

# Calculs hydrogéologiques relatifs aux fouilles

A. DASSARGUES

*Laboratoires de Géologie de l'Ingénieur, d'Hydrogéologie,  
et de Prospection Géophysique (L.G.I.H.), Université de Liège  
Bat. B19, 4000 LIEGE, BELGIQUE*

*Hydrogeologie, Afd Historische Geologie, Dpt Geografie-Geologie  
Redingenstraat 16, K. U. Leuven, LEUVEN, BELGIE*

**Résumé** Le calcul des débits à pomper afin d'assécher les fouilles n'est pas toujours aisé. Les solutions analytiques donnent habituellement des approximations et des ordres de grandeur dont la qualité des résultats peut dépendre très fort de degré de complexité de la situation et de l'hétérogénéité des terrains géologiques rencontrés. Par contre, les calculs réalisés en utilisant des logiciels basés sur les méthodes numériques des éléments finis, des différences finies et des éléments frontières, sont actuellement beaucoup plus rapides et précis, tout en permettant une grande flexibilité pour prendre en compte des géométries complexes et l'hétérogénéité du sous-sol. Néanmoins, il ne faut pas perdre de vue que bien souvent ces calculs sont très sensibles à quelques paramètres ainsi qu'au choix des conditions aux frontières. Par conséquent, des analyses de sensibilité des résultats par rapport à l'un ou l'autre des paramètres importants, ainsi que par rapport aux conditions aux frontières, sont parfois très utiles afin de dégager une réponse quantitative fiable à la question posée.

**Abstract** Calculation of the de-watering pumping rates in the trenches needed for Civil Engineering Works is not so easy. Analytical solutions provide usually approximations and order of magnitude but the accuracy of the results will depend strongly on the degree of complexity of the real situation and on the actual heterogeneity of the geological layers. On the other hand, computations using codes based on numerical techniques as Finite Element, Finite Difference or Boundary Element methods allow now to reach more rapidly a better degree of accuracy. However these simulations are not so simple, the results are very sensitive to the chosen parameters and boundary conditions. Consequently, sensitivity analysis of the results to the main parameters and to different types of boundary conditions are often very useful to allow a quantitative answer to the question.

## 1. Introduction

Lorsque des fouilles sont réalisées et asséchées pour la réalisation de travaux provisoires ou définitifs, un des problèmes majeurs consiste à l'estimation des débits à pomper, ainsi que le calcul de l'influence de ces pompages sur l'allure de la surface piézométrique de la nappe aquifère. Certaines méthodes analytiques permettent des calculs relativement simples, mais sont néanmoins très limitées dans la pratique par les différentes hypothèses qu'elles demandent. Parmi ces dernières, on peut citer notamment :

- des couches géologiques supposées homogènes et isotropes;
- des conditions aux frontières latérales reportées à l'infini;
- des problèmes le plus souvent ramenés à une coupe 2D verticale;
- l'imperméabilité totale des parois du batardeau;
- des niveaux de la nappe aquifère peu ou pas affectés par les pompages réalisés;
- un régime permanent d'écoulement.

Les méthodes numériques par éléments finis, différences finies et éléments frontières qui permettent de résoudre l'équation d'écoulement en milieux poreux en régime transitoire sont les outils utilisés actuellement pour pouvoir simuler de façon plus réaliste les situations réelles pour lesquelles une réponse quantitative doit être trouvée.

## 2. Ecoulement en milieu poreux

### a. Equation en 3D

Dans la plupart des cas pratiques, on peut considérer le milieu comme poreux et continu et utiliser le concept d'Elément de Volume Représentatif (EVR) pour traduire l'hétérogénéité du sous-sol en valeurs différentes des paramètres dans chaque EVR considéré. L'écoulement de l'eau dans les terrains perméables suit la loi de Darcy. Cette loi indique que les pertes de charge de l'écoulement sont proportionnelle aux flux spécifiques de filtration. Elle se traduit par :

$$\underline{q} = -\underline{K} \cdot \underline{\text{grad}} h \quad (1)$$

avec  $\underline{q}$  : vecteur flux spécifique (m/s),  $\underline{K}$  : tenseur des perméabilités à l'eau du milieu (m/s),  
 $h = z + p/(\rho \cdot g)$  : hauteur piézométrique ou charge hydraulique (m).

