

CALCUL DU TRANSPORT CONVECTIF DE POLLUANT DANS LES AQUIFERES PHREATIQUES DE BUCAREST

Teodor COMEAGA¹ & Alain DASSARGUES²

1 ICIM, Bucarest, Roumanie

2 LGIH, Université de Liège, Belgique

Abstract

In order to remedy for the insufficiency of drinking and industrial water supplies in Bucharest, the use of groundwater resources is considered. This idea is based on the existence of deep aquifers, which could theoretically be exploited to supply huge quantities of high quality drinking water. Nevertheless, the shallow and intermediary aquifers can also be taken into account. This study is a first approach towards a better knowledge of the shallow aquifer behaviour, integrating all the available data.

The model covers a surface of about 3500 km² and is more or less corresponding to the Arges lower basin, one of the most important Danube's tributary rivers. According to measurements, the shallow unconfined aquifer shows clearly different piezometric gradients in the upstream and downstream areas of the domain.

Conceptually, a one-layer model is chosen and the lack of long term measurements determined the choice for a steady-state flow simulation. The well known MODFLOW and MODPATH programs are used to complete the groundwater flow and convective transport simulations. The boundary conditions are chosen according to the basin limits and the calibration is carried out by comparing the calculated piezometric surface to the measured one. The resulting hydraulic conductivities fit well the available measurements. Then the pollutant convective transport is calculated by particle injection simulation at different points of the aquifer. For different effective porosity values, the convective transfer delays are computed. Depending on the convective paths and on the values of the effective porosity, time intervals from 10 to 30 years are obtained. The conclusions emphasize the need for more detailed piezometric measurements and for local and accurate values of transport parameters (effective porosity, dispersivities, adsorption coefficients, etc.) in order to complete more accurately this aquifer study.

1. Introduction

Le développement de la ville de Bucarest durant les dernières décennies a provoqué la croissance des besoins en eau potable. Ce développement rapide, sans réelle planification, a provoqué, malgré les efforts des spécialistes, beaucoup de problèmes en ce qui concerne le système d'alimentation en eau potable.

Actuellement, l'équilibre entre la consommation d'eau et les débits que peuvent fournir les différentes captages du système est très précaire. Selon des estimations récentes, dans des

circonstances peu favorables, on ne peut assurer une alimentation continue en eau froide que pour 82 à 84% des habitants de la ville. De plus, pour maintenir cet équilibre précaire, il faut actuellement exploiter les captages, les aqueducs et les réservoirs au maximum de leurs capacités.

La ville de Bucarest est alimentée par un système qui s'est mal adapté aux nombreux changements apparus par rapport au plan initial notamment concernant l'emplacement des nouveaux quartiers et des industries. Des "arrangements" momentanés et ponctuels ont parfois été choisis comme solution provisoire, au détriment parfois d'autres consommateurs.

L'alimentation en eau potable de la ville est assurée par des prélèvements importants dans les rivières avoisinantes et le traitement est effectué aux stations Arcuda et Rosu.

L'eau provenant de la rivière Dambovita est traitée à la station de traitement Arcuda avec une capacité de 745000 m³/jour (~8600 l/sec). La zone de captage se trouve à 20 km en amont d'Arcuda, les débits étant assurés par un canal mis en exploitation en 1985.

Les processus de traitement utilisés comprennent la pré-décantation, la décantation, le traitement aux coagulants, des filtres rapides, des filtres lents et la désinfection au chlore.

La station de traitement Rosu a une capacité d'environ 52000 m³/jour (~ 6000 l/sec) et traite l'eau captée dans la rivière Arges à hauteur de Crivina.

Le traitement comprend: la rétention des parts grossières au niveau de la prise; la décantation suspensionnelle; le filtrage rapide; le traitement au sulfate d'aluminium, à la chaux, au charbon actif et la désinfection au chlore gazeux.

D'autre part, l'eau industrielle nécessaire pour la ville de Bucarest est fournie par deux systèmes:

- le système Cernica - Pantelimon (capacité 240000 m³/jour) comprenant deux stations qui traitent les eaux en provenance des lacs Cernica et Pantelimon II, destinées aux activités industrielles du sud-est de la ville.

- le canal Arges - Rosu (capacité 100000 m³/jour) couvrant les besoins en eau des industries situées dans l'autre moitié de la capitale.

Les réservoirs peuvent stocker seulement 15% du débit quotidien, et la réserve d'incendie représente à elle seule un tiers du volume stocké. N'importe quelle avarie mène à la réduction brutale des débits livrés aux consommateurs.

Un des programmes d'action tendant à éliminer les problèmes d'alimentation en eau prévoit le "doublement" du système, basé jusqu'ici sur le captage des eaux de surface, par le captage des eaux souterraines pratiqué à grande échelle. Ceci s'appuie sur le fait que la région de Bucarest est caractérisée du point de vue hydrogéologique par l'existence d'aquifères profonds capables de fournir de l'eau de bonne qualité et des débits exploitables considérables. Les couches aquifères moins profondes, font aussi l'objet de l'intérêt des hydrogéologues, en vue de leur exploitation pour l'eau industrielle.

