

LE PROBLÈME DE L'ALIMENTATION ARTIFICIELLE DES NAPPES : PUITS D'INJECTION, ZONE D'ÉPANDAGE, INTERVENTION DES MODÈLES MATHÉMATIQUES

PAR
J. ZAOUI *

Introduction

On peut définir l'alimentation artificielle ou la recharge d'une nappe comme l'ensemble des procédés permettant d'accroître les quantités d'eau qui pénètrent dans cette nappe.

Ainsi, le premier exemple trouvé dans les publications qui ont traité de ce problème concerne la ville de Glasgow où, en 1810, une galerie drainante fut creusée dans une île de la Clyde pour accroître les infiltrations en provenance du cours d'eau. En 1821, d'Aubuisson fit construire à Toulouse un barrage superficiel pour augmenter la charge vis-à-vis d'un bassin filtrant creusé près de la berge de la Garonne. Il semble que ce fut Thiem qui proposa le premier (en 1888, à la ville de Stralsund) une recharge par injection d'eaux superficielles, qui fut refusée, puis appliquée un peu plus tard par la ville d'Essen. En 1896, Richert réalisa une recharge par bassins pour l'alimentation de Göteborg : l'installation est toujours en fonctionnement. En se référant à la définition, de nombreuses recharges se pratiquent involontairement : un changement de la couverture végétale peut accroître l'infiltration ou diminuer l'évapotranspiration, le rabattement de certaines nappes a eu pour effet d'augmenter les infiltrations en période humide... Cependant, les pompes intensifs ont provoqué dans de nombreux pays des rabattements excessifs qui ont imposé l'aménagement de dispositifs d'injection directe ou d'épandage des eaux de surface. Ainsi, plusieurs villes allemandes (Essen, Munich, Nuremberg, Hambourg,...), s'approvisionnent de cette façon en eau potable. On a aussi calculé que le quart de la consommation urbaine d'eau en Suède sera prochainement fourni par l'intermédiaire de l'alimentation artificielle des nappes, mais le développement de cette technique vient surtout des Etats-Unis, où l'on

compte actuellement plusieurs centaines d'installations qui comprennent en tout plusieurs milliers d'ouvrages de recharge. Les eaux récupérées sont utilisées en quantité à peu près égales par les municipalités, l'industrie et l'agriculture.

On mentionnera pour mémoire l'injection d'eau dans les nappes de pétrole pour récupérer l'huile, l'élimination des eaux résiduaires et les remontées des nappes phréatiques sous l'effet des irrigations, remontées qui peuvent poser de sérieux problèmes surtout si les nappes sont salées.

On distinguera la recharge *superficielle* par bassins aménagés, fossés, canaux, sillons ou zones d'épandage, de la recharge *profonde* par puits, drains ou galeries. La recharge profonde est employée lorsque la nappe à réalimenter est séparée de la surface du sol par une ou plusieurs couches continues peu perméables ou lorsqu'il est difficile de créer des aménagements de surface (zone urbaine) ou encore, lorsque les puits d'injection servent alternativement au pompage. Dans les autres cas, la recharge superficielle est souvent préférée en raison du prix de revient plus avantageux et surtout de la plus grande commodité d'entretien des installations.

D'un point de vue économique, il a été estimé que les installations de recharge suédoises entraînent des dépenses annuelles inférieures de plus d'un demi-million de francs à celles que nécessiterait le fonctionnement de stations de traitement direct des eaux superficielles. Les Hollandais font état du même argument en faveur de la recharge des dunes côtières.

Dans le cas de la recharge d'une nappe en exploitation par pompage, l'élévation ou le maintien des niveaux entraîne une économie sur l'équipement des pompes et des puits et sur les consommations d'énergie. Une loi de l'Etat de Californie impose aux utilisateurs d'eau souterraine une taxe (en 1958, 2,65 \$ par 1 000 m³ extraits) qui sert à financer les installations d'alimentation artificielle.