Si l'eau est considérée comme incompressible, l'équation de conservation en régime permanent s'écrit :

$$- \text{div} \underline{q} = 0 \quad (2)$$

donc :

$$\text{div}(\underline{K} \cdot \underline{\text{grad}} h) = 0 \quad (3)$$

En régime transitoire, l'équation 3D de l'écoulement en milieu poreux saturé s'écrit habituellement :

$$\text{div}(\underline{K} \cdot \underline{\text{grad}} h) + q' = S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4)$$

avec  $q'$  : débit entrant ou sortant par m<sup>3</sup> d'aquifère (s<sup>-1</sup>)

$S_s$  : coefficient d'emmagasinement spécifique du milieu poreux ( $m^{-1}$ )

Ecrite sous cette forme, cette dernière équation demande cependant que soient acceptées les hypothèses suivantes :

- conditions isothermes ;
- composition chimique homogène ;
- contrainte totale constante ;
- compressibilité de l'eau et des grains solides négligées ;
- la compressibilité volumétrique du milieu poreux, par diminution de porosité peut être représentée par un coefficient  $\alpha$  :

#### b. Equation en 2D

Dans le cas d'une nappe libre, en régime transitoire, l'utilisation de l'équation demanderait de tenir compte de façon explicite de l'écoulement en zone non saturée et donc d'introduire des non linéarités importantes de  $K$  et  $S_s$ . En effet, des lois de variations de la perméabilité et de l'emmagasinement (au sens généralisé) en fonction de la pression d'eau (positive en zone saturée et négative en zone partiellement saturée) sont à intégrer et à introduire dans les lois constitutives du modèle (Brouyère & Dassargues, 1997). Les données mesurées étant rarement disponibles pour paramétrer ces dernières, on simplifie souvent le problème de l'écoulement en nappe libre en le ramenant à un problème à deux dimensions dans le plan horizontal. L'équation s'écrit alors :

$$\text{div}(\underline{T} \cdot \underline{\text{grad}} h) + q'' = S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5)$$

avec  $\underline{T}$  : tenseur 2 x 2 des transmissivités ( $m^2/s$ )  
 $q''$  : débit entrant ou sortant par  $m^2$  d'aquifère ( $m/s$ )  
 $S_s$  : coefficient d'emmagasinement du milieu poreux (-) souvent approximé par la porosité efficace ( $n_e$ ).

Dans le plan horizontal 2Ds, l'équation (5) peut également s'écrire :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_y \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right) + q'' = n_e \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (6)$$

Ecrite sous cette forme, cette dernière équation suppose que l'anisotropie éventuelle du milieu peut être ramenée à 2 directions principales.

Si on veut écrire l'équation 2D de l'écoulement dans le plan vertical, il nous faut disposer de lois de variations de  $K$  et  $S_s$  en fonction du degré de saturation dans la zone non saturée pour envisager le problème en régime transitoire. Dans le cas contraire, il faudra utiliser des lois de variations empiriques n'ayant pas toujours un sens physique. C'est la raison pour laquelle bien souvent on s'arrête à une analyse en régime permanent. L'équation 2D dans le plan vertical de l'écoulement permanent en milieu poreux saturé s'écrit :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \right) + q''' = 0 \quad (7)$$

avec  $K_1, K_2$  : composantes principales de la perméabilité dans le plan vertical  
 $q'''$  : débit entrant ou sortant par  $m^2$  d'aquifère et par mètre courant ( $s^{-1}$ ).

### 3. Solutions analytiques

A partir des équations de l'écoulement écrits dans le plan horizontal et dans le plan vertical, des solutions analytiques sont proposées pour résoudre en régime permanent des problèmes aux géométries relativement simples (Schneebeili, 1966).

#### A. Tranchée drainante

Un exemple classique est celui de la tranchée drainante de longueur  $2c$  traversant entièrement une nappe et la drainant (figure 1). Le problème est ramené à un écoulement horizontal avec une hauteur piézométrique imposée à la tranchée et des limites latérales reportées à l'infini. Schneebeili (1966) a démontré qu'en milieu poreux homogène les courbes équipotentielles (isopièzes) sont des ellipses homofocales de foyers  $x = \pm c, y = 0$ , et les lignes de courant des hyperboles de foyers  $x = \pm c, y = 0$  (figure 1). Il en tire une expression du débit total drainé par la tranchée et une expression du débit local fonction de la coordonnée  $x$ .

