Analyse par modélisation hydrologique globale de la sensibilité des aquifères aux sécheresses et à la pollution

Dominique Thiéry

▶ **To cite this version:**

Dominique Thiéry. Analyse par modélisation hydrologique globale de la sensibilité des aquifères aux sécheresses et à la pollution. Conférence SHF: XXI ème Journées de l'Hydraulique. Les eaux souterraines et la gestion des eaux, Jan 1991, Sophia Antipolis, France. 9 p. hal-01070969

HAL Id: hal-01070969
https://brgm.hal.science/hal-01070969

Submitted on 2 Oct 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.

SOCIÉTÉ
HYDROTECHNIQUE
DE FRANCE

XXIe Journées
de l'Hydraulique
Sophia Antipolis
29-31 Janvier 1991

Progrès récents dans la connaissance des aquifères continus et discontinus QUESTION N° I

RAPPORT N° 16

Analyse par modélisation hydrologique globale de la sensibilité des aquifères aux sécheresses et à la pollution

Dominique THIERY

BRGM, Orléans

Les grands évènements naturels, comme les sécheresses sur le continent africain, ou les actions humaines chroniques comme la pollution par les nitrates provenant de l'agriculture peuvent avoir des effets et des temps de réactions très variables sur les aquifères. Quand on dispose de longs historiques ponctuels de mesures, la modélisation hydrologique globale est une méthode particulièrement économique et performante pour l'analyse de la sensibilité des aquifères à ces évènements. Deux exemples d'application sont présentés dans cet article.

Dans un système aquifère au Burkina Faso, la modélisation globale a montré que la baisse régulière, mais très marquée, du niveau piézométrique qui y est observé, s'explique uniquement par la sécheresse des décennies 1970 à 1990. Le modèle a montré que malgré ces fortes baisses, la situation n'est pas critique pour les années à venir bien qu'une remontée du niveau de l'eau à la suite de précipitations plus abondantes ne puisse être que très lente.

L'évolution de la concentration en nitrates dans les sources de la Voulzie (qui participent à l'alimentation de Paris) a été également analysée avec un modèle hydrologique global à partir des pluies, des épandages en engrais et des consommations des cultures. Le modèle a montré que les concentrations dans les sources (donc dans l'aquifère) dépendent bien entendu des excédents en nitrates, mais également et surtout de la succession d'années plus ou moins pluvieuses. L'utilisation du modèle en simulation de scénarii a mis en évidence la grande insensibilité du système à une amélioration puisqu'une réduction très importante des apports en azote conduirait seulement à une stabilisation des concentrations pendant au moins 15 ans avant une décroissance ultérieure très lente.

I - SENSIBILITE A LA SECHERESSE

1. INTRODUCTION

La forte variabilité interannuelle des précipitations en Afrique sahélienne induit une variabilité encore plus importante de la recharge des aquifères, qui se traduit sur les niveaux piézométriques. La sécheresse marquée observée depuis le milieu de la décennie 1970-1980 a souvent produit de fortes baisses des niveaux malgré de faibles remontées saisonnières. Il est rare de disposer de longues chroniques d'observations, cependant des séries de 5 à 10 ans peuvent être utilisées pour analyser l'évolution possible des niveaux des nappes dans différents scénarios de pluies.

Les niveaux d'eau dans le piézomètre du CIEH à Ouagadougou, ont été suivis manuelle-

ment par le CIEH, pendant la période 1978-1985 (C. DILUCA et W. MULLER, 1985). C'est un piézomètre implanté dans un faciès granitique à Ouagadougou (Burkina Faso) jusqu'à une profondeur de 20 m. Ses crépines s'étendent de 6 à 20 m et captent 5 m d'arène, 4 m de granite altéré et 5 m de granite sain. Il est suivi depuis 1978 par le CIEH qui nous en a fait parvenir les données. La figure 1 montre qu'on observe une baisse continue du niveau moyen qui passe d'environ 6 m de profondeur par rapport au sol en 1979 à un peu plus de 10 m de profondeur en 1985. On observe cependant chaque année une remontée d'environ 0,80 m pendant quelques mois (à l'automne) avant la reprise de la descente. Des données récentes montrent que la baisse s'est à peu près stabilisée depuis 1987 avec chaque année une profondeur maximale d'environ 10,45 mètres.