2. Caractérisation de la zone d'intérêt et des aquifères concernés par l'étude

L'aquifère étudié se trouve dans la zone du bassin inférieur de l'Arges, dans la partie centrale de la Plaine Roumaine.

La construction d'un modèle mathématique pour représenter le comportement de cet aquifère permettra de simuler les écoulements souterrains et le transport de contaminant par convection en intégrant dans le modèle toutes les informations disponibles à ce jour.

Le modèle couvre une surface d'environ 3.500 km², dont les limites encerclent la ville de Bucarest, et sont distantes de 10 à 50 km par rapport à la capitale.

Les données ont été acquises à partir d'environ 200 forages de reconnaissance. Leur répartition n'est pas homogène dans le domaine étudié; de ce fait les données extrapolées ou corrélées n'ont pas le même degré de précision et de confiance dans toutes les zones de l'aquifère.

La zone étudiée est traversée (figure 2.1.) par la rivière Arges, un des plus importants affluents du Danube. On y trouve aussi quelques affluents de l'Arges: Colentina, Pasarea, Dambovita et Calnisteia, qui forment des vallées presque parallèles, avec une direction générale d'écoulement orientée de N-W vers S-E .

D'une façon générale, les études menées par les hydrogéologues roumains ont mis en évidence l'existence dans la Plaine Roumaine des formations hydrogéologiques suivantes (de haut en bas):

- **le système aquifère du Pléistocène Supérieur**, qui comprend:
 - les sables de Mostistea;
 - les sables et les graviers de Colentina;
 - les sables et les graviers de Dambovita
- **le système aquifère granulaire (sables et graviers) Romanian - Pléistocène Inférieur** qui contient:
 - les couches de Candesti;
 - les couches de Fratesti
- **le système aquifère fissural Jurassique - Crétacé Inférieur**, cantonné dans des formations calcaires.

Les eaux phréatiques de la région sont cantonnées dans un complexe de dépôts perméables de l'ère Quaternaire (les couches de Dambovita et de Colentina), constitués de sables fins ou moyens avec des éléments grossiers situés à la base du loess. Souvent, les formations aquifères présentent des intercalations imperméables ou semi-perméables. Ces couches sont discontinues. A la base et au toit des couches phréatiques des couches imperméables ou semi-perméables, constituées de silts, silts argileux ou d'argiles sont également présentes.

2.1. Le système aquifère du Pléistocène supérieur

Dans la zone étudiée la succession suivante a été mise en évidence:

- Sables et graviers alluviaux de Dambovita. Aux profondeurs de 4 à 15 m et avec des épaisseurs de 2 à 11 m. Il s'agit de sables fins et moyens qui se transforment vers la base en sables grossiers et graviers.

- Sables et graviers de Colentina. Cette couche est presque omniprésente dans le sous-sol de la zone étudiée, excepté dans la zone de la plaine alluviale de la Dambovita. Son épaisseur varie de 3 à 15 m, diminuant du Nord - Ouest vers le Sud - Est. La partie supérieure de la couche est constituée de sables ayant une granulométrie très variée, alors que des graviers et des matériaux pierreux dont les grains ont des diamètres jusqu'à 50 mm sont trouvés dans les zones plus profondes.

- Une couche intermédiaire de sables apparaît par endroit entre les sables et les graviers de Colentina et les sables de Mostistea (plus profonds). Elle a un développement assez discontinu, la plus importante zone d'apparition se situant à l'Ouest de la ville de

