

ANALYSE DE REGIME HYDRIQUE AUTOUR DES TUNNELS EN RÉGIME TRANSITOIRE

NON STEADY FLOW ANALYSIS SYSTEM WATER AROUND TUNNEL

Abdeldjalil ZADJAOUI¹,

¹ Département de génie civil. Université de Tlemcen. Laboratoire RisAM. Algérie.
a.zadjaoui@gmail.com

RÉSUMÉ – Le présent article traite les écoulements hydrauliques autour des tunnels creusés en terrains aquifères. Nous présentons d'abord un résumé des travaux antérieurs relatifs à ce sujet et les solutions pour estimer la réponse hydraulique du massif encaissant au creusement de l'ouvrage. La méthode des éléments finis a été utilisée pour analyser les écoulements autour de tunnels en conditions bidimensionnelles et en régime transitoire. Les résultats ainsi obtenus dans le cas d'un tunnel perméable, sont comparés à ceux donnés par les méthodes approchées.

ABSTRACT – This article study the hydraulic flows around the tunnels excavate into aquifers. We first present a summary of previous work on this subject and the solutions to estimate the hydraulic response of the banking environment of the excavation work. The finite element method was used to analyze the flow around tunnel two-dimensional conditions and transient. The results thus obtained in the case of a permeable tunnel, are compared with those given by the approximate methods.

1. Introduction

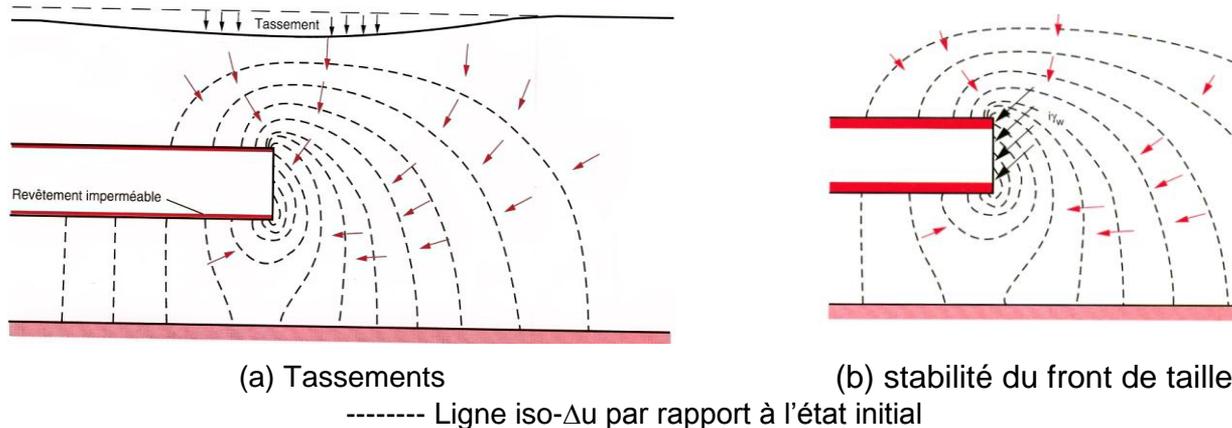
Le creusement d'une galerie en terrain aquifère affecte l'équilibre hydraulique initial. Les écoulements qui en résultent peuvent provoquer des problèmes de stabilité générale et des tassements et modifier ainsi le niveau de la nappe phréatique. L'ingénieur doit être en mesure d'estimer les conséquences de ces écoulements, tant en cours de construction qu'en conditions de service. A moyen terme les écoulements sont caractérisés principalement par leur évolution transitoire. Les observations de chantiers présentées par Atwa et al., 2000 et Zadjouï, 2000 ont montré que l'écoulement autour d'un tunnel est en général caractérisé par une évolution du régime hydraulique dans le temps. A court et moyen terme, l'écoulement autour de l'ouvrage doit être analysé en régime transitoire. Les développements récents réalisés dans le domaine de la modélisation numérique permettent d'étudier ce phénomène. Le présent travail analyse, à l'aide de programme de calcul TFAP (Transient Flow Analysis Program), l'écoulement autour les tunnels en section transversale (cas bidimensionnel). Une étude de l'influence de la profondeur du tunnel par rapport au terrain naturel a été effectuée à la fin de cette contribution.

