



HAL
open science

Un système d'aide à la gestion des ressources en eaux souterraines. Application au site de Bordeaux.

Dominique Thiéry, Jean Schwartz, Jacques Berge, Farrokh Fotoohi, Kiriakos Konstantopedos, Marc Lambert

► **To cite this version:**

Dominique Thiéry, Jean Schwartz, Jacques Berge, Farrokh Fotoohi, Kiriakos Konstantopedos, et al..
Un système d'aide à la gestion des ressources en eaux souterraines. Application au site de Bordeaux..
Hydrogéologie, 1995, 1, pp.129-139. hal-01062487

HAL Id: hal-01062487

<https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-01062487>

Submitted on 9 Sep 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Un système d'aide à la gestion des ressources en eaux souterraines. Application au site de Bordeaux

Dominique THIERY ⁽¹⁾
Jean SCHWARTZ ⁽²⁾
Jacques BERGE ⁽³⁾
Farrokh FOTOOHI ⁽⁴⁾
Kiriakos KONSTANTOPELOS ⁽⁴⁾
Marc LAMBERT ⁽⁵⁾

A system for assisting in the management of groundwater resources - Application to the site of Bordeaux.

Hydrogéologie, n° 1, 1995, pp. 129-139, 9 fig., 6 tabl.

Mots-clés : Gestion ressource eau, Nappe eau, Optimisation, Captage eau, Gironde.

Key-words: Water management, Aquifers, Optimization, Water harvesting, Gironde.

Résumé

L'intégration d'une gestion des nappes d'eau souterraine dans un service de production et de distribution d'eau consiste à déterminer les stratégies de prélèvements optimales en accord avec les contraintes et objectifs liés à la ressource. Pour déterminer ces stratégies la démarche consiste à calculer, avec un modèle hydrodynamique, les coefficients d'influence de tous les captages existants sur tous les niveaux piézométriques sensibles. Le coefficient d'influence d'un captage sur un point d'observation est la réponse en ce point, en régime transitoire, d'un échelon unitaire d'augmentation du prélèvement. Il est ainsi possible, en appliquant le théorème de superposition, de calculer l'influence de n'importe quel scénario d'exploitation par une simple convolution des coefficients d'influence.

Pour mettre en oeuvre cette méthode, un logiciel d'optimisation sous contraintes travaillant sur les coefficients d'influence extraits d'un modèle hydrodynamique, a été mis au point : le

logiciel CAPUCINE. Ce logiciel permet d'optimiser une fonction critère – somme des débits pompés ou coût d'exploitation par exemple – sous différentes contraintes exprimées en termes de charges ou de débits à respecter, ponctuellement ou par zone géographique. L'originalité du logiciel est d'intégrer directement les diamètres des forages et les pertes de charge singulières dans les ouvrages, ce qui est indispensable. L'influence du diamètre et des pertes de charge n'étant pas linéaire, le logiciel procède de manière itérative à une série d'optimisations linéaires successives pour obtenir le scénario optimal.

Cette méthode a été appliquée au système aquifère de Bordeaux dont 4 formations (Miocène, Oligocène, Eocène et Crétacé supérieur) ont été modélisées avec des mailles de 500 m de côté pour représenter le champ captant de la Communauté Urbaine de Bordeaux. Après détermination des pertes de charge dans les ouvrages et des coefficients d'influence, des optimisations de prélèvements ont été réalisées à titre de démonstration.

Un système de gestion a alors été développé sur ce site : le système GRENAT (Gestion des Ressources en Eau des Nappes Aquifères en Transitoire). Ce système intègre les coefficients d'influence et le logiciel d'optimisation. Il est destiné aux exploitants et fournit une solution technique adéquate pour la détermination des consignes d'exploitation.

Le système de gestion appliqué à ce site est en cours de validation et devrait être opérationnel en 1995.

Extended abstract

Integration of groundwater management into a service that produces and distributes water, helps in determining a strategy for optimum abstraction that is in harmony with the constraints and objectives related to the resource. The constraints in this case are mainly defined by technical and conservation parameters, the first being related to the movements of the water levels in a pumped borehole, e.g. the fact that screens

(1) BRGM, Direction de la Recherche/Dépt. HYT, BP 6009, 45060 Orléans Cedex 2, France.

(2) ANTEA, Direction Opérationnelle EAU, BP 6119, 45061 Orléans Cedex 2, France.

(3) Lyonnaise des Eaux-Dumez, Direction Régionale Aquitaine, Bordeaux, France.

(4) Laboratoire d'Informatique Avancée de Compiègne, France.

(5) ANTEA/Aquitaine, Bordeaux, France.

should not fall dry. Conservation parameters concern points such as the conservation of the confined character of an aquifer, or the protection against salt-water intrusion. The main objective is to minimize the lowering of the water table from one year to the next, thus ensuring the medium- and long-term sustainability of the groundwater resource.

This type of management first of all requires a sufficiently detailed modelling of flow within the aquifer. This will, in turn, enable the definition of each pumping well and the determination of its associated constraints.

Methodology

First, a hydrodynamic finite-difference model is created and calibrated on the aquifer of interest. This model will help in predicting the influence of any exploitation scheme on the evolution of potentiometric levels. The drawback is that, especially in transient state, this model requires a large amount of computer time. This means that such models are mainly used for the one-time calculation of coefficients of the influence exerted by all existing pumping wells on all sensitive potentiometric levels. The coefficient of influence of a well on an observation point, is the response, at this point and in transient state, of a unit increase in the pumping flowrate. In steady state, this coefficient is the differential of potentiometric variation divided by the variation in flowrate. Assuming that the aquifer can be represented as a invariant linear system and applying the superposition theorem, it is possible to calculate the influence of any pumping scenario through the simple convolution of the coefficients of influence. In reality, the system is not perfectly linear, as the coefficients of influence depend upon transmissivity values that, in an unconfined aquifer, are partially dependent upon the potentiometric levels, which in turn are related to the abstraction, i.e. the influences. However, if the variations in abstraction are small, the linear assumption generally is entirely acceptable.

BRGM researchers have developed the CAPUCINE software (Thiery,

1993a) (fig. 1), which is based on an optimization under constraint and works with coefficients of influence that are derived from a hydrodynamic model. This software enables the optimization of a parameter function, e.g. the sum of abstracted flowrates or exploitation cost, under various constraints. The last are expressed in terms of heads or flowrates to be respected, either locally or in a geographic region. The original aspect of this optimization software is that it directly integrates the diameters of boreholes and head losses coefficients in boreholes, which are indispensable data. As the influence of borehole diameter and head loss is non-linear (e.g. table 3), the software calculates a series of successive linear optimizations in an iterative manner, to arrive at an optimum scenario.

On the basis of integrating this software with the coefficients of influence, the LIAC (the Laboratory for advanced computing at Compiègne) has developed the GRENAT management system for groundwater resources in transient state. This system is targeted at production units and provides an adequate technical solution for determining exploitation guidelines. It can operate in simulation or in optimization. In the first case (fig. 8), it makes direct use of the coefficients of influence, to evaluate the impact of planned production on the evolution of groundwater levels, and to identify any exceeding of the safety thresholds. In optimization (fig. 9), it helps in defining the constraints related to the resource itself, and to the supply of water to the distribution network, such as consumption figures and borehole-pumping rates. Such optimization under constraint is carried out by the software in a completely transparent manner for the user.

