

## Simulation de l'effet d'un mur emboué et de fondations profondes sur les écoulements souterrains: Cas de la place St Lambert à Liège

Modelling the impact of a slurry wall and deep foundations on the groundwater levels: Case study of the St Lambert square in Liège

A. Dassargues & A. Monjoie

Laboratoires de Géologie de l'Ingénieur d'Hydrogéologie, et de Prospection Géophysique (LGIH), Université de Liège, Belgique

**RESUME:** Un modèle numérique utilisant la méthode des éléments finis a été construit pour simuler les écoulements souterrains dans la nappe d'alluvions et de pieds de versant située sous la place St Lambert dans le centre de la ville de Liège en Belgique. Des travaux importants du génie civil sont prévus, comportant l'implantation de murs emboués traversant le sous-sol de la place et des fondations profondes sous certains nouveaux bâtiments. Après calibration du modèle sur la situation piézométrique mesurée avant les travaux, les simulations tendent à déterminer l'impact des travaux projetés sur les hauteurs piézométriques de la nappe. De plus, une situation de chantier avec pompes intensifs, a été simulée permettant d'estimer les rabattements provoqués. En effet, les rabattements avant que les remontées sont à craindre, en raison de la présence d'un important bâtiment historique (le Palais des Princes Evêques) dont les fondations sur pieux en bois risquent d'être sensibles à toute modification importante de la surface libre de la nappe et de sa frange capillaire.

**ABSTRACT:** A finite element numerical model has been used to simulate the groundwater flow conditions in the alluvial and colluvial aquifers below the St Lambert place in the city centre of Liège. Important Civil Engineering works are foreseen with realization of slurry walls crossing the underground of the whole place and deep foundations under important new buildings. After the calibration procedure of the model, completed on the previous measured piezometric situation, the simulations tend to determine accurately the impact of the Civil Engineering works on the piezometric heads of the aquifer. Moreover, a field-work situation with intensive pumping has been simulated in order to determine the induced drawdowns. Any important drawdown or recovery is to be avoided due to the presence of very old wooden foundations belonging to an historical building (the Bishop-Princes palace). These wooden pile foundations should be very sensitive to any important change of the water table and of its capillary fringe.

### 1 INTRODUCTION: MODELES NUMERIQUES DECOULEMENT SOUTERRAIN

Quelque soit le but final, la meilleure façon d'utiliser au maximum toutes les données disponibles relatives à une nappe aquifère, est de combiner celles-ci aux lois physiques appropriées (exprimées sous forme d'équations) et de réaliser ainsi un modèle mathématique (Dassargues, 1991a). Ces modèles numériques ont pour but de décrire et de quantifier les comportements observés.

En utilisant, dans leur formulation, les équations régissant les processus qu'on veut représenter avec les vraies variables impliquées, on s'assure de la

signification physique des simulations et de la fiabilité des résultats. Pour fournir des solutions ayant un sens physique le plus précis possible, il est nécessaire de tenir compte de la complexité des réservoirs aquifères. Les hétérogénéités, variations spatiales, anisotropies des terrains géologiques, sont autant de sources de complications, alourdissant la réalisation des modèles mathématiques en hydrogéologie. La construction d'un modèle mathématique requiert les principales étapes décrites ci-après (Bear & Verruijt, 1987) :

(a) La synthèse des données disponibles doit aboutir à un modèle conceptuel de l'aquifère étudié, à partir duquel seront choisies les dimensions spatiales, les conditions aux limites et la formulation en régime permanent ou transitoire.

(b) La formulation en équations mathématiques des processus physiques est suivie de la recherche de l'expression numérique de celles-ci et de leur implémentation dans le programme.

(c) Le programme est testé quant à sa convergence, sa stabilité et sa précision; des comparaisons avec des solutions analytiques connues, en utilisant de grands intervalles de variation des paramètres, sont recommandées.

(d) La calibration est menée en ajustant la répartition de la valeur des paramètres (et éventuellement des conditions aux frontières) de manière à ce que les résultats calculés soient similaires aux données mesurées pour une même sollicitation du système.

La loi de Darcy, établissant que le flux est inversement proportionnel au gradient hydraulique, s'écrit :

$$q_j = K_{xy} \frac{\partial h}{\partial x_j}, \quad j = 1, 2, 3 \quad (1)$$

où  $K_{xy}$  est le tenseur des perméabilités du milieu,  $q_j$  le vecteur flux,  $x_j$  coordonnée généralisée et  $h$  la hauteur piézométrique.