2. Conséquences des écoulements hydrauliques vers un tunnel

Sur le plan hydraulique, de faibles venues d'eau peuvent suffire à perturber les différentes étapes de réalisation de l'ouvrage. Pour des fortes venues d'eau, il peut y avoir inondation du site, ce qui constitue un danger pour le matériel de construction et la sécurité du personnel. Par conséquent une estimation fiable de ce débit est nécessaire au bon

déroulement des travaux. Cependant le creusement du tunnel provoque une redistribution de la charge hydraulique sur la paroi excavée entraînant ainsi un écoulement des eaux souterraines vers l'ouvrage.

Par ailleurs, sur le plan mécanique, la diminution de la pression interstitielle entraîne une modification des contraintes effectives dans le massif encaissant. Par conséquent, les tassements de consolidation engendrés dans la zone d'influence du tunnel peuvent menacer la sécurité des ouvrages avoisinant (Figure 1.a), (Atwa et al., 1994 ; Leca et al., 1997 ; Atwa et al., 2000). D'autre part, l'apparition de gradients hydrauliques au voisinage du tunnel et derrière le front de taille s'avère être la cause principale des risques d'instabilités dus aux forces hydrauliques qui en résultent ($i \cdot \gamma_w$), (Figure 1.b).



i : gradient hydraulique ; γ_w : poids volumique de l'eau ; $i \gamma_w$: force hydrodynamique par unité de volume

Figure 1. Conséquences mécaniques des écoulements vers un tunnel à revêtement imperméable (Atwa et al., 2000).

3. Aperçu sur les méthodes de calcul des écoulements autour des tunnels

Différentes approches sont utilisées pour proposer des méthodes de calcul pour l'estimation des conséquences des écoulements à travers une galerie souterraine. La plupart de ces méthodes sont basées sur des travaux analytiques, expérimentaux et numériques. Ces méthodes sont surtout destinées à estimer les caractéristiques hydrauliques en régime permanent. Pour caractériser l'évolution des écoulements dans le temps, quelques travaux ont également été consacrés à l'étude des phénomènes transitoires.

Compte tenu des similitudes entre ce problème et celui de l'écoulement vers un drain horizontal, il est intéressant de signaler les travaux de Polubarinova-Kochina, 1962, consacré à l'écoulement vers des drains est basé sur la méthode des transformations conformes. Cette méthode a conduit à une estimation de l'évolution dans le temps du débit recueilli dans le cas d'une nappe à surface libre.

En s'appuyant sur une analyse de l'équilibre hydraulique du massif encaissant, Sato, 1983 a proposé l'expression suivante du débit $Q(t)$ recueilli par unité de longueur de tunnel :

$$Q(t) = Q_0 \left(1 - \frac{f}{Q_0} t \right) \quad (1)$$

Où : Q_0 = représente le débit initial dans la galerie (en l'absence d'infiltration) ; f = le taux d'infiltration en surface.

Cette expression correspond au cas d'une nappe à surface libre mais tient compte d'un éventuel taux de réalimentation en surface. Des essais, basés sur le principe de l'analogie visqueuse, sur modèles réduits de Hele-Shaw (Sato et Lizawa, 1983) conduisent à des résultats cohérents avec la fonction exponentielle décroissante donnée par l'analyse d'équilibre hydraulique.

La forme exponentielle décroissante de l'évolution dans le temps du débit vers le tunnel est confirmée par les travaux numériques de Chishaki et al., 1978. L'expression obtenue pour le débit $Q(t)$ traversant la galerie à l'instant t peut se mettre sous la forme :

$$Q(t) = Q_0 e^{-at} + Q_p \quad (2)$$

Dans cette expression : Q_0 = représente le débit initial ; Q_p = le débit d'équilibre et a = un paramètre homogène à l'inverse d'une longueur.

La figure 2 présente un abaque donnant les évolutions dans le temps du débit et du rabattement de la nappe pour un tunnel semi-circulaire de 10 m de diamètre, en fonction de la hauteur initiale de la nappe et du rayon d'action du tunnel.

Goodman et al., 1967 se sont intéressés à l'influence de la vitesse de progression d'un tunnel dans une zone perméable sur les débits recueillis dans la galerie. La figure 3 permet de mettre en évidence l'influence de la vitesse d'avancement du tunnel sur l'évolution des débits.

