

L'utilisation des modèles mathématiques pour l'exploitation des nappes d'eau souterraines

Lelièvre R.F.

L'eau

**Paris : CIHEAM
Options Méditerranéennes; n. 14**

1972
pages 86-89

Article available on line / Article disponible en ligne à l'adresse :

<http://om.ciheam.org/article.php?IDPDF=CI01.0484>

To cite this article / Pour citer cet article

Lelièvre R.F. **L'utilisation des modèles mathématiques pour l'exploitation des nappes d'eau souterraines.** *L'eau*. Paris : CIHEAM, 1972. p. 86-89 (Options Méditerranéennes; n. 14)



<http://www.ciheam.org/>
<http://om.ciheam.org/>

R. F. LELIÈVRE
Géohydraulique
Groupe OTH

L'utilisation des modèles mathématiques pour l'exploitation des nappes d'eaux souterraines

De la baguette fourchue chère à nos ancêtres, aux exploits sportifs de nos spéléologues, certains mythes entourent encore le milieu des eaux souterraines. Et ce n'est pas par hasard que les anglosaxons utilisent le mot « underground » pour désigner certaines activités culturelles ésotériques!

Qui n'a entendu ce paysan évoquer la « rivière souterraine » qui parcourt sa propriété, quand il s'agit en fait d'une nappe aquifère? ou cet autre s'étonner ou se plaindre des caprices d'une source, attribuant à quelque sort fantasque la variabilité climatique du lieu ou l'influence lointaine d'un pompage périodique? qui n'a vu enfin celui-là entourer son puits de soins religieux dans la crainte perpétuelle que la « source » qu'il a mise à jour « ne se perde »?

Pourtant, depuis qu'au siècle dernier Darcy jeta les fondements d'une science nouvelle, l'hydraulique souterraine a accompli des progrès considérables; longtemps partagée entre deux conceptions opposées et néanmoins complémentaires qui lui ont apporté, l'une, la connaissance naturaliste du milieu hydrogéologique, l'autre, la connaissance théorique des mécanismes hydrodynamiques, elle s'est érigée en une science relativement précise faisant notamment appel aux plus récents développements de l'informatique.

Alors que les ressources en eau commencent à constituer une denrée rare qu'il convient de gérer avec soin, il est devenu nécessaire de disposer de techniques visant à la maîtrise des eaux souterraines; en particulier l'exploitation des nappes d'eaux souterraines ne doit plus être laissée au hasard; elle doit pouvoir être planifiée et intégrée dans des schémas d'aménagement régionaux.

EAUX SUPERFICIELLES ET EAUX SOUTERRAINES

Les eaux souterraines se distinguent des eaux superficielles par deux qualités :

- le sous-sol renferme des eaux bactériologiquement pures, appréciées pour l'alimentation humaine,
- les nappes constituent des réservoirs naturels facilement exploitables.

Toutefois, alors que la mobilisation des eaux superficielles résulte de la seule consi-

dération du régime hydrologique des cours d'eau, l'exploitation rationnelle des eaux souterraines requiert l'existence :

- de ressources disponibles,
- d'aptitudes locales des nappes,
- de moyens de captage appropriés.

BILAN DES NAPPES ET RESSOURCES DISPONIBLES

Le bilan d'une nappe résulte de la comparaison des apports et des exhaures de l'ensemble de l'unité hydrogéologique considérée. Une nappe peu exploitée par l'homme présente un bilan équilibré : les apports compensent globalement les exhaures et la réserve d'eau reste, en moyenne inchangée.

Les exhaures se décomposent en exhaures artificielles (prélèvements humains) et naturelles (drainage par les cours d'eau, évaporation des nappes dans des zones d'affleurement, évapotranspiration des zones marécageuses, fuites naturelles vers la mer ou vers d'autres aquifères, etc.).

Si l'homme désire intensifier les prélèvements dans les nappes, cet accroissement doit s'effectuer au détriment des exhaures naturelles afin de ne pas déséquilibrer le bilan global; les exhaures naturelles constituent donc, sauf cas particulier, les *ressources disponibles* des nappes.

