

L'incidence d'une crue sur un ouvrage routier enterré

La modélisation numérique : outil d'aide à la décision pendant les travaux

Jean-Pierre BIDAULT
Jean-Pierre GIGAN

Groupe Géologie-mécanique des sols
Laboratoire régional de l'Est parisien

Pascal VIENNOT

Centre d'informatique géologique
ARMINES - École des mines de Paris

RÉSUMÉ

L'article présente plusieurs applications d'une modélisation numérique de l'écoulement d'une nappe alluviale.

Le modèle plan prend en compte les caractéristiques de transmissivité de l'aquifère, déterminées par des essais de perméabilité et de pompage, ainsi que l'effet de puits d'alimentation en eau potable déprimant fortement la nappe. Les conditions d'échanges entre le fleuve et la nappe sont exprimées au moyen de coefficients de transfert dont les valeurs ont été calées en régime transitoire à partir de l'analyse des fluctuations piézométriques.

Le modèle a permis, dans un premier temps, d'analyser l'impact d'une tranchée routière sur les conditions d'exploitation de la nappe, dans un deuxième temps d'évaluer les possibilités d'écrêtage par pompage d'une remontée de la nappe en période de crue, enfin, par une analyse à rebours, de confirmer l'efficacité des dispositions adoptées en cours de travaux.

MOTS CLÉS : 42 - Inondation - Tranchée couverte - Route en tranchée - Fleuve - Zone urbaine - Modèle numérique - Essai - Écoulement (fluide) - Nappe aquifère - Caractéristiques - Perméabilité - Pompage - Étude d'impact.

Introduction

Le projet de réalisation de la déviation de la route nationale 13 à Rueil-Malmaison a nécessité le creusement d'une tranchée couverte de près de 1 000 m de longueur dans un secteur fortement urbanisé.

Ce projet s'inscrit dans la plaine alluviale de la Seine, à une distance comprise entre 150 et 450 m du bras gauche du fleuve (fig. 1).

Au nord, il franchit en souterrain la ligne Paris-Saint-Germain du réseau express régional puis longe les immeubles de la résidence Bellerive, où il atteint la profondeur maximale de 8 m et se poursuit ensuite en tranchée dans une zone pavillonnaire.

En coupe transversale, l'ouvrage comporte deux chaussées de trois voies de circulation, ce qui représente une largeur totale de 32 mètres.

Le contexte géologique et hydrogéologique (fig. 2)

Les reconnaissances géologiques, engagées en 1987, ont mis en évidence une structure très régulière des couches de sols.

Depuis le terrain naturel, situé entre + 26 et + 27 m NGF, on rencontre sur quelques mètres des remblais et alluvions limoneuses, puis les alluvions sablo-graveleuses dont la puissance atteint 6 à 8 mètres.

Le substratum est constitué par la craie campanienne, dont la surface d'érosion quasi-horizontale se situe entre + 15 et + 16 m NGF.

L'analyse de l'hydrogéologie du site s'avère plus complexe.

Alors que la cote de retenue normale de la Seine est de 20,60 m NGF (bief de Bougival, à l'aval du barrage de Chatou), le niveau piézométrique actuel de la nappe se situe vers la cote 15 - 15,5 m NGF hors période de crue.

Cette forte dépression s'explique par les importants pompages d'eau potable effectués depuis 1948 par la SLEE (Société Lyonnaise des eaux et de l'éclairage) dans ses champs captants de la boucle de Croissy, à une distance comprise entre 2,5 et 4 km du projet.

Ces prélèvements effectués dans la nappe de la craie ont atteint en moyenne 45 millions de m³ au cours des quinze dernières années et sont en partie compensés depuis 1971 par une réinjection d'eau de Seine dans la craie à partir de bassins d'infiltration. Ces réinjections ont permis de stabiliser le niveau de la nappe, qui avait atteint une cote minimale de 11 m NGF en 1976.

La transmissivité de l'aquifère a été déterminée à partir d'un essai de pompage réalisé au droit de la tranchée, puis d'un pompage à fort débit (40 000 m³ en 24 h) réalisé dans un puits de la SLEE situé à quelques centaines de mètres du tracé.

Les résultats conduisent à une transmissivité moyenne de l'aquifère de 1 à 2.10⁻¹ m²/s, ce qui correspond à une perméabilité moyenne de 0,5 à 1.10⁻² m/s en considérant une épaisseur de 20 m de la craie supérieure fortement fissurée, confirmée par des essais au micromoulinet réalisés pendant le pompage.

Compte tenu des très forts débits à attendre d'un rabattement même limité du niveau de la nappe, le profil de la tranchée a été calé le plus haut possible, de manière à permettre une réalisation des terrassements à sec.

En outre, l'éventualité d'une réduction ou suspension des pompages doit être envisagée à long terme. Dans ce cas, le niveau de la nappe rejoindrait le niveau de la Seine, soit environ 20 m NGF et il en suivrait les fluctuations.

Pour mettre l'ouvrage hors d'eau et compenser les sous-pressions, la tranchée comporte donc un radier ancré par micropieux. Ceux-ci sont calculés pour l'hypothèse d'une crue centennale, soit un niveau de nappe à + 26,50 m NGF.

La première modélisation - L'impact de la tranchée sur les conditions d'exploitation de la nappe

Bien que non exploité actuellement, le champ captant des Martinets à Rueil constitue pour la SLEE un dispositif de secours ou d'appoint éventuel.

La réalisation des parois moulées de la tranchée jusqu'à la cote 5 m NGF dans le périmètre de protection rapprochée pouvait laisser craindre une diminution des performances du champ captant (l'un des six puits de pompage se trouvait même sur le tracé de la déviation).

Au stade des études, une modélisation numérique a été entreprise en 1988 afin d'apprécier les perturbations de la surface de rabattement créées par la présence de la tranchée dans l'hypothèse d'un pompage permanent d'un débit de 40 000 m³/jour.