Application to the site of Bordeaux

The multi-layer aquifer system beneath Bordeaux was modelled with the MARTHE code (Thiery, 1990, 1993b, 1994, 1995). Four units were identified: Miocene-Pliocene-Quaternary, Oligocene, Eocene and Upper Cretaceous (fig. 4). The model has a main grid of 5×5 km and integrates a nested grid with cells of 500 m (Braneyre and

Lambert, 1994). The head losses in the wells were determined and the coefficients of influence were calculated. Optimized pumping rates were then carried out for demonstration purposes (tables 5 and 6).

Extrapolation to other sites

The GRENAT system is presently installed in the offices of the Regional Division for Aquitaine of the Lyonnaise des Eaux. It is being validated and should be operational by mid-1995. Installation at other sites of the Lyonnaise des Eaux is contemplated, and groundwater models are being updated or created for this purpose at Dijon, Nancy, Dunkirk and the Paris Region. The results from simulation work carried out with these models can be processed by the management system, thus enabling the water operators to evaluate the influence of a planned production strategy on the evolution of the groundwater resource.

Introduction

L'utilisation de modèles hydrodynamiques de nappe permet de répondre à des questions précises sur l'effet d'une modification apportée à un système aquifère. Par exemple : si on modifie le débit de prélèvement (ou d'injection) dans un captage, quel sera le rabattement induit, comment seront modifiés les débits d'échanges avec l'extérieur, quelles seront les nouvelles concentrations en polluant, etc. En pratique, le problème qui se pose au gestionnaire de la nappe est souvent un problème inverse. Il s'agit de gérer de manière optimale un ensemble de captages en respectant des contraintes physiques (rabattement maximal admissible, non perturbation des voisins) ou réglementaires. Le gestionnaire cherche par exemple à déterminer :

- Les prélèvements optimaux pour satisfaire une demande, par groupe de captages, au moindre coût en tenant compte du coût de l'énergie de pompage.

- Les prélèvements maximaux possibles tout en respectant des cotes mini-

males dans les ouvrages et en certains points sensibles de la nappe.

– Le schéma d'exploitation permettant le mieux de conserver la ressource souterraine en minimisant les écoulements de la nappe vers la mer ou vers un cours d'eau.

– Le schéma (débits de pompages, débits d'injection, répartition des rejets) permettant d'abaisser la concentration en polluant en dessous du seuil maximal : aux forages ou dans certaines zones sensibles.

– Le schéma d'exploitation permettant d'obtenir le maximum d'énergie (en prenant en compte la température de l'eau) au coût minimum.

– Les débits minimaux nécessaires pour assécher un chantier, donc pour obtenir des charges inférieures à une limite donnée dans une zone de la nappe.

Il s'agit bien d'un problème inverse, puisqu'on part non pas de la cause (pompage), pour déterminer l'effet (rabattement), mais de l'effet pour calculer la cause. Ce problème a été abordé depuis longtemps en association avec des modèles hydrodynamiques de nappe.

Gorelick (1983) présente une revue des méthodes utilisées. Il existe deux approches, comme le montrent Aguado *et al.* (1974), Aguado et Remson (1974), El Magnouni (1993) pour les problèmes d'hydrodynamique, et Gorelick et Remson (1982), Remson (1985), Gorelick (1982, 1984), et Ahfeld *et al.* (1986), Karatzas et Pinder (1993) pour les problèmes de qualité des eaux.

Ces deux approches sont l'approche couplée, intégrée au modèle hydrodynamique, et l'approche par coefficients d'influence.

L'approche couplée consiste à avoir une optimisation intégrée à un modèle hydrodynamique. Elle est intéressante puisqu'elle n'a pas besoin de faire une hypothèse de linéarité comme la méthode des coefficients d'influence. Par contre, elle nécessite énormément de mémoire quand elle est couplée à des modèles hydrodynamiques 3D faisant intervenir plusieurs dizaines de milliers

de mailles. D'autre part, elle n'est pas applicable pour les problèmes de qualité des eaux. Cette approche a été récemment mise en oeuvre par W. Treichel (1994). La méthode des coefficients d'influence (Maddock 1972, Vandenberg 1973, 1976) est plus générale mais nécessite pour les nappes libres, si le schéma d'exploitation est très modifié, de réutiliser le modèle hydrodynamique, en aval de l'optimisation, pour calculer les coefficients d'influence correspondant à ce schéma. Elle peut être appliquée aussi bien aux calculs de ressources (charges, débits) qu'aux problèmes de qualité (transport de masse ou d'énergie). Elle nécessite peu de mémoire et peut être appliquée à de très gros modèles hydrodynamiques. Le texte qui suit présente une extension de la méthode des coefficients d'influence avec prise en compte des diamètres des forages et des pertes de charge singulières. L'intérêt de la méthode est illustré par une application au champ captant de la Communauté Urbaine de Bordeaux.

Description de la méthode

Position du problème

Selon le cas, le gestionnaire de la nappe cherche à maximiser un gain en respectant des contraintes sur les niveaux ou sur la qualité de l'eau ou bien à minimiser un coût pour satisfaire une demande (les besoins) sous contraintes. Dans tous les cas, l'objectif est la maximisation d'un bénéfice **B** défini comme la différence entre le gain **G** et le coût **C**.

• Gain

Le gain **G** est le prix de revient de la vente de l'eau

$$G = PV \cdot Q$$

avec

PV : prix de vente d'un volume unitaire d'eau

Q : débit prélevé (donc vendu)

Si on cherche à satisfaire exactement une demande donnée, le gain sera proportionnel à la demande et sera donc indépendant de la répartition spatiale des prélèvements.

• Coût

Le coût se décompose en plusieurs termes :

– le coût de l'énergie nécessaire à la production du débit : CE

– le coût de transport de l'eau du captage au point de distribution : CD

– le coût du traitement de l'eau : CT

– l'amortissement des investissements de foration et le coût d'entretien des forages : CI

$$C = CE + CD + CT + CI$$

Ces différents coûts s'écrivent sous la forme :

$$CE = a_1 \cdot Q \cdot h \quad (\text{Energie proportionnelle à } Q \cdot h)$$

$$CD = a_1 \cdot Q \cdot pc \quad (\text{Energie proportionnelle à } Q \cdot pc)$$

$$CT = a_3 \cdot Q \cdot S$$

$$CI = a_4 \quad (\text{constante si le forage existe déjà})$$

avec

a_1, a_2, a_3, a_4 = constantes

h = hauteur de refoulement = A-HC
HC = charge dans le captage

A = altitude locale du sol

S = concentration de l'eau à traiter

pc = perte de charge en conduite = $a_2 \cdot d$

d = distance de transport

a_2 = perte de charge par unité de longueur de conduite

Si la concentration **S** est constante, le coût du traitement **CT** sera indépendant de la répartition spatiale des prélèvements. De même, si la hauteur de refoulement est importante, et si les distances de transport sont faibles on pourra négliger (en première approximation) le terme **CD** ou considérer qu'il est peu variable.