Si les prélèvements humains étaient inconsidérément accrus, les exhaures viendraient à excéder les apports et le déficit du bilan serait compensé par une diminution des réserves de la nappe; il en résulterait une baisse inexorable des niveaux. La surexploitation ne peut donc constituer qu'une solution temporaire car elle met en péril l'équilibre hydraulique d'une région (1).

(1) Elle peut toutefois être tolérée dans deux cas très particuliers :

1° Dans le cas de vallées parcourues par un cours d'eau important, les pompages dans la nappe alluviale ont pour effet d'induire une réalimentation de la nappe par le cours d'eau; les prélèvements s'effectuent ainsi au détriment du cours d'eau ce qui est tolérable s'il n'existe pas de contraintes visant à préserver un débit minimum du cours d'eau.

2° Dans le cas d'une nappe au bilan déficitaire, il est possible d'accroître les apports en rechargeant artificiellement la nappe.

APTITUDES LOCALES DES NAPPES ET RESSOURCES MOBILISABLES

Les ressources disponibles ne peuvent pas être prélevées n'importe où : tout prélèvement dans une nappe créant une dépression localisée du niveau, les possibilités d'exploitation des nappes dépendent :

- de la répartition spatiale des transmissivités (ou aptitudes des nappes à céder leurs eaux);

- des rabattements maximaux tolérables des nappes (compte tenu de la structure des réservoirs, du niveau des nappes, des risques d'intrusion saline en bordure de mer, etc.).

La recherche de l'exploitation rationnelle d'une nappe consiste ainsi à mobiliser des quantités au plus égales aux ressources disponibles en utilisant au mieux les possibilités locales des nappes.

LES MOYENS DE CAPTAGE

Il s'agit des ouvrages destinés à extraire des nappes les ressources effectivement mobilisables. Ces ouvrages adaptés à différents types de nappes et à différentes classes de débits, sont les suivants :

- ouvrages horizontaux : drains, tranchées et galeries drainantes,

- ouvrages verticaux : puits, forages,

- ouvrages mixtes : puits + galerie, puits + drains rayonnants, puits + forages.

La détermination du réseau de captage le plus approprié résulte de la considération

- des prévisions concernant l'évolution du niveau des nappes (notamment pour des années exceptionnellement déficitaires),

- du rabattement propre à chaque ouvrage (rabattement spécifique + pertes de charge),

- des interférences entre ouvrages.

DIFFÉRENTS TYPES DE PROBLÈMES D'EXPLOITATION DES NAPPES D'EAU

Nous envisageons tout d'abord des problèmes particuliers ne nécessitant pas d'étude des ressources disponibles. Exemples :

1° Les besoins sont faibles et la nappe est peu exploitée.

2° On projette de créer une station de pompage dans une nappe bordant un cours d'eau

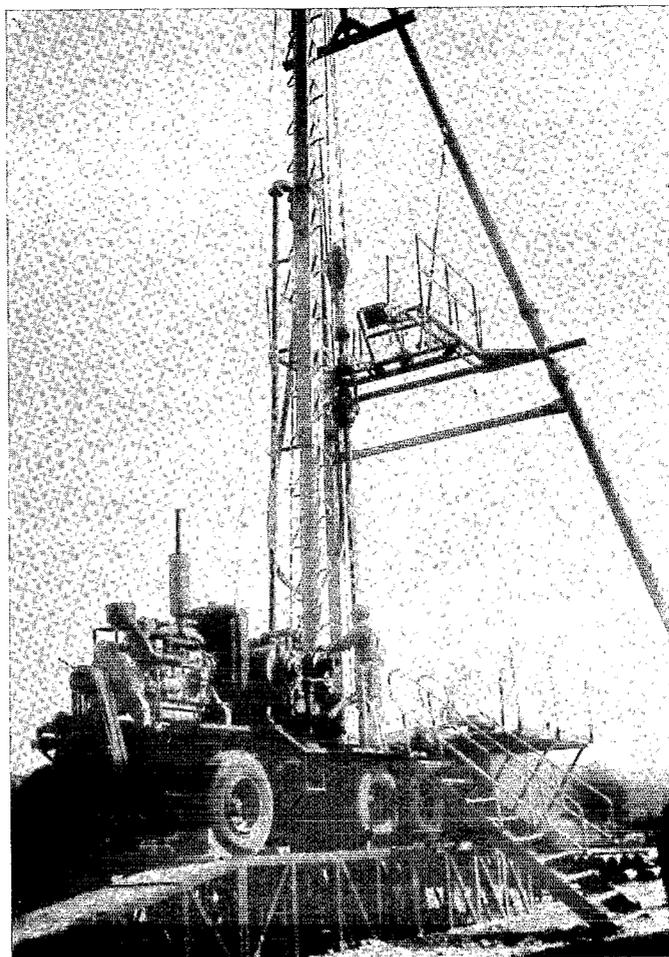
3° On projette de créer une station de pompage aux abords d'une zone marécageuse dans le double but :

- de disposer d'une ressource,

- d'assainir la zone.