Le détail de cette étude en modèle plan, utilisant un modèle préexistant sur la boucle de Croissy, ne sera pas donné ici.

On indiquera toutefois qu'un premier ajustement du modèle en régime transitoire sur l'essai de pompage de 24 h a permis de caler les principales caractéristiques de l'aquifère.

En faisant l'hypothèse très pessimiste d'une coupure totale de l'aquifère par les parois sur une longueur de 850 m, le supplément de rabattement au niveau des puits atteignait 0,80 m au bout d'un mois.

Il était inférieur à 0,10 m dans le cas d'une coupure partielle, ce qui montrait que l'impact de la tranchée restait d'amplitude très modeste en cas d'exploitation prolongée du champ captant.

L'analyse de l'effet des crues - Les dispositions retenues pour le projet

Aucune crue importante de la Seine ne s'est produite de 1988 à 1993, période des reconnaissances et de suivi du niveau de la nappe. Pour pouvoir apprécier correctement l'incidence d'une crue et en déduire les dispositions constructives à prévoir, il a heureusement été possible de se référer aux relevés piézométriques effectués par la SLEE depuis 1967 et qui ont été superposés aux limnigrammes enregistrés au pont de Chatou.

Il en ressort que les faibles crues de la Seine, inférieures aux crues quinquennales, soit environ 24,5 m NGF, n'entraînent qu'une remontée de quelques décimètres du niveau de la nappe, probablement en raison d'un colmatage des berges.

Quatre crues de Seine ont dépassé la cote + 25,00 m NGF depuis 1955, la dernière remontant à janvier 1982, avec un niveau de + 25,70 m NGF, devant correspondre approximativement à la crue décennale.

Avec un décalage de l'ordre d'un mois la nappe a atteint la cote maximale de 20,10 m NGF, et est restée au-dessus de la cote 18 m NGF jusqu'en septembre 1982, soit pendant huit mois.

Compte tenu de la forte perméabilité des terrains, il n'était pas envisageable de maintenir hors d'eau la plate-forme de terrassement par un rabattement de nappe, dans le cas d'une crue de cette importance.

La maîtrise d'œuvre se trouvait donc confrontée au choix difficile suivant :

- soit se prémunir pendant les travaux vis-à-vis d'une crue décennale, ce qui occasionnait nécessairement des travaux coûteux, par exemple la réalisation d'un écran horizontal injecté dans la craie ;
- soit prendre le risque de ne pas rencontrer une trop forte crue de Seine durant les travaux, tenter d'aménager les plannings pour ne pas avoir à réaliser les terrassements profonds et les radiers durant les quatre à cinq mois critiques et au pire prévoir de noyer temporairement la tranchée.

Cette deuxième option a finalement été retenue. Par référence aux relevés effectués sur les crues des dernières années, la valeur de calcul du niveau de nappe en phase travaux a été fixée à + 16,5 m NGF, compatible avec une réalisation à sec de l'ensemble des travaux.

Le déroulement des travaux et le suivi de la nappe en 1994

Les travaux de la tranchée couverte de Rueil ont démarré fin 1993 :

- perforation des parois moulées de janvier 1994 à juin 1994,
- réalisation de la dalle de couverture jusqu'en juin 1995.

Les terrassements en taube étaient alors prévus, précédant la réalisation des micropieux d'ancrage, puis le coulage du radier.

Un suivi piézométrique discontinu de la nappe a été réalisé pendant cette période.

La figure 3 reproduit les fluctuations de la Seine et l'un des suivis piézométriques du site durant l'hiver 1993 - 1994 (Martinet 2).

La crue de janvier 1994, nettement plus importante que celle des années précédentes peut être qualifiée de crue quinquennale.

Vingt jours après le pic de la crue, le niveau de la nappe a atteint la cote maximale de 18 m NGF et le niveau d'étiage n'a été rejoint qu'en octobre. L'abaissement moyen a été de 0,30 m/mois.

Ainsi, pendant plus de six mois, la cote de référence travaux a été dépassée, ce qui n'était pas de nature à rendre optimiste la maîtrise d'œuvre et les entreprises pour le déroulement des travaux de l'hiver suivant !

C'est alors qu'est apparu l'intérêt de pouvoir écrêter le niveau de la nappe lors d'une crue

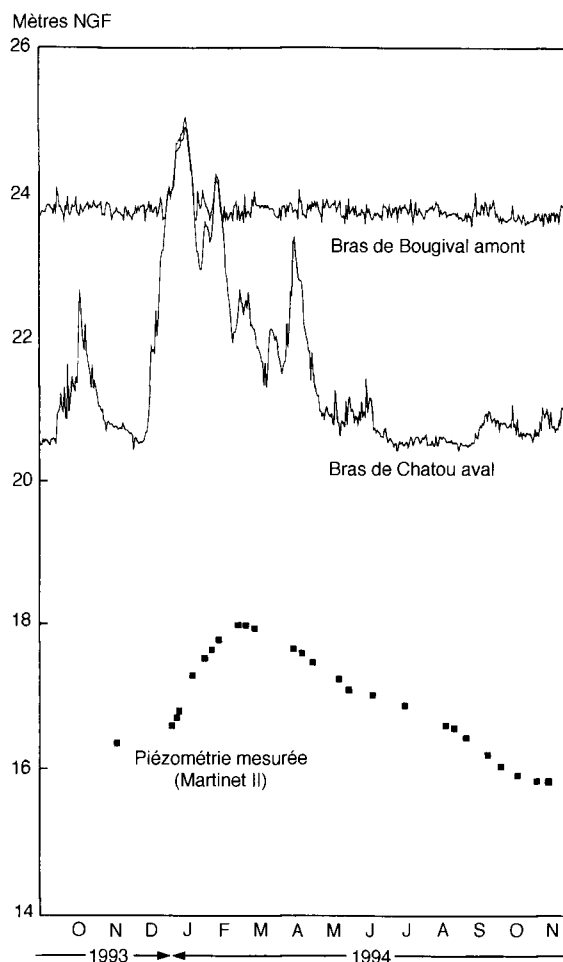


Fig. 3 - Fluctuations des niveaux de Seine et de la nappe pendant l'hiver 1993-1994.

moyenne en mettant en place un réseau de puits de pompages, actionnés dès l'amorce d'une montée significative du niveau de la Seine.

