

Effet de barrage souterrain suite à l'implantation d'un puits de métro

A. Holeyman

Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgique

ABSTRACT: Cette communication présente les résultats d'une étude entreprise pour évaluer les effets sur l'environnement suite à l'implantation d'un puits de métro à Bruxelles en travers de la vallée de la Woluwe. L'importance des écoulements souterrains, comparée à celle de l'écoulement superficiel permettait de supposer que l'effet de barrage devait être considéré.

La technique de réalisation des puits de métro à Bruxelles s'appuie sur la condition que les 2 parois moulées dans le sol s'encastrent dans un horizon imperméable (Fig. 1). Cette disposition peut présenter des inconvénients lors de la mise en service de l'ouvrage puisque l'écoulement naturel de la nappe semi-captive contenue dans les graviers du fond de la vallée ne peut plus se faire dans ces formations perméables.

Etant donné le nombre important d'informations géotechniques disponibles pour ce site, l'approche du phénomène a été entreprise à l'aide de la méthode des éléments finis. Il est observé que, dans le domaine de l'hydrogéologie, il reste préférable de considérer les résultats numériques obtenus comme indicatifs.

Dans cette optique et pour le problème considéré dans cette communication, on peut retenir que le puits pouvait descendre jusqu'au sommet des graviers sans affecter la nappe de manière sensible, mais que dès que le puits interceptait les graviers, la nappe profonde en était directement perturbée, le désordre ne pouvant apparaître en surface que beaucoup plus tard.

1 INTRODUCTION - EXPOSE DU PROBLEME

La Société des Transports Interurbains Bruxellois ayant entrepris de prolonger une ligne de métro dans la commune de Woluwe-Saint-Lambert, a procédé à l'implantation d'un puits suivant approximativement le tracé de l'avenue Paul Hymans (Tronçon G4A).

Cet ouvrage coupe la vallée de la Woluwe dans une direction quasi perpendiculaire à son cours et à un endroit où le Roodebeek s'y raccorde.

Bien que ces cours d'eau soient actuellement d'une importance limitée, leur influence sur les conditions géologiques et géotechniques que l'on rencontre à ce point de confluence ont été déterminantes.