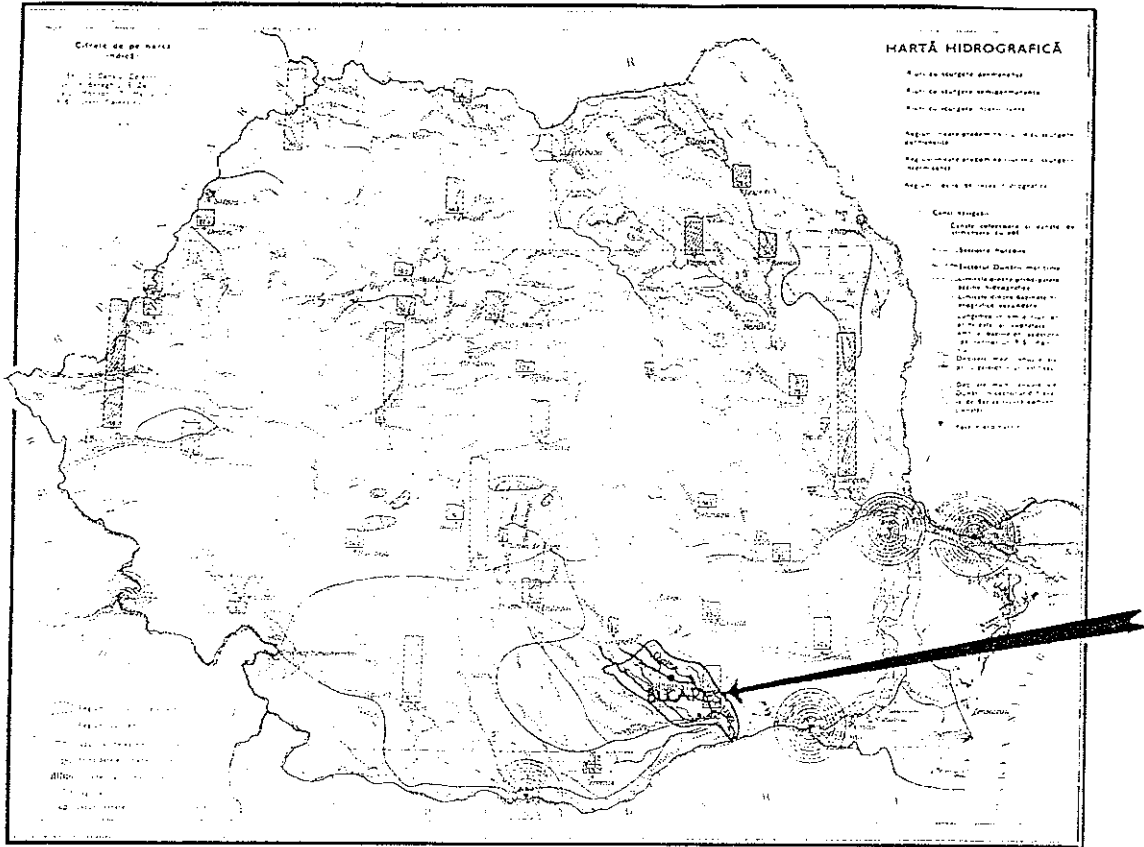


Fig.2.1. La position du domaine modélisé

Bucarest. Les matériaux qui forment cette couche sont des sables fins à grossiers, la fraction prédominante ayant des diamètres de 0.25 à 1.00 mm.

- Les sables de Mostistea constituent une couche continue, située aux profondeurs de 30 à 40 m. La granulométrie des matériaux est assez homogène, plutôt fine avec des rares intercalations argileuses.

- Des couches inférieures de sables séparant les horizons aquifères de petite et moyenne profondeur de ceux de grande profondeur.

Dans le cadre de cette étude seules les couches supérieures sont considérées, c'est à dire les sables de Dambovita et Colentina.

3. Construction du modèle mathématique

3.1. Synthèse des données

Les nappes aquifères peu profondes faisant l'objet de cette étude sont alimentées par les précipitations tombées pendant la saison froide (octobre - avril). Les niveaux piézométriques présentent des oscillations qui manifestent une périodicité saisonnière et multiannuelle.

L'amplitude et la fréquence de ces oscillations dépendent notamment de la quantité et de la durée des précipitations, mais également des capacités de stockage des aquifères.

Le bassin inférieur de l'Arges fait partie d'une unité géomorphologique uniforme (la Plaine Roumaine). De ce fait, dans la région étudiée les conditions climatiques et météorologiques sont également uniformes et, par conséquent, une valeur moyenne des précipitations peut être estimée pour l'ensemble de la zone.

Un bilan hydrologique annuel moyen de la nappe a été établi de façon suivante (Stefanescu, 1993) :

- précipitations moyennes annuelles: $P = 500$ mm
- évapotranspiration réelle moyenne: $ETR = 395$ mm
- infiltration efficace: $I = 70$ mm
- débit total des captages: 170000 m/jour soit $Q_{\text{capt}} = 115$ mm
- apport venant des rivières: $Q_r = 80$ mm

$$P + Q_r = ETR + Q_{\text{capt}} + I$$

3.2. Le modèle conceptuel

Dans le cadre de la théorie des Eléments de Volume Représentatifs (EVR), dans un milieu poreux continu, la couche aquifère sableuse et graveleuse est considérée comme étant continue, les intercalations argileuses présentes dans le domaine ayant un caractère local et ne coupant pas le contact hydraulique entre les différentes zones de l'aquifère.

Compte tenu du fait que la conductivité hydraulique de la couche qui se trouve au-dessous de l'aquifère est très faible, on a admis qu'on peut négliger les échanges par écoulement vertical entre les différentes couches du système aquifère. Cette hypothèse simplificatrice est loin d'être vérifiée et les campagnes d'acquisition de données devraient dans le futur être menées de manière à lever cette incertitude.

Le modèle conceptuel choisi est un modèle monocouche. Les simulations sont réalisées en régime permanent car nous ne disposons pas de données étalées dans le temps.

Le choix des conditions aux frontières doit être réalisé en s'assurant que les conditions imposées aux frontières du modèle créent le même effet que les limites naturelles. Après avoir choisi ces frontières, on doit justifier conceptuellement les éventuelles différences avec la

réalité afin de démontrer que les limites idéalisées n'influencent pas, ou très peu, la solution (Dassargues, 1991).

Environ deux tiers des frontières du domaine étudié, coïncident avec des limites physiques du bassin hydrogéologique, correspondant approximativement à des lignes de partage des eaux. Le problème étant étudié en régime permanent, on a pu imposer sur ces frontières une condition de flux nul. Sur le reste, des potentiels imposés constants ont été choisis.