Afin d'étudier l'efficacité d'un tel dispositif, il a été décidé de réactiver le modèle numérique utilisé en 1988, en ajustant les paramètres hydrodynamiques par un calage sur les relevés piézométriques de la période 1990 - 1994 et principalement de la crue de 1994.

Cette étude a été confiée au Centre d'informatique géologique de l'École des mines de Paris, déjà auteur de la première modélisation.

Modélisation prévisionnelle de l'efficacité des pompages en situation de crue

Mise en place du modèle

Le modèle numérique utilisé est le modèle NEWSAM mis au point et développé au Centre d'informatique géologique de l'École des mines de Paris.

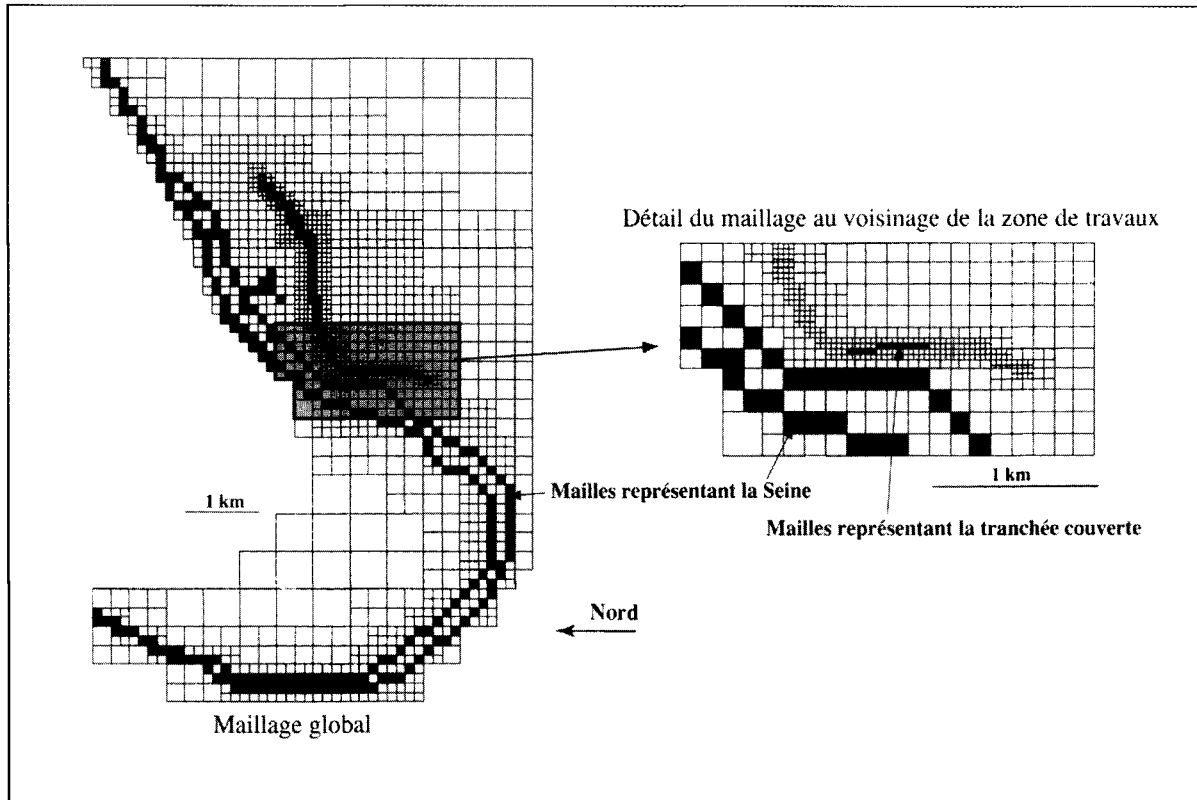


Fig. 4 - Maillage du modèle.

Ce programme résout l'équation de la diffusivité à deux dimensions caractérisant l'écoulement par la méthode des différences finies sur un maillage de type gogone.

Ce modèle permet la simulation numérique de l'écoulement de l'aquifère mais également le calcul en régime transitoire de l'évolution des niveaux piézométriques de la nappe sous l'effet d'une sollicitation hydraulique imposée (variations du niveau de la Seine, mise en œuvre de pompes).

La figure 4 présente le maillage utilisé dans son extension maximale (2071 mailles de taille variant de 500 m à 31,25 m de côté), ainsi que le détail de ce maillage au niveau de la zone de travaux.

Calage du modèle

Calées par les études antérieures, les transmissivités de la nappe de la craie varient sur l'ensemble du domaine entre $8 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ et $1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. Elles ont été ajustées à $2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ au niveau de la commune de Rueil-Malmaison.

Le coefficient de transfert nappe-Seine T_p fixe le débit échangé en chaque maille parcourue par le fleuve selon la relation suivante :

$$Q = T_p (H_0 - H)$$

H_0 : cote de drainage imposé par le niveau de Seine

H : niveau piézométrique calculé dans la maille

Ce coefficient très important, car il représente le moteur des variations piézométriques engendrées par une crue, est mal connu. Il a été déterminé par des calculs de calage du modèle en régime transitoire par pas de temps de dix jours, de manière à reproduire au mieux les fluctuations d'un piézomètre de référence.

