

2

Modèle hydrogéologique en zone aride ou semi-aride

A. DASSARGUES, A. MONJOIE

*Faculté des Sciences appliquées, Université de Liège, au Sartliman,
Bâtiment B 19, 4000 Liège, Belgique*

Si les nappes d'eaux souterraines en zone aride à semi-aride ont des caractéristiques hydrogéologiques classiques, leurs conditions de réalimentation et d'exploitation induisent des problèmes particuliers dont on doit tenir compte lors de leur modélisation.

Au point de vue exploitation, le manque d'eau potable de ces régions conduit à exploiter des aquifères de faible capacité qui, en Europe, ne seraient retenus que pour des besoins individuels ou très locaux. En zone aride ou semi-aride, un puits donnant 1 à 18 m³/h est souvent une aubaine.

D'autre part, la dispersion des populations impose une implantation tout aussi diffuse des puits d'exploitation d'eaux souterraines.

Ces deux caractéristiques sont également imposées par le caractère aléatoire et très limité de l'alimentation naturelle des nappes. Il faut « tenir » sur les réserves de la nappe durant de longues périodes dépassant souvent quelques années.

De manière à optimiser l'exploitation des nappes sans épuiser leurs réserves, des modèles mathématiques déterministes et physiquement significatifs sont utilisés. Leur avantage consiste à intégrer toutes les données disponibles, d'approximer de façon logique et fiable les données manquantes et de fournir une réponse globale montrant les tendances de la nappe en régime transitoire.

Les modèles hydrogéologiques, physiquement significatifs, sont basés sur des lois d'écoulement en milieu poreux utilisant comme paramètres la transmissivité (ou la perméabilité), le coefficient d'emmagasinement et des coefficients d'infiltration. Le calcul est réalisé en résolvant l'équation différentielle avec les paramètres spécifiés, les sollicitations extérieures et les conditions aux limites imposées.

La solution proposée par le modèle consiste en une description de la piézométrie (ou du champ de pression).

Dans les hypothèses prises pour le calcul et dans la description géométrique de l'aquifère (discrétisation en sous-régions) nécessaires pour la simulation numérique, il est indispensable de prendre en compte les caractéristiques essentielles de chaque cas étudié.

Vu les faibles réalimentations naturelles des nappes, il est par exemple indispensable de réaliser des simulations en mode transitoire.

Caractéristiques principales des aquifères

Les principales nappes que nous avons eu l'occasion d'étudier en zone aride ou semi-aride peuvent être caractérisées comme suit.

Nappes alluviales logées dans les dépôts sablo-graveleux des Oued ou Kori

Généralement, le problème est classique et la modélisation n'implique pas de problèmes particuliers aux zones arides, hormis la réalimentation qui est épisodique, sauf pour les grands fleuves pérennes.

Ce point est certes important mais ne modifie pas la conception du modèle que nous appliquons en Europe.

Les nappes à surface libre doivent être étudiées en régime transitoire. Vu les larges superficies concernées, il est indispensable de pouvoir traiter le problème sans changement de discrétisation (remaillage) après chaque pas de temps. Le programme utilisé permet donc de prendre en compte la non-linéarité de la transmissivité car celle-ci dépend de la hauteur piézométrique qui est elle-même calculée par le modèle.

Moyennant une bonne gestion et si possible une réalimentation artificielle, ces aquifères offrent des potentialités remarquables. Dans certains cas, on trouve, sous les alluvions actuelles, un paléo-relief à dépôt graveleux, fournissant des réserves aquifères pluriannuelles à condition d'en assurer la réalimentation en périodes pluvieuses.

Nappes du manteau d'altération

Elles sont également classiques mais leur réalimentation est très limitée.

Elles se tarissent vite et sont surtout sensibles aux pollutions. Très exploitées par puits artisanaux, donnant des débits limités et très variables, elles méritent rarement une modélisation mathématique.