Un point de discussion important au cours de cette étape a concerné la façon de représenter les rivières dans le modèle: doit on imposer le potentiel au droit des rivières ou non? Il est évident que si on avait imposé ces potentiels, suite à la densité assez élevée du réseau hydrographique dans la région, aucune calibration n'aurait pu être fiable, les résultats étant en grande partie imposés au modèle.

Afin de garantir une fiabilité raisonnable au modèle réalisé, certains niveaux d'eaux de portions de rivières connues en équilibre avec la nappe superficielle ont été utilisés comme piézomètres de référence pour la vérification du modèle.

3.3. La discrétisation

Les solutions simulées d'un système ont d'autant plus de sens physique que la manière dont la modélisation prend en compte la complexité des réservoirs aquifères est précise. Les hétérogénéités, variations spatiales, anisotropies sont souvent des sources de complications qui alourdissent la réalisation des modèles mathématiques en hydrogéologie (Dassargues, 1991), mais il est nécessaire de les prendre en compte.

Le logiciel utilisé est le MODFLOW - MODPATH. Vu la surface assez grande du domaine à modéliser - plus de 5000 km² - des mailles de 1000 x 1000 m ont été choisies, soit environ 5000 mailles. Vu les dimensions importantes du domaine et l'échelle à laquelle on travaille, cette discrétisation reste satisfaisante pour décrire les caractéristiques de l'aquifère.

Après l'élimination des cellules inactives aux bordures, le domaine étudié est représenté par environ 3500 mailles, soit une surface de 3500 km² à modéliser.

Les limites encadrent la ville de Bucarest qui est située au milieu du domaine. Les deux axes (Ox et Oy) dans le plan horizontal sont choisis respectivement quasi - parallèles et quasi - perpendiculaires à la direction générale de l'écoulement des rivières et dans la nappe.

En pratique, la discrétisation a été faite à partir des cartes topographiques et des coupes géologiques réalisées lors d'une étude concernant l'aquifère phréatique de la zone d'intérêt, menée par l'Institut National de Météorologie et Hydrologie (I.N.M.H., 1983).

Des difficultés ont été rencontrées car les coupes sont assez éloignées les unes des autres. Les valeurs de l'altitude de la base et du toit de la couche aquifère, ainsi que de la surface du terrain, ont dû souvent être interpolées sur base des données ponctuelles. Ceci a été réalisé en respectant avec soin les valeurs disponibles les plus proches et celles déduites de la géologie.

Grâce à l'option du logiciel permettant d'attribuer les valeurs de l'altitude cellule par cellule, on a évité le lissage des valeurs pour respecter au mieux les données disponibles.

3.4. Les paramètres hydrogéologiques de l'écoulement

L'aquifère étudié étant une nappe libre, les paramètres hydrogéologiques de l'écoulement sont la porosité efficace et la conductivité hydraulique .

Comme la simulation a lieu en régime permanent, la porosité efficace n'influence pas l'équation de conservation. Par contre, vu la nature sablo - graveleuse de la couche, une grande précision est requise en ce qui concerne la conductivité hydraulique.

Les valeurs de perméabilité ont été recalculées à partir des altitudes de la base de l'aquifère et du niveau piézométrique dans la couche à chaque endroit où une valeur de la transmissivité était disponible.

Comme il s'agit d'une nappe libre, à partir des conductivités hydrauliques introduites et d'une première approximation des niveaux piézométriques, le programme effectue partout le calcul des transmissivités. Ensuite, au cours des différentes itérations menant à la solution, la transmissivité est actualisée en la prenant égale au produit de la perméabilité et de la hauteur saturée dans la cellule concernée.

La prise en compte de l'anisotropie n'est justifiée que dans le cas d'aquifères où ce phénomène est clairement démontré. Il s'agit souvent d'aquifères fissurés où l'écoulement est modifié dans l'une ou l'autre des directions. Par conséquent, dans le modèle présenté ici on a négligé l'anisotropie.

3.5. La piézométrie

Dans la moitié Est de la zone, la densité plus grande des forages de reconnaissance a permis d'obtenir un meilleur degré de certitude quant à la piézométrie mesurée.

Pour la calibration, il faut connaître les zones où des incertitudes sont grandes dues aux interpolations linéaires utilisées pour dresser la carte piézométrique mesurée. Là où les points de mesure sont plus rares on peut soupçonner l'existence de variations que l'interpolation linéaire ne peut mettre en évidence.

On constate une modification de l'allure des isolignes de potentiel en allant de la partie amont vers la partie aval de la zone étudiée. Dans la partie amont les courbes sont quasi parallèles et équidistantes, ce qui leur confère un aspect assez régulier. Par contre, vers la partie aval du domaine, on constate des changements radicaux de gradients et de directions d'écoulement. Parfois même ces changements sont si évidents et si importants qu'on peut raisonnablement se poser la question de savoir s'il ne s'agit pas d'interventions humaines pour lesquelles on n'a pas d'informations.

Du point de vue géologique, cette différence peut s'expliquer par la nature des dépôts existants. La partie amont du domaine est caractérisée par l'existence des couches sableuses (les sables de Colentina et de Dambovita) assez homogènes. Vers l'aval de la zone modélisée, la granulométrie des dépôts change graduellement. On y trouve toujours les mêmes dépôts sableux, mais avec des intercalations silteuses et argileuses assez importantes. Ce sont ces intercalations qui provoquent vraisemblablement ces changements de gradient piézométrique.