* Ingénieur à la SO.GR.E.A.H.

Recharge superficielle

MÉCANISME DE L'OPÉRATION :

Quel que soit le type d'ouvrages utilisés, on peut distinguer trois phases dans les opérations de recharge superficielle (fig. 1) :

- 1° *L'infiltration*, c'est-à-dire l'absorption, par les couches superficielles du sol, de l'eau qui les recouvre;
- 2° *La percolation*, c'est-à-dire le mouvement sensiblement vertical de l'eau infiltrée jusqu'au contact avec la surface libre de la nappe proprement dite;
- 3° *La filtration*, c'est-à-dire l'écoulement de la nappe elle-même.

Infiltration :

Une bonne capacité d'absorption des tranches superficielles du sol est la condition primordiale de toute installation de recharge. C'est ainsi que les cônes de déjection des rivières californiennes, comprenant une forte proportion de matériaux grossiers, sont rechargés intensivement depuis des années sans difficultés majeures. Il en est de même dans les « eskers » suédois constitués par des dépôts morainiques très hétérogènes, dans les alluvions fluviales d'Allemagne ou dans les sables dunaires de Hollande.

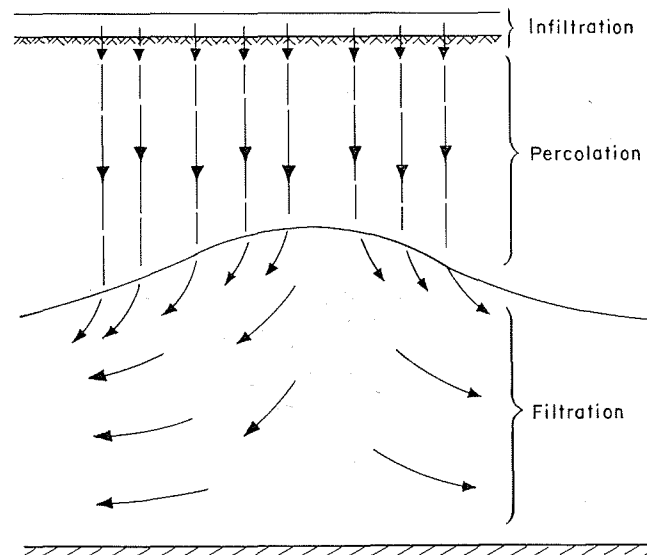
Si ces formations perméables sont recouvertes par une mince couche de limon, celle-ci est évidemment éliminée et quelquefois, mais pas toujours, remplacée par un filtre constitué de graviers, gravillons ou sables selon la constitution du sous-sol et les usages locaux.

La vitesse ou taux d'infiltration dépend en second lieu de la qualité de l'eau répandue.

La conductivité ou le pH de l'eau ne semblent pas affecter l'infiltration; mais les eaux dures (teneur élevée en Ca et Mg) s'infiltrant plus rapidement, tandis que des teneurs élevées en Na ralentissent l'écoulement.

Un problème important est celui des sédiments transportés en suspension. Des essais effectués aux Etats-Unis ont montré qu'un m³ de gravier pouvait absorber près de 200 kg de sédiments sans voir son pouvoir filtrant considérablement réduit, mais les sables se colmatent beaucoup plus vite. Comme on pouvait s'y attendre, d'autres essais ont indiqué que les matériaux en suspension se déposent beaucoup moins facilement lorsque l'eau chargée s'écoule sur le milieu poreux au lieu de stagner; on pourrait donc admettre une concentration plus élevée dans la recharge par canaux que dans la recharge par bassins. On a aussi constaté que les sols recouverts d'une végétation appropriée (*Bermuda grass* aux Etats-Unis) se colmatent moins que les sols nus ou labourés. En définitive, il apparaît que si les eaux trop chargées sont absolument proscrites, il existe des moyens pour maintenir en opération des installations utilisant de l'eau à concentration modérée en matières solides. Les matières en suspension ne sont pas seules responsables du colmatage. Des essais de laboratoire et des observations sur le terrain ont montré que, même en l'absence de transport solide dans l'eau, le taux d'infiltration subissait les variations suivantes (fig. 2) :