Il a ainsi été nécessaire d'imposer un coefficient de transfert variable avec la hauteur d'eau dans le bras de Seine situé à l'aval du barrage de Chatou.

Ce coefficient varie de $2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ à $8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

La figure 5 présente l'évolution piézométrique calculée au pas de temps journalier du 12 septembre 1993 au 25 novembre 1994.

Le calage est satisfaisant à l'exception d'une bosse sur la courbe de descente entre juin et septembre qui n'a pu être expliquée par des variations de niveau de la Seine. Bien que ne disposant pas de données précises concernant l'exploitation de la nappe sur cette période, des simulations effectuées en stoppant artificiellement certains forages n'ont pas permis de reproduire cette courbe de diminution de la piézométrie.

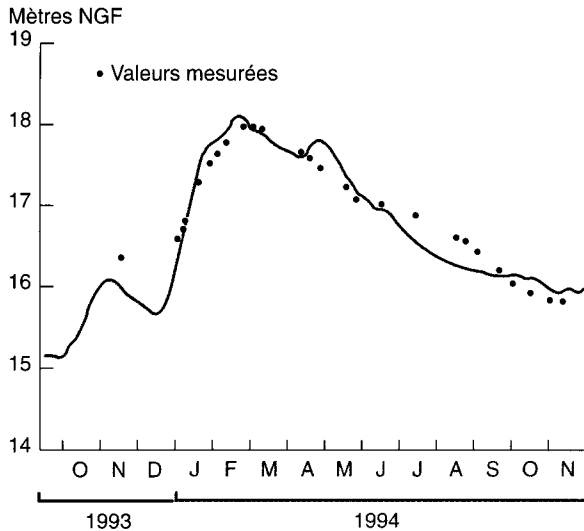


Fig. 5 - Niveaux piézométriques mesurés (•) et calculés pendant l'hiver 1993-1994.

Simulations prospectives de crues - Effet de pompages

Plusieurs types de crues ont été introduits dans la modélisation, correspondant à différentes cotes maximales, durées de palier et vitesses de décrue. La figure 6 présente l'un de ces cas de calcul, le niveau maximum de crue variant de 22 à 25 m NGF.

Sur cet exemple, on peut constater que le niveau de la nappe reste inférieur à la cote 16,8 m NGF pour une crue de cote maximale 22 m NGF.

Sur ces mêmes profils de crue a ensuite été testée l'efficacité de la mise en place de trois

puits de pompage répartis le long de la tranchée et débitant chacun 100 m³/heure (fig. 7a et 7b).

En supposant un démarrage des pompages dix jours avant l'atteinte du palier pour le profil étudié, on vérifie que le niveau contractuel de 16,5 m NGF peut être respecté pour une crue avec palier à 24 m NGF mais est dépassé de 0,40 m pour une crue à 25 m NGF.

Dans les deux cas, les pompages doivent être maintenus pendant une durée minimale de trois mois.

La même simulation de l'efficacité de pompage a été effectuée pour le profil de la crue de 1994 (fig. 8). L'objectif d'un maintien du niveau de nappe en dessous de 16,5 m NGF pour ces conditions de pompage n'est pas atteint. Le maintien du niveau de nappe à moins de 17 m NGF aurait nécessité de démarrer les pompages au 1^{er} janvier alors que la Seine n'avait pas dépassé la cote 24 m NGF (cf. profil de la fig. 3).

Les conclusions de ces diverses simulations réalisées au cours du dernier trimestre 1994 étaient donc qu'il était possible de maintenir la nappe à un niveau acceptable permettant la poursuite des travaux pour des crues d'une importance inférieure ou égale à celle de 1994. Il était alors proposé la mise en œuvre de trois puits de pompage d'un débit unitaire de 100 à 200 m³/h répartis le long du tracé de la tranchée couverte. L'attention était attirée sur la nécessité de mettre en œuvre ces puits dès que possible et surtout avant que la crue n'ait atteint un niveau trop élevé.

Figure 6 - Simulation numérique de l'influence de crues d'amplitudes variables.