L'apparition de ces hétérogénéités peut s'expliquer par le fait qu'on se trouve à la proximité de la vallée du Danube et de l'Arges et que par conséquent ces sédiments résultent de processus sédimentaires et d'érosion différents et peut-être plus puissants que dans les autres zones.

4. Calibration du modèle d'écoulement

L'intégration numérique des équations du mouvement de l'eau souterraine fournit des résultats (les valeurs du potentiel hydraulique) qui devraient être identiques ou très proches des valeurs réelles des niveaux piézométriques, obtenues par observations directes. Avant que ce soit le cas, le modèle nécessite une calibration. En pratique, on constate dans cette étape des différences très importantes entre les valeurs mesurées et celles calculées. L'existence de ces différences s'explique par l'utilisation de paramètres équivalents (dans le cadre de la théorie de l'EVR), non encore ajustés aux caractéristiques réelles de l'aquifère.

Les valeurs de perméabilité, déterminées avec une certaine approximation en analysant les résultats des essais de pompage nous fournissent d'excellentes indications. Les valeurs des autres paramètres comme l'échange des débits entre la nappe et les rivières ou la valeur des infiltrations dans l'aquifère par percolation, ne font habituellement pas l'objet de mesures directes.

Pour ajuster les valeurs des perméabilités avec la meilleure précision possible, on applique une méthode qui consiste en l'exécution d'essais successifs pour chaque set de valeurs choisi. La modification de ces paramètres est faite dans le sens de l'obtention d'une approche optimale entre les résultats des calculs et les valeurs mesurées en réalité.

Un modèle n'est donc qu'une copie aussi fidèle que possible de la réalité, mais la représentation de celle-ci par un schéma nous permettant de nous faire une idée de ce qui se passe. Il en résulte logiquement qu'un modèle bien calibré n'est pas spécialement celui où on a défini une multitude de perméabilités différentes, mais, par contre, une bonne calibration est souvent celle qui essaye de considérer le minimum de valeurs différentes tout en respectant au maximum toutes les informations dont on dispose.

Si on tente de distinguer des zones importantes couvrant de grandes surfaces, la calibration du modèle devient parfois très difficile, la taille des EVR considérés étant elle-même très grande. En effet, on a beaucoup plus de chance d'intégrer des discontinuités ou des hétérogénéités peu ou pas connues. D'autre part, habituellement plus la surface du modèle augmente, plus les possibilités techniques d'avoir des données suffisantes décroissent. C'est pour ces raisons que l'étape de calibration est la partie la plus délicate de la construction du modèle.

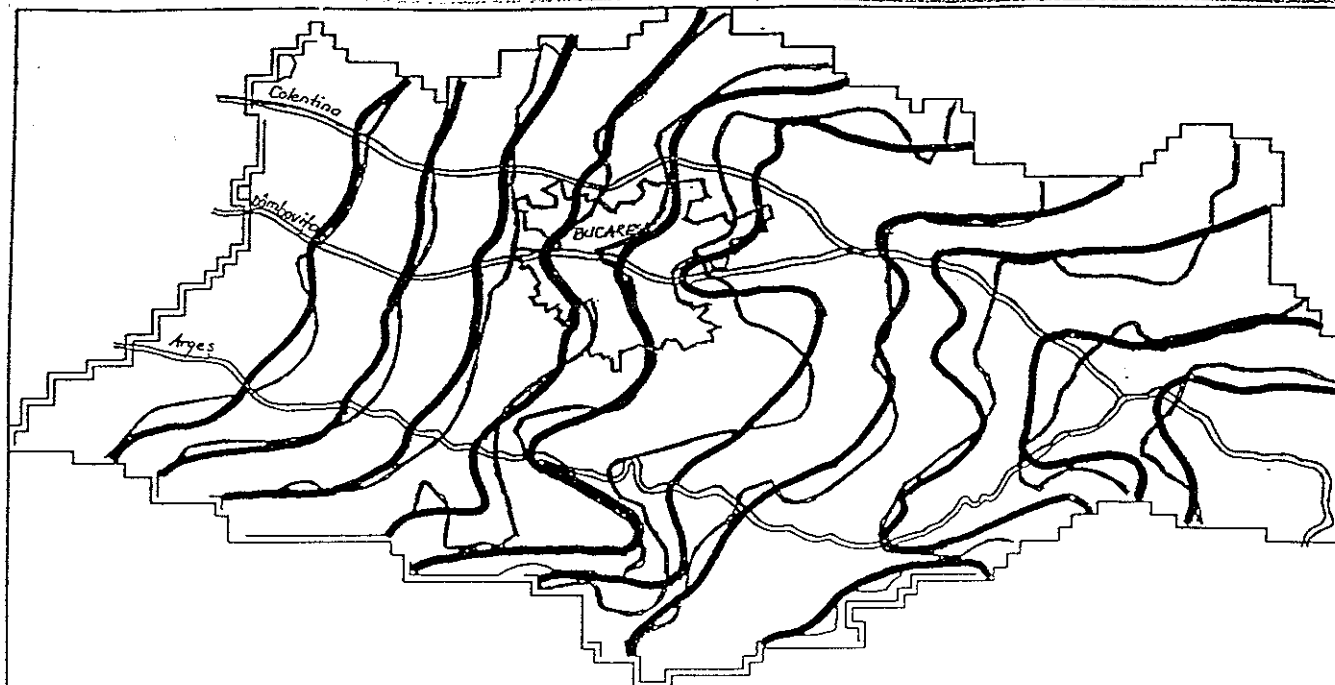
Des classes de valeurs de la conductivité hydraulique ont été retenues, allant de 30 m/jour à 200 m/jour, soit de 3.5×10^{-4} m/s à 2.5×10^{-3} m/s.