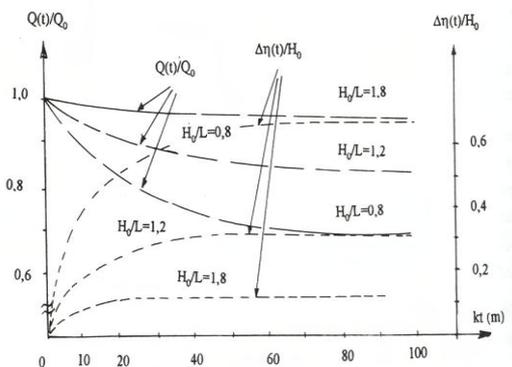


Figure 2. Méthode de Chishaki et al. (1978)

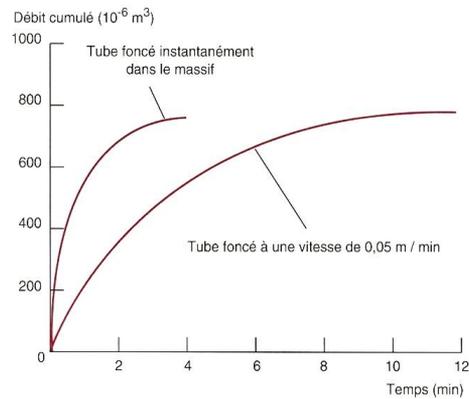


Figure 3. Influence de la vitesse d'avancement du tunnel sur les débits. Goodman et al. (1967)

4. Commentaires et discussions

Pour évaluer l'ampleur des écoulements hydrauliques vers les tunnels, l'ingénieur dispose d'un certain nombre de méthodes qui peuvent être directement mises en œuvre. Ces méthodes présentent toutefois des limites soit dans la profession d'ingénierie soit dans l'interprétation des cas pathologiques et des observations en place. De plus, elles sont basées sur différentes approches analytiques expérimentales et numériques qui sont limitées par leurs hypothèses de bases et par le degré de représentativité que présente le modèle.

D'un autre côté, ces méthodes ne considèrent pas l'écoulement qui se produit au dessus du niveau piézométrique. Elles ne donnent pas d'indications sur la distribution des pressions interstitielles autour de l'ouvrage ni sur l'ampleur des gradients à la sortie. L'application de la méthode des éléments finis permet une étude ou représentation plus fine du problème.

5. Caractère évolutif du régime hydraulique autour d'un tunnel

5.1. Temps de stabilisation

Dans le cas d'une nappe au repos, Rat, 1969 a proposé la formule suivante qui permet d'estimer le temps de stabilisation t_p dans laquelle le rayon du tunnel n'affecte pas le temps nécessaire à la stabilisation de régime hydraulique.

$$t_p = \frac{2H_0}{k} (b_s + n) \quad (3)$$

Tel que : H_0 : charge hydraulique initiale du terrain ; k : = perméabilité du terrain ; b_w : compressibilité de l'eau ; b_s : compressibilité de squelette solide et n : porosité.

Pour un tunnel sous marin le temps d'équilibre est de l'ordre de quelques heures et peut être considéré comme nul, dans la mesure où les conditions aux limites ne changent pas.

Par contre, pour une nappe à surface libre, vu son évolution dans le temps, le temps de stabilisation est beaucoup plus long (il tend vers l'infini théoriquement). Chishaki et al., 1978 ont pu définir un facteur temps approximatif ($k.t_{90}$), qui correspond à 90% du taux de diminution du débit.

5.2. Paramètres caractéristiques des écoulements d'eau vers les tunnels

En analysant les phénomènes d'écoulements vers les tunnels à un instant donné t , on constate qu'ils dépendent principalement des paramètres suivant :

- ❖ La perméabilité du terrain ainsi que son emmagasinement;
- ❖ La charge hydraulique initiale du terrain ;
- ❖ La profondeur du substratum imperméable ;
- ❖ Le taux de réalimentation de l'aquifère ;
- ❖ L'anisotropie de perméabilité de terrain ;
- ❖ La stratification du milieu ;
- ❖ Le diamètre du tunnel ou sa dimension verticale ;
- ❖ La présence ou non du revêtement ;
- ❖ La distance des sources de réalimentation latérale.