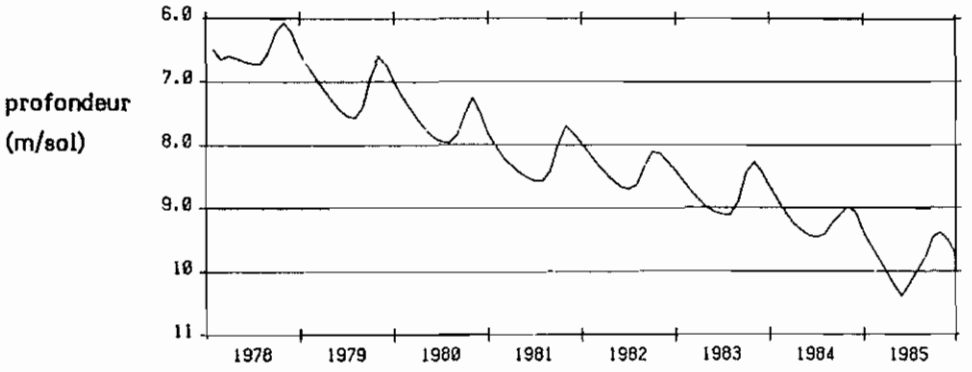


FIGURE 1 - Evolution du niveau d'eau au piézomètre du CIEH à Ouagadougou (Burkina Faso) de 1978 à 1985

2. LES DONNEES DISPONIBLES

Aucune donnée hydrodynamique n'est disponible, seul un pompage d'essai de très courte durée (1 h) ayant été réalisé en mai 1978 à proximité du site étudié. En particulier le coefficient d'emmagasinement (ou la porosité efficace) n'est pas connu, mais compte tenu de la nature des terrains, on peut estimer qu'il doit être de l'ordre de quelques pourcents. L'ordre de grandeur de la transmissivité déduite de cet essai est 3 à 7 10^{-5} m^2/s.

Les précipitations sont en moyenne de 852 mm/an sur la période 1959-1985, mais seulement de 690 mm/an sur la période 1978-1985. Le nombre de jours de pluie est de 73 par an sur la période 1959-1985, mais seulement de 60 par an de 1979 à 1985.

Les valeurs d'évapotranspiration potentielle utilisées ont été calculées à Ouagadougou par la formule mensuelle de Turc. Seules les valeurs moyennes interannuelles (sur une période inconnue) ont pu être relevées sur un atlas (L. LEMOINE et J.C. PRAT, 1972). La valeur moyenne est de 2 084 mm/an.

3. LE MODELE GLOBAL UTILISE

Pour réaliser un bilan entre précipitation, évapotranspiration potentielle, ruissellement et infiltration, on a utilisé le modèle GARDENIA du BRGM. C'est un modèle hydrologique global à réservoirs qui permet de faire un bilan local en particulier au pas journalier et de calculer l'évapotranspiration réelle (ETR), le ruissellement, l'infiltration et le niveau en un point de la nappe. Ce modèle est décrit en détail par ROCHE et THIERY (1984), THIERY (1988a) ; et nous en rappelons ici brièvement le principe.

Le modèle est composé de 3 réservoirs superposés (fig. 2). Le premier réservoir RU est caractérisé par sa capacité de rétention maximale (RUMAX). Il représente l'effet de rétention des premiers mètres du sol. Ce réservoir est alimenté par les précipitations et vidangé par l'évapotranspiration. On ne peut observer de ruissellement, ni d'infiltration avant qu'il soit saturé. Il prend en compte à la fois l'effet d'interception dans les dépressions du sol et schématise "l'effet

de clapet" du sol non saturé selon son état d'humidité.

Le deuxième réservoir H qui est non linéaire, est caractérisé par deux paramètres : un temps de demi-percolation THG, une hauteur d'équi-ruissellement RUIPER. Il assure le transfert à la nappe à travers la zone non saturée et la répartition entre ruissellement et infiltration : plus le niveau dans ce réservoir est élevé -à la suite de fortes précipitations-, plus la proportion de ruissellement sera grande. Quand le niveau du réservoir est égal à la hauteur d'équi-ruissellement, il y a autant d'infiltration que de ruissellement ; quand il est inférieur, il produit une plus grande proportion d'infiltration.