Cette étape nous a permis de distinguer quelles anomalies observées sur la carte piézométrique sont dues à des irrégularités de la couche, lesquelles d'entre elles sont dues à des variations importantes de la conductivité hydraulique où à des pompages locaux.

Ensuite, on a pu s'approcher de la solution calibrée au mieux par rapport aux mesures en jouant seulement sur les valeurs de la perméabilité. Ceci a permis l'obtention de résultats satisfaisants à partir desquels il était devenu très difficile d'encore améliorer la solution.

5. Résultats du modèle d'écoulement

Dans notre cas, tenant compte de la densité variable et de l'imprécision des données de départ, on peut dire qu'on arrive à une calibration acceptable si les différences entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées sont inférieures à 0.5 - 1.0 m (fig.5.1). Il faut aussi tenir compte du fait que l'incrément des courbes équipotentielles sur la carte mesurée est de 10 m, ce qui réduit d'une certaine façon les possibilités d'avoir une calibration très précise.

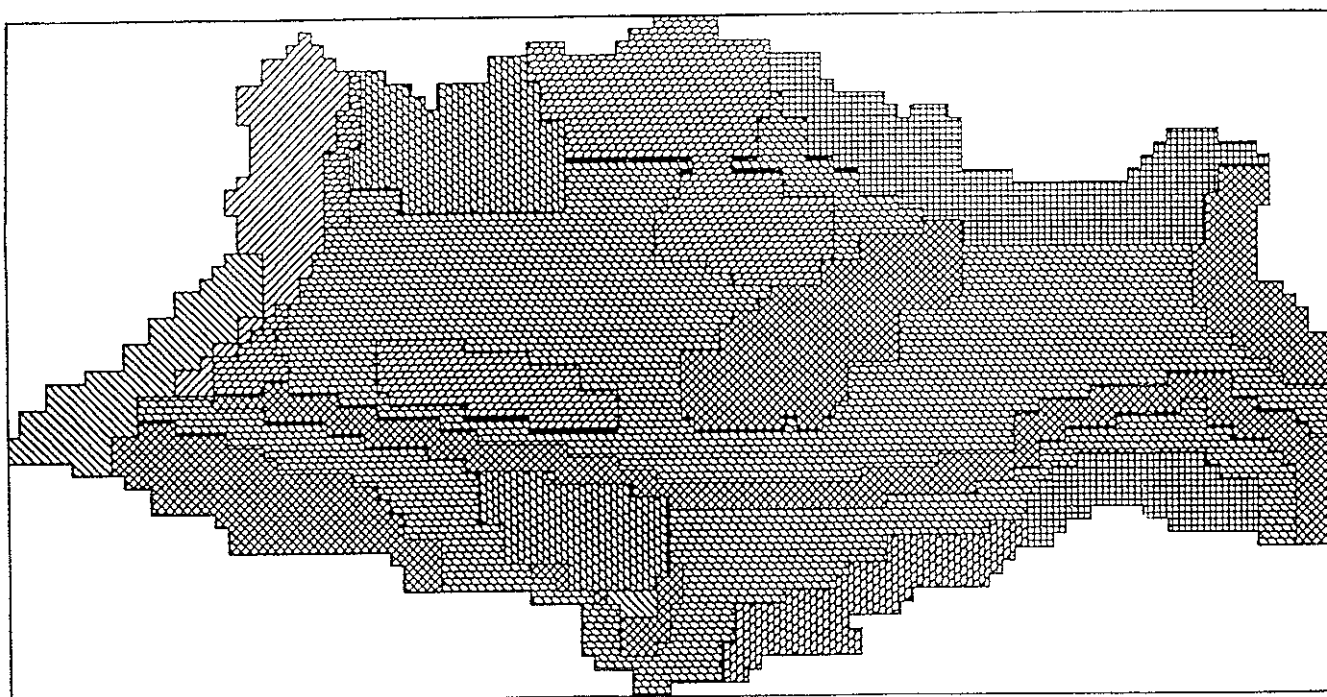


BUURESTI - PIEZOMETRIE ACVIFER FREATIC
 MIN = 20 , MAX = 120 DELTA = 10

0 10 20 km

— potentiels mesurés
 - - - potentiels calculés

Fig.5.1. La calibration du modèle d'écoulement



2E+2 1.5E+2 1E+2 8E+1 7E+1 5E+1 3E+1 1E+1



BUURESTI - PIEZOMETRIE ACVIFER FREATIC

0 10 20 km

Fig.5.2. Les perméabilités déduites de la calibration

Les conductivités hydrauliques déduites de la calibration semblent être dans la normale et par conséquent satisfaisantes. On a débuté avec 5 classes de valeurs et à la fin du processus le modèle a été calibré en utilisant 7 classes, allant de 30 m/jour à 500 m/jour. Pour affiner encore le niveau de précision de cette calibration, un panel plus étendu de valeurs devrait sans doute être pris en compte et des données complémentaires à ce sujet seraient nécessaires (fig.5.2.).