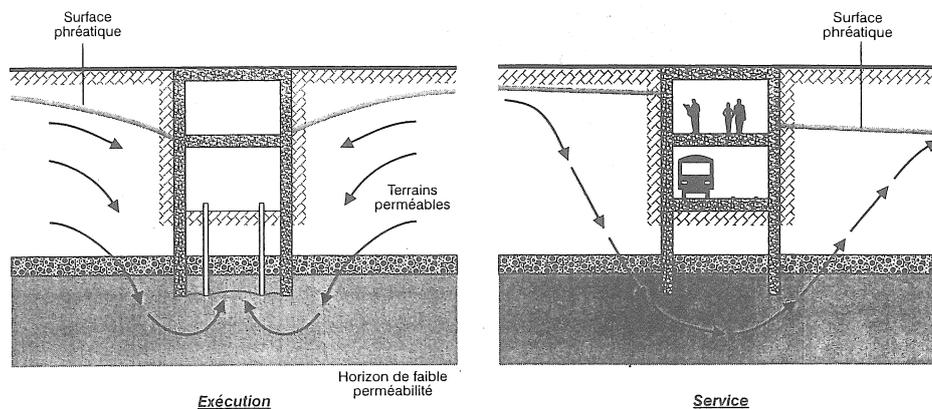


Fig.1 : Méthode d'exécution et mise en service d'un puits de métro

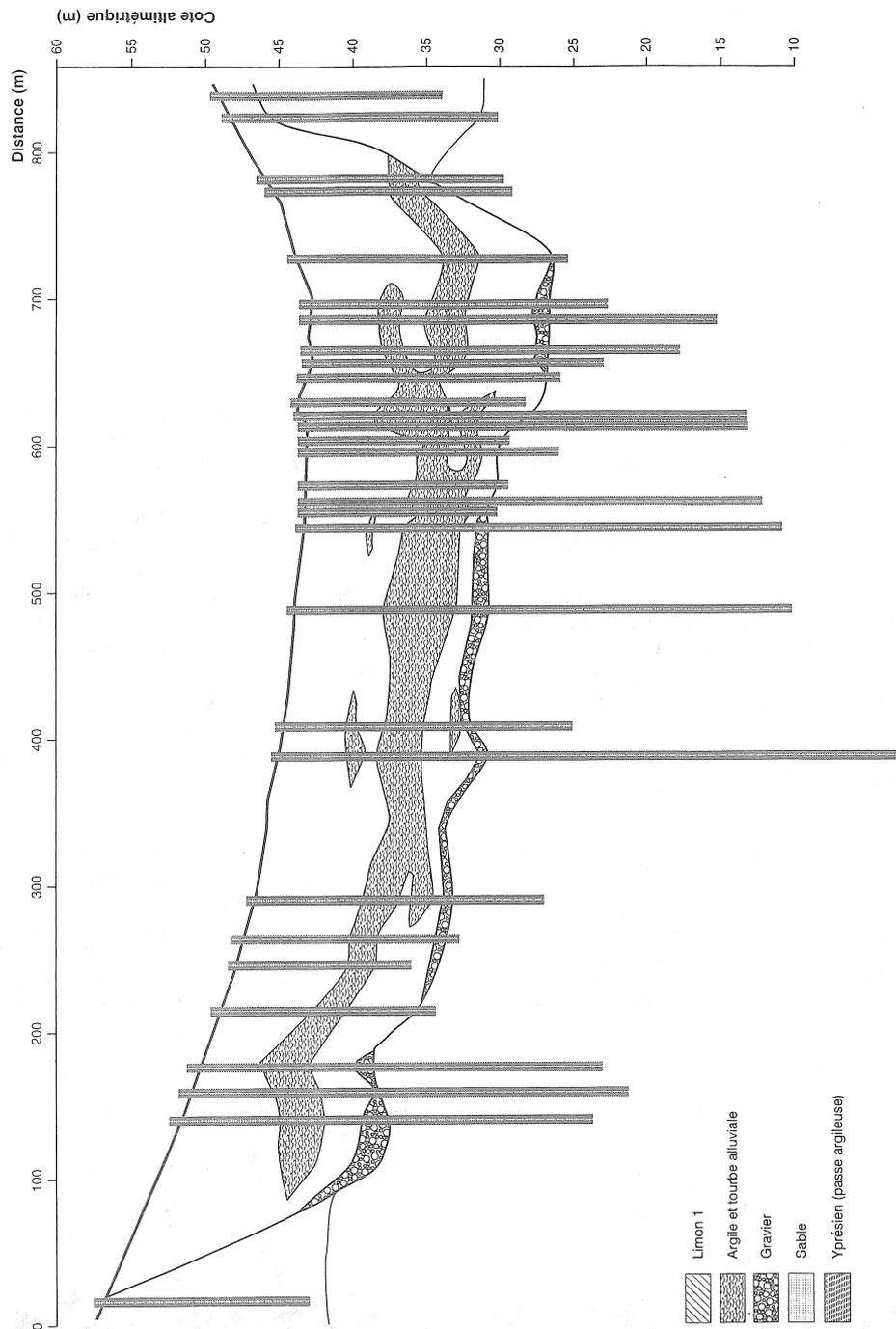


Fig.2 : Coupe géotechnique transversale de la vallée de la Woluwe

En particulier, l'importance des écoulements souterrains, comparée à celle de l'écoulement superficiel permettait de supposer que l'effet de barrage devait être considéré. C'est pourquoi l'auteur qui a mené pour le CSTC une recherche sur le rabattement de la nappe aquifère et ses conséquences, a entrepris d'évaluer les phénomènes relatifs à ce problème.

La technique de réalisation des puits de métré à Bruxelles s'appuie sur la condition que les 2 parois moulées dans le sol s'encastrent dans un horizon imperméable. Il est ainsi possible de procéder à l'évacuation du stross alors que l'eau est éliminée à l'intérieur du caisson quasi hermétique réalisé de la sorte (fig. 1).

Cette disposition, avantageuse lors de l'exécution, peut présenter des inconvénients lors de la mise en service de l'ouvrage puisque l'écoulement naturel de la nappe semi-captive contenue dans les graviers du fond de la vallée ne peut plus se faire dans ces formations perméables. Il en résulte une mise en pression de la nappe à l'amont du puits et une dépression à l'aval.

Etant donné le nombre important d'informations géotechniques disponibles pour ce site, l'approche du phénomène a été entreprise à l'aide de la méthode des éléments finis.