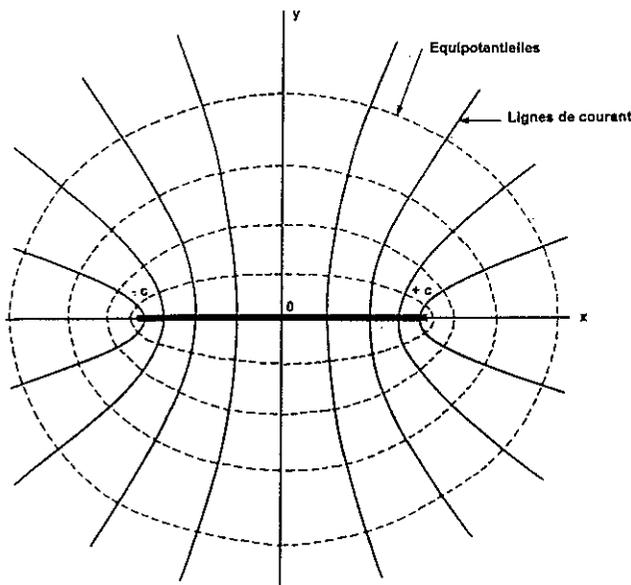


Figure 1 : Lignes équipotentielles et lignes de courant autour d'une tranchée drainante (adapté d'après Schneebeili).

#### B. Ecoulement sous un barrage

Un autre cas très souvent évoqué traite des écoulements sous un barrage supposé parfaitement imperméable. Le problème est ramené au calcul de l'écoulement dans un plan vertical et le débit calculé sera relatif à une tranche unitaire d'épaisseur du barrage (par mètre courant). Une solution analytique approchée du problème consiste à considérer que, pour le problème illustré à la figure 2, les équipotentielles peuvent être approximées par des hyperboles de foyers  $x = \pm a/2$  et les lignes de courant par les ellipses de même foyer (figure 2).

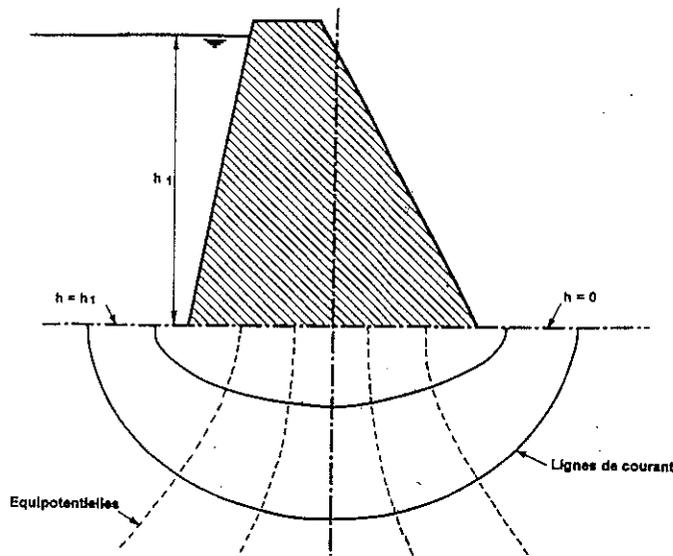


Figure 2 : Lignes équipotentielle et lignes de courant décrivant les écoulements sous un barrage (adapté d'après Schneebeli).

### C. Fouilles limitées par des écrans verticaux

Pour une fouille excavée entre deux écrans verticaux supposés imperméables, des solutions analytiques approchées peuvent également être trouvées (Schneebeli, 1966) en supposant que les équipotentielles sont les hyperboles de foyers  $y = \pm c$ , et les lignes de courant les ellipses de mêmes foyers (figure 3). Bien sûr, le milieu poreux est supposé homogène, les frontières latérales reportées à l'infini, et le niveau de la nappe est supposé constant et non affecté par la présence de la fouille et le pompage. Deux situations sont distinguées : (1) soit l'écoulement est limité par la largeur du batardeau (figure 4), (2) soit l'écoulement est limité par l'épaisseur de terrain perméable entre le bas de l'écran imperméable et le toit d'une couche peu perméable (figure 5). Pour l'un et l'autre cas, Schneebeli (1966) fournit des solutions approchées fournissant le débit relatif à une tranche unitaire d'épaisseur de la fouille (par mètre courant).

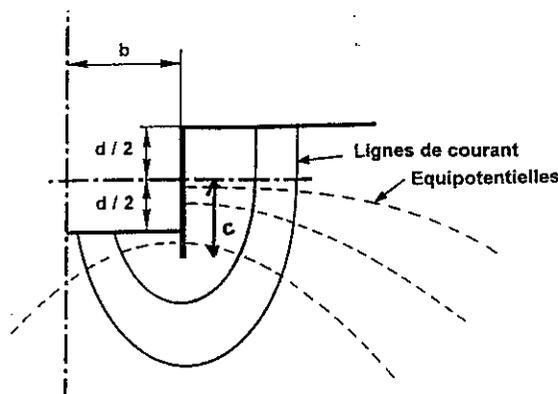


Figure 3 : Lignes équipotentielle et lignes de courant décrivant l'écoulement sous des écrans verticaux (adapté d'après Schneebeli).