Au total le coût se réduit à :

$$C = a_1 \cdot Q \cdot (A-HC) + \text{constante}$$

Principe de l'optimisation

Les méthodes classiques d'optimisation linéaires, comme le Simplex par exemple, permettent de maximiser un bénéfice **B** défini par :

$$B = b + \sum_i a_i \cdot Q_i \quad (b \text{ et } a_i = \text{constantes})$$

En respectant des contraintes linéaires sur les valeurs des Q_i .

Dans le problème d'optimisation qui nous concerne on a vu qu'on dispose d'une fonction bénéfique $B=f(Q_i, HC_i)$, qui dépend de Q_i et HC_i , et d'un ensemble de contraintes sur HC_j (limites de rabattement) et sur Q_i (somme des besoins par zone géographique). Il faut donc linéariser à la fois la fonction bénéfique B et les contraintes pour les exprimer en fonction des débits prélevés Q_i . On écrira donc :

$$B \approx b + \sum_i \left(\frac{\partial B}{\partial Q_i} \right) Q_i$$

et comme B dépend des HC_j

$$\frac{\partial B}{\partial Q_i} = g \left(\frac{\partial HC_j}{\partial Q_i} \right)$$

De même pour les contraintes sur HC_j

$$HC_j = h_o + \sum_i \left(\frac{\partial HC_j}{\partial Q_i} \right) Q_i$$

(h_o étant une constante)

Il est donc nécessaire de calculer les dérivées $\partial HC_j / \partial Q_i$ des charges dans les captages, et dans tous les points de contrôle, par rapport à tous débits des captages i .

Détermination des charges dans la nappe

Un modèle hydrodynamique par différences finies permet de calculer la charge HM dans chaque maille du modèle à partir des conditions aux limites et des débits prélevés ou injectés. Il permet en particulier de déterminer les charges HM_i dans les mailles représentant un forage Q_i et HM_j dans les mailles représentant les points d'observations. Le modèle hydrodynamique peut également fournir les coefficients d'influence a_{ij}

$$a_{ij} = \frac{dHM_j}{dQ_i} = \text{influence du pompage } i \text{ sur la charge de la maille } j$$

De la même manière pour les débits d'échange D , les concentrations S ou les températures T , le modèle donne

$$d_{ij} = \frac{dD_j}{dQ_i}; S_{ij} = \frac{dS_j}{dQ_i}; t_{ij} = \frac{dT_j}{dQ_i}$$

Calcul des coefficients d'influence

Les coefficients d'influence a_{ij} (et d_{ij} , s_{ij} , t_{ij}) peuvent être calculés simplement à partir d'une simulation de référence en faisant tourner successivement N fois le modèle hydrodynamique en modifiant à chaque fois légèrement le débit en un des N captage et en calculant la différence de charge (et de débit d'échange, de concentration et de température) en chacun des points d'observations. Dans le cas des charges, il serait possible de calculer directement les a_{ij} par inversion de la matrice des coefficients des charges dans le modèle.

En régime transitoire, le modèle de simulation hydrodynamique donne en fonction du temps le coefficient d'influence du forage i sur le point d'observation j , correspondant à une variation unitaire du débit du forage i . C'est la réponse unitaire correspondant un échelon unitaire (et non pas à une impulsion brève). L'avantage de cette approche est de ne pas dépendre d'une certaine "durée d'imposition de débit". C'est d'ailleurs l'approche classique utilisée par les hydrogéologues avec la méthode des "images". Compte tenu de cette définition, la charge $H_{j,k}$ du point d'observation j à la date k , est obtenue par convolution des coefficients d'influence a_{ij} aux différentes dates par les différences de débits au cours du temps.

Le calcul des coefficients d'influence peut s'effectuer automatiquement, en régime permanent ou transitoire dans le modèle hydrodynamique MARTHE (Thiery 1990, 1993b, 1994, 1995).

Détermination de la charge dans un captage

La relation entre la charge HC dans un captage et la charge HM moyenne dans une maille du modèle s'écrit :

$$HC = HM + H_d + H_p$$

avec

H_d = correction due au rapport entre la dimension de la maille du modèle et le diamètre de l'ouvrage de captage (correction de diamètre)

H_p = Perte de charge singulière dans le captage

Les termes complémentaires ont les expressions suivantes :

* correction due au diamètre

$$H_d = \frac{Q}{2\pi \cdot T} \left[L_n \left(\frac{d_x}{r_p} \right) - \frac{\pi}{2} \right]$$

avec

Q = débit dans le forage (négatif si pompé)

T = transmissivité dans la maille de calcul

d_x = dimension de la maille. Si la maille de surface A n'est pas carrée, on prendra sa diagonale : $d_x = \sqrt{A}$

L_n = logarithme népérien

Si la transmissivité T est constante cette correction est linéaire en fonction de Q_j . Mais si la nappe est libre, la correction n'est plus linéaire et on écrira :

$$T = K \cdot [\text{Min}(\text{TOIT}, H) - \text{SUB}]$$

avec

K = perméabilité

TOIT = cote du toit de la nappe

SUB = cote du substratum de la nappe

* Pertes de charges singulières

$$H_p = \alpha \cdot Q + \beta \cdot Q^2$$

avec

α = coefficient de perte de charge linéaire : $m/(m^3/s)$

β = coefficient de perte de charge quadratique : $m/(m^3/s^2)^2$

Dérivées des charges par rapport aux débits

En un point d'observation j différent du captage i on a :

$$H_j = HM \text{ d'où } \frac{dH_j}{dQ_i} = a_{ij}$$

En un forage i on a :

$$H_i = HM + Hd + Hp$$

d'où

$$\frac{dH_i}{dQ_i} = a_{ii} + \frac{dHd}{dQ} + \frac{dHp}{dQ}$$

avec

$$\frac{dH_i}{dQ_i} = \frac{1}{2\pi T} \left[L_n \left(\frac{d_x}{rp} \right) - \frac{\pi}{2} \right]$$

$$\frac{dHp}{dQ} = \alpha + \beta \cdot Q$$

Pour les débits d'échange, les concentrations ou les températures, l'approche est identique mais il n'y a pas de corrections au forage.

Optimisation des débits

Pour résoudre le problème d'optimisation, le logiciel CAPUCINE (CALcul de Pompages par Utilisation de Coefficients d'INfluence Externes) décrit par D. Thiery (1993a) a été mis au point après un prototype réalisé par N. Courtois (1993). Ce logiciel, directement couplé au modèle MARTHE en 3D, permet l'optimisation automatique des débits d'un champ captant, en régime permanent ou transitoire, en nappe libre ou captive, avec des contraintes sur les niveaux et les débits. Il pourrait aussi utiliser les coefficients d'influence résultant de tout autre modèle à différences finies ou même à éléments finis (moyennant quelques changements au niveau de la correction de charge dans les forages).

Par rapport aux méthodes classiques d'optimisation à partir des coefficients d'influences d'un modèle (par exemple Aguado *et al.* 1974, Vandenbeusch 1973, 1976), le logiciel CAPUCINE présente les aspects originaux suivants :

– fonctionnement en régime transitoire,

– correction de charge automatique dans les forages, tenant compte du diamètre du forage et de la dimension de la maille,

– prise en compte automatique des pertes de charge linéaires et quadratiques dans les forages,

– prise en compte directe des coûts d'exploitation dus à l'énergie de pompage en fonction de la cote réelle de l'eau dans le forage et de la cote du sol,

– contraintes possibles sur les charges mais aussi les débits d'échanges aux limites (ou les débits de débordement).