2 APERÇU GEOTECHNIQUE

La coupe schématisée à la figure 2 de la vallée de la Woluwe permet de distinguer de haut en bas les formations de remplissage suivantes :

- 1 à 2 mètres de remblais
- 2 à 6 mètres de limon
- 0 à 6 mètres de tourbe et d'argile tourbeuse
- 1 à 6 mètres de limon sableux
- 1 mètre environ de gravier.

Cette cuvette remplie actuellement par ces dépôts d'âge quaternaire est taillée dans le sable bruxellien n'apparaissant qu'en bordure et dans les complexes sablo-argileux et argileux formés au tertiaire.

Les écoulements souterrains s'effectuant principalement dans le tapis drainant constitué par les graviers de base sont susceptibles de grandes modifications si l'on obstrue ce passage privilégié sur toute la largeur de la vallée.

D'autre part, la proximité des épaisses couches de tourbe et des graviers responsables de la transmission à grande distance des variations de pression interstitielle permet de supposer que toute dépression de la phase liquide à l'aval de l'ouvrage pourrait développer assez rapidement des tassements en surface.

Si dans son principe, le phénomène pouvait être appréhendé, il importait de quantifier les caractéristiques hydrogéologiques des unités géotechniques mises en évidence afin d'analyser plus clairement les éléments composant ce phénomène. C'est pourquoi nous avons pris en compte les données disponibles afin d'adopter les paramètres fondamentaux des unités de sol les plus réalistes; ces

Tableau 1 : Paramètres hydrologiques fondamentaux des unités géotechniques

Symboles	Types de sol	Perméabilité horizontale (10 ⁻³ m/h)	Perméabilité verticale (10 ⁻³ m/h)	Coeff. d'emmagasinement (-)
	Remblais	4.0	4.0	0.25
	Limon 1	0.04	0.04	0.15
	Argile et tourbe alluviales	0.1	0.04	0.50
	Limon 2	0.4	0.4	0.20
	Gravier	1000	1000	0.25
	Sable	40.0	40.0	0.15
	Yprésien (passe argileuse)	0.1	0.4	0.20
	Yprésien (passe sableuse)	4.0	4.0	0.15

paramètres sont présentés dans le tableau I. Les données disponibles consistaient en des forages de reconnaissance, des essais classiques d'identification sur les échantillons de sol, ainsi que des essais oedométriques et de perméabilité.

3 METHODE D'ANALYSE

La méthode des éléments finis qui est couramment utilisée pour résoudre les problèmes d'élasticité s'adapte bien à la résolution des écoulements dans les milieux poreux régis par l'équation de Laplace. En effet, après avoir discrétisé le domaine en un certain nombre d'éléments, le calcul s'effectue en formant pour chaque élément pris individuellement les équations de comportement et en assemblant ces équations grâce aux principes de continuité et de conservation. Le système d'équations ainsi formé a pour inconnues les hauteurs piézométriques aux noeuds du maillage. Il est simplifié par l'introduction de conditions aux limites et est résolu par une méthode numérique appropriée.

Le programme utilisé présente les avantages suivants :

- 1) la procédure itérative pour trouver la surface phréatique dans les problèmes d'écoulement libre est assez stable,
- 2) les conditions aux limites pour les points de sortie de la nappe phréatique sont bien rendues
- 3) la surface phréatique peut passer à travers des matériaux de différentes perméabilités.
- 4) Une sortie graphique des résultats permet de présenter une vue d'ensemble des écoulements.

Le problème à traiter étant tridimensionnel de nature, nous avons sélectionné une tranche typique de sol dans le sens de l'écoulement que nous avons considéré plan et avons simulé le rôle de l'affluent par l'injection d'un débit estimé au 1/4 du débit principal. Cette analyse pseudo-tridimensionnelle permet de prendre en compte une donnée importante du problème sans exiger de recourir à une fastidieuse analyse par éléments finis à 3 dimensions. De plus, pour tenir compte de l'éventuel effet de by-pass des écoulements en dessous de l'ouvrage, la limite