1) Ecoulement limité par la largeur de la fouille (figure 4)

Le débit par mètre courant ( $m^2/s$ ), venant des deux côtés de la fouille est dans ce cas approximé par :

$$q = 2.K.H.\alpha \tag{8}$$

$\alpha$  étant tiré de l'abaque de la figure 6

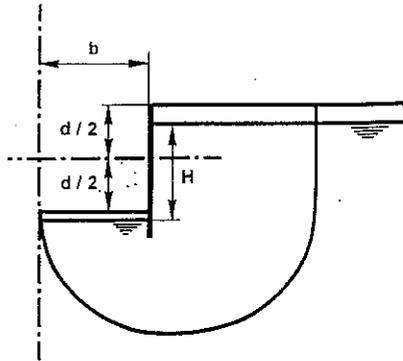


Figure 4 : Ecoulement limité par la largeur de la fouille (adapté d'après Schneebeli).

2) Ecoulement limité en profondeur (figure 5)

Le débit par mètre courant ( $m^2/s$ ), venant des deux côtés de la fouille est approximé par ( $c/d$  et  $a/d \geq 1$ ) :

$$q = \frac{2.K.H}{\pi} \cdot \ln \left[ \frac{a}{c} + \sqrt{\left(\frac{a}{c}\right)^2 - 1} \right] \tag{9}$$

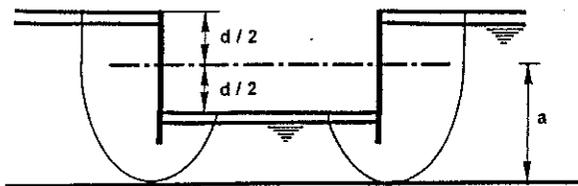


Figure 5 : Ecoulement limité en profondeur (adapté d'après Schneebeli).

D. Anisotropie

Il a été prouvé analytiquement par de nombreux auteurs (de Marsily, 1986, Schneebeli, 1966, ...) que, pour le calcul de débits, l'anisotropie des terrains pouvait être prise en compte en utilisant une perméabilité isotrope fictive équivalente qui est égale à la moyenne géométrique des composantes principales de la perméabilité réelle :

$$K_{eq} = K_{geom} = \sqrt{K_x \cdot K_z} \quad (10)$$

Il est clair néanmoins que, lorsque le débit sous les écrans verticaux tend à être limité par la largeur de la fouille, le débit réel sera d'autant plus inférieur au débit calculé que l'anisotropie ( $K_x > K_z$ ) est accentuée.

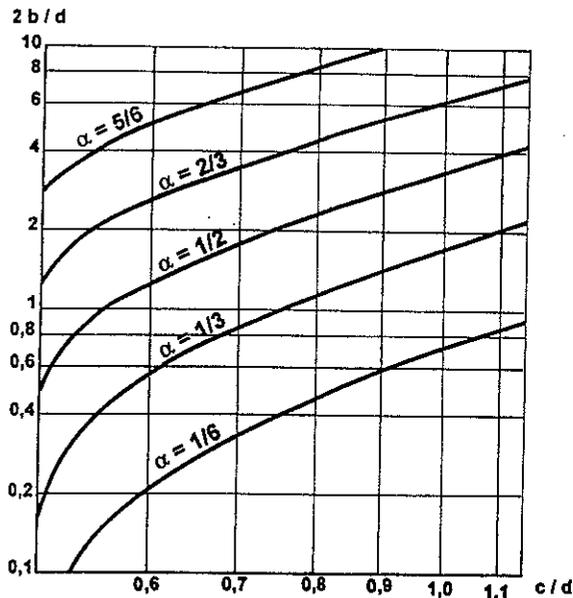


Figure 6 : Abaque fournissant la valeur de  $\alpha$  dans le cas où l'écoulement est limité par la largeur de la fouille (adapté d'après Schneebeli).

#### 4. Limitations des solutions analytiques

Les principales difficultés qui apparaissent pour l'utilisation pratique des solutions analytiques exactes ou approchées décrites ci-dessus, viennent des faits suivants :

- le sous-sol peut rarement être considéré comme un ensemble homogène du point de vue de la perméabilité aussi bien que pour l'emmagasinement;
- les écrans verticaux (palplanches, rideaux d'injection,...) peuvent rarement être considérés comme parfaitement imperméables. Le plus souvent, il est plus réaliste de pouvoir affecter une valeur de perméabilité (même relativement faible) à une épaisseur réduite du terrain;
- les fouilles n'ont pas toujours une géométrie et une disposition permettant de ramener le problème de l'écoulement à une tranche verticale d'épaisseur unitaire. Même pour une fouille circulaire, on a dans la pratique :

$$Q_{total} < q \cdot 2\pi \cdot r \quad (11)$$

avec  $Q_{total}$  = débit total  
 $q$  = débit calculé par mètre de fouille  
 $r$  = rayon de la fouille