Cette loi, écrite sous forme scalaire, consiste en fait en 3 équations avec 4 inconnues : les  $q_j$  et la hauteur piézométrique  $h$ . La 4<sup>ème</sup> équation scalaire est fournie par l'expression du principe de conservation de la masse. En combinant la loi de Darcy et l'équation de continuité, on obtient l'expression de l'équation de diffusivité :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( K_{xy} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) - Q = S_j \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

$i, j = 1, 2, 3$

où  $S_j$  est le coefficient d'emmagasinement spécifique,  $t$  le temps et  $Q$  le terme de flux externe (pompages, reinjections, infiltrations).

Lorsque la nappe étudiée peut se réduire à un problème 2D, l'équation est ramenée à 2 dimensions par intégration sur l'épaisseur de la hauteur saturée. Cette simplification repose sur l'hypothèse que les vitesses d'écoulement horizontales sont très supérieures aux vitesses verticales (hypothèse de Dupuit).

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) - Q \quad (3)$$

où  $S$  est le coefficient d'emmagasinement,  $Q$  le flux externe,  $T$  la transmissivité et  $x, y$  les coordonnées horizontales. Cette équation est uniformément valable pour des flux horizontaux en nappe captive, mais elle est également utilisée comme approximation en nappe libre avec  $T = K_e e$  représentant l'épaisseur des terrains saturés de la nappe.

Une nappe aquifère a une extension limitée dans l'espace et, sur ses limites, les échanges d'eau avec l'extérieur sont régis par les conditions aux frontières. Ces conditions sont de trois types :

1°) Condition de Dirichlet ou de potentiel imposé :

$$h = h \quad (4)$$

La valeur du potentiel  $h$  est alors spécifiée sur la frontière considérée, cette condition est typiquement celle d'un contact nappe-rivière, le potentiel constant imposé étant égal à la cote de la surface libre.

2°) Condition de Neuman ou de flux imposé :

$$\frac{\partial h}{\partial n} e_x + \frac{\partial h}{\partial y} e_y = \phi \quad (5)$$

où  $n$  est la normale extérieure à la frontière considérée,  $e_x$  et  $e_y$  les cosinus directeurs de cette normale et  $\phi$  le flux imposé à la frontière.

La valeur du gradient de potentiel normal à la frontière est alors imposée. Dans le cas particulier où  $\phi = 0$ , cette condition exprime, par application de la loi de Darcy, que la composante d'écoulement normale à la frontière est nulle. Les équipotentielles sont donc perpendiculaires à cette frontière et les lignes de flux parallèles.

3°) Condition de Fourier ou mixte :

$$h + \lambda \frac{\partial h}{\partial n} \text{ imposé} \quad (6)$$

Ce troisième type de condition permet d'imposer une relation entre le potentiel et le flux, comme cela est le cas lors :

- de la drainage par une frontière séparant la nappe aquifère d'un plan d'eau;
- du suintement à la frontière d'un milieu poreux, au contact de l'atmosphère.

La définition ad hoc de ces conditions aux frontières est indispensable à la résolution correcte du problème de champ posé.

## 2. DONNÉES ET CONDITIONS DU MODELE

Les données géologiques et hydrogéologiques de la zone à étudier ont été tirées des rapports antérieurs des L.G.I.H. de l'Université de Liège sur le sujet (Moujoié & Calembert, 1975). Les données concernant la géométrie des ouvrages et travaux prévus ont été fournies par la Société des Transports En Commun (TEC), le Service de l'Urbanisme de la ville de Liège et l'Association Momentanée des Bureaux d'Ingénieurs-Consuls.

La carte piézométrique mesurée en 1972, avant les travaux importants, est reprise à la figure 1. Les perméabilités de la nappe alluviale dans cette zone peuvent varier entre  $1.10^{-3}$  et  $5.10^{-2}$  m/s selon la granulométrie des alluvions. La figure 2

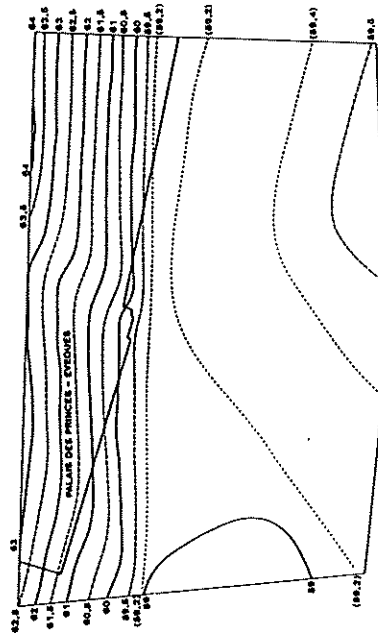


Fig. 1 Carte piézométrique mesurée avant tout travaux.