6. Calcul des écoulements au moyen du programme TFAP

TFAP est un programme de calcul par éléments finis. Il traite notamment des problèmes d'écoulement en milieu poreux (Zadjaoui, 2000). Le programme permet de modéliser les écoulements dans les milieux poreux indéformables saturés et non saturés, en régime permanent ou transitoire. La description théorique des écoulements en milieux poreux repose sur l'équation de la conservation de la masse des fluides et sur la loi de Darcy généralisée pour les sols non saturés (Richards, 1931 ; Childs et Collis-George, 1950). Le programme est fondé sur une description monophasique de l'écoulement dans un milieu non saturé conduisant ainsi à l'équation générale de Richards:

$$t_p = \frac{2H_0}{k} (b_s + n) \quad (4)$$

Avec : u_w : pression interstitielle ; H : charge hydraulique ; Q : débit volumique éventuel ;
 k_{sat} : tenseur de perméabilité à la saturation ; $\theta(u_w)$: teneur en eau volumique ;
 $k_r(u_w)$: perméabilité relative.

La variation de la perméabilité relative et la capacité capillaire en fonction de la pression interstitielle, elle même fonction de la charge hydraulique est introduite dans le programme en utilisant le modèle semi-empirique de Gardner, 1958 :

$$k_x(u_w) = \frac{A}{A + |u_w|^B} \text{ et } \theta(u_w) = \frac{C}{C + |u_w|^D} \quad (3)$$

Où A, B, C, D = sont des paramètres qui dépendent de type de sol.

Le programme TFAP a été utilisé pour analyser les caractéristiques des écoulements hydrauliques vers un tunnel. Le tunnel considéré à 5 m de diamètre est creusé à 10 m de profondeur (figure 4), dans un terrain de perméabilité isotrope. Le toit de la nappe se situe au niveau de la surface de sol et le substratum, supposé imperméable et horizontal, est situé à 20 m de profondeur. Une charge hydraulique constante a été imposée aux limites latérales du modèle, à 100 m de l'axe du tunnel, simulant ainsi une source de réalimentation latérale continue.

Le tableau I résume les caractéristiques hydrauliques du sol encaissant.

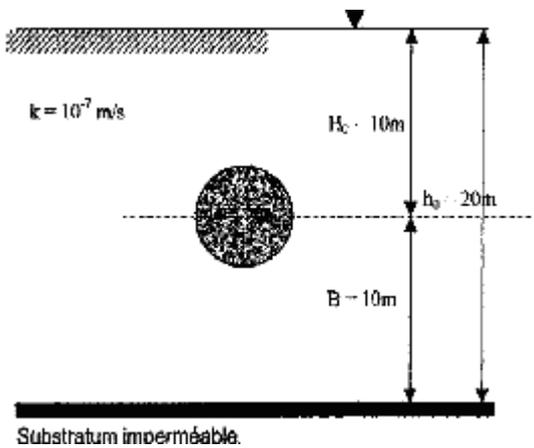


Figure 4. Configuration adoptée

Tableau I. Caractéristiques du massif encaissant		
Poids volumique de l'eau γ_w	kN/m ³	10
Porosité	-----	0,3
Compressibilité de l'eau β_w	kPa ⁻¹	10 ⁻⁵
Coefficient de perméabilité k_x	m/s	10 ⁻⁷
Coefficient de perméabilité k_y	m/s	10 ⁻⁷
Coefficient de perméabilité k_{xy}	m/s	0
Teneur en eau volumique θ_{sat}	-----	0,3
Paramètre A	-----	10 ⁻⁶
Paramètre B	-----	04
Paramètre C	-----	10 ⁻⁴
Paramètre D	-----	1,5

6.1. Calcul des écoulements vers un tunnel perméable

La simulation des écoulements vers un tunnel perméable, en régime transitoire a été effectuée, en conditions bidimensionnelles selon une coupe transversale perpendiculaire à l'axe du tunnel. La figure 5 montre l'évolution dans le temps de la distribution des charges hydrauliques (lignes équipotentielles) dans le terrain, au voisinage du tunnel. Il s'agit d'une évolution à court terme, après le creusement de l'ouvrage.