- Les conditions aux frontières latérales (problème 2D vertical) ne peuvent pas toujours être considérées comme repoussées à l'infini et, d'autre part, au voisinage de la fouille, il est souvent illusoire de considérer que le niveau de la nappe n'est pas affecté par le rabattement dans la fouille. Il est d'ailleurs primordial de pouvoir obtenir une bonne approximation de ces baisses de hauteurs piézométriques, car elles conditionneront les éventuels tassements (Dassargues & Schroeder, 1997);

- des calculs en régime transitoire doivent parfois être effectués pour obtenir une prévision des débits d'exhaure en fonction du temps et avec des conditions et/ou des sollicitations appliquées à la nappe qui sont également variables dans le temps.

## 5. Modèles numériques

En raison de ces différents facteurs limitant l'application des méthodes analytiques, les modèles numériques 2D et 3D utilisant les méthodes des différences finies et des éléments finis sont utilisés actuellement de manière routinière par les professionnels concernés par ce genre de calculs. Il faut néanmoins rester prudent dans la manière de "conceptualiser" le problème pour pouvoir le simuler en utilisant un de ces logiciels. Le choix du modèle conceptuel qui consiste à simplifier la réalité en acceptant différentes hypothèses régissant notamment la dimensionalité du problème et les conditions aux frontières, ne devrait, en principe, jamais être influencé par des considérations de disponibilité de logiciel.

Les exemples ci-dessous permettront d'illustrer la difficulté qui peut apparaître concernant le choix du modèle conceptuel adéquat permettant de résoudre le problème spécifique posé.

### A. Cas 1

Dans le cas repris à la figure 7, on peut considérer, par exemple, qu'une nappe cylindrique s'écoule vers une frontière latérale du domaine à hauteur piézométrique imposée (par le niveau d'eau dans la rivière). La fouille ayant une dimension longitudinale importante et parallèle à cette frontière, ainsi qu'aux isopièzes de la nappe, on peut ramener le problème à l'étude des écoulements dans une tranche verticale d'épaisseur unitaire et multiplier ensuite les débits obtenus par la longueur de l'ouvrage. On néglige de la sorte les flux entrant dans la fouille latéralement (petits côtés de la fouille). L'hétérogénéité verticale des terrains pourra être prise en compte dans la tranche considérée, mais on prend l'hypothèse que cette hétérogénéité est partout identique suivant la dimension longitudinale de l'ouvrage !

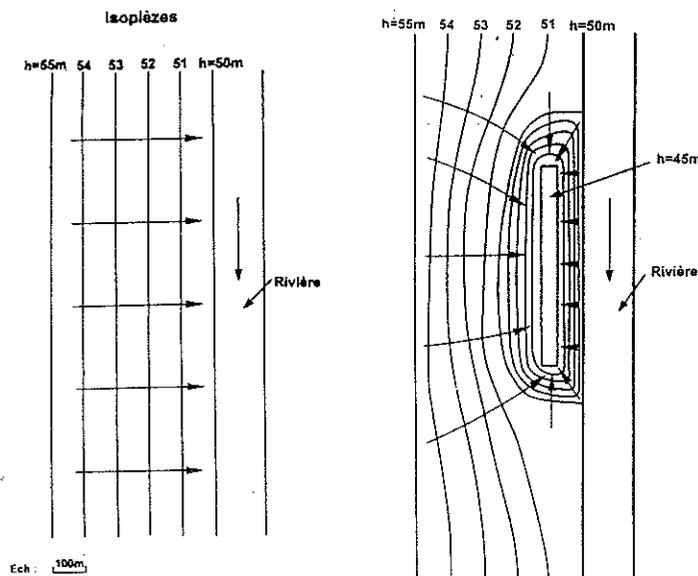


Figure 7 : Cas d'une fouille disposée transversalement par rapport à la direction des écoulements.

Si la nappe est libre et qu'une simulation en régime transitoire est nécessaire, à moins de disposer d'un logiciel permettant d'introduire les variations des paramètres d'écoulement en fonction du degré de saturation de la zone partiellement saturée, un modèle 3D quasi-3D (empilement de couches 2D) ou 2D plan sera utilisé. Ce dernier ne sera utilisé que si l'hétérogénéité verticale peut être négligée.