Le troisième réservoir G est caractérisé par son temps de demi-tarissement. Il représente le tarissement exponentiel de la nappe. THIERY (1985) a montré que ce schéma correspond pratiquement à un aquifère bordé d'un côté par une limite imperméable rectiligne et de l'autre par une limite rectiligne à niveau imposé. Si le piézomètre n'est pas situé trop près de la limite à niveau imposé, le niveau piézométrique

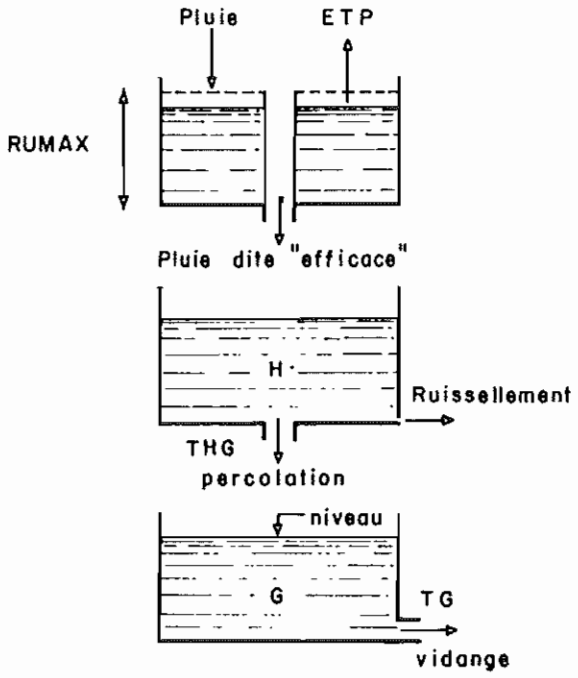


FIGURE 2 - Principe du modèle GARDENIA pour la simulation des niveaux piézométriques

NI se déduit au niveau G dans le réservoir G par :

$$NI = G / EMM + NB$$

avec

EMM coefficient d'emmagasinement libre ou porosité efficace équivalente

NB niveau de base local

4. CALAGE DU MODELE

Pour effectuer un bilan complet, il faudrait idéalement disposer de données (pas forcément simultanées) de séries de mesures : de ruissellement et d'évolution du niveau piézométrique et connaître le coefficient d'emmagasinement de la zone de fluctuation de la surface libre. Les paramètres du modèle seraient alors ajustés pour reproduire au mieux les 2 séries. Dans notre exemple, on ne dispose pas de données de ruissellement et on ne connaît pas le coefficient d'emmagasinement libre (mais uniquement un coefficient d'emmagasinement de nappe captive qui n'a pas d'influence sur les fluctuations à "nappe libre").

L'évapotranspiration (ETR) n'est réglée que par un seul paramètre : la capacité de rétention du sol RUMAX. Ce paramètre permet de déterminer la "pluie efficace" qui est elle-même répartie en ruissellement et recharge. La rapidité du tarissement n'est réglée que par le temps de demi-tarissement TG. Ce paramètre permet d'étaler la recharge dans le temps et de simuler le niveau observé (en association avec le niveau de base et le coefficient d'emmagasinement).

Six calculs sont réalisés en fixant la capacité de rétention du sol, respectivement à 0, 10, 20, 40, 70 et 100 mm. Les résultats les meilleurs sont obtenus pour une capacité de rétention inférieure à 40 mm. Pour une capacité de 40, 70 et surtout 100 mm, le calage devient mauvais avec en particulier des années sans aucune remontée du niveau (en 1984, 1985). La pluie efficace calculée dépend beaucoup de la capacité de rétention. Quand la capacité de rétention passe de 0 à 20 mm, l'évapotranspiration réelle augmente de 286 mm/an, soit 14 fois la valeur de la capacité. Une telle capacité de rétention de 20 mm passe donc en moyenne 14 fois par an d'un état saturé à un état complètement sec. Ceci est dû à la fois à la forte évapotranspiration potentielle (2 084 mm/an) et à l'irrégularité des