— Au début de la submersion, il diminue plus ou



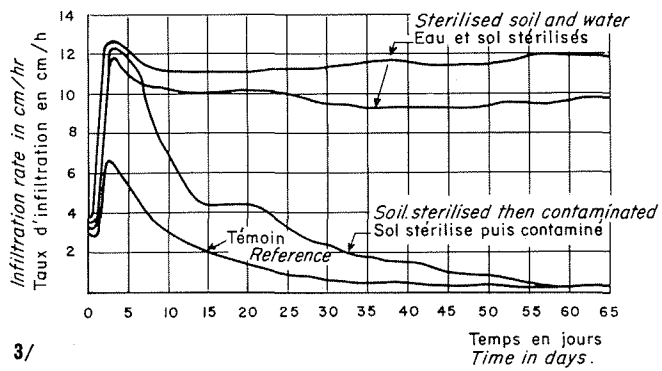
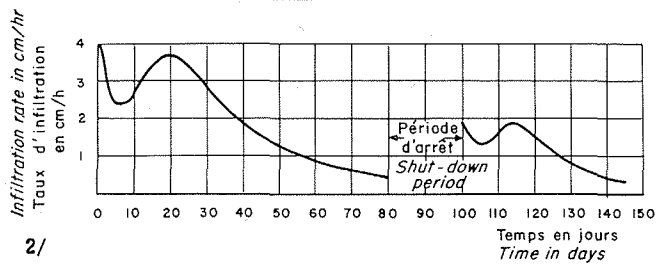
1/

moins sensiblement. Cette diminution est attribuée à la dispersion et au gonflement des particules argileuses;

- Dans une seconde étape, on assiste à une augmentation de l'infiltration qui serait due à la dissolution progressive de l'air contenu dans le terrain;
- En dernier lieu, le taux d'infiltration diminue régulièrement et l'on incrimine le développement de micro-organismes en milieu anaérobie. Cette explication a été corroborée par des essais dans lesquels l'eau et l'échantillon avaient été stérilisés et où le taux d'infiltration était resté pratiquement constant (fig. 3), alors qu'une réinoculation du milieu provoquait une décroissance rapide de la vitesse d'infiltration. Si l'on cesse pendant quelque temps la submersion, la répétition du cycle précédent se produit, mais avec des taux d'infiltration généralement moins élevés. Par séchage prolongé suivi de hersage, il a été souvent possible de recouvrer des valeurs proches du taux initial, mais pas toujours, en raison des apports inévitables de sédiments fins par l'eau de recharge. Pratiquement, il s'est souvent révélé plus économique de changer, au bout de quelque temps de fonctionnement, la couche superficielle naturelle ou artificielle plutôt que d'en séparer par agitation et succion les sédiments infiltrés.

Percolation :

Au début de la recharge, la vitesse de percolation subit les mêmes variations que la vitesse d'infiltration (gonflement des colloïdes et dissolution ou expulsion de l'air). La couche biologique étant très mince, le colmatage n'affecte généralement pas la vitesse de percolation qui peut atteindre pratiquement la perméabilité verticale du terrain, mais cette vitesse diminue brutalement lorsque le niveau de la nappe arrive à atteindre la surface du sol. C'est seulement dans ce cas qu'on a pu constater une influence de l'épaisseur d'eau sur la vitesse d'infiltration. Réciproquement, les vitesses maximales d'infiltration ont été mesurées au moment d'une baisse rapide de la surface libre de la nappe (aspiration?).



Un cas particulier se présente lorsqu'une ou plusieurs couches semi-perméables, continues ou intermittentes, s'intercalent entre la surface et la nappe aquifère; il peut se former des nappes perchées qui réduisent le taux d'infiltration. On peut alors avoir intérêt à n'utiliser qu'une portion de la superficie disponible pour la recharge, de façon à créer une rotation des zones d'épandage pour maintenir un taux d'infiltration élevé.