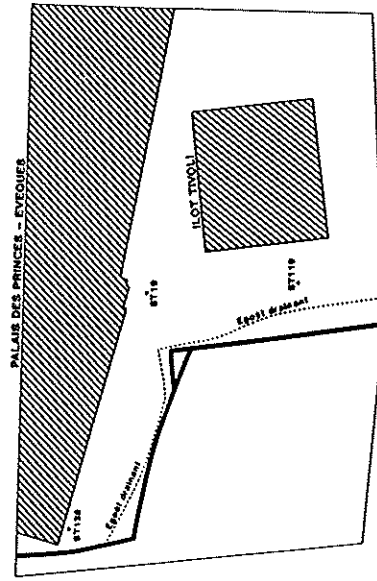


Fig. 2 Plan de situation montrant l'implantation du Palais des Princes-Evêques, de l'Îlot Trivoli, du mur emboué et de l'égoût drainant.

présente l'implantation du mur emboué ainsi que la localisation des trois piézomètres de mesure situés dans la zone étudiée. On distingue également sur cette figure, le tracé d'un égoût drainant ainsi que la zone correspondant aux fondations profondes de l'Îlot Trivoli. Sur base de ces informations hydrogéologiques et de la géométrie des travaux projetés, un modèle d'écoulement souterrain utilisant la méthode des éléments finis a été élaboré.

Des éléments finis "briques" à 8 noeuds sont utilisés pour la discrétisation. Leur épaisseur reprend systématiquement l'épaisseur du milieu poreux saturé via l'utilisation des transmissivités.

Le problème est ainsi ramené en pratique à une simulation à deux dimensions dans le plan

horizontal par intégration sur l'épaisseur de la hauteur saturée. Ces fondations influencent la perméabilité moyenne équivalente à prendre en compte dans le modèle d'écoulement. Les mesures piézométriques aux trois piézomètres de référence sont résumées au tableau 1 pour différentes conditions de chantier.

Tableau 1. Mesures piézométriques.

	Avant travaux	Pendant travaux (avec pompage)	Pendant travaux (avec pompage) +mur emboué
ST 138	61.2 m	≈ 56.0 m	57.62 m
ST 19	59.25 m	58.9 m	59.22 m
ST 119	59.38 m	58.85 m	59.37 m

La discrétisation effectuée sur base de ces données est reprise à la figure 3. Les conditions aux frontières latérales sont des hauteurs piézométriques imposées car aucune bordure réellement imperméable ne peut être envisagée dans cet environnement hydrogéologique. La base du modèle est supposée imperméable.

Les infiltrations efficaces dues à la pluviométrie sont négligées et la simulation a lieu en régime permanent pour une nappe considérée comme libre.

### 3 CALIBRATIONS DU MODELE

Ce n'est que lorsqu'un modèle mathématique représente de façon précise les phénomènes simulés, que son application peut être envisagée pour d'éventuelles prédictions. La procédure appelée "calibration" consiste à minimiser la différence entre mesures et résultats par ajustement des données d'entrée jusqu'à ce que le modèle reproduise les conditions du champ mesuré avec un niveau de précision acceptable. Le plus souvent, les données modifiées sont essentiellement les valeurs et répartitions des perméabilités - transmissivités car les autres données résultent de mesures plus fiables. Cette approche requiert de la part de l'hydrogéologue une bonne expérience et un bon jugement afin d'obtenir finalement une calibration fiable (Dassargues, 1991b).

Dans notre cas, la calibration a débuté en distinguant deux zones de perméabilités différentes :

- Zone de la plaine alluviale :  $K = 8.10^{-3}$  m/s
- Zone du colluvium du versant :  $K = 1.10^{-4}$  m/s.

Au départ, les piézométries calculées lors des premiers passages (essais) sont quelque peu différentes de la piézométrie mesurée (figure 1). On remarque quelques différences notamment dans la zone de transition entre la zone de la plaine alluviale et celle du versant. La calibration a été poursuivie pas à pas. Sans entrer dans les détails, quelques résultats intermédiaires vont être exposés ci-après, afin de montrer le cheminement réalisé.