6. Le modèle de transport

Le logiciel MODPATH permet de simuler le transport pur convectif des polluants à partir des écoulements calculés par le programme MODFLOW. Les particules de polluant sont transportées par le courant convectif souterrain avec une vitesse égale au quotient du flux de Darcy par la porosité efficace (n_e) du milieu traversé. Ce logiciel permet de simuler l'injection de particules où on le désire et de voir dans quelle direction ces particules de polluant se dirigent et quelles sont les durées de ces trajets convectifs.

La simulation du transport convectif permet de mettre en évidence d'une façon très claire les tendances et les directions préférentielles d'écoulement et d'estimer les temps moyens de transport convectif et, par conséquent, la capacité d'auto-épuration de l'eau polluée.

La vitesse de convection va déterminer le flux massique convectif défini par (Dassargues, 1993):

$$f_c = r C v_e = r C v / n_e = C^V v / n_e,$$

où:

- C est la concentration massique;
- C^V est la concentration volumique;
- r - masse volumique;
- v est la vitesse Darcy;
- v_e est la vitesse effective.

Cette relation met en évidence l'importance de connaître précisément la porosité efficace du milieu afin de pouvoir quantifier correctement la durée des trajets convectifs envisagés.

En pratique, pour nos simulations, deux particules ont été injectées suivant les deux directions horizontales sur la face supérieure de chaque cellule où les plus hautes valeurs du potentiel sont trouvées et d'autre part des injections de particules au droit de la ville de Bucarest ont été simulées pour étudier le transport convectif à partir de cette zone.

Les trajectoires obtenues (fig.6.1. et 6.2.) montrent que la grande majorité des particules injectées se dirigent vers les rivières. L'importance de ce résultat est grande si on tient compte du fait que la quasi - totalité des débits utilisés pour l'alimentation en eau de la ville de Bucarest sont prélevés des eaux de surface.

Le temps de parcours des particules a été estimé pour différentes valeurs de la porosité efficace, vu le manque de données exactes sur ce dernier paramètre. On constate que la plupart des trajectoires ont des longueurs de 25 - 30 km. Les temps nécessaires pour qu'une particule soit dans l'eau des rivières étaient d'environ 10 à 30 ans, pour des valeurs de la porosité efficace de 0.05 à 0.15, respectivement.

Evidemment, vu l'agriculture pratiquée à grande échelle aux environs de Bucarest, il serait très intéressant d'étudier la propagation des polluants correspondant aux engrais utilisés. Mais pour simuler le transport de ce genre de substances il est absolument nécessaire de connaître plus profondément les caractéristiques du milieu, et tout particulièrement dans la zone partiellement saturée ou non saturée.



Fig.6.1. Trajectoires des particules de polluant injectées sur la limite amont

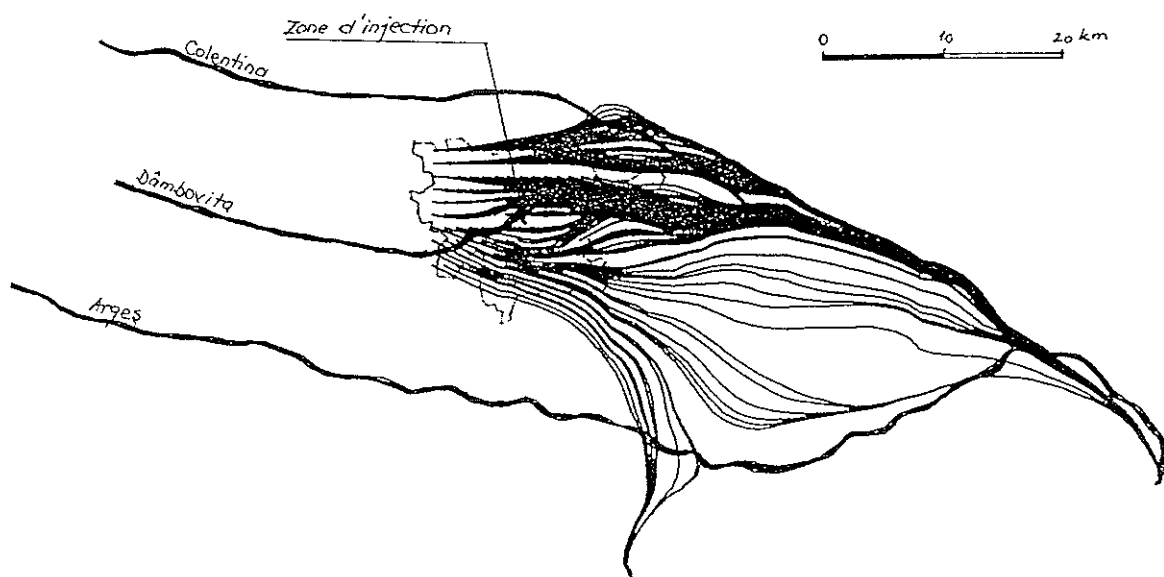


Fig.6.2. Trajectoires des particules de polluant injectées dans la zone de Bucarest