Filtration :

Lorsque l'eau de recharge a atteint la nappe phréatique, l'écoulement en milieu poreux est régi par les lois habituelles de l'hydrodynamique : l'équation de continuité et la loi de Darcy.

On examinera un peu plus loin les méthodes d'études utilisables pour la prévision de l'écoulement de la nappe.

D'un point de vue physico-chimique, les milieux perméables « en petit » se comportent comme des épurateurs très efficaces. Quelques dizaines ou au plus quelques centaines de mètres de filtration suffisent pour l'élimination complète des micro-organismes, à tel point que certaines installations de recharge allemandes n'ont pas d'autre effet que de conférer à des eaux de surface le « label de qualité » des eaux souterraines. Il est toutefois nécessaire que l'eau de recharge soit suffisamment oxydée; sans cela, l'eau de récupération peut être très agressive (Ruhr); on a aussi constaté que des teneurs élevées de l'eau en matières organiques ou en ions échangeables (surtout Na^+ et H^+) avaient rapidement provoqué le colmatage d'une formation aquifère contenant de l'argile dispersée.

Les variations de température entraînent des modifications de la perméabilité par l'intermédiaire de la densité et surtout de la viscosité de l'eau, les eaux froides filtrant moins rapidement que les eaux plus chaudes. D'autre part, le séjour dans le sol régularise la température de l'eau; on a cependant cité l'exemple d'une recharge au Canada où les eaux récupérées sont plus froides en été qu'en hiver, le trajet souterrain de ces eaux durant environ six mois.

LUTTE CONTRE LE COLMATAGE :

Différents procédés ont été utilisés avec plus ou moins de succès pour assurer la pérennité des recharges. Sans entrer dans le détail, citons les plus courants :

- le traitement préalable des eaux par le chlore, l'oxygène ou le sulfate de cuivre pour la destruction des matières organiques;
- la décantation des matériaux en suspension avant l'épandage;
- le maintien des conditions aérobies (faible épaisseur d'eau, submersion alternée, aérateurs en cascades);
- l'entretien de la couverture végétale;
- la scarification de la surface;
- l'épandage de déchets de coton : moyennant quelques précautions, les expérimentateurs semblent être parvenus à des résultats significatifs et durables.

ZONES D'ÉPANDAGE :

La littérature ne donne pas d'exemples où la recharge soit pratiquée au moyen de simples dérivations sur des étendues relativement plates voisines du cours d'eau; le danger d'érosion semble trop grand. L'épandage exige un contrôle relativement strict de la dérivation du cours d'eau, d'une part, pour limiter le débit à admettre sur la zone d'infiltration, d'autre part, pour éviter autant que possible l'entrée des matériaux solides transportés principalement en période de crues. La distribution à l'intérieur du périmètre exige moins de précaution; de simples levées de terre exécutées par des engins mécaniques peuvent suffire à condition que chaque épandage soit contrôlé par des équipes de spécialistes qui réparent rapidement les dégâts causés par des débordements ou des érosions locales. L'épandage en lame mince semble présenter sur l'infiltration par bassins l'avantage d'un investissement initial moins élevé et surtout de la pérennité du taux d'infiltration, mais il exige un entretien plus constant.

Recharge profonde

La recharge directe par puits et, éventuellement par galeries, est moins pratiquée en raison des colmatages extrêmement rapides qui ont affecté bon nombre d'installations. Les causes invoquées sont multiples : obstruction par les sédiments en suspension dans l'eau, couche biologique, entrées d'air, bouchage des crépines par précipitation des oxydes de fer, etc.

Les remèdes proposés sont tout aussi divers : acidification, neige carbonique, régénération par pompage, chloration, constitution de filtres en gravier autour des crépines, crépines largement perforées, injection par le fond pour éviter les bulles d'air, prétraitement de l'eau.