Nappes des « dallols » du Niger

Ces nappes méritent une attention particulière. Les horizons sableux qui les contiennent présentent des variations de faciès rapides, les corrélations entre deux puits, parfois distants de quelques centaines de mètres, étant aléatoires.

Modèle hydrogéologique

Les lentilles sableuses ont des extensions limitées, ce qui pose le problème de la réalimentation de tels aquifères via les horizons silto-argileux encaissants (aquitards). Ces intercalaires étant généralement assez compressibles, il en résulte qu'une baisse de pression de l'aquifère entraîne un tassement de l'aquitard avec expulsion d'eau de celui-ci. Si le phénomène est favorable à court terme, il implique par tassement de l'aquitard une diminution de la perméabilité de celui-ci et par voie de conséquence une réduction notable de l'alimentation de la lentille sableuse.

Le phénomène est souvent ignoré ou négligé par les hydrogéologues alors qu'il est bien connu des géotechniciens s'occupant des tassements induits en surface dans de tels environnements. Le phénomène, d'autant plus intense que le rabattement est important, est sans doute responsable pour une part de la baisse progressive du rendement des puits dans ces aquifères.

Le phénomène peut être approché mathématiquement et il est évident que tout modèle dans de tels aquifères doit en tenir compte.

Les paramètres intervenant dans l'équation d'écoulement en milieu poreux sont le coefficient de perméabilité K et le coefficient d'emmagasinement spécifique S_v .

Ces grandeurs sont fonction de l'état de contrainte régnant dans le milieu. Dans le cas où la compressibilité de l'eau et la compressibilité des grains solides sont négligées par rapport à la compressibilité du milieu poreux due à un réarrangement des grains (diminution de la porosité), on peut écrire :

$$S_v = \rho \cdot g \cdot \alpha$$

où $\rho \cdot g$ = poids volumique de l'eau

α = coefficient de compressibilité du milieu poreux.

Les terrains compressibles ont un caractère argileux prépondérant et leur compressibilité est déterminée par des essais oedométriques. Il vient :

$$S_v = \rho \cdot g / A \cdot \sigma' \text{ en régime élastique}$$

$$S_v = \rho \cdot g / C \cdot \sigma' \text{ en régime plastique}$$

où A = constante de gonflement (élastique) du milieu

C = constante de compression (plastique) du milieu

σ' = la contrainte effective.

Les constantes A et C sont déterminées par l'essai oedométrique, de même que la contrainte effective de préconsolidation (σ'_{pre}) limitant le domaine élastique et le domaine plastique. On constate que S_v va varier en fonction de σ' et donc en fonction des conditions de pression d'eau dans le milieu poreux. Le modèle utilisé permet de tenir compte de cette variation du coefficient d'emmagasinement spécifique.

La réduction du volume des vides due au réarrangement des grains lors d'un tassement provoque une baisse de la perméabilité du milieu poreux. Différentes relations liant la perméabilité à l'indice des vides ou à la porosité peuvent être aisément introduites dans le modèle. Dans le cas des couches compressibles argileuses d'origine marine nous avons utilisé avec succès l'équation :

$$K = \exp (\alpha_v \cdot e + \beta_v)$$

Les coefficients α_v et β_v sont à déterminer pour chaque milieu poreux compressible de nature différente, sur base d'essais ayant fourni des valeurs de K et des valeurs de l'indice des vides e .

L'introduction dans le modèle des variations de S , et de K entraîne l'apparition dans celui-ci d'un couplage écoulement — tassement, doublé des non-linéarités de ces paramètres.

Ce genre d'étude implique un modèle nettement tridimensionnel, de géométrie très complexe, fonctionnant en régime transitoire avec évolution des caractéristiques K et S , en fonction des variations de pression.