A partir des coefficients d'influence obtenus par le modèle hydrodynamique, pour un point de fonctionnement correspondant à une répartition des débits prélevés, le logiciel dispose de deux possibilités de linéarisation : une linéarisation analytique (possible seulement en régime permanent) ou une linéarisation numérique. La linéarisation analytique calcule -analytiquement- la dérivée des contraintes et des termes de l'objectif par rapport aux débits influençants. La variation de la transmissivité en fonction de la charge ne peut cependant pas être prise en compte analytiquement pour la correction due au diamètre du forage. La linéarisation numérique consiste à calculer numériquement, au voisinage du point de fonctionnement les dérivées des contraintes et de l'objectif en faisant varier légèrement chaque débit Q_i à proximité de sa valeur courante.

Le logiciel CAPUCINE procède de manière itérative en linéarisant à chaque fois les fonctions non linéaires (pertes de charge, coût de l'énergie) au voisinage de la nouvelle solution (de débits prélevés donc de charges dans l'ouvrage). Il résout à chaque fois le système d'optimisation linéaire par la méthode du Simplex. Comme le montre la figure 1, quand la solution est obtenue, un nouveau calcul de coefficients d'influence est réalisé avec le modèle hydrodynamique au voisinage des débits optimaux, pour affiner la solution si la nappe n'est pas captive partout.

Le logiciel CAPUCINE a été vérifié sur l'exemple d'assèchement d'une

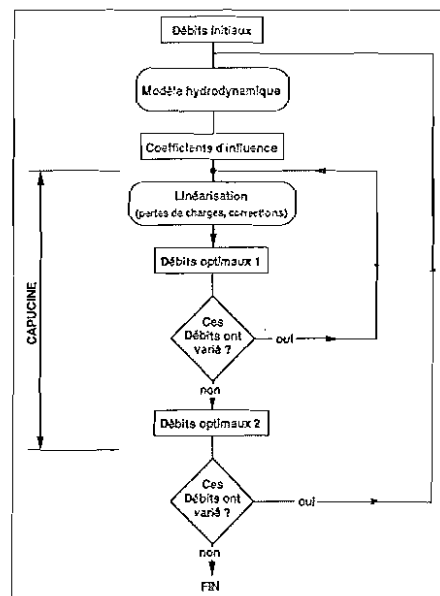


Fig. 1. – Schéma de fonctionnement du logiciel CAPUCINE.

Fig. 1. – Schematic operation flow-chart of the CAPUCINE software.

fouille présentée par Aguado *et al.* (1974).

Application au champ captant de Bordeaux

Le modèle hydrodynamique

Le département de la Gironde, l'un des plus riches en France en eau souterraine, est aussi celui où les nappes de bonne qualité sont les plus exploitées (99 % de l'alimentation eau potable est assurée par les nappes souterraines).

Les ressources souterraines constituent des réserves naturelles de bonne qualité qui nécessitent, en règle générale, peu de traitement par rapport aux eaux de surface. Ce patrimoine doit être bien géré car il n'est ni inépuisable, ni insensible aux agressions de l'environnement. Il est indispensable, pour préserver durablement l'avenir, d'associer une gestion quantitative et qualitative des eaux souterraines, afin de satisfaire la demande par les points de production les mieux adaptés. Une exploitation globale et prévisionnelle est indispensable, car une exploitation mal maîtrisée des nappes pourrait avoir des conséquences très néfastes et peut-être irréversibles sur la qualité de l'eau.

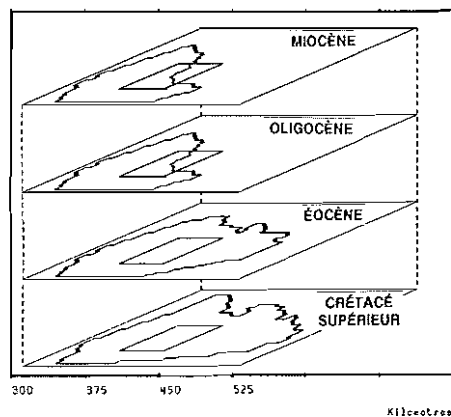


Fig. 2. - Extension latérale du modèle hydrodynamique.

Fig. 2. - Lateral extension of the hydrodynamic model.

Un modèle Nord-Aquitain avait été développé dans le cadre de la gestion des ressources aquifères régionales. Ce modèle multicouche prenait en compte, avec des mailles carrées de 5 km de côté les 4 formations aquifères suivantes (de haut en bas) dans la zone encadrant la Communauté Urbaine de Bordeaux :

- les alluvions du Plio-Quaternaire et les calcaires et sables du Miocène ;
- les calcaires de l'Oligocène ;
- les sables et calcaires de l'Eocène ;
- les calcaires du Crétacé Supérieur.

Ces aquifères sont séparés par des couches semi-perméables (épontes) d'épaisseurs et de perméabilités variables. La figure 2 présente en perspective cavalière l'extension latérale des 4 couches.

Le suivi de ces nappes depuis de nombreuses années a permis d'identifier un certain nombre de problèmes :

- une baisse générale de la piézométrie sur l'ensemble des nappes.
- Oligocène : vulnérabilité de la nappe autour de Bordeaux, aux pollutions potentielles de surface et de rivière.
- Eocène : existence d'un domaine où les concentrations en sulfates, fluor et potassium dépassent les normes en vigueur.

Risque d'intrusion d'eau salée au niveau de l'estuaire de la Gironde, si le creux piézométrique sous Bordeaux n'est pas stabilisé.