Il est évident que la variation de la charge hydraulique entraîne une variation de pression. Les pressions interstitielles se dissipent beaucoup moins rapidement dans les couches superficielles que sur la paroi du tunnel. La variation de la pression interstitielle en différents points situés au dessus de l'axe du tunnel est illustrée sur la figure 6, jusqu'à stabilisation, après plusieurs années.

Les gradients hydrauliques (figure 7) diminuent progressivement sur la paroi jusqu'à ce qu'un régime d'équilibre soit atteint ; ceci provoque une diminution du débit entrant dans le tunnel avec le temps.

6.2. Comparaison et discussion

Les résultats en terme de débit obtenu à l'aide du programme TFAP peuvent être comparés avec ceux estimés à partir des méthodes issues de la littérature. Ces comparaisons sont représentées sur la figure 8.

La comparaison des résultats fait apparaître une faible divergence (5% par rapport à CESAR-LCPC (NSAT)). D'autre part une certaine divergence des résultats est constatée par rapport aux autres méthodes. Ces différences peuvent toutefois être attribuées à l'interface d'un nombre plus important de paramètres régissant les phénomènes transitoires, ceux-ci étant traités différemment d'une méthode à une autre. Par exemple, nous remarquons qu'à long terme, le débit donné par TFAP est supérieur à celui donné par les autres méthodes. Ceci vient sans doute du fait que le calcul par TFAP ou bien CESAR-LCPC (NSAT) prend en compte l'écoulement dans la partie non saturée, celui-ci tendant à réalimenter la nappe. Cette réalimentation est négligée dans les autres méthodes. D'autre part, les temps de stabilisation diffèrent sensiblement d'une méthode à l'autre et la relation entre le débit et le temps n'est pas constante d'un modèle à un autre.

6.3. Influence de la profondeur de substratum imperméable

Pour une raison économique généralement les tunnels sont creusés à des faibles profondeurs. Par contre la profondeur de substratum imperméable est une contrainte géologique qui influe directement sur la quantité d'eau recueillie dans l'ouvrage.

La figure 9 montre d'abord l'évolution dans le temps de débit jusqu'à stabilisation pour différents niveaux de la profondeur B . Cette figure nous a permis de constater qu'une variation de rapport B/L entre 0,1 et 1,5 conduit à une augmentation de débit variant de 15% à 50%.

A ce niveau, il est intéressant de signaler les travaux de Sato et Lizawa, 1983, concernant l'influence de la profondeur H_0 ($H_0 = B + h_w$) à court terme ($t_p = 2$ heures).

Enfin, la figure 10 représente d'une part l'évolution des gradients hydrauliques dans le temps et d'autre part l'influence de la profondeur de substratum imperméable sur la valeur des gradients obtenus dans la partie inférieure du tunnel.

7. Conclusion

Pour étudier les écoulements vers un ouvrage, l'ingénieur dispose d'un certain nombre de méthodes qui permettent d'évaluer le débit convergeant vers la galerie ; les méthodes ont toutefois, des limites liées aux hypothèses géométriques ou phénoménologiques qu'elles adoptent (notamment ceux qui négligent l'écoulement dans la partie non saturée), et ne permettent d'étudier qu'une partie des phénomènes impliqués. L'application de la méthode des éléments finis (TFAP) pour l'étude de ce problème a permis une analyse plus adaptée. Les applications en conditions bidimensionnelles en coupe transversale ont permis de comparer les méthodes décrites dans la littérature avec les résultats du programme. L'efficacité ou plus précisément l'impact d'un revêtement sur les caractéristiques hydrauliques a été confirmé par les travaux de Attwa, 1996 ; Zadjouji, 2000 et El Houari Boucif, 2015.

L'analyse a montré que l'écoulement vers un tunnel provoque une redistribution des charges hydrauliques qui est accompagnée par une importante diminution des pressions interstitielles.

Cette diminution risque de causer des tassements conséquents aux ouvrages situés en surface, même dans le cas d'installation d'un revêtement relativement imperméable.