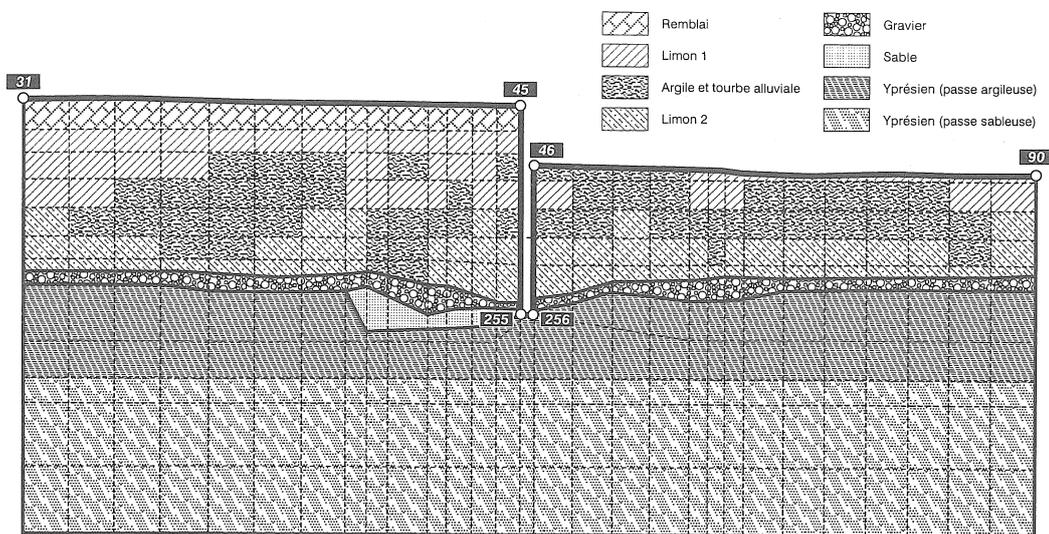


Fig.3 : Modèle par éléments finis représentant une section longitudinale de la vallée de la Woluwe

imperméable du domaine analysé a été translatée vers le bas et une zone passive d'écoulement inférieur a pu être considérée. Elle est constituée des 3 rangées inférieures d'éléments et limitée sur les trois bords extérieurs par une frontière imperméable.

La tranche typique qui a servi de base aux simulations est présentée à la fig. 3. On y reconnaît les diverses unités géotechniques dont les caractéristiques ont été regroupées au tableau I, ainsi que l'ouvrage dénoté par la tranchée centrale (absence d'éléments); Le réseau qui schématise cette section comporte 427 noeuds, 385 éléments et 8 types de matériaux. Le programme des simulations a compris deux phases principales :

- 1) la recherche de l'écoulement initial : donnant les hauteurs piézométriques amont et aval, obtenir dans le sol vierge la surface phréatique de régime ainsi que les débits passant au travers des sections amont et aval
- 2) Etude de l'effet de barrage : connaissant les débits de régime et les imposant comme conditions aux limites, voir l'évolution des écoulements et de la surface phréatique lorsque l'ouvrage se construit en profondeur.

Alors que la première phase correspondait à une étude en mouvement permanent, la seconde devait être traitée en régime transitoire.

La procédure de solution dans ce cas est un schéma de type « time marching », ce qui signifie que le problème est traité comme une succession de régimes permanents mais dont les conditions limites sont modifiées à chaque intervalle de temps pour tenir compte de la fluctuation de domaine

géométrique contenant la nappe libre. Il importe dans ce cas de choisir l'intervalle de temps suffisamment petit de manière à ce que les ajustements de la surface piézométrique se fassent progressivement.

4 RESULTATS

En prenant une dénivellation piézométrique de 2 m pour une longueur d'environ 400 m, soit un gradient moyen de 0.5 %, le débit de régime, sans tenir compte de l'influence du Roodebeek était de 5.6 m³/h; ce chiffre correspondait à l'idée que se faisaient les géologues sur la Woluwe. Prenant 25 % de cet écoulement (1.4 m³/h) et l'attribuant au Roodebeek par une injection dans le milieu sableux à l'aval de l'ouvrage, nous avons observé une diminution du débit principal aval (4.8 m³/h). La nappe exhibait dans ce cas un gradient plus faible à l'aval du Roodebeek qu'à l'amont puisqu'à la verticale de l'injection la nappe avait remonté par rapport au cas précédent d'une dizaine de centimètres. Avant la construction de l'ouvrage, les vitesses d'écoulement semblent relativement horizontales en surface, tandis que le rôle du massif passif est très réduit.

Nous nous sommes alors assurés de la stabilité de cette solution en étudiant le régime initial à l'aide des conditions aux limites de débit et nous avons retrouvé les conditions aux limites de pression prescrites lors de la première phase. Nous avons ensuite supprimé les éléments où le puits n'interceptait pas le lit de graviers et au cas où le puits traversait ce lit de gravier.