Chaque ouvrage est un cas d'espèce; les seules règles générales qui semblent se dégager préconisent l'utilisation d'eaux très peu chargées et traitées par le chlore, l'implantation des crépines dans la nappe elle-même plutôt que dans la zone de percolation et la mise en œuvre, à des intervalles rapprochés, des moyens de décolmatage prévus.

Deux applications en France de ce mode d'alimentation artificielle sont présentées en détail dans les communications de MM. Muller-Feuga, Ruby et Garraud.

Méthode d'étude Modèles mathématiques

L'étude d'un projet de recharge est une opération complexe en raison des nombreux facteurs qui sont susceptibles de l'influencer.

En premier lieu, il convient de procéder à une reconnaissance précise du site :

- origine, abondance et qualité des eaux superficielles disponibles;
- étude hydrogéologique de la formation aquifère et des terrains de couverture;
- étude climatologique, topographique et pédologique pour la recharge superficielle.

Des mesures et essais divers doivent être effectués pour estimer le taux d'infiltration et ses variations dans le temps et pour déterminer la porosité et les perméabilités verticale et horizontale des différentes couches de terrain.

Les éléments ainsi réunis permettent de donner un premier avis sur la possibilité de créer des installations de recharge à des conditions économiques acceptables. Il s'agit ensuite de prévoir ce que deviendra l'eau infiltrée, quelles seront les élévations de niveaux, quelle proportion pourra être récupérée par les ouvrages d'exhaure. Si la recharge est effectuée pour s'opposer à l'intrusion d'eau de mer, il convient d'estimer les quantités perdues vers la mer et les mouvements de l'interface...

La solution consiste à simuler le comportement de la nappe en fonction des données existantes et des dispositifs envisagés, c'est-à-dire de créer des modèles plus faciles à étudier et moins coûteux à réaliser que des essais en vraie grandeur.

On sait que dans une nappe homogène, il existe un potentiel des vitesses qui satisfait à l'équation de Laplace; le problème consiste à intégrer cette équation, connaissant les conditions existant aux limites de la nappe et aux singularités de celle-ci.

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées :

- les méthodes analytiques peuvent donner des solutions valables dans les cas très schématiques;
- les modèles réduits à base de matériaux poreux sont difficiles à constituer et à exploiter;
- les modèles analogiques (Hélé-Shaw, papier conducteur, cuves de Stokes...) peuvent fournir des renseignements intéressants pour l'étude des régimes permanents à une ou deux dimensions.

Lorsque la situation est trop complexe pour être traitée par l'une de ces méthodes, il existe une possibilité relativement nouvelle qui consiste à intégrer numériquement les équations à l'aide d'un programme sur calculatrice électronique.

La méthode numérique la plus classique est celle des différences finies : elle consiste à décomposer le domaine en éléments géométriques réguliers et à appliquer à chacun d'eux les équations convenables. On obtient ainsi un grand nombre d'équations que l'on résoud simultanément par des méthodes directes ou itératives. Pour simuler l'évolution de la nappe au cours du temps, on recommence la même opération de Δt en Δt : cela représente des quantités énormes d'opérations élémentaires que les ordinateurs modernes sont à même d'effectuer dans des temps raisonnables. On a ainsi constitué un véritable modèle mathématique qui sert en premier lieu à déterminer les caractéristiques inconnues de la nappe par exploitation des observations effectuées dans la phase de reconnaissance sur le terrain. Le modèle ainsi réglé, il devient aisé de simuler le comportement de la nappe en fonction des dispositions envisagées : on ajoutera, supprimera ou déplacera des puits ou des zones d'épandage par la seule introduction, dans la machine, de cartes perforées. La limitation actuelle d'emploi de ces modèles est plus d'ordre économique que technique. Pratiquement, les données existantes ne sont pas suffisamment nombreuses pour justifier l'élaboration d'un modèle extrêmement détaillé. En se limitant à des modèles qui restent simples, tout en prenant en compte des facteurs importants négligés dans les méthodes classiques, on obtient des outils de travail souples, puissants et, en définitive, économiques, grâce à la possibilité qu'ils offrent d'étudier rapidement un grand nombre de dispositions projetées pour conserver la solution optimale.