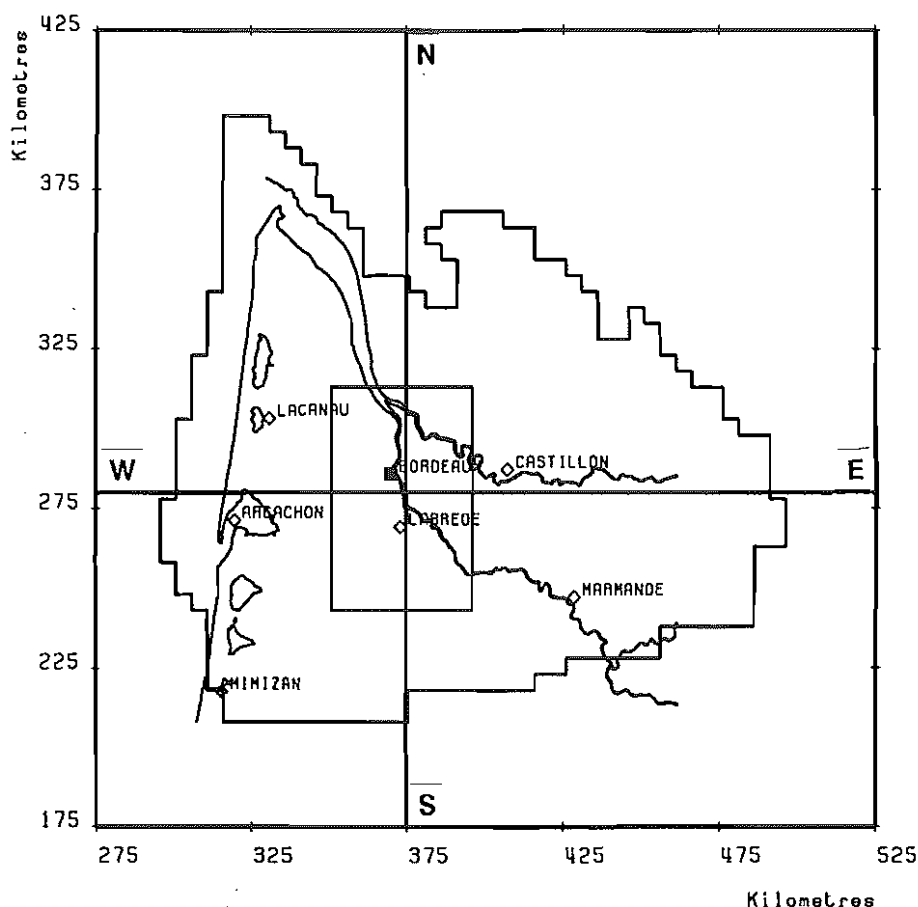


Fig. 3. - Extension totale du modèle et situation des coupes verticales W-E et S-N.

Fig. 3. - Total extension of the model, and location of the E-W and N-S cross-sections.

L'augmentation des prélèvements est en grande partie responsable de ces phénomènes.

Une recherche en partenariat industriel (RPI) a été constituée entre le BRGM et la Lyonnaise des Eaux pour définir une méthodologie de prise en compte de la gestion spécifique des ressources souterraines dans la gestion globale du service de production et de distribution d'eau potable. Dans le cadre de ce RPI, un modèle gigogne, inclus dans le précédent, a été élaboré dans les mêmes formations, avec des mailles de 500 m de côté c'est-à-dire de surfaces 100 fois plus petites (Braneyre et Lambert, 1994). Le maillage principal fait intervenir au total 2 400 mailles et couvre une extension totale de 24 000 km² ; le maillage gigogne à mailles fines fait intervenir 28 800 mailles avec une extension de 525 km².

La figure 3 permet de situer l'extension totale des 4 aquifères (le rectangle

central correspond au modèle gigogne). La figure 4 présente une coupe W-E et une coupe N-S dont les positions sont précisées sur la figure 3.

Le modèle a été calé en régime permanent sur la piézométrie de 1989 qui a été utilisée comme référence. Le calage en régime transitoire a été réalisé en utilisant les historiques de charges dans les forages pendant 22 ans (période 1971-1992). Les charges utilisées sont les niveaux statiques obtenus par arrêt du forage pendant environ 24 heures pour éliminer les pertes de charge. A l'issue du calage les piézométries de l'année 1989 des 4 couches sont bien simulées, ainsi que les évolutions en régime transitoire dans les forages. Pour 90 % de ces évolutions les variations simulées présentent un écart de moins de 5 m par rapport aux évolutions mesurées.

Le simulateur utilisé est le modèle hydrodynamique MARTHE du BRGM (Thiery 1990, 1993b, 1994).

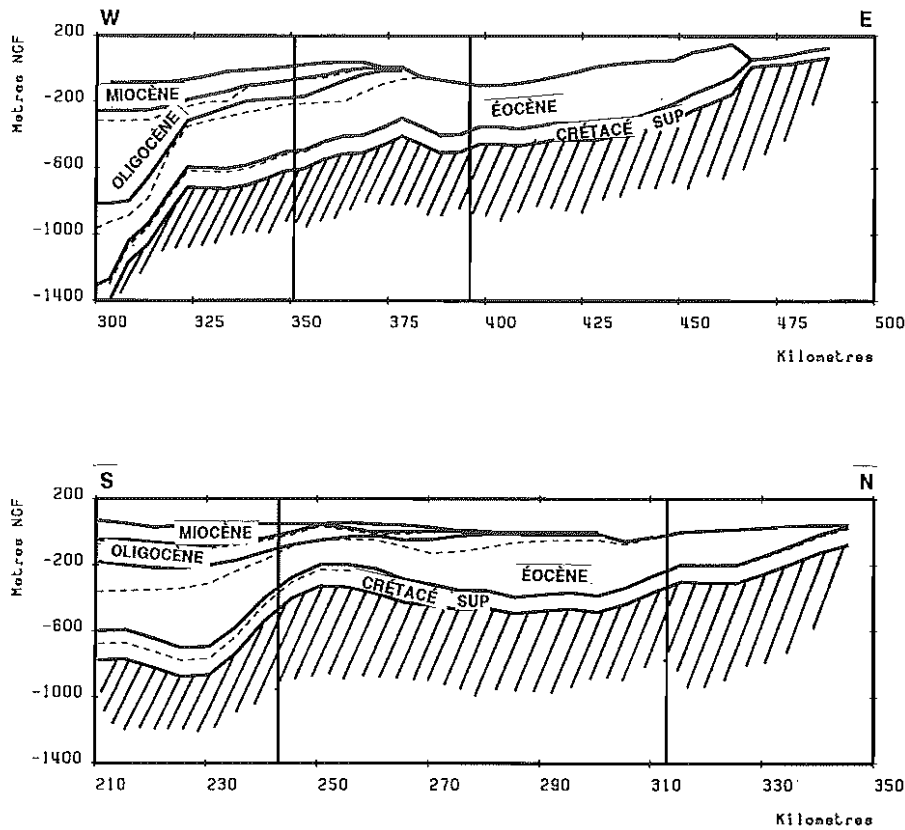


Fig. 4. – Coupes verticales Ouest-Est (W-E) et Sud-Nord (S-N).

Fig. 4. – Vertical east-west (E-W) and north-south (N-S) cross-sections.

	Diamètre captage (mm)		Alpha (s/m ²)		Beta (s ² /m ²)	
	couche 2	couche 3	couche 2	couche 3	couche 2	couche 3
moyenne	414	196	456	358	1704	2230
Ecart type	194	26	112	92	175	1218

Tabl. 1. – Caractéristiques des forages (diamètres, coefficients de pertes de charge).

Tabl. 1. – Borehole characteristics (diameters, head-loss coefficients) ('layer 2' = Oligocene; 'layer 3' = Eocene).

	Cote minimale des forages (m)		Épaisseur Nappe (m)		Transmissivité (10 ⁻³ m ² /s)	
	couche 2	couche 3	couche 2	couche 3	couche 2	couche 3
moyenne	-10,7	-52,3	53,2	253,3	2,8	8,6
Ecart type	12,6	20,0	14,4	50,0	1,3	4,1

Tabl. 2. – Cotes minimales des forages et caractéristiques de la nappe.

Tabl. 2. – Safety thresholds of layers 2 (Oligocene) and 3 (Eocene), as well as thickness and transmissivity figures for these aquifers.