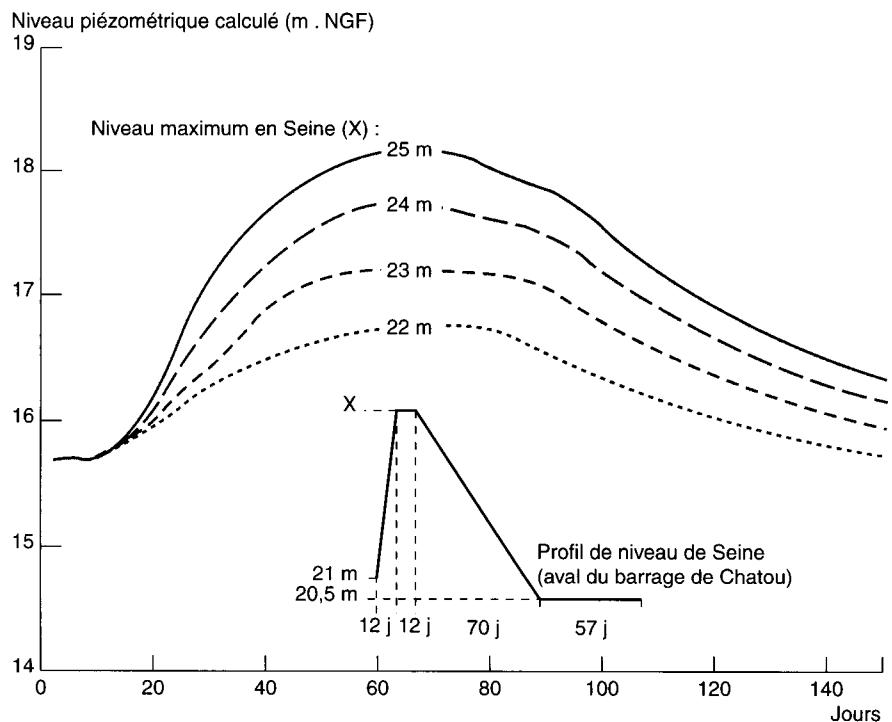
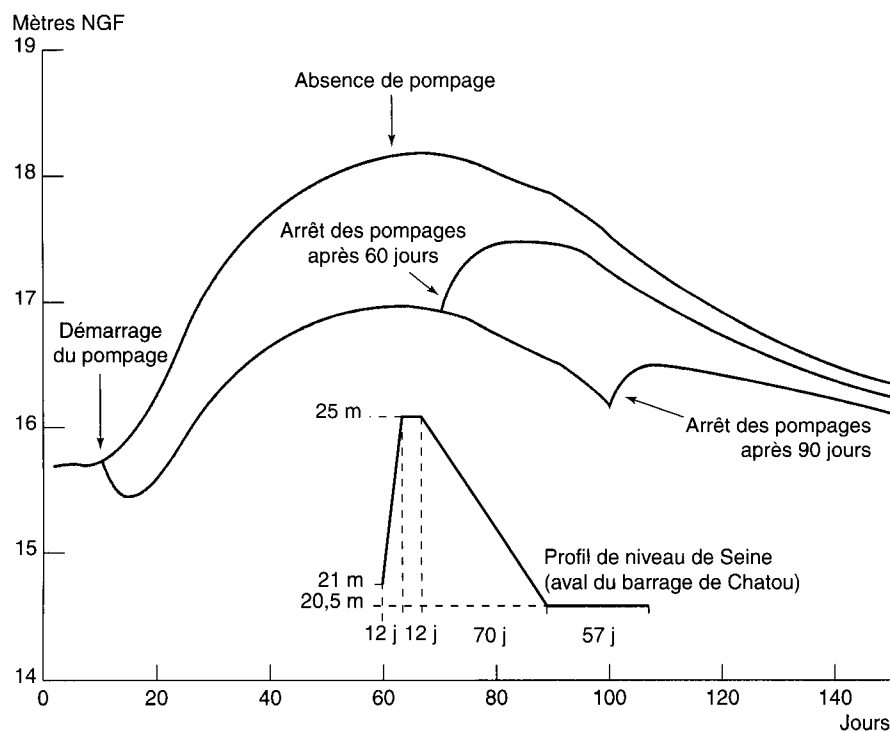
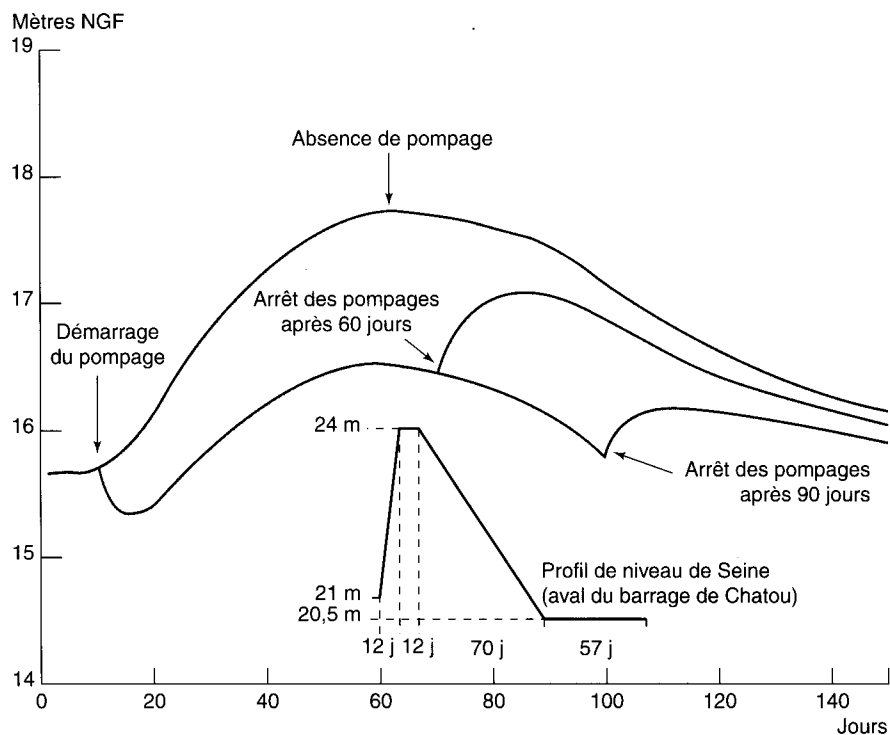


Fig. 7 - Simulation numérique de l'influence de pompages pour des crues de cote maximale + 24 et + 25 NGF



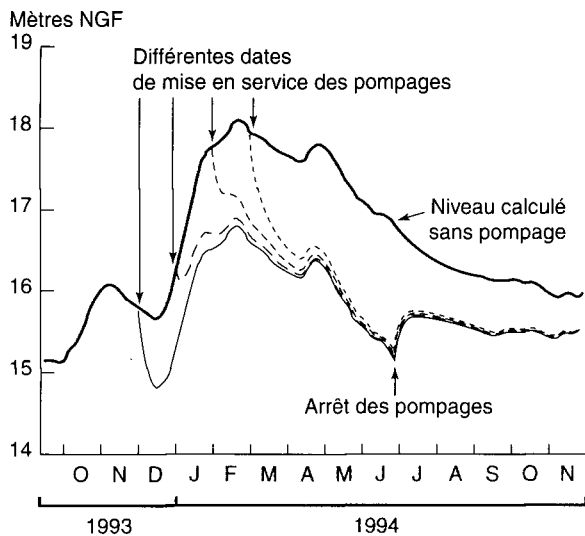


Fig. 8

Fig. 8 - Influence de la date de mise en service des pompages.