Ces problèmes se réduisent au choix des sites et des types de captage les mieux appropriés.

Les autres problèmes nécessitent de déterminer les ressources disponibles R.



En procédant du plus simple au plus complexe :

4° On veut satisfaire des besoins B inférieurs aux ressources R; il n'y a pas de risques de surexploitation de la nappe et le problème consiste à rechercher des sites et des types de captages appropriés.

5° On veut satisfaire des besoins B supérieurs aux ressources R : il y a surexploitation de la nappe. S'il s'agit d'une situation temporaire, le problème consiste à rechercher des sites et des types de captages favorables et à déterminer la date au delà de laquelle la surexploitation ne pourra plus être tolérée.

S'il s'agit d'une situation durable le problème consiste à rechercher les dispositifs de recharge artificielle des nappes nécessaires pour équilibrer le bilan de la nappe.

6° On se propose d'élaborer un plan d'aménagement hydraulique à partir des seules ressources en eaux souterraines; il s'agit donc de mobiliser toutes les ressources disponibles. Si le problème admet plusieurs solutions techniquement possibles, il faut ensuite en rechercher l'optimum économique.

7° Dans le cas le plus complexe, on se propose d'élaborer un plan d'aménagement hydraulique à partir des ressources superficielles et souterraines; certains besoins sont connus, les autres sont fonctions des ressources disponibles et de leur coût. Le problème admet en général de nombreuses solutions techniquement possibles et les choix peuvent nécessiter la mise en œuvre de « modèles économiques ».

MÉTHODES DE RÉOLUTION DE CES PROBLÈMES

Les études quantitatives de ressources en eaux souterraines, reposent sur une conception déterministe des phénomènes hydrogéologiques. Leur démarche logique est la suivante :

- on admet que le complexe des nappes constitue un « système » hydrodynamique régi par des lois immuables que l'on se propose de déterminer;

- sous l'influence d'apports et d'exhaures variables au cours du temps, ce système évolue d'une manière *déterminée* et dans la mesure où l'on dispose de toutes les données concernant les causes et les effets de cette évolution, il est théoriquement possible de déterminer toutes les lois qui régissent le comportement de ce système,

- disposant enfin de lois connues et immuables — c'est-à-dire indépendantes des conditions climatiques du moment ou de l'état actuel des interventions humaines —, on peut fictivement soumettre ce système à d'autres types de conditions climatiques — tels qu'une sécheresse exceptionnelle par exemple — ou à d'autres types d'intervention humaine — tels que la création de nouveaux pompages par exemple — et prévoir l'évolution du système dans ces nouvelles conditions.

La complexité des milieux naturels est en général telle qu'il est impossible d'aborder globalement ces problèmes par calcul manuel; on a alors recours à une tech-



Puits d'eau près de Yamoussoukro (Côte-d'Ivoire)

nique de simulation au moyen de *modèles* : un *modèle* de nappe est un instrument de calcul que l'on façonne à l'image de la réalité observée jusqu'à ce que, soumis aux actions extérieures observées (précipitations, pompages, etc.), il restitue le plus fidèlement possible l'évolution piézométrique observée; étant alors jugé *représentatif* du système, le modèle peut être soumis à toutes sortes d'hypothèses d'aménagement et permet d'en prévoir les influences à long terme.

Le modèle de nappe reproduit un *phénomène physique*; il n'est donc pas doté de pouvoirs décisionnels. Aussi peut-il être nécessaire d'étudier de nombreuses configurations pour accéder à une ou plusieurs solutions physiquement possibles.