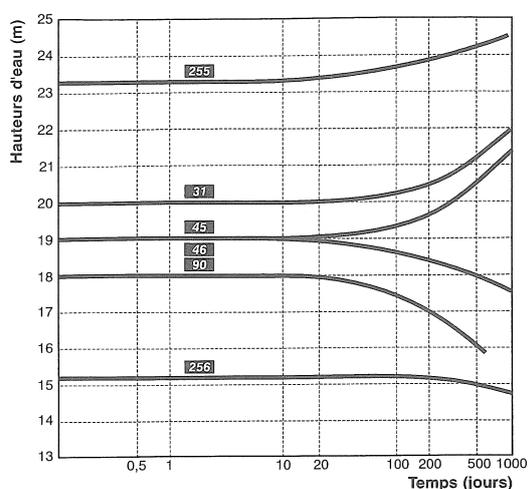


Fig.4 : Evolution des hauteurs d'eau en quelques points nodaux suite à l'implantation du puits (les chiffres renvoient aux noeuds numérotés à la figure 3)

Lorsque le puits s'arrête au sommet des graviers, la nappe remonte rapidement d'une vingtaine de centimètres tandis que le gradient à l'endroit du puits devient 4 fois plus grand que le gradient initial.

Par contre, dès que le puits intercepte les graviers, la nappe contenue dans les graviers subit instantanément une mise en pression de plus de 4 m d'eau à l'amont et une dépression du même ordre de grandeur à l'aval.

Cependant, pour que la surface piézométrique réponde, il faut attendre de l'ordre d'un an pour voir les fluctuations atteindre le mètre (voir le graphique de la fig. 4). Il n'a pas été possible d'atteindre un régime d'équilibre avec ce dernier problème car après un millier de jours, la nappe qui avait atteint le niveau du terrain naturel à l'aval continuait à monter à un rythme n'indiquant aucunement la proximité d'une stabilité quelconque, en dépit du rôle croissant du massif inférieur permettant le by-pass via la mise en pression de la nappe à l'aval de l'ouvrage.

5 CONCLUSIONS

La méthode des éléments finis peut constituer un outil puissant de résolution des écoulements souterrains complexes lorsque l'on connaît les informations nécessaires aux milieux modélisés. Mis à part certains cas particuliers où une simulation parfaite peut être envisagée, son avantage principal provient des phénomènes qu'elle met en évidence lorsque l'on fait varier les paramètres clés du problème.

En tout état de cause, dans le domaine de l'hydrogéologie, il est préférable de considérer les résultats obtenus comme indicatifs tant il est vrai qu'actuellement notre compétence à calculer dépasse de loin notre compétence à mesurer les paramètres fondamentaux.

Dans cette optique et pour le problème considéré dans cet article, on peut retenir que le puits peut descendre jusqu'au sommet des graviers sans affecter la nappe de manière sensible, mais que dès que le puits intercepte les graviers, la nappe profonde est directement perturbée, le désordre ne pouvant apparaître en surface que beaucoup plus tard. A ce point de vue, un piézomètre profond donnera par anticipation les variations de la surface phréatique.

Ces résultats ont été obtenus par un programme occupant 120 K de mémoire. Pour un problème de la taille que nous avons traité en régime transitoire et demandant 40 intervalles de temps, l'ordinateur utilisé prenait environ une dizaine de minutes tandis que le tracé du réseau avec les vecteurs d'écoulement demandait 1 minute sur la table traçante. Cependant, le principal poste d'une action de ce genre reste humain : il a fallu à un chercheur un mois et demi pour compiler les données géotechniques et un mois pour mettre au point le modèle et en faire l'analyse proprement dite.

6 REMERCIEMENTS

L'auteur exprime sa reconnaissance au C.S.T.C (Centre Scientifique et Technique de la Construction) et plus particulièrement à M. Legrand, chef de Division, pour lui avoir permis de publier les résultats d'une recherche conduite au C.S.T.C. avec l'aide de subsides octroyés par l'IRSI.

7 BIBLIOGRAPHIE

- Castany, G. 1963. Traité pratique des eaux souterraines. Paris, Dunod.
- De Wiest, J.M. 1965. Geohydrology. New York, Wiley & Sons.
- Kruseman, G.P. & De Ridder, N.A., 1976. Analysis and evaluation of pumping test data. Wageningen, International Institute for Land Reclamation and Improvement, Bulletin nr 11.
- Schneebeil, G. 1966. Hydraulique souterraine. Paris, Eyrolles.
- Terzaghi, K., 1951. Mécanique des sols. Paris, Dunod.