Conclusion

L'alimentation artificielle des nappes est une technique qui a fait ses preuves et à laquelle on sera contraint de faire appel de plus en plus pour faire place à la demande croissante d'eau de bonne qualité. C'est une technique délicate qui demande des études et des essais approfondis avant la réalisation d'un aménagement. L'élaboration de modèles mathématiques sur calculatrice électronique peut contribuer à l'interprétation précise des observations effectuées et à la détermination de la solution la plus avantageuse.

Discussion

Président : M. LEFOULON

Sur la demande de M. le Président, M. ZAOUÏ ajoute à son exposé le commentaire ci-après :

« Les modèles mathématiques dont je viens de parler sont pour l'instant des conceptions théoriques mais, pratiquement, nous avons été amenés à étudier deux problèmes dont la solution a exigé la mise en œuvre de méthodes très voisines :

« 1° Interprétation des courbes de rabattement en fonction du temps observées lors de pompages d'essais effectués dans la nappe du Chott Chergui. Le modèle mathématique établi a permis de prendre en compte la grande hétérogénéité et d'évaluer les paramètres hydrodynamiques des formations

aquifères, à la suite de quoi, fut simulé le comportement de la nappe sous l'action de pompages prolongés pour définir les conditions les plus rationnelles d'une exploitation éventuelle des ressources.

« 2° Evaluation de l'augmentation des débits pompés procurés par l'implantation dans la nappe phréatique de Pierre-Bénite de puits d'injection. La solution analytique avait pu être obtenue mais les lourds calculs numériques qu'elle exigeait ont pu être aisément effectués grâce à l'emploi d'un ordinateur. »

M. René Lévy signale que l'on peut se procurer à Washington une bibliographie annotée de tout ce qui a été écrit aux

Etats-Unis sur « Artificial Recharge of Captive Waters », paper 1477.

M. ZAOUÏ indique que la matière de l'exposé qu'il vient de faire est tirée pour une large part de publications traitant de la recharge des nappes. La liste bibliographique des documents consultés, qui comprend en particulier la bibliographie annotée de M. TONN, est à la disposition des personnes qui en feraient la demande à M. ZAOUÏ.

M. LAGARDE expose que l'alimentation artificielle des nappes d'eau souterraine est un problème très proche des problèmes pétroliers et à ce titre, à l'Institut Français du Pétrole, on a utilisé les quatre classes de modèles dont parlait M. ZAOUÏ. Bien qu'appliqués principalement à des gisements d'huile ou à des aquifères captifs, les modèles numériques ou analogiques se sont révélés particulièrement intéressants; M. LAGARDE précise que les modèles analogiques permettent aussi bien l'étude des transitoires que les modèles numériques (voir l'étude présentée au Comité Technique n° 74 de la S.H.F. - 21 et 22 novembre 1963) et, pour des problèmes de moyenne importance, fournissent des résultats aussi bons (cela a été vérifié en menant simultanément sur simulateur et sur ordinateur la même étude); il semble donc que, pour les problèmes pas trop élaborés dont a parlé M. ZAOUÏ, leur utilisation soit encore plus économique que l'emploi d'un ordinateur.