Dans les cas les plus complexes où les choix économiques entre ces diverses solutions ne sont pas directement accessibles(2), il peut être intéressant de coupler ce modèle physique à un modèle économique décisionnel (cf. « Modélisation d'un aménagement hydro-agricole régional » par G. Guillaud, Options méditerranéennes, juillet-août 1970).

LES MODÈLES MATHÉMATIQUES

Parmi les différents types de modèle de nappe, les modèles mathématiques occupent une position privilégiée; alors que d'autres types de modèles tels que les modèles électriques par exemple présentent un grand intérêt pour l'étude de pro-

(2) L'exploitation d'une nappe peut dépendre par exemple des surfaces à mettre en valeur et des dotations, elles-mêmes fonctions des types d'assolement, des valorisations qui en résultent, etc.

blèmes spécifiques, les modèles mathématiques, plus universels, permettent d'aborder les études d'exploitation de nappe dans toute leur complexité.

Leur principe repose sur la transformation des lois physiques par des méthodes classiques de « différences finies », ce qui suppose de discrétiser l'espace et le temps en « mailles » et « pas de temps » suffisamment petits; des méthodes de contrôle permettent de contenir les imprécisions qui résultent de ces discrétisations dans des limites convenables.

Les modèles sont essentiellement constitués de programmes (entrées, sorties, calculs) et de données; les résultats sont fournis par l'ordinateur sous forme de « listings », de cartes perforées et de planches dessinées sur table traçante.

LES DONNÉES NÉCESSAIRES

La mise au point d'un modèle nécessite un très grand nombre de données de terrain. Toutefois le volume des données nécessaires dépend du problème posé et de la précision recherchée, et il n'est pas toujours facile d'évaluer *a priori* le volume minimum des données nécessaires à la bonne résolution du problème.

On peut distinguer :

- des données immuables concernant le milieu hydrogéologique (structure, géométrie, caractéristiques hydrodynamiques des aquifères et relations entre aquifères);
- des données concernant l'état actuel de l'intervention humaine (inventaire des captages et débits prélevés);

— des données variables liées à l'hydroclimatologie (précipitations et températures, débits des cours d'eau);

— des données variables résultantes (piézométrie des nappes).

Comme certaines données concernent des grandeurs variables au cours du temps, il est nécessaire d'observer toutes ces grandeurs durant un ou plusieurs cycles hydrologiques complets afin qu'il y ait corrélation entre les différentes mesures effectuées.

EXEMPLES D'ÉTUDES RÉALISÉES

Afin d'illustrer notre propos, nous allons décrire deux exemples significatifs d'exploitation rationnelle de nappes étudiées par nos services, et réalisés en pays méditerranéens.

Exemple 1: POSSIBILITÉS D'EXPLOITATION DE LA NAPPE CÉNOMANIENNE AVEC RECHARGE ARTIFICIELLE - BEYROUTH (LIBAN)

Les ressources en eau de la région de Beyrouth proviennent en partie d'une nappe calcaire à écoulement rapide, et de plusieurs cours d'eau côtiers. Les cours d'eau sont secs en été et les possibilités d'exploitation estivale de la nappe sont limitées par l'apport trop faible des pluies et par la présence d'une nappe salée profonde dont les eaux remontent vers les forages d'exploitation.

L'alimentation en eau de l'agglomération est déficitaire en période estivale, faute de sites appropriés de stockage sur les cours d'eau, qui auraient permis d'em-

magasiner en hiver les eaux excédentaires qui se déversent en mer. Dans ce contexte, l'Administration libanaise a mis à l'étude une solution originale qui consiste à stocker ces eaux dans la nappe en période hivernale au moyen de forages d'injection et à les exploiter par pompage en période estivale.

Le problème consiste à rechercher les sites d'implantation des forages d'injection et d'exploitation et les débits d'exploitation et d'injection les plus appropriés, de manière à récupérer un volume maximum pour un volume injecté minimum, en prenant garde de limiter les fuites vers les cours d'eau et la mer, les risques d'inondation et les remontées d'eau salée.