Aquifère logé dans les fissures du substratum rocheux

Il correspond à une nappe classique de fissures. Hétérogène et très anisotrope, il est souvent difficile à modéliser correctement, même en Europe. Dans les cas que nous avons été amené à traiter, notamment au Mali, en Guinée..., le substratum n'est aquifère qu'au droit de certaines failles ou dans et à proximité de filons ou dyke de roches éruptives, notamment des dolérites.

En cas de substratum affleurant ou subaffleurant, le caractère rare et aléatoire des pluies conditionne fortement le débit moyen annuel exploitable. Heureusement, dans les zones arides ou semi-arides, le substratum rocheux est souvent recouvert par une épaisse couche de manteau d'altération, siège de la nappe superficielle dont il est question ci-avant.

Ces accidents constituent des axes de drainage préférentiels, autorisant des débits souvent élevés, fonction de l'extension des sillons de rabattement induit. Ceux-ci, drainant per descensum la nappe superficielle, assurent ainsi une alimentation plus pérenne et différée dans le temps, permettant de franchir des périodes plus ou moins longues de sécheresse.

Un tel aquifère implique une modélisation susceptible de représenter valablement les axes de drainage préférentiels que sont les failles ou filons et la drainance verticale de la nappe superficielle.

De plus, le caractère évolutif dans le temps de l'alimentation nécessite un fonctionnement en régime transitoire.

Seul un modèle réellement 3 D et fonctionnant en régime transitoire permet de simuler un tel comportement. Par contre, la géométrie du modèle est relativement simple par rapport à celle des dallois.

Modélisation de nappes captives classiques du type de la nappe du Maestrichtien

Elle ne pose pas de problème particulier en zone aride ou semi-aride.

Cependant leur modélisation en mode transitoire est impérative car trop souvent leur facilité d'exploitation et les bons débits obtenus conduisent à une surexploitation inquiétante avec baisse de pression et diminution des caractéristiques K et S , s'il y a des terrains compressibles surincombants ou intercalaires.

Enfin, l'alimentation réduite des nappes en zone aride et semi-aride et son caractère aléatoire impliquent de pouvoir modéliser correctement le phénomène et de calculer correctement le temps de transfert entre surface et nappe.

De plus, l'augmentation des besoins par rapport aux dimensions souvent réduites de la plupart des aquifères conduit à envisager une réalimentation artificielle des nappes. Cette réalimentation peut provoquer des modifications de K et S , par dissolution ou précipitation des ions, échanges de base, variation de température. Les modèles utilisés doivent pouvoir tenir compte de ces phénomènes.

Modèle hydrogéologique

Parmi les modèles mathématiques de type déterministe et physiquement significatifs, seuls les modèles éléments finis nous paraissent réunir les caractéristiques nécessaires pour « coller à la réalité ».

Les éléments peuvent être de forme quelconque (3 D, plan 2 D, 1 D type tube,...) et la variabilité des caractéristiques hydrogéologiques peut y être introduite. Avec le code LAGAMINE mis au point à l'Université de Liège par le laboratoire M.S.M. et adapté par les L.G.I.H. aux phénomènes hydrogéologiques, nous avons pu résoudre les différents problèmes cités ci-avant.

Le programme se présente sous forme modulaire, ce qui a permis les adaptations aisées de la loi constitutive pour tenir compte des phénomènes couplés (écoulement-tassement, par exemple) et des variations des paramètres en fonction du temps et éventuellement de la pression d'eau.

Cependant, un des gros problèmes subsistant en zone aride et semi-aride est le manque de données et le manque d'historique de données pour pouvoir caler valablement le modèle.

Les valeurs des paramètres ne sont connues que dans certaines zones locales et l'hydrogéologue doit fournir des estimations pour les autres zones.

Néanmoins, dès que le modèle est choisi, les reconnaissances hydrogéologiques in situ peuvent être orientées de manière à satisfaire ses besoins en données.

La procédure de « calibration » du modèle consiste ensuite à minimiser la différence entre mesures et résultats par l'ajustement des données d'entrée jusqu'à ce que le modèle reproduise les conditions du champ mesuré avec un niveau de précision acceptable.