7. Conclusions

Les problèmes liés à l'insuffisance des débits fournis par l'alimentation en eau potable de la ville de Bucarest et à la pollution croissante des cours d'eau de surface a déterminé la prise en compte de la possibilité que les eaux souterraines de la région soient captées et utilisées à grande échelle.

Le système aquifère de la région est connu à partir des données acquises par l'intermédiaire d'environ 200 forages de reconnaissance. On a mis en évidence la succession suivante:

- les sables et les graviers de Dambovita;
- les sables et les graviers de Colentina;
- les sables intermédiaires;
- les sables de Mostistea;
- les couches inférieures de sables.

L'étude prend en compte seulement les sables de Dambovita et Colentina, contenant les aquifères superficiels.

La tendance générale de la piézométrie indique un écoulement dirigé de N-W vers S-E.

Les valeurs prises pour le calcul du bilan hydrologique annuel moyen de la nappe sont:

- précipitations moyennes annuelles: $P = 500$ mm;
- évapotranspiration moyenne: $ETR = 395$ mm;
- infiltration efficace + pertes: 70 mm;
- débit des captages: 115 mm;
- apport des rivières: $Q_r = 80$ mm.

Les simulations ont été réalisées avec le logiciel MODFLOW-MODPATH.

Dès les premières exécutions du programme, on a pu constater que les grandes lignes de l'allure de la nappe étaient bien représentées. La calibration a été réalisée en jouant seulement sur les valeurs de la perméabilité. Dans les zones où les piézomètres ont une densité très faible, les valeurs prises en compte restent encore affectées d'une grande incertitude. Les conductivités hydrauliques déduites de la calibration ont des valeurs allant de 30 à 500 m/jour.

Au niveau simulation du transport des polluants, vu le manque de données détaillées, on a négligé le rôle de la dispersion et on a considéré (à ce stade de l'étude) le transport comme étant purement convectif.

Les simulations du transport convectif fournissent les trajectoires moyennes et les temps de parcours moyens. La plupart des trajectoires ont des longueurs de 25 à 30 km et le temps nécessaire pour qu'une particule injectée sur la limite amont de potentiel imposé se retrouve dans les rivières est de 10 à 30 ans, pour des valeurs de la porosité efficace de 0.05 à 0.15, respectivement.

Le modèle présenté est très perfectible. Au stade actuel (manque de données étalées dans le temps, absence de valeurs pour les coefficients de dispersion ou de retard) on s'est limité à construire un modèle en régime permanent et on a simulé le transport en négligeant la

dispersion. De ce fait les études à faire dans le futur devraient être orientées vers l'acquisition de données plus détaillées, afin de pouvoir mieux approcher la situation réelle.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **Bear et Verujit** - Modelling groundwater flow and pollution - Reidel, 1987
2. **Chiang, W-H., Kinzelbach, W.** - Processing MODFLOW, Department of Civil Engineering, Kassel University, Germany, 1992
3. **Dassargues, A.** - Vers une simulation physiquement significative du mouvement de l'eau et des polluants solubles dans les nappes aquifères, Université de Liège, 1993
4. **Danchiv, Al.** - Simulation numérique du transport des polluants dans les aquifères, rev. "Hidrotehnica", Bucarest, vol. 33, no.3, 1988
5. **Fried, J.** - Groundwater pollution, Elsevier Scientific Publishing Co., 1975
6. **I.N.M.H. Bucarest** - L'estimation des ressources des eaux souterraines exploitables dans le bassin de l'Arges, 1983
7. **De Marsily, G.** - Hydrogéologie quantitative, 1986
8. **Stefanescu, C.** - Les implications qualitatives et quantitatives de la réalimentation des horizons aquifères près de Bucarest, TEMPUS DEA-SEE, Bucarest, 1994
9. * * * - Pollution et protection des aquifères, UNESCO, 1986

57

RENCONTRES HYDROLOGIQUES FRANCO-ROUMAINES

Troisième Assemblée

Contribution au Programme Hydrologique International de l'UNESCO

organisée par

les Comités Nationaux Français et Roumain de l'AISH et du PHI

sous le patronage de

l'Association Internationale des Sciences Hydrologiques

avec le soutien

du Ministère Français de l'Environnement

*du Ministère Roumain des Eaux, des Forêts et de la Protection de
l'Environnement*

de l'Organisation Météorologique Mondiale

de la Régie Autonome "Apele Romane"

et du Conseil Régional Languedoc Roussillon

MONTPELLIER, 6 - 8 septembre 1995