### B. Cas 2

Pour la même situation hydrogéologique qu'au cas 1, mais avec une fouille dont la dimension longitudinale est plutôt parallèle aux lignes de courant de l'aquifère (figure 8), un modèle 2D plan, quasi-3D ou 3D devra être envisagé. Aucune conceptualisation ramenant le problème à une tranche verticale d'épaisseur unitaire ne peut être acceptée.

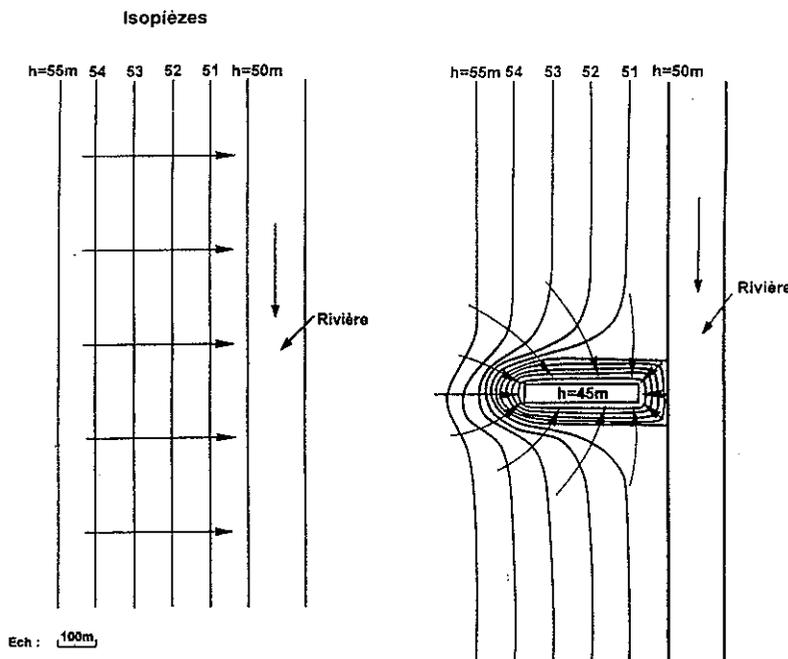


Figure 8 : Cas d'une fouille dont la dimension longitudinale est plutôt parallèle aux lignes de courant de l'aquifère

### C. Cas 3

De même pour l'exemple repris à la figure 9, un modèle 2D plan, quasi-3D ou 3D sera utilisé selon la simplification qui peut être acceptée au niveau de l'hétérogénéité sur la verticale.

Outre le choix de la dimensionalité du problème, les conditions aux frontières doivent être discutées avec à propos dans chaque cas en fonction des circonstances et du rayon d'influence des nouvelles sollicitations provoquées. Des exemples pratiques de ces choix sont décrits ci-dessous pour le cas 1.