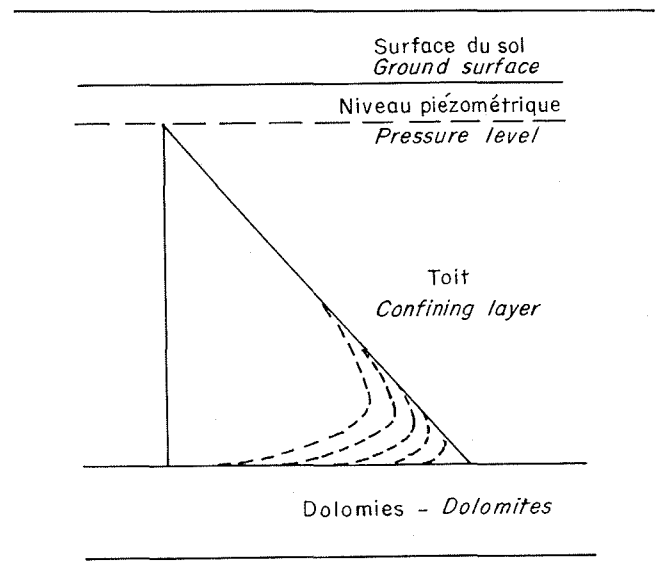
En ce qui concerne l'expérience pratique, il semble que la nappe du Chott Chergui constitue un exemple de réalimentation naturelle (par le toit argileux) dont le traitement par modèle peut être transposé à la réalimentation artificielle. Comment sur l'ordinateur M. ZAOUÏ s'y était-il pris, en l'absence de modèle tridimensionnel? De son côté, pour ce genre de problème, l'Institut Français du Pétrole a mis au point un tel modèle numérique à trois dimensions. Dans les cas les plus simples de réalimentation artificielle par points de réinjection les modèles tridimensionnels habituels (analogique, numérique) suffisent évidemment.

M. ZAOUÏ répond aux points soulevés par M. LAGARDE :

Le modèle mathématique du Chott Chergui consistait en fait en plusieurs modèles pour tenir compte des échanges éventuels entre les dolomies aquifères et le toit semi-perméable qui les recouvrait.

En premier lieu, la nappe aquifère proprement dite contenue dans les dolomies était représentée par un modèle plan : la schématisation de Dupuit pouvait être considérée comme justifiée en raison de la « minceur » de la nappe (100 à 200 m d'épaisseur pour des distances horizontales allant jusqu'à 200 km). Mais l'équation de continuité faisait intervenir, non seulement la compressibilité de la formation aquifère, mais également les échanges dans le temps entre la nappe et les terrains susjacentes.

Pour calculer ces échanges, qui pouvaient provenir, en régime transitoire, du drainage du toit sous l'effet de la dépression consécutive aux pompages, on a établi un modèle unidimensionnel représentant le toit. Comme conditions aux



limites, on disposait, d'une part, du niveau piézométrique qui n'avait pas été modifié à la fin des pompages d'essai et d'autre part, des relations $H(t)$ dans les dolomies observées dans des sondages ou interpolées pour chaque maille. On a donc simulé la propagation dans le toit de la dépression piézométrique (figure). Les débits d'échange ainsi calculés en fonction du temps, étaient introduits dans le modèle d'ensemble. En définitive, cet ensemble de modèles mathématiques n'a donné des résultats satisfaisants que dans la mesure où les débits d'échange devenaient pratiquement négligeables devant les débits qui transitaient dans les dolomies. Ceci a permis de démontrer que le toit était trop consolidé pour jouer un rôle important dans le fonctionnement hydraulique du Chott Chergui.

D'autre part, la préférence de M. LAGARDE pour les modèles analogiques peut s'expliquer par la nature des problèmes qu'il est amené à résoudre, chaque méthode pouvant plus ou moins bien s'adapter aux exigences des études. Le modèle mathématique présente pour sa part les avantages suivants :

- 1° Le réglage des paramètres n'exige que la perforation de quelques cartes;
- 2° L'expérience acquise permet maintenant de concevoir des programmes de calcul généraux permettant de traiter des configurations géométriques de nappes extrêmement variées;
- 3° Si le type des équations change par l'introduction de nouvelles lois physiques, il suffit de modifier une partie limitée du modèle mathématique, alors que le modèle analogique peut se révéler inutilisable.