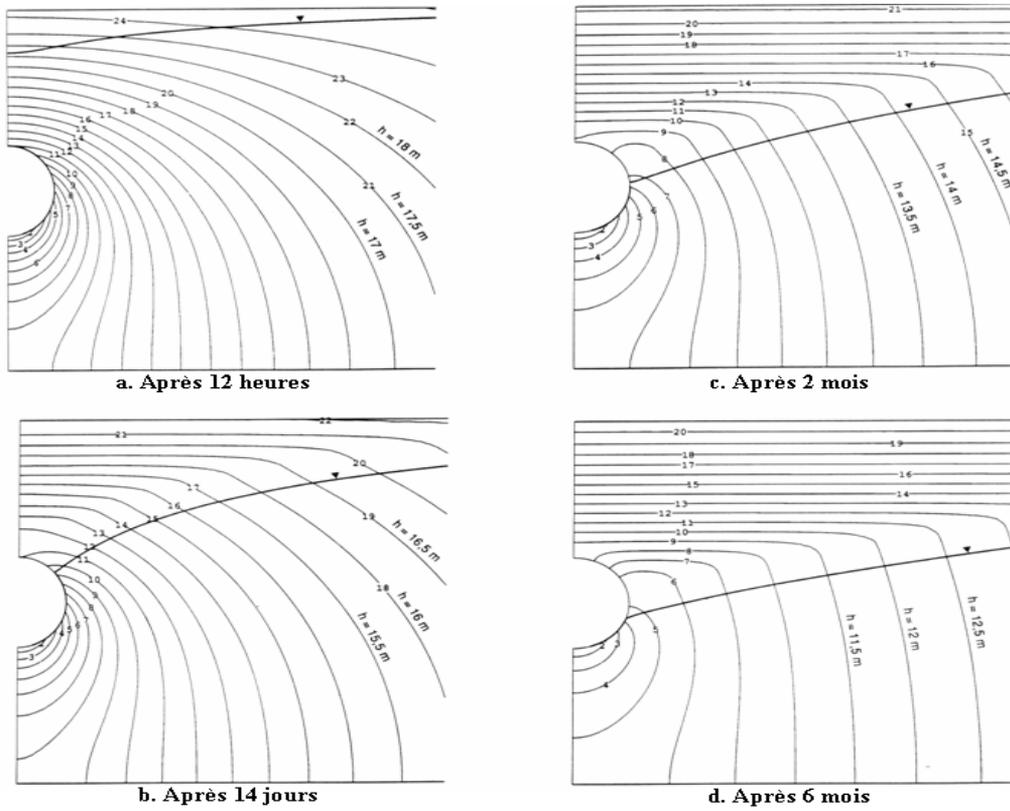


Figure 5. Évolution du régime de l'écoulement autour d'un tunnel à paroi perméable.

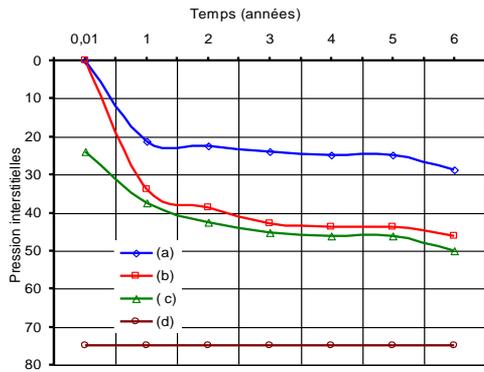


Figure 6. Evolution de la pression interstitielle au cours du temps.

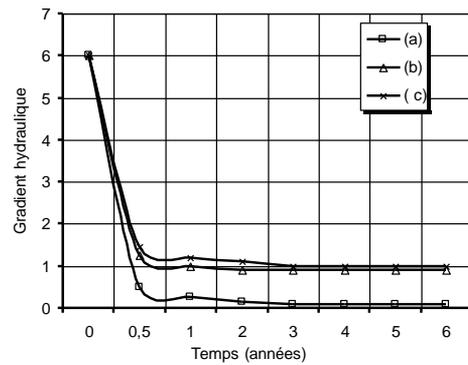


Figure 7. Variation de gradient hydraulique à différents points au dessus du tunnel

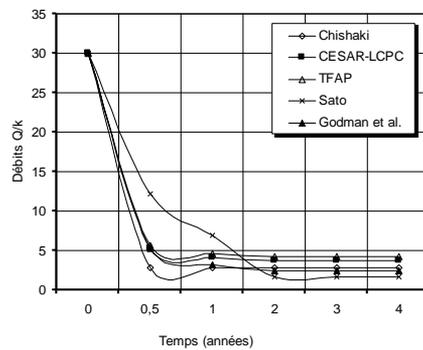


Figure 8. Comparaison des résultats obtenus pour la variation du débit avec le temps.