Fig. 9 - Fluctuations de la Seine (bras de Chatou aval) et de la nappe durant l'hiver 1994-1995 (à comparer avec la figure,3 pour l'hiver 1993-1994).

Fig. 10 - Implantation des puits et piézomètres.

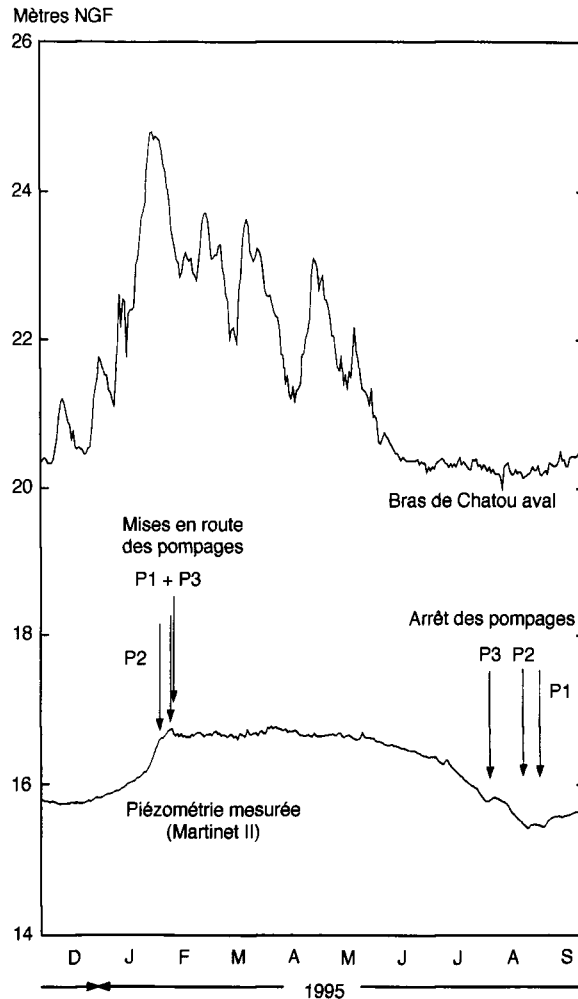


Fig. 9

La crue de 1995

Suivi en continu de la piézométrie

Pour assurer un suivi en continu de la nappe, la mise en place d'enregistreurs a été décidée mi-1994.

Deux forages ont ainsi été équipés de centrales d'acquisition MADOSOLO, commercialisées par la société IRIS Instruments. Les mesures des niveaux de nappe obtenus par capteurs de pression piézo-résistifs, sont effectuées au pas fixe de 24 heures.

Caractéristiques de la crue de 1995 (fig. 9)

La crue de début 1995 s'est avérée d'amplitude équivalente mais de durée plus longue que celle de 1994. Démarrant plus lentement que l'année précédente, elle a atteint une cote maximale de

25,20 m NGF. Le niveau de la Seine n'est redescendu en dessous de 22 m NGF qu'au mois de mai (fig. 9).

En décembre 1994, les terrassements généraux de la tranchée étaient terminés, le fond de forme étant protégé par un béton de propreté et la réalisation des micropieux d'ancrage du radier démarrait.

Il fallait donc agir rapidement !

La décision de réaliser les puits de pompage a été prise le 1^{er} février par la maîtrise d'œuvre en concertation avec les entreprises. Répartis le long du tracé (fig. 10), ces puits ont été mis en service respectivement les 4 - 14 et 15 février, le débit global de pompage atteignant alors 523 m³/h.

La figure 11 fournit la coupe de l'un de ces puits.

L'évolution de la nappe a été enregistrée sur les deux piézomètres Martinets 2 et Acacias (fig. 9). On constate que si le niveau de 16,50 m NGF n'a