Au 4ème passage, on peut considérer le modèle comme calibré sur la situation piézométrique mesurée de 1972. La carte piézométrique calculée est reprise à la figure 4, montrant un bon ajustement à la piézométrie mesurée (figure 1). A ce stade, les perméabilités utilisées sont les suivantes (figure 5) :

- Zone de la plaine alluviale :  $K = 5.10^{-2}$  m/s
- Zone du colluvium de versant :  $K = 1.10^{-4}$  m/s.

Cependant, il est également nécessaire de calibrer le pompage intensifs qui ont rabattu la nappe, de telle façon que les niveaux piézométriques calculés soient similaires à ceux qui sont mesurés pendant le chantier et notamment aux piézomètres de référence (tableau 1).

Après différents essais, au 15ème passage, on peut considérer que le modèle est calibré sur cette deuxième situation, tout en imposant un minimum de changement dans les valeurs de perméabilité. La carte piézométrique calculée (figure 6) montre un bon ajustement avec les mesures. Les valeurs des perméabilités aux éléments 306 et 307 ont été ramenées à  $1.10^{-4}$  m/s et une zone de pied de versant, de perméabilité de  $5.10^{-3}$  m/s a dû être distinguée (figure 7).

Le 16ème passage reprend la simulation de la nappe, sans pompage, et en tenant compte des modifications de perméabilités. La carte piézométrique calculée est proche de celle obtenue pour le 4ème passage (figure 4). Au vu des piézométries obtenues avec et sans pompage de chantier, on remarque que les pompages ont provoqué des rabattements sous une grande partie du Palais des Princes Evêques. A partir de ces deux situations calibrées (situations avec et sans pompage), les simulations présentées ci-dessous établiront l'influence sur les écoulements souterrains de la construction du mur emboué et des fondations profondes prévues pour l'Ilot Tivoli.

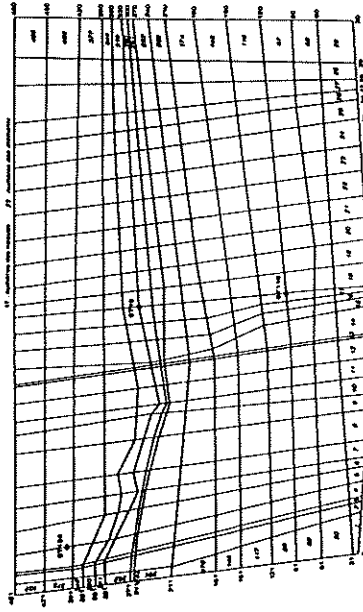


Fig. 3 Discrétisation de la zone en éléments fins. Une géométrie un peu tordue a permis de tenir compte explicitement de la géométrie du mur emboué.

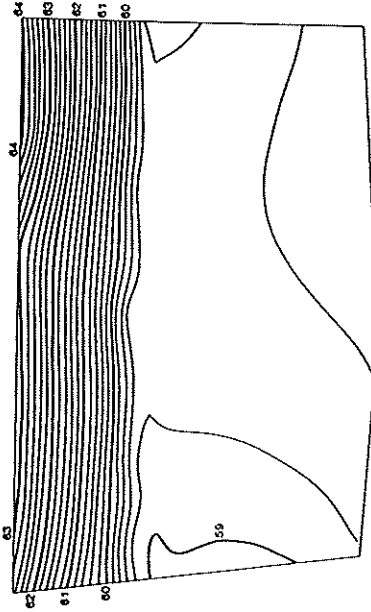


Fig. 4 Résultats calculés au quatrième passage (essai) de la calibration.

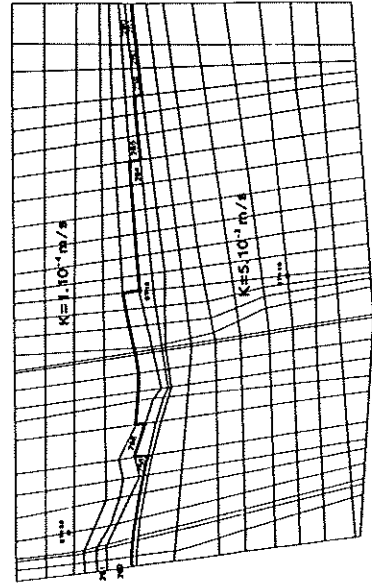


Fig. 5 Valeurs des perméabilités utilisées pour le quatrième passage de la calibration.