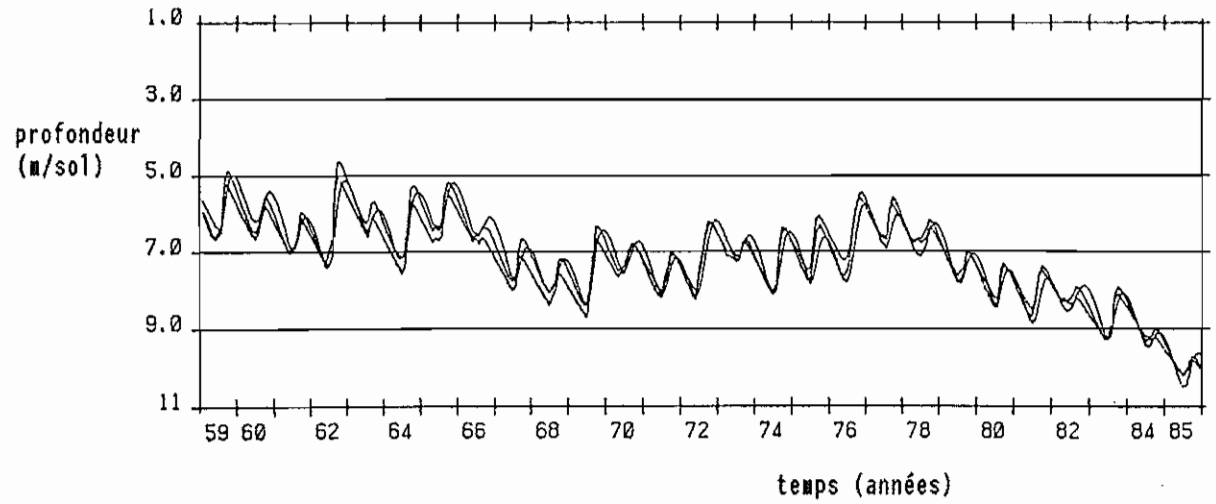


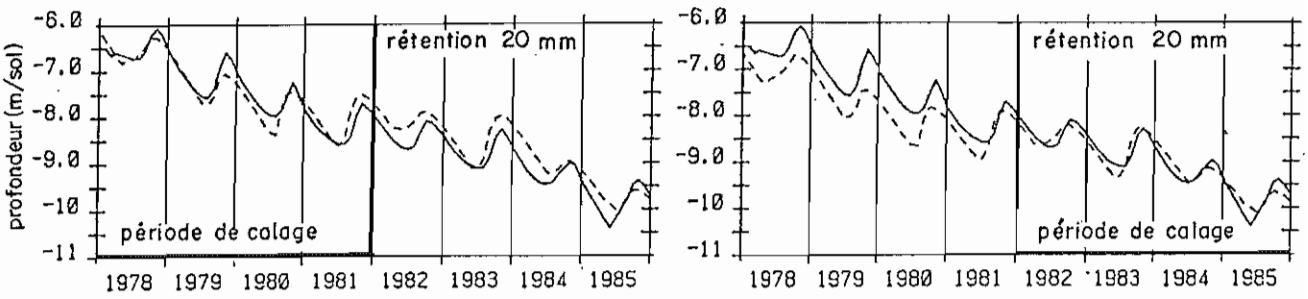
FIGURE 3 - Simulation de la période 1959-1985 pour 3 valeurs de capacité de rétention de sol (coefficient d'emmagasinement 1 %)

pluies journalières.

La proportion de ruissellement est réglée par les paramètres RUIPER (hauteur d'équi-ruissellement) et THG (temps de demi-percolation). 6 calculs ont été réalisés : pour 3 valeurs de capacité de rétention (10, 20 et 30 mm) associées à 2 valeurs de coefficient d'emmagasinement (1 % et 4 %). Les 6 simulations sont acceptables (coefficients de corrélation tous compris entre 0,965 et 0,980). Les ajustements obtenus avec un coefficient d'emmagasinement de 1 % ou de 4 % sont aussi bons l'un que l'autre (la valeur optimale de la capacité de rétention étant dans les deux cas de 10 à 30 mm). Le coefficient d'emmagasinement équivalent ne peut donc pas être déterminé par simple analyse des variations naturelles de niveaux.

5. UNICITE DU CALAGE ET ANALYSE DE SENSIBILITE

Quand on s'aperçoit que le calage n'est pas unique, c'est-à-dire que plusieurs jeux de paramètres permettent de simuler aussi bien une courte période d'observations (1978-1985 dans notre cas), il est tentant de penser qu'on obtiendrait une solution unique pour une plus longue période d'observations (égale à au moins 4 ou 5 fois le temps de demi-tarissement) doit intégrer à la fois des années très excédentaires, d'autres très déficitaires. Les paramètres doivent alors jouer sur toute leur plage : par exemple, la rétention du sol doit être nulle à certaines périodes et saturée à d'autres ; d'autre part, la nappe doit atteindre des cotes suffisamment basses pour bien identifier le tarissement et le niveau de base.



Calage sur la période 1982-1985 *Calage sur la période 1978-1981*

FIGURE 4 - Contrôle du modèle

Pour vérifier cette hypothèse, on a utilisé toute la période d'observation des précipitations journalières à Ouagadougou (1959-1985) et on a simulé l'évolution du niveau de la nappe avec les jeux de paramètres identifiés. La figure 3 montre que sur la période de 17 ans les niveaux calculés sont pratiquement identiques avec les différents jeux de paramètres On peut donc admettre qu'une longue période d'observation ne permettrait pas de mieux identifier un jeu unique de paramètres.