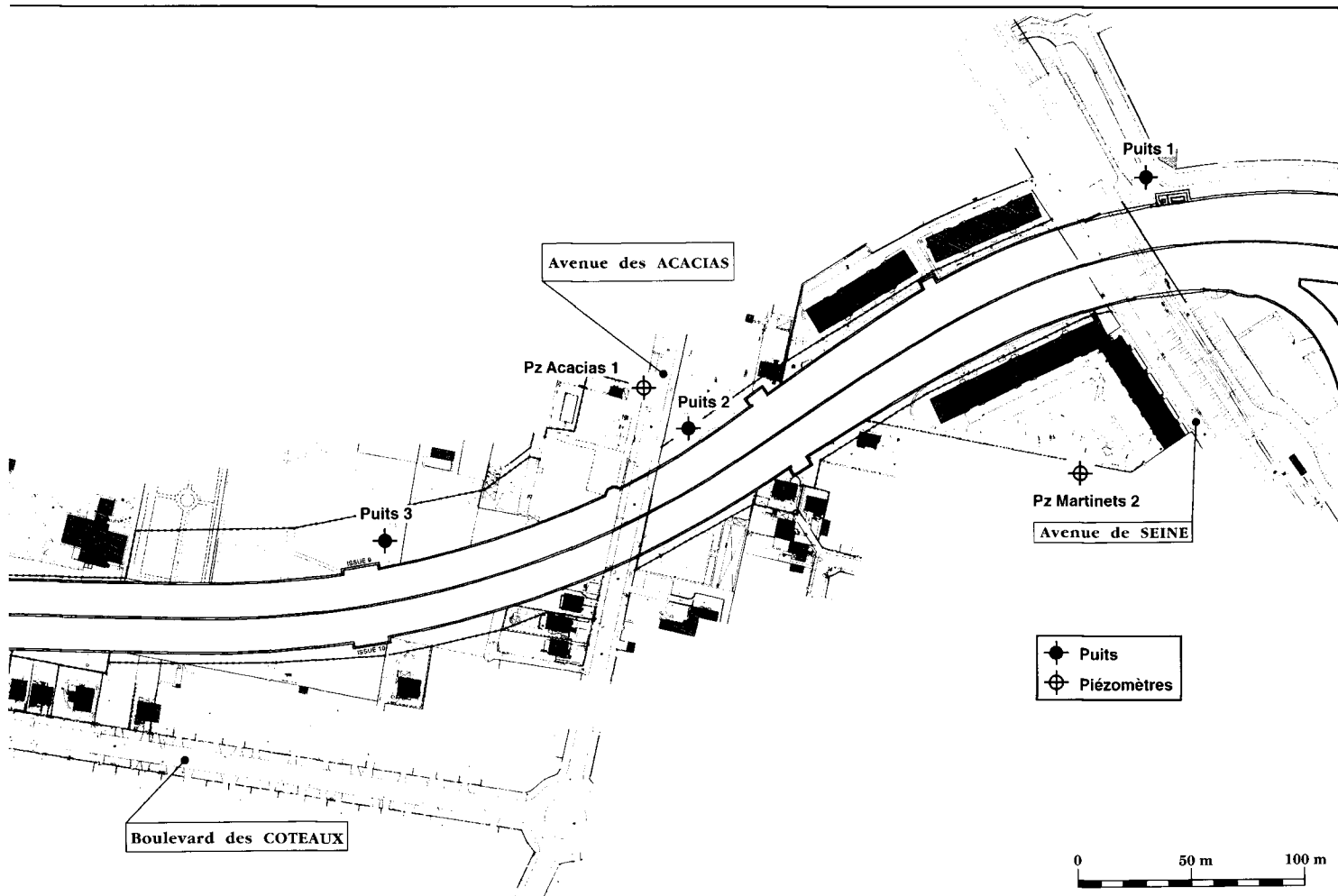


Fig. 10

pu être respecté sur l'ensemble du site, la nappe a pu être maintenue en permanence en dessous de 16,80 m NGF et les travaux n'ont subi aucune interruption, ce qui était l'objectif recherché. On notera cependant que les pompages ont dû être maintenus jusqu'en juillet et août 1995 pour écrêter convenablement le niveau de la nappe.

L'analyse à rebours

Une simulation de l'effet de la crue de janvier 1995 a été effectuée *a posteriori*. La figure 12 présente les résultats obtenus, en présence ou non des pompages, comparés à la piézométrie réellement mesurée.

On vérifie que le calcul représente globalement bien l'évolution de la piézométrie, excepté en phase de crue proprement dite (fin janvier - début février) et en phase (un peu plus longue) de début d'étiage. Ce phénomène avait déjà été

rencontré lors de la simulation de la crue de février 1994 et pendant la période de juillet, août, septembre de la même année. Ces deux phénomènes restent inexplicables à ce jour et leur compréhension nécessiterait une étude beaucoup plus lourde à mettre en œuvre (affinement de la liaison avec la nappe des alluvions au nord de la zone, précision des perméabilités, meilleures connaissances de l'évolution dans le temps des échanges nappe-rivière).

L'étude montre qu'en l'absence de pompage, le niveau de la nappe aurait atteint et dépassé la cote 18 m NGF de mars à mai, soit pendant plus de trois mois, ce qui aurait retardé les travaux de construction du radier de l'ouvrage, entraînant une immobilisation totale du chantier en raison des terrassements en taupe, ceux-ci ne pouvant être repris avant le mois d'août, une fois le niveau piézométrique redescendu en dessous de 17 m NGF.

Fig. 11 - Coupe et équipement de l'un des puits de pompage.

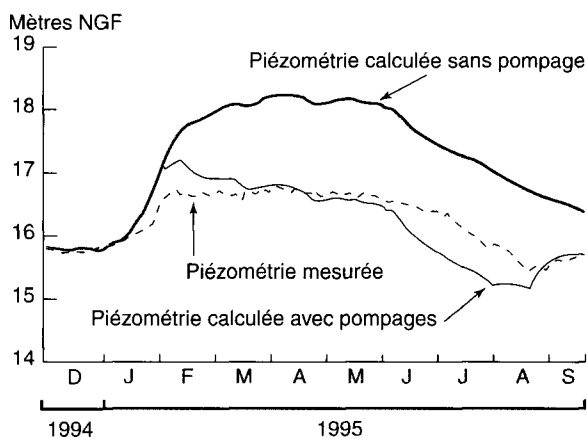
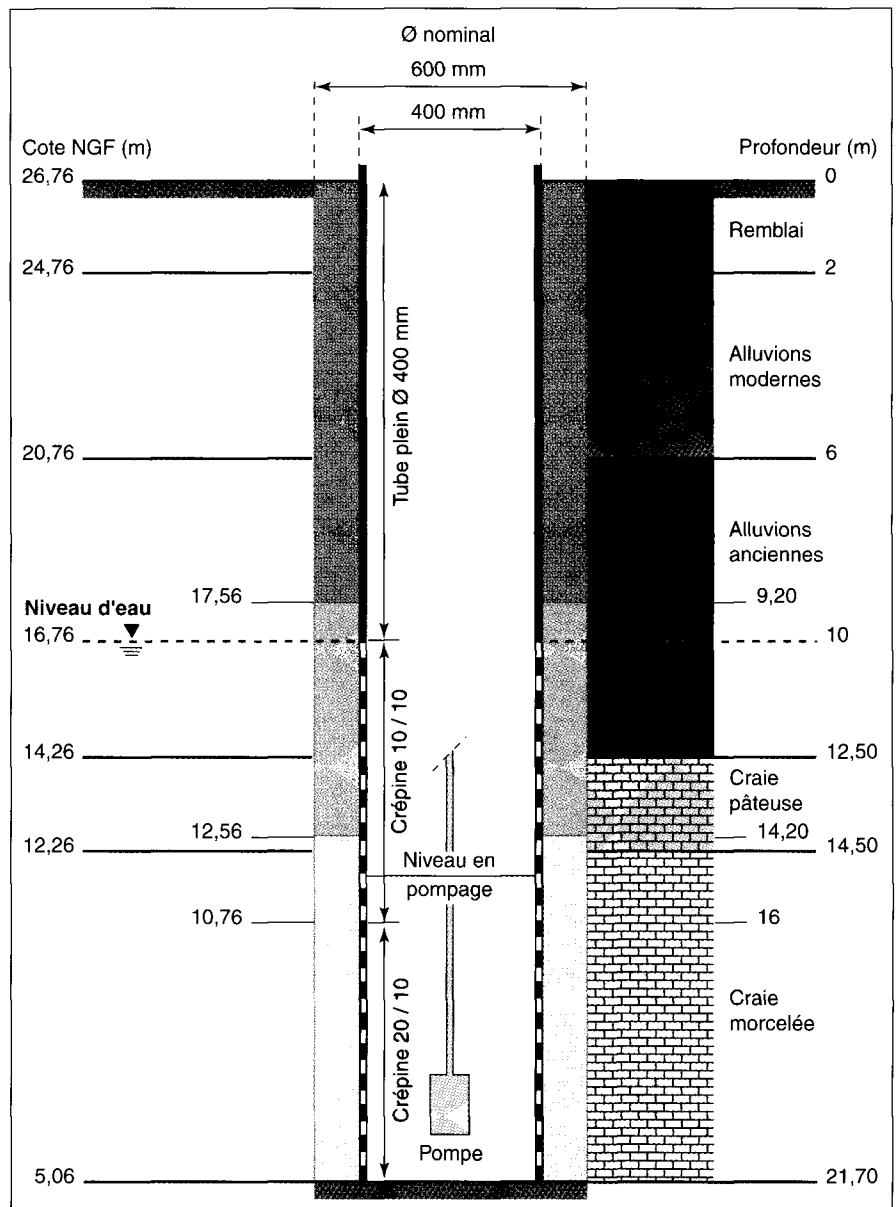


Fig. 12 - Simulation numérique a posteriori de la crue de 1994-1995. Calcul du niveau piézométrique en l'absence de pompages.

Conclusion

Cette étude a montré l'intérêt que pouvait apporter une modélisation numérique pour analyser les interactions existant entre les fluctuations du niveau d'un fleuve et celui d'une nappe alluviale.

Les données du problème s'avéraient pourtant au départ relativement complexes du fait de l'existence de pompages industriels à fort débit déprimant la nappe de plusieurs mètres, et par ailleurs d'une connaissance imprécise des conditions d'échange entre le fleuve et la nappe au niveau des berges.

Par contre, des suivis piézométriques réalisés depuis plus de vingt ans sur le site apportaient

des informations statistiques intéressantes sur les réactions de la nappe à la propagation d'une onde de crue.

Un paramètre essentiel de l'étude était la valeur de la transmissivité de la nappe qui avait été appréciée principalement par un essai de pompage réalisé dans l'un des puits d'exploitation.

Si dans le voisinage du puits, la valeur mesurée a été conservée dans le modèle, des ajustements ultérieurs ont nécessité de réduire la transmissivité à la périphérie du maillage. On peut expliquer ces différences de répartition spatiale des transmissivités à la fois par l'hétérogénéité naturelle de la fissuration de la craie et également par le fait que l'exploitation des puits, bien qu'arrêtée actuellement, a pu provoquer un décolmatage des fissures et augmenter localement la perméabilité de l'aquifère.

Malgré ces incertitudes qui pouvaient avoir des conséquences directes sur les prévisions de débits, les puits de rabattement, réalisés dans de bonnes conditions techniques, ont permis de rabattre le niveau de la nappe selon les objectifs prévus.

La mise en place depuis mi-1994 d'un enregistrement continu du niveau d'eau dans deux piézomètres a facilité un contrôle permanent du bon fonctionnement du dispositif.

Disposant ainsi de la modélisation préalable de divers scénarios ainsi que d'une information en temps réel de l'évolution du niveau du fleuve et de celui de la nappe, le maître d'œuvre a pu prendre les décisions de conduite du chantier en disposant d'un maximum d'éléments d'appréciation. L'enjeu de pouvoir mener les travaux selon le planning prévu a permis de sensibiliser efficacement les entreprises, en particulier pour une mise en service rapide du système de rabattement.

Cette expérience montre qu'une modélisation numérique, dont on souligne souvent le caractère théorique, peut constituer un outil concret d'aide à la décision pour la conduite d'un chantier d'ouvrage enterré dans un contexte sensible.

L'économie apportée par les dispositions adoptées pour éviter un arrêt de travaux peut être estimée entre 6 et 8 MF, le coût de réalisation et de maintenance du dispositif de pompage se montant à environ 1,4 MF.

ABSTRACT

The effect of flooding on an underground highway structure Digital modelling: a decision-making aid tool for use during works

J-P BIDAULT - J-P GIGAN - P. VIENNOT

This paper describes several applications of a digital flow model for an alluvial water table.

The plane model takes account of the transmissivity of the aquifer, as established by permeability and pumping tests and also the pronounced depression of the water table resulting from the presence of drinking water wells. The conditions of exchange between the river and the water table have been expressed by transfer coefficients whose values have been calibrated in a non-steady state on the basis of piezometric fluctuations.

Initially, the model has made it possible to analyze the impact of a road cutting on the functioning of the water table and then to evaluate the feasibility of using pumping to maintain the water table at a steady level during flood conditions. Finally, reverse analysis has allowed us to verify the effectiveness of the measures which have been taken during works.