#### 4 SIMULATIONS ET RESULTATS

La géométrie du mur emboué est celle représentée à la figure 2. Etant donné que le modèle est monocouche, la "perméabilité équivalente du mur"

à introduire dans les éléments correspondants doit tenir compte de la zone où le mur repose sur le bed rock altéré et où des débits de fuite parfois importants peuvent être enregistrés. N'ayant aucune donnée quantitative fiable concernant ces débits de fuite, on a considéré différentes valeurs de "perméabilité équivalente" du mur emboué. Les résultats obtenus pour les valeurs extrêmes de ces perméabilités permettront de déduire les minima et

maxima des remontées de la nappe en présence du mur emboué.

#### 4.1 Simulation de l'écoulement de la nappe en présence du mur emboué

##### 4.1.1 Calcul des remontées par rapport à une situation initiale sans pompage

Dans un premier temps, une valeur de "perméabilité équivalente" du mur emboué égale à  $1.10^{-7}$  m/s et une situation initiale sans pompage sont choisis pour les simulations. Les résultats obtenus (figure 8) montrent notamment une remontée de la nappe

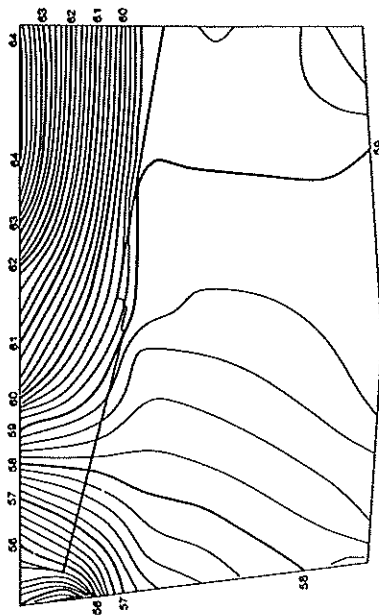


Fig. 6 Carte piézométrique calculée, calibrée sur la situation de chantier avec pompages.

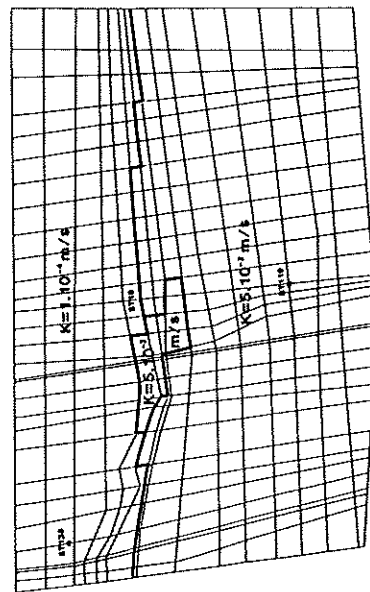


Fig. 7 Valeurs et répartition des perméabilités utilisées pour la situation calibrée.

de 0.89 m au ST138, de 0.09 m au ST19 et de 0.08 m au ST119. Avec les mêmes conditions initiales mais une "perméabilité équivalente" du mur emboué égale à  $1.10^{-8}$  m/s, les résultats montrent une remontée de la nappe quasi identique : 0.92 m au ST138, 0.09 m au ST19 et 0.08 m au ST119. On peut en déduire que le fait de diminuer la "perméabilité équivalente" du mur emboué en dessous d'une valeur de  $1.10^{-7}$  m/s ne modifie que très légèrement la remontée de la nappe.

En reprenant ensuite les mêmes conditions initiales et une "perméabilité équivalente" du mur emboué égale à  $1.10^{-6}$  m/s, il est logique que les résultats obtenus montrent une remontée moins importante de la nappe dans la zone de ST138 (près du coin du Palais des Princes Evêques): 0.68 m au ST138, 0.09 m au ST19 et 0.08 m au ST119. En augmentant encore la "perméabilité équivalente" du mur emboué à  $1.10^{-5}$  m/s, les remontées obtenues se limitent à : 0.20 m au ST138, 0.09 m au ST19 et 0.08 m au ST119.

Rappelons que l'ensemble de ces résultats correspondent au calcul de la remontée de la nappe par rapport à une situation initiale sans pompage. On constate une relative sensibilité de la remontée de la nappe dans la zone du piézomètre ST138 en fonction d'une "perméabilité équivalente" du mur emboué passant de  $1.10^{-5}$  m/s à  $1.10^{-6}$  m/s. Cependant, dans la pratique, il est réaliste de considérer que cette "perméabilité équivalente" devrait être inférieure ou égale à  $1.10^{-6}$  m/s. Les remontées de la nappe sont, dans ce cas, comprises entre 0.7 et 1.0 m près du pignon Ouest du Palais des Princes Evêques (ST138) et inférieures à 0.10 m dans la partie centrale de la zone simulée (ST19 et ST119).