Le modèle a été calé sur les 8 années de la période 1978-1985. Avant de l'utiliser en extension de données, il convient de vérifier son comportement en extrapolation. Dans ce but, pour 3 capacités de rétention (0,20 et 40 mm), on a réalisé un calage sur les 4 premières années et calculé les niveaux des 4 dernières années sans modifier le calage. On a également réalisé l'opération inverse (calage sur les 4 dernières années et contrôle sur les 4 premières). La figure 4 montre que les résultats sont très satisfaisants. Le calage sur la période 1978-1981 permet très bien de prévoir les niveaux de 1982 à 1985, bien que ceux-ci soient nettement plus bas que ceux de la période de calage. Le calage sur la période finale 1982-1985 permet également -quoique un peu moins bien- de calculer les niveaux de 1978 à 1981.

6. INTERPRETATION

A ce stade, on peut affirmer que le modèle permet, à partir des précipitations mesurées et de paramètres réalistes de très bien reproduire la période d'observations qui est en décroissance marquée. Le modèle permet donc de déduire que la baisse des niveaux est due principalement à la décroissance de l'alimentation par les pluies. Elle n'est pas due à des causes externes comme des pompages qui pourraient être réalisés dans la nappe à une certaine distance, ou bien à une modification de la végétation comme la plantation d'arbres dont les racines préleveraient de l'eau directement dans la nappe. L'analyse de sensibilité a également montré que, malgré la non-unicité des paramètres de calage, le modèle est fiable et peut parfaitement être utilisé en extension pour analyser divers scénarios d'alimentation de la nappe.

7. SIMULATION D'UN RETOUR A DES PRECIPITATIONS PLUS ABONDANTES QU'ACTUELLEMENT

L'analyse de la recharge annuelle calculée sur la période 1959-1985 montre que la recharge de 1981 est très proche de la recharge de la moyenne de la période. On a donc simulé après 1985 une séquence de 10 années avec la pluie de 1981 pour voir comment et à quelle vitesse la nappe réagirait. La figure 5 établie pour 4 hypothèses de calcul montre une remontée qui s'effectue très lentement puisqu'il faut plus de 10 ans pour atteindre un nouvel équilibre. Une seule année de pluies moyennes comme l'année 1981 ne produirait qu'une légère remontée après un an, et ne rechargerait pas la nappe "pour plusieurs années". Le temps nécessaire à la remontée est bien entendu du même ordre de grandeur que celui nécessaire à la descente. Ceci est bien évidemment dû à l'inertie de la nappe qui a un temps de demi-tarissement supérieur à 4 ans.

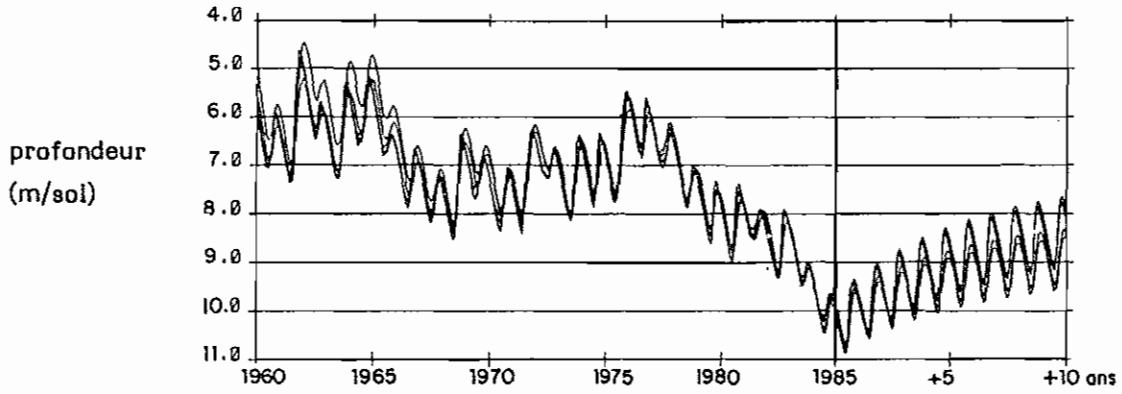


FIGURE 5 - Simulation d'une période de 10 années moyennes (identiques à l'année 1981) suivant 1985. (a) période 1960-1985 - (b) période 1979-85