Une étude de la sensibilité du modèle par rapport aux différents paramètres est souvent très importante. Ce type d'analyse doit pouvoir couvrir les aspects suivants :

- étudier les interactions entre paramètres (relations éventuelles);
- déterminer la plage de variation optimum pour un paramètre, et l'influence d'une variation (choisie dans cette plage) sur certains résultats;
- déterminer éventuellement les « importances » respectives des différents paramètres intervenant dans le modèle.

Les conclusions de ce type d'étude peuvent amener à diriger les prospections ultérieures vers des endroits considérés comme particulièrement « sensibles » pour la précision des résultats du modèle.

Conclusions

Lors de l'utilisation d'un modèle mathématique pour simuler le comportement de nappes régionales, en zone aride ou semi-aride, il est indispensable de tenir compte de façon précise des caractéristiques propres de ces nappes :

- respecter le plus possible, par une approche 3 D, la géométrie de l'aquifère;
- évaluer les paramètres sur base d'un nombre suffisant d'essais et mesures;

- introduire des conditions initiales cohérentes et des conditions aux frontières influençant au minimum les résultats cherchés dans la zone sollicitée;
- réaliser les simulations en mode transitoire.

Préalablement à ces recommandations, qui influencent fortement le degré de fiabilité du modèle, il est nécessaire de réaliser une collecte de données aussi exhaustive que possible. Ensuite, en découle le choix des paramètres, la phase de calibration et les résultats prévisionnels du modèle.

D'autre part, il faut être vigilant par rapport à des phénomènes induits, tels que les tassements, diminution de porosité et de perméabilité... et en tenir compte dans les modélisations. Ce type de non-linéarités des paramètres, appliquées à un modèle réellement 3 D, augmente fortement le temps de calcul (CPU time) consommé, mais les ordinateurs ou « stations de travail » de plus en plus puissants et de moins en moins onéreux permettent et permettront dans l'avenir ce type d'analyse à des coûts raisonnables.

Références

1. Castany G. (1968). *Prospection et exploitation des eaux souterraines*. Paris : Dunod, 717 p.
2. Dassargues A., Bolly P.Y., Monjoie A. (1988). Finite difference and finite element modelling of an aquifer in Cretaceous chalk, *Proceedings of the 6th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics*. Innsbruck : Balkema.
3. Dassargues A., Radu J.-P., Charlier R. (1988). Finite elements modelling of a large water table aquifer in transient conditions. *Advances in Water Resources*, 11 (2), Computational Mechanics Publications.
4. Dassargues A. (1990). Modèles mathématiques en hydrogéologie et paramétrisation, *Bulletin de la Société Géologique de Belgique*, 1990 (à paraître).
5. Delvaux Th., Monjoie A. (1987). *Projet de forages à Dosso (Niger); ensablement des puits*. Rapport LGIH, Université de Liège pour l'Agence Générale de Coopération au Développement de Belgique (non publié).
6. De Marsily G. (1981). *Hydrogéologie quantitative*. Paris : Masson, 440 p.
7. Fetter G.W. (1988). *Applied Hydrogeology*, Second edition, Messil Publishing Company.
8. Halleux L., Monjoie A., Van Lierde M. (1984). *Mission de Prospection hydrogéologique pour l'implantation de 35 puits le long de la voie ferrée Bamako-Kidira (Mali)*, Rapport LGIH, Université de Liège pour l'Agence Générale de Coopération au Développement de Belgique (non publié).
9. Michiels Th., De Rijdt R., Perin P. et Monjoie A., 1989. *Forages à Dosso (Niger)*, Rapport LGIH. Université de Liège pour l'Agence Générale de Coopération au Développement de Belgique, non publié.
10. Monjoie A. (1985). *Note au cours d'Hydrogéologie*, Université de Liège.