##### 4.1.2 Calcul des remontées par rapport à une situation avec pompages

Dans un deuxième temps, une valeur de "perméabilité équivalente" du mur emboué égale à  $1.10^{-7}$  m/s et une situation avec pompages sont choisis. Les résultats obtenus (figure 9) montrent notamment une remontée de la nappe de 0.87 m au ST138, de 0.21 m au ST19 et de 0.17 m au ST119 (par rapport à la situation initiale calibrée correspondante). Avec les mêmes conditions de pompage et une "perméabilité équivalente" du mur emboué égale à  $1.10^{-8}$  m/s, les résultats montrent une remontée de la nappe quasi identique : 0.89 m au ST138, 0.21 m au ST19 et 0.17 m au ST119. Comme dans le cas des simulations sans pompage, on peut en déduire que les remontées de la nappe

sont très peu dépendantes d'une diminution de la "perméabilité équivalente" du mur emboué en dessous de  $1.10^{-7}$  m/s.

En reprenant ensuite les mêmes conditions de pompage et une "perméabilité équivalente" du mur emboué égale à  $1.10^{-6}$  m/s, les résultats montrent une remontée moins importante de la nappe dans la zone de ST138: 0.70 m au ST138, 0.21 m au ST19 et 0.17 m au ST119.

En augmentant encore la "perméabilité équivalente" du mur emboué égale à  $1.10^{-5}$  m/s, les remontées obtenues se limitent à : 0.26 m au ST138, 0.20 m au ST19 et 0.17 m au ST119. On constate que la diminution de la "perméabilité équivalente" du mur emboué au dessous de  $1.10^{-7}$  m/s n'a que peu d'influence sur les remontées de la nappe.

D'autre part, et c'est plus grave, l'ensemble des résultats montre également que la remontée provoquée par la mise en place du mur est largement inférieure aux rabattements provoqués par les pompages de chantier au droit de la partie Ouest du Palais des Princes Evêques.

#### 4.2 Simulation de l'écoulement de la nappe en présence du mur emboué et des fondations profondes de l'ilot Tivoli

La zone des fondations de l'ilot Tivoli concerne les éléments 78 → 83, 107 → 112, 136 → 141 et 165 → 170 du modèle (figures 2 et 3). Si les fondations sont discontinues, elles ne constituent pas un obstacle complètement imperméable pour les écoulements de la nappe alluviale. Dans le modèle, des perméabilités équivalentes (Schneebeli, 1966) doivent être choisies dans les éléments fins concernés afin de tenir compte de l'imperméabilité totale des "plots" de fondation et de la perméabilité des sédiments alluviaux. Si on considère que 1/100 de la surface occupée par l'ilot Tivoli est laissée libre pour l'écoulement entre les fondations, on obtient une perméabilité équivalente de l'ordre de :

$$K_{eq} = \frac{1}{100} K_{\text{plaque alluviale}} + \frac{99}{100} K_{\text{solon}} \quad (7)$$

Dans notre cas, on aurait :

$$K_{eq} = 5.10^{-4} \text{ m/s}$$

Par le même raisonnement, une perméabilité équivalente de  $1.10^{-8}$  m/s correspondrait à une imperméabilité quasi-totale des fondations de l'ilot

Tivoli par rapport à la perméabilité des dépôts alluviaux de  $5.10^{-2}$  m/s.

#### 4.2.1 Calcul des remontées par rapport à une situation initiale sans pompage

Les conditions sont similaires aux passages décrits au paragraphe 4.1.1 avec une perméabilité équivalente du mur emboué à  $1.10^{-8}$  m/s. On y ajoute la modification de la perméabilité dans la zone de l'îlot Tivoli, prenant  $K_{eq} = 1.10^{-8}$  m/s dans cette zone. Les résultats obtenus montrent qu'une remontée additionnelle est quasi inexistante. Les passages avec des perméabilités équivalentes (de la zone Tivoli) supérieure à  $1.10^{-8}$  m/s fournissent évidemment des résultats encore moins marqués.