L'étude a été conduite en trois temps :

— rassemblement et analyse des données disponibles puis conception d'un premier schéma hydrodynamique de la nappe;

— élaboration d'un modèle mathématique « diphasique », les deux phases liquides étant constituées par l'eau douce et l'eau salée, puis recherche de la représentativité du modèle (intégration de toutes les données, vérification de leur cohérence, retouches successives du schéma hydrodynamique initial, détermination progressive des grandeurs inconnues, jusqu'à restitution des états observés);

— utilisation du modèle à des fins prévisionnelles : étude successive de 8 configurations concernant les sites et débits des forages d'injection et d'exploitation, pour des séquences d'années hydroclimatiques normales, ou exceptionnelles.

Au terme de cette étude, il est possible d'envisager d'accroître l'alimentation en eau de la région de Beyrouth d'environ 60 %.

Exemple 2 : POSSIBILITÉS DE SUREXPLOITATION TEMPORAIRE DES NAPPES DE LA PLAINE DE LA MITIDJA - ALGER (ALGÉRIE)

Compte tenu de l'expansion démographique et de l'élévation du niveau de vie de l'agglomération algéroise, ainsi que du développement touristique, industriel et agricole des régions avoisinantes, les besoins en eau du département d'Alger doivent tripler dans les trente prochaines années.

Les nappes de la Mitidja qui fournissent actuellement la majeure partie des ressources en eau sont déjà très intensivement exploitées et malgré les réalisations prévues de grands ouvrages hydrauliques (détournements de cours d'eau, barrages, etc.), on prévoit un important déficit de ressources.

Écartant pour l'instant les ressources potentielles que pourraient constituer le recyclage des eaux urbaines ou industrielles et le dessalement de l'eau de mer, l'Administration se propose de rechercher dans la surexploitation temporaire des nappes les ressources supplémentaires qui permettraient de satisfaire la totalité des besoins jusqu'à l'an 2000.

Les mécanismes hydrauliques des nappes sont relativement complexes : alimentées par les pluies dans la plaine et par l'infiltra-

tion des cours d'eau et des torrents dans les piémonts de l'Atlas, les nappes s'écoulent vers la mer ou se mettent en charge dans une basse plaine limoneuse; leurs exhaures sont assurées par le drainage des cours d'eau en aval de la plaine, par fuite vers la mer sur le littoral, par pompes dans la plaine et par évapotranspiration dans la basse plaine.

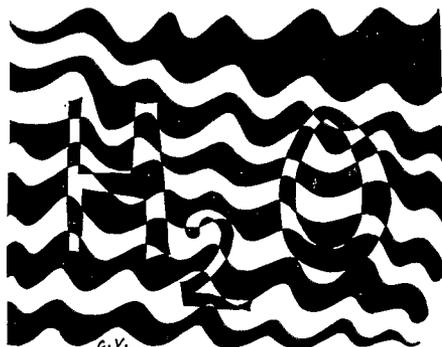
Les rabattements maximaux tolérables étant limités par la structure des réservoirs ou le niveau des nappes, et par les caractéristiques des grandes stations de pompage existantes, le problème consiste à rechercher un mode d'exploitation physiquement possible — sans risques d'intrusion saline par le littoral — qui permette de satisfaire globalement les besoins et qui, en outre, s'inscrive dans le cadre du plan d'aménagement hydraulique projeté.

La complexité du problème réside dans les nombreux choix possibles d'affectation des ressources aux besoins qui conditionnent en partie l'exploitation des nappes; par exemple, il est possible d'irriguer un périmètre à partir des eaux d'un barrage et de créer une nouvelle station de pompage pour assurer les besoins des villes ou des industries mais il est également possible d'affecter les eaux du barrage aux villes ou industries et d'irriguer le périmètre par pompage dans la nappe, ce qui modifierait le premier schéma d'exploitation de la nappe. A l'échelle d'une région qui comprendra plusieurs barrages, près de 100 000 ha de terres nouvellement irriguées, de nombreuses industries et des villes en profonde mutation, on conçoit que les choix d'affectation soient très nombreux.

Après étude de différents schémas, il a été possible de trouver une solution satisfaisante sur le plan hydraulique, que des considérations économiques permettront d'améliorer.

* * *

L'exploitation rationnelle des nappes d'eaux souterraines et son intégration dans un plan d'aménagement régional posent des problèmes complexes, dont la résolution nécessite l'emploi de méthodes élaborées; les modèles mathématiques, façonnés à l'image de la réalité physique observée, en constituent l'outil essentiel.



c.v.