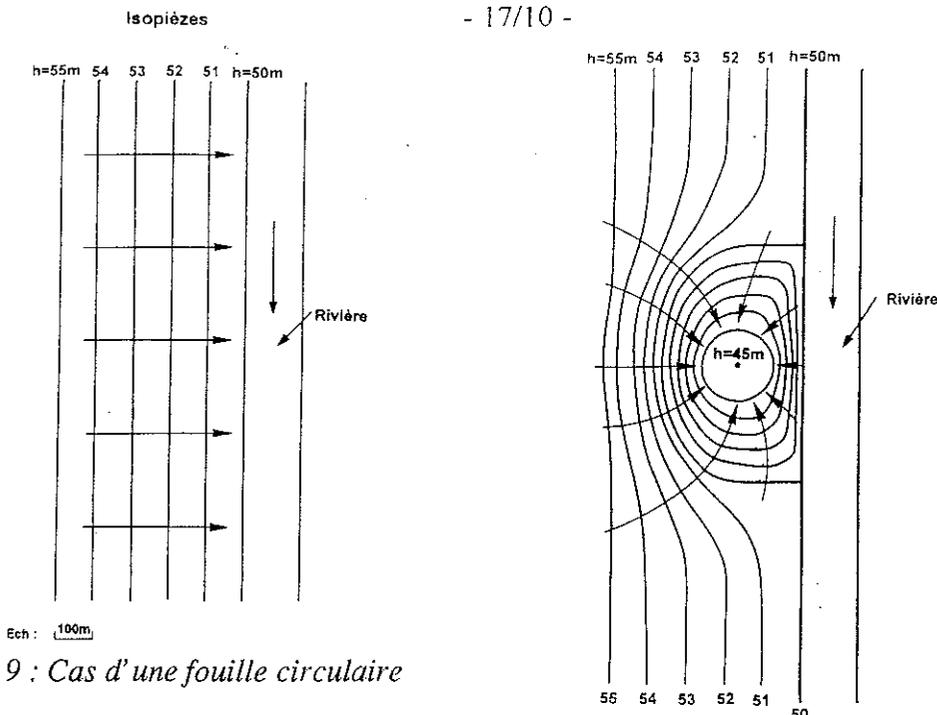


Figure 9 : Cas d'une fouille circulaire

### 6. Comparaisons de résultats

Selon les méthodes de calculs utilisées (modèles numériques ou solutions analytiques) et surtout le modèle conceptuel admis, des résultats parfois très différents peuvent être obtenus. Reprenant l'exemple du cas 1 décrit dans ses grandes lignes à la figure 7, différents résultats de calculs analytiques et de simulations numériques seront exposés. La schématisation en coupe verticale est reprise avec détails à la figure 10.

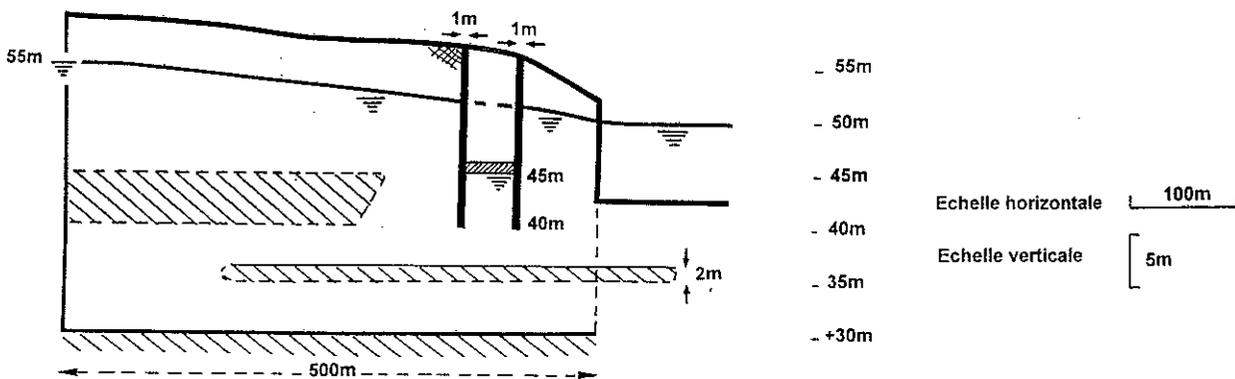


Figure 10 : Coupe verticale montrant la géométrie du cas 1.

Les paramètres utilisés pour le cas 1 'Référence' sont les suivants :  $K_h = K_v = 1.10^{-4}$  m/s,  $K_{écran} = 1.10^{-6}$  m/s, homogénéité et isotropie. Ensuite les hétérogénéités reprises à la figure 10 seront prises en compte : 'Hétérogène'. Les principaux résultats des calculs utilisant les solutions analytiques approchées et différents modèles numériques sont repris au tableau 1.

En premier lieu, les calculs sont réalisés en utilisant les solutions analytiques telles que déduites des travaux de Schneebeli (1966). Pour ces calculs, les hauteurs piézométriques en amont et en aval de la fouille doivent être connues. Si on considère une nappe limitée en amont par  $h = 55$  m et en aval par  $h = 50$  m, on trouve en écoulement naturel (sans la fouille) une

hauteur piézométrique de 51.3 m en amont et 51.0 m en aval, car la recharge par infiltration ayant été supposée nulle, une variation linéaire de la hauteur piézométrique est trouvée. Ce calcul (1) est peu réaliste car la nappe est sûrement rabattue par les pompages dans la fouille. Un calcul en conditions anisotropes  $K_h/K_v = 10$  est également réalisé (2). La simulation effectuée avec un modèle 2D vertical, en utilisant la méthode des éléments finis, fournit vraisemblablement des résultats beaucoup plus plausibles (3). On remarque le rabattement de la nappe provoqué par le pompage dans la fouille. Pour comparaison, les débits ont été calculés avec la solution analytique approchée en imposant les niveaux de la nappe tels que calculés par le modèle numérique (4). Il est fait de même en conditions anisotropes (5) et (6).

Si une condition d'imperméabilité est choisie à la frontière amont du modèle 2D, les écoulements sont grandement affectés et plus aucun débit en provenance de l'amont ne rentre dans la fouille (7).

La perméabilité de l'écran (rideau de palplanche, rideau d'injection, ...) joue peut-être un rôle. Des simulations avec  $K_{\text{écran}} = 1.10^{-7}$  m/s (8) et  $K_{\text{écran}} = 1.10^{-5}$  m/s (9) montrent qu'à partir de  $K_{\text{écran}} = 1.10^{-6}$  m/s les flux traversant l'écran sont fort négligeables.