#### 4.2.2 Calcul des remontées par rapport à une situation avec pompages

Les conditions sont similaires aux passages décrits au paragraphe 4.1.2 avec une perméabilité équivalente du mur emboué prise à  $1.10^{-8}$  m/s. On y ajoute la modification de la perméabilité dans la zone de l'îlot Tivoli, avec  $K_{eq} = 1.10^{-8}$  m/s dans cette zone. Les résultats montrent une remontée supplémentaire nulle près de l'îlot Tivoli, ailleurs, l'influence des pompages serait même favorisée, expliquant des remontées plus faibles dans certaines zones.

Les résultats des passages avec des perméabilités équivalentes (de la zone Tivoli) supérieures à  $1.10^{-8}$  m/s sont encore moins marqués. Dans ces conditions, aucune remontée due spécifiquement aux fondations de l'îlot Tivoli n'est constatée au ST19.

#### 4.3. Simulations avec d'autres valeurs de la perméabilité de la nappe alluviale

Les remontées calculées, dans le cas de la situation initiale sans pompage et pour la situation avec pompages, sont très faibles de par la perméabilité très grande des dépôts alluviaux, obtenue par la calibration ( $K = 5.10^{-2}$  m/s). Afin de se situer du côté de la sécurité et donc en se fixant des conditions plus défavorables, des simulations ont été réalisées en divisant par 10 et par 100 les valeurs de la perméabilité de la nappe alluviale.

#### 4.3.1 Calcul des remontées par rapport à une situation initiale sans pompage

Les simulations sont réalisées avec les mêmes paramètres qu'au paragraphe 4.2.1 si ce n'est une perméabilité de la nappe alluviale divisée par 10 ( $K = 5.10^{-3}$  m/s) et puis par 100 ( $K = 5.10^{-4}$  m/s). Les résultats obtenus (figure 10) montrent que, dans ces dernières conditions notamment, les remontées seraient plus importantes, et surtout dans la zone proche de ST19.

#### 4.3.2 Calcul des remontées par rapport à une situation avec pompages

Les simulations sont réalisées avec les mêmes paramètres qu'au paragraphe 4.2.2 si ce n'est une perméabilité de la nappe alluviale divisée par 10 ( $K = 5.10^{-3}$  m/s) et puis par 100 ( $K = 5.10^{-4}$  m/s). Les résultats obtenus (figure 11) montrent que dans ces dernières conditions, les remontées seraient plus importantes, sauf dans la zone proche de ST138 fort influencée par le pompage.

### 5 CONCLUSIONS

Au total trente-six simulations ont été réalisées, dont 16 pour les besoins de la calibration du modèle, étape nécessaire pour que les résultats du modèle puissent être interprétés avec fiabilité.

De la piézométrie calibrée sur la situation ayant cours avec les pompages de chantier, on peut tirer une première constatation : les pompages de chantier ont induit un rabattement non négligeable (parfois de l'ordre de 5 m) de la nappe sous une grande partie du Palais des Princes Evêques. Les fondations de celui-ci ont donc été, sous la cote 64, désaturées totalement ou partiellement. Les simulations relatives à l'effet du mur emboué et des fondations de l'îlot Tivoli ont été menées en distinguant :

- une situation initiale avec ou sans pompages;
- des perméabilités équivalentes du mur de  $1.10^{-8}$  m/s à  $1.10^{-5}$  m/s;
- des perméabilités équivalentes des fondations Tivoli de  $1.10^{-8}$  m/s à  $1.10^{-5}$  m/s;
- des perméabilités de la nappe alluviale de  $5.10^{-4}$  à  $5.10^{-2}$  m/s.

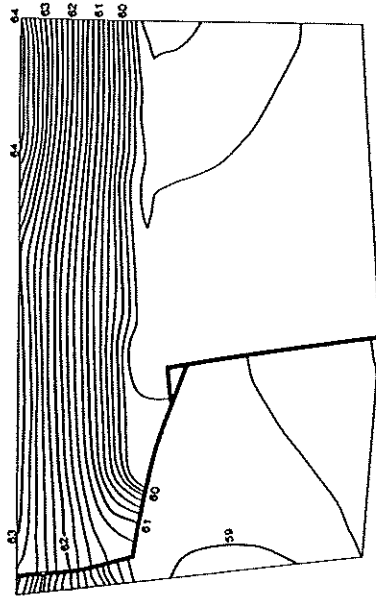


Fig. 8 Piézométrie calculée sans pompage et avec le mur emboué à  $K_{eq} = 1.10^{-7}$  m/s.