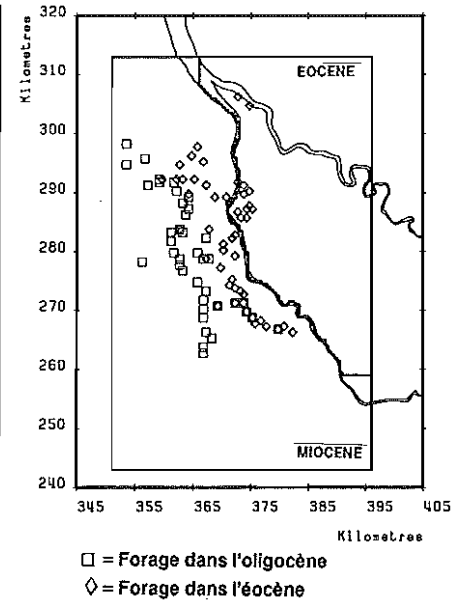


Fig. 5. – Situation des forages dans le maillage gigogne.

Fig. 5. – Location of boreholes in the nested grid.

Optimisation des débits prélevés

A titre d'application on a calculé l'optimisation d'un ensemble de 89 forages situés dans les couches 2 et 3 du modèle (Oligocène et Eocène). Cette application a été réalisée avec des données réelles mais avant la validation définitive du calage du modèle hydrodynamique et avec des hypothèses simplificatrices. Elle sert à illustrer l'intérêt de la méthode d'optimisation mais les résultats obtenus ne peuvent être utilisés en dehors de cette démonstration.

Les 89 forages sont représentés sur la figure 5 qui fait apparaître les affleurements de l'Eocène (couche 3) dans la partie est alors que l'Oligocène (couche 2) est recouvert par le Miocène dans la partie ouest. Cette figure montre que 38 forages (symbolisés par des carrés) sont implantés en couche 2 et 51 forages (losanges) en couche 3. Les tableaux 1 et 2 présentent les caractéristiques de ces forages. Il apparaît que les profondeurs limites sont environ 5 fois plus basses dans la couche 3. Par contre, les diamètres y sont en moyenne près de 2 fois plus petits. Les épaisseurs de couches et les transmissivités sont respectivement 5 fois et 3 fois plus grandes

	Coefficients d'influence (m par 1 000 m ³ /j)			
	sur le forage		sur les forages voisins	
	couche 2	couche 3	couche 2	couche 3
moyenne	3,1	1,8	4,4	20,6
Ecart type	1,4	0,9	2,8	3,0

Tabl. 3. – Coefficients d'influence des forages.

Tabl. 3. – Coefficients of influence of abstractions

	Puissance consommée	
	kW	kWh/an
Avant optimisation (état de référence)	1125	9,86 10 ⁶
Après optimisation	995	8,72 10 ⁶
Gain	130	1,14 10 ⁶

Tabl. 4. – Optimisation des prélèvements : état de référence (84 000 m³/j)

Tabl. 4. – Optimization of energy consumption for water abstraction (reference condition is 84.000 m³/day = before optimization), and the after optimization; last line is the gain. Second column is yearly energy consumption.

dans la couche n° 3. Par contre, les coefficients alpha et beta qui contrôlent les pertes de charge sont comparables. Le tableau 3 présente l'analyse des coefficients d'influence calculés. Il montre qu'en couche 2 une augmentation de débit de 1 000 m³/j provoque un rabattement moyen de 3,1 m dans le forage lui-même et que la somme des rabattements induits dans les autres forages est égale à 1,8 m en moyenne. En couche 3 (l'Eocène), les transmissivités trois fois plus fortes font que le rabattement dans le forage lui-même est environ moitié mais que l'influence dans les forages voisins est 5 fois plus grande (20,6 m contre 4,4 m).

Deux types d'optimisation ont été réalisés avec ces données :

1. minimisation des coûts d'énergie de pompage pour un besoin total donné
2. maximisation du débit total, compte tenu uniquement des contraintes sur les rabattements maximaux

Minimisation des coûts d'énergie de pompage

Pour ces optimisations on a considéré que le sol était à une altitude uniforme

pour tous les forages. On a fixé cette altitude uniforme à la valeur + 100 m. En fait cette valeur intervient uniquement sur l'énergie calculée mais non pas sa variation puisque à la puissance P est donnée par

$$P = 9810 \cdot \sum Q \cdot (A - HC) / r$$

P = puissance
Q = débit
A = altitude du sol
HC = charge dans le captage
r = rendement des pompes

comme la somme des débits est imposée on a :

$$P = \text{Constante} - 9810 \cdot \sum Q \cdot HC / r$$

Optimisation dans l'état de référence

La somme des débits prélevés dans l'état de référence est égale à environ 84 000 m³/j. Le tableau 4 présente les puissances consommées – en considérant que les pompes ont un rendement de 100 % – avant et après optimisation. Il montre que l'optimisation permet un gain de 130 kW.

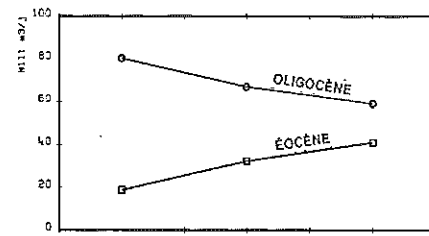


Fig. 6. – Répartition du débit prélevé par couche : 1 = sans correction ; 2 = avec correction de diamètre ; 3 = avec toutes les corrections.

Fig. 6. – Distribution of the pumped flowrate by layer: 1) without corrections; 2) with correction of the diameter; 3) with all corrections.

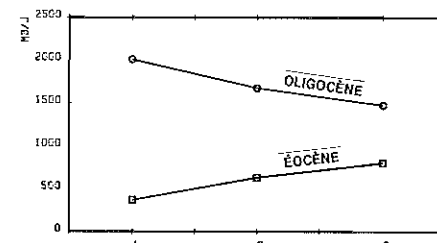


Fig. 7. – Débits moyens prélevés par puits : 1 = sans correction ; 2 = avec corrections de diamètre ; 3 = avec toutes les corrections.

Fig. 7. – Average flowrates abstracted per well: 1) without corrections; 2) with correction of the diameter; 3) with all corrections.

Ce gain correspond à une diminution moyenne de hauteur de refoulement de 13,6 m par forage.

Importance des corrections de charge aux puits

Pour mettre en évidence l'importance des corrections de charge entre la nappe et le captage on a réalisé 3 simulations avec une demande totale de 100 000 m³/j :

- a) sans correction de diamètre ni pertes de charge
- b) avec seulement la correction de diamètre
- c) avec correction de diamètre et pertes de charge

Le tableau 5 montre que la configuration optimale, avec prise en compte des corrections, nécessite 17 % de puissance de plus que si on négligeait cette correction. Par contre la configuration optimale sans corrections est très différente et ne respecterait pas les contraintes réelles.

Les figures 6 et 7 montrent en effet que sans pertes de charge ni corrections

de diamètre, la répartition optimale conduit à prélever un débit moyen et un débit total 4 fois plus grand dans la couche 2 que dans la couche 3. Ceci résulte de la plus faible profondeur dans cette couche qui permet une plus faible dépense d'énergie. Avec la prise en compte de la correction de diamètre et des pertes de charge, l'écart diminue et les prélèvements dans la couche 2 ne sont que 50 % plus forts que ceux de la couche 3.