Si on introduit les hétérogénéités dans les couches géologiques, comme représentées à la figure 10, on peut distinguer plusieurs cas :

(10) 'Hétérogène' avec  $K = 1.10^{-5}$  m/s dans les couches considérées

(11) 'Hétérogène' avec  $K = 1.10^{-6}$  m/s dans les couches considérées

(12) 'Hétérogène' avec  $K = 1.10^{-5}$  m/s dans les couches considérées et avec anisotropie  $K_h/K_v = 10$

Les résultats de ces simulations sont également repris au tableau 1.

Pour comparaison, un modèle 3D utilisant la méthode des différences finies a été utilisé également pour simuler les cas :

(13) 'Hétérogène' avec  $K = 1.10^{-6}$  m/s dans les couches considérées

(14) 'Hétérogène' avec  $K = 1.10^{-6}$  m/s dans les couches considérées et avec anisotropie  $K_h/K_v = 10$

De telles simulations et comparaisons peuvent être poursuivies indéfiniment. Néanmoins, elles présentent l'avantage de permettre de cadrer relativement bien les valeurs de pompages auxquelles on peut s'attendre et de prévoir les rabattements induits.

## 7. Conclusion

Actuellement, les modèles numériques présentent la plus grande souplesse nécessaire pour le calcul des débits d'exhaure dans les fouilles. Néanmoins, le modèle conceptuel choisi peut avoir une importance très grande sur les résultats trouvés. D'autre part, il est parfois précieux de pouvoir effectuer un calcul analytique permettant de 'cadrer' l'ordre de grandeur des débits à attendre. Bien souvent l'utilisation des solutions analytiques mène à une surestimation des débits à pomper.

## Bibliographie

- Brouyère S. et Dassargues A., 1997, Modélisation mathématique des écoulements en milieu non saturé par la méthode des éléments finis, dans ce volume.
- Dassargues A. et Schroeder Ch., 1997, Calcul non linéaire des tassements induits par pompage dans des formations sédimentaires meubles, dans ce volume.
- De Marsily G., 1986, Quantitative Hydrogeology, Academic Press, 440 p.
- Schneebehl G., 1966, Hydraulique Souterraine, Eyrolles, 362 p.

Tableau 1 : Principaux résultats des calculs effectués pour le cas 1 présenté aux figures 7 et 10.

	Cond. Naturelles CBTEST0	Débit total (m <sup>3</sup> /j/mcrt)	Débit amont (m <sup>3</sup> /j/mcrt)	Débit aval (m <sup>3</sup> /j/mcrt)	h amont (m)	h aval (m)
1	Cas 'Référence' Solution analytique	44.2	22.7	21.5	51.3	51.0
2	Cas 'Référence' Solution analytique + Anisotropie $K_h/K_v = 10$	14.0	7.2	6.8	51.3	51.0
3	Cas 'Référence' Modèle 2D vertical (FEM)	13.0	4.4	8.6	45.8	46.6
4	Cas 'Référence' Solution analytique + rabattement de la nappe	17.4	5.8	11.6	45.8	46.6
5	Cas 'Référence' Modèle 2D vertical + Anisotropie $K_h/K_v = 10$	10.4	4.1	6.3	47	48
6	Cas 'Référence' Solution analytique + Anisotropie $K_h/K_v = 10$ + rabattement de la nappe	5.7	2.3	3.4	47	48
7	Cas 'Référence' Modèle 2D vertical Frontière amont imperméable	8.7	-	8.7	45	46.1
8	Cas 'Référence' Modèle 2D vertical $K_{écran} = 1.10^{-7}$ m/s	12.9	4.5	8.4	45.8	46.6
9	Cas 'Référence' Modèle 2D vertical $K_{écran} = 1.10^{-5}$ m/s	13.9	4.6	9.3	45.1	45.4
10	Cas 'Hétérogène' Modèle 2D vertical avec $K = 1.10^{-5}$ m/s	11.2	3.6	7.7	45.6	46.1
11	Cas 'Hétérogène' Modèle 2D vertical avec $K = 1.10^{-6}$ m/s	10.5	3.4	7.1	45.8	46.4
12	Cas 'Hétérogène' Modèle 2D vertical avec $K = 1.10^{-5}$ m/s + Anisotropie $K_h/K_v = 10$	8.9	3.2	5.7	46.6	47.5
13	Cas 'Hétérogène' Modèle 3D avec $K = 1.10^{-6}$ m/s	9.34				
14	Cas 'Hétérogène' Modèle 3D avec $K = 1.10^{-6}$ m/s + Anisotropie $K_h/K_v = 10$	7.87				