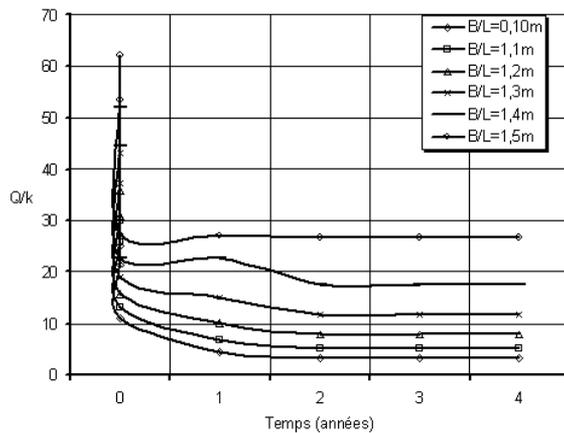


Figure 9. Influence de la profondeur de substratum sur l'évolution du débit.

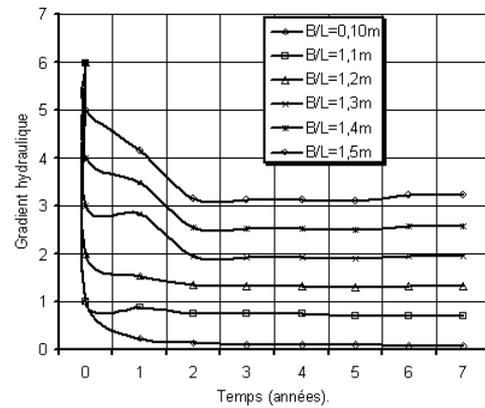


Figure 10. Influence de la profondeur de substratum sur l'évolution de gradient hydraulique (partie inférieure du tunnel).

8. Références bibliographiques

- Atwa M., Leca E., Rat M., Humbert P. (1994), Analyse des écoulements hydrauliques vers les tunnels en régime transitoire, *Bull. de Liaison LPC*, n° 189, pp. 21-34.
- Atwa M., Leca E., Magnan J.M. (2000), Analyse des écoulements d'eau autour des tunnels en construction et à long terme, ERLPC, série géotechnique GT 68, 165 pages.
- El Houari Boucif N., (2015), Contribution à l'étude mécanique et hydraulique des tunnels en configuration tridimensionnelle. Thèse de Doctorat. Univ. Abou bekr Belkaid. Tlemcen. Algérie.
- Goodman R. F., Moye D.G., Van Schaikwyk A., Javandel I. (1967), Ground water inflows during tunnel driving, *Bull. Int. Assoc. Geol.*, 2(1), pp. 39-56.
- Chishaki T., Yang S. D., Numata W. (1978), Non steady flow of ground water through a tunnel, *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University*, 38(1), pp. 61-81.
- Childs, E.C. and Collis-Georges, N. 1950. The permeability of porous materials, *Proc. Roy. Soc., London*, A-201, 392-405.
- Gardner, R. (1958), Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data, *Froc. of the Soil Science Society of America*, 20, pp. 317-320.
- Polubarinova-Kochina, (1962). Theory of Ground Water Movement, traduit du russe par J.M Roger de Wiest, Princeton University Press, 613 pages.
- Rat, M., (1969), Tunnel sous la Manche, *Rapport interne au LCPC*.
- Richards, L.A., (1931). Capillary conduction of liquids through porous medium, *Physics* 1, pp. 318- 333.
- Sato, K. (1983), Hydraulic character of discharge hydrograph for tunneling, *Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.23, n°4, pp. 27-33.
- Sato, K. et Lizawa, M. (1983). Fundamental study on unsteady flow around underground cavern in unconfined groundwater, *Froc. of the Japanese Society of Civil Engineering*, n°337, pp. 213-220.
- Zadjaoui A., (2000), Etude des écoulements autour des tunnels : analyse bibliographique et modélisation numérique. Mémoire de Magister. 158 pages. Univ. Abou bekr Belkaid. Tlemcen. Algérie.