La couche n° 3 est plus sollicitée qu'avant puisque sa transmissivité étant plus grande, le rabattement supplémentaire dû à la correction de diamètre s'y fait moins sentir. D'autre part avec les pertes de charge on atteindrait les profondeurs limites des forages de la couche n° 2 qui sont nettement moins profondes que celles de la couche 3. Avec toutes les corrections le rabattement supplémentaire moyen dans un captage est égal à 13,8 m en couche 2 contre 4,5 m en couche 3 dans laquelle les diamètres sont pourtant plus petits.

Il apparaît ainsi que la prise en compte des pertes de charge et des corrections de diamètre est fondamentale car elle conduit à des répartitions de débits complètement différentes. Il conviendrait de prendre également en compte les distances de transport en conduite jusqu'aux centres de consommations. Ceci pourrait être réalisé facilement en fixant non pas une demande globale, mais une demande par zone géographique. En estimant une perte de charge en conduite de l'ordre de 1 à 2 m par kilomètre, l'énergie du transport sur 10 km est équivalente à un refoulement en forage de 10 à 20 m de haut.

Maximisation du débit total

Dans cette optimisation on cherche à maximiser le débit total prélevé, indépendamment des coûts d'énergie. Le tableau 6 montre que si on ne prend pas en compte la correction de diamètre ni les pertes de charge, on arrive à une sur-estimation de 91 % des débits prélevables. Si on ne prend en compte que la correction de diamètre, l'erreur est de 29 %.

	Puissance consommée	
	KW	kWh/an
Sans correction de diamètre ni pertes de charge	1045	9,16 10 ⁶
Après uniquement la correction de diamètre	1138	9,98 10 ⁶
Avec les 2 corrections	1221	10,71 10 ⁶

Tabl. 5. – Puissance consommée pour prélever 100 000 m³/j : influence de la prise en compte des corrections de charge.

Tabl. 5. – Energy consumption for the pumping of 100.000 m³/day: first line without any correction for diameter or head loss, second line shows only diameter correction; third line shows both corrections. Second column is yearly energy consumption.

	Débit prélevable (milliers de m ³ /j)	Erreur (%)
Sans aucune correction	310,6	91
Après uniquement la correction de diamètre	209,8	29
Avec toutes les corrections	162,5	0

Tabl. 6. – Maximisation du débit prélevable : influence de la prise en compte des corrections de charge.

Tabl. 6. – Maximizing the pumping flowrate: impact of taking head corrections into account (lines the same as for table 5, first column pumped volume in thousands of cubic metres per day; second column is error percentage when neglecting corrections).

Le système de gestion GRENAT

Approche générale et fonctionnalités

L'intégration d'une gestion spécifique et conforme des nappes en eau souterraine dans un service de production et de distribution d'eau potable devrait consister à adapter les stratégies de prélèvements destinés à l'alimentation du réseau en accord avec les contraintes et objectifs liés à la ressource.

Ces contraintes sont caractérisées par des seuils de niveau piézométrique de type "sécurité", liés aux équipements des forages (non dénoyage des crépines...) ou de type "conformité", liés à la sauvegarde des aquifères (conservation du caractère captif de la nappe, barrage contre l'infiltration d'un biseau salé...) : l'objectif étant de minimiser la baisse de la piézométrie des nappes d'une année à l'autre, afin d'assurer la pérennité des ressources à moyen et long terme.

Le problème essentiel de la mise en pratique de la gestion est d'exprimer ces contraintes sous forme de consignes exploitables pour le pilotage du réseau de production et distribution d'eau potable. Un système de gestion a été développé par le LIAC (Laboratoire d'Informatique Avancée de Compiègne, Lyonnaise des Eaux) pour résoudre ce problème sur le champ captant de la Communauté Urbaine de Bordeaux : le système GRENAT (Gestion des Ressources en Eau des Nappes Aquifères en Transitoire). Ce système intègre les coefficients d'influence et le logiciel CAPUCINE. Il est destiné aux exploitants et fournit une solution technique adéquate pour la détermination des consignes d'exploitation. Il peut fonctionner en simulation ou en optimisation.

Simulation

Basé sur un modèle analytique de représentation des écoulements (coeffici-

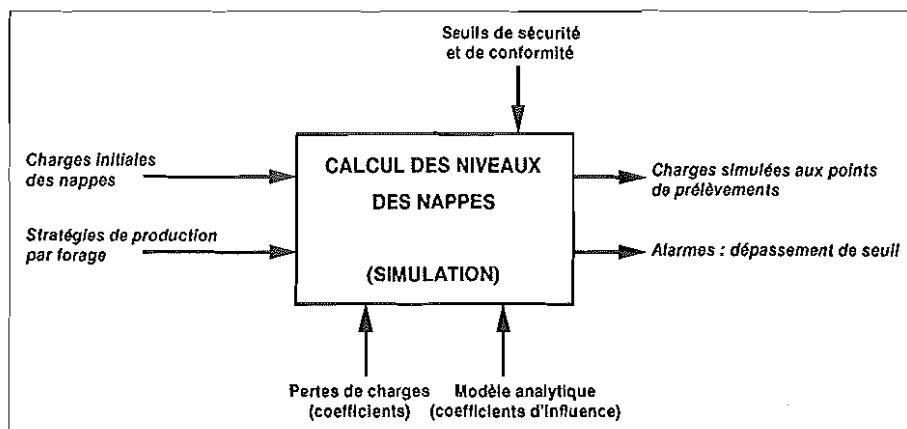


Fig. 8. – Logiciel GREMAT : Simulation.

Fig. 8. – GREMAT software: simulation (calculation of aquifer water levels).

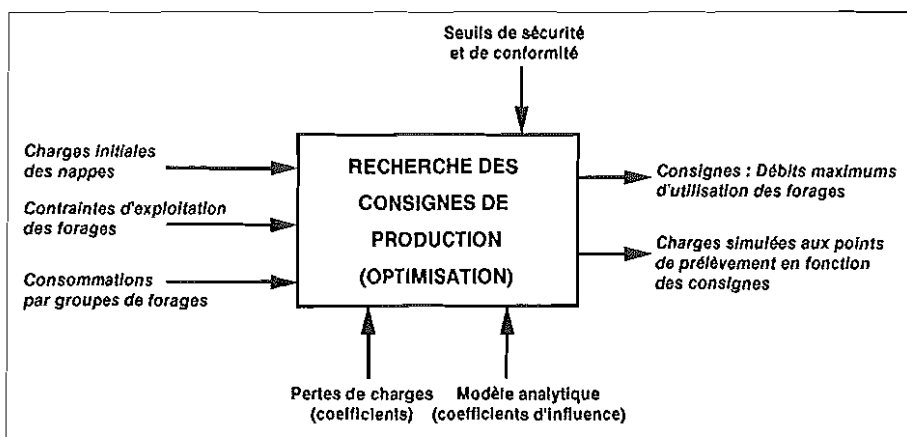


Fig. 9. – Logiciel GREMAT : Optimisation.

Fig. 9. – GREMAT software: optimization (search for production guidelines).

coefficients d'influence déduits à partir du modèle hydrodynamique), l'outil permet d'évaluer l'influence des stratégies de production préconisées sur l'évolution des niveaux des nappes, et d'identifier les dépassements éventuels des seuils de sécurité et/ou de conformité (fig. 8).