Fig. 9 Piézométrie calculée avec pompages et avec le mur emboué à  $K_{eq} = 1.10^{-7}$  m/s.

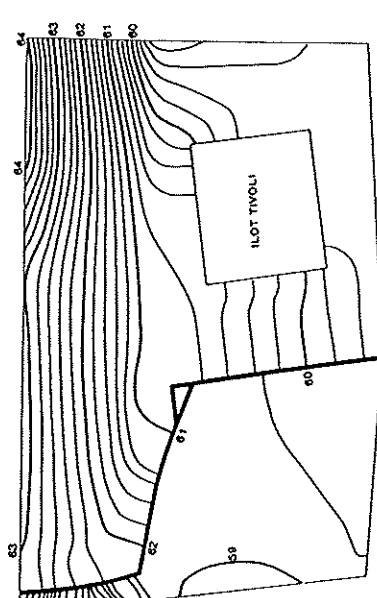


Fig. 10 Carte piézométrique calculée, sans pompage, avec le mur emboué et les fondations Tivoli à  $K_{eq} = 1.10^{-8}$  m/s, l'aquifère alluvial avec une perméabilité de  $K = 5.10^{-4}$  m/s

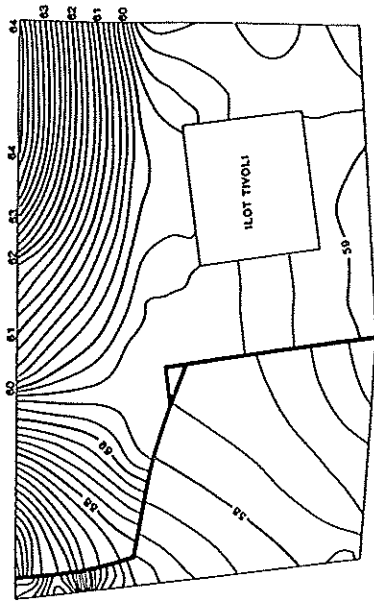


Fig. 11 Carte piézométrique calculée, avec le mur emboué et les fondations Tivoli à  $K_{eq} = 1.10^{-8}$  m/s, l'aquifère alluvial avec une perméabilité de  $K = 5.10^{-4}$  m/s

Sur base des résultats décrits ci-dessus, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- les remontées de la nappe alluviale induites par l'implantation du mur emboué et les fondations de l'Ilot Tivoli sont peu importantes. Sans pompage, elles pourraient atteindre un maximum d'environ 1.5 m dans les endroits les moins perméables de la nappe. A ces valeurs maxima correspondraient des hauteurs piézométriques d'environ 62.5 m au ST138 et 60.85 m au ST19. Dans ces conditions, il serait souhaitable de rendre drainant l'égout traversant la place St. Lambert.

- l'effet séparé des fondations peu perméables ou imperméables de l'Ilot Tivoli est négligeable pour les conditions dans lesquelles le calcul a été réalisé (perméabilité importante de la nappe alluviale). Néanmoins, tout ouvrage qui tendrait à "impermeabiliser" de quelconque façon que ce soit la zone située entre l'Ilot Tivoli et le mur emboué doit être proscrit ou tout au moins étudié avec soin. Des calculs supplémentaires simulant l'obstruction de ce passage important indiqueraient inévitablement une nette remontée des niveaux piézométriques en amont.

Bien que ne disposant que de peu de données, les exercices de simulations réalisés dans le cadre de cette étude ont permis indubitablement de mettre en évidence les facteurs réellement importants pour le problème posé. Les résultats des simulations réalisées pour des intervalles importants dans les valeurs des paramètres principaux, permettent cette analyse.

#### REMERCIEMENTS

Tous nos remerciements vont à la société IBM Belgium S.A. pour le soutien qu'elle nous accorde actuellement au niveau des équipements informatiques.

#### REFERENCES

- Bear, J. & Vermijit, A. 1987. *Modeling groundwater flow and pollution*. Reidel, 414 p.
- Dassargues, A. 1991b. *Paramétrisation et simulation des réservoirs souterrains: Couplages et non linéarités*. PhD Thesis in Applied Sciences, University of Liege, unpublished
- Monjoie A. & Calembert L. 1975. Ouvrages souterrains de la place St Lambert. Rapport STIL, non publié, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège.
- Schneebeil, G. 1966. *Hydraulique souterraine*. Eyrolles. Collection du centre de recherches et d'essais de Chatou. 357p.