Optimisation

La définition des consignes de production (contraintes et objectifs de prélèvements) est formulée sous forme d'un problème d'optimisation sous contraintes : maximiser les prélèvements tout en respectant les contraintes liées à l'alimentation du réseau (consommations, débits d'exploitation des forages) et celles liées à la ressource (seuils de conformité et de sécurité). La résolution du problème se fait par le logiciel d'optimisation couplé avec le modèle hydrodynamique, par l'intermédiaire des coefficients d'influence (fig. 9).

Fonctionnement

GREMAT propose 2 modes de travail : la configuration et l'utilisation normale. Chaque mode permet l'accès à des fonctionnalités accessibles par des classes d'utilisateurs différentes.

Le mode configuration est accessible uniquement par le superviseur de l'outil. Celui-ci a le droit d'ajouter de supprimer et de paramétrer les forages du système. Il peut aussi générer les données nécessaires au recalage du modèle des nappes (liste des forages et historiques d'exploitation de ceux-ci).

Le mode d'utilisation normale est quant à lui accessible par tous les utilisateurs se connectant au système. C'est le mode d'exploitation du système de gestion. Il permet l'accès aux fonctionnalités principales qui sont la simulation et l'optimisation des stratégies de production.

Une fonctionnalité très importante, assurée en permanence par le système de

gestion, est la vérification du calage du modèle. Pour cela il calcule par forage l'écart entre les charges mesurées et celles calculées à partir des productions réelles. Si cette erreur dépasse un certain seuil (fixé par forage) une alarme est générée.

Résultats

La première version de l'outil a été réalisée pour être utilisée sur une station de travail SUN sparc 2 sous l'environnement graphique d'exploitation Solaris 2.0.

Son interface graphique le rend très facile et agréable à utiliser.

Il est installé depuis août 1994 au télécontrôle eau de la DRA à Bordeaux. Les premiers résultats obtenus semblent cohérents et satisfont les utilisateurs du système.

La conception du système de gestion GREMAT permet son adaptation à d'autres sites d'exploitation.

Conclusions

L'extension de la méthode des coefficients d'influence avec prise en compte du diamètre des forages et des pertes de charge permet l'optimisation des prélèvements dans les forages d'un champ captant. Nous avons montré sur l'ensemble du site de Bordeaux que la prise en compte des pertes de charge et des corrections de diamètre était indispensable. L'intégration du logiciel d'optimisation dans le système de gestion permettra aux exploitants du champ captant d'évaluer l'influence d'une stratégie de production sur l'évolution de la ressource. La méthode des coefficients d'influence peut être étendue, par l'intermédiaire d'un modèle de transport hydrodispersif, à la gestion de la ressource également en terme de qualité.

Le développement de la méthode d'optimisation (CAPUCINE) et son couplage avec le modèle de simulation hydrodynamique (MARTHE) ont été réalisés dans le cadre du projet de recherche S11 financé sur crédits de recherches du BRGM. Le système de gestion GREMAT a été développé sur des crédits de la Lyonnaise des Eaux.

Cet article est la publication n° 95 019 du BRGM.

Références bibliographiques

- AGUADO E., REMSON I. (1974) – Groundwater hydraulics in aquifer management. - *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, **100**(HY1), pp. 103-118.
- AGUADO E., REMSON I., PIKUL M.F., THOMAS W.A. (1974) – Optimal pumping for aquifer dewatering. - *J. Hydraul. Div. Amer. Soc. Civ. Eng.*, **100**(HY7), pp. 869-877.
- AHFELD D.P., MULVEY J.M., PINDER G.F. (1986) – Designing optimal strategies for contaminated groundwater remediation. - *Adv. Water Resour.*, **9**(2), pp. 77-84.
- BRANEVRE M., LAMBERT M. (1994). – Modèle régional multicouche du bassin nord-aquitain - Calage en régime transitoire et simulations. - Rapport BRGM R37957 BOR 4S 94.
- COURTOIS N. (1993) – Couplage Simulation / Optimisation. Réalisation d'un programme prototype. - Note technique BRGM n° 93 EAU 023.
- EL MAGNOUNI S. (1993) – Méthodologie d'Aide à la Décision pour l'évaluation et la gestion multicritère des ressources en eau. - *Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL, Nancy)*.
- GORELICK S.M. (1982) – A model for managing sources of groundwater pollution. - *Water Resour. Res.*, **18**(4), pp. 773-781.
- GORELICK S.M. (1983) – A review of distributed parameter groundwater management modeling methods. - *Water Resour. Res.*, **19**(2), pp. 305-319.
- GORELICK S.M. (1984) – Aquifer reclamation design : the use of contaminant transport simulation combined with nonlinear programming. - *Water Resources Research*, vol. **20**, n° 4, pp. 415-427.
- GORELICK S.M., REMSON I. (1982) – Optimal location and management of waste disposal facilities affecting groundwater quality. - *Water Resour. Bull.*, **18**(1), pp. 43-51.
- KARATZAS G.P., PINDER G.F. (1993) – Groundwater management using numerical simulation and outer approximation method for global optimization. - *Water Resour. Res.*, **29** (10) pp. 3371-3378.
- MADDOCK T. (1972) – Algebraic technological function from a simulation model. - *Water Resour. Res.*, **8**(1) pp. 129-134.
- REMSON I. (1985) – Models for groundwater pollution management. - *Bull. Ass. Eng. Geol.*, **22**(3), pp. 231-239.
- THIERY D. (1990) – Logiciel MARTHE. Modélisation d'Aquifères par un Maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements. Version 4.3. - Rapport BRGM R32210.
- THIERY D. (1993a) – Optimisation des champs captants : le logiciel CAPUCINE. Principes et domaine d'application. - Rapport BRGM R37811.
- THIERY D. (1993b) – Modélisation des aquifères complexes - Prise en compte de la zone non saturée et de la salinité - Calcul des intervalles de confiance - *Revue Hydrogéologie*, 1993 n°4, pp 325-336.
- THIERY D. (1994) – Modélisation 3D des écoulements en Zone Non Saturée avec le logiciel MARTHE version 5.4. - Rapport BRGM R38108 DR/HYT 94.
- THIERY D. (1995) – Modélisation 3D du transport de masse avec le logiciel MARTHE version 5.4. - Rapport BRGM R 38 149 HYT/DR 95.
- TREICHEL W. (1994) – Couplage simulation/optimisation par l'approche intégrée ; quelques tests sur CAPUCINE. - Rapport ANTEA A 01441.
- VANDENBEUSCH M. (1973a) – Informatique hydrogéologique. Implantation optimale de captages. Programme OPPER. - Rapport BRGM 73 SGN 161 AME.
- VANDENBEUSCH M. (1973b) – Informatique hydrogéologique. Gestion des ressources. Programme d'optimisation PROLI. - Rapport BRGM 73 SGN 443 AME.
- VANDENBEUSCH M. (1976) - Prise en compte des principaux facteurs hydrodynamiques et économiques. Présentation des programmes MAPPLI et PLIBI. - Rapport BRGM 76 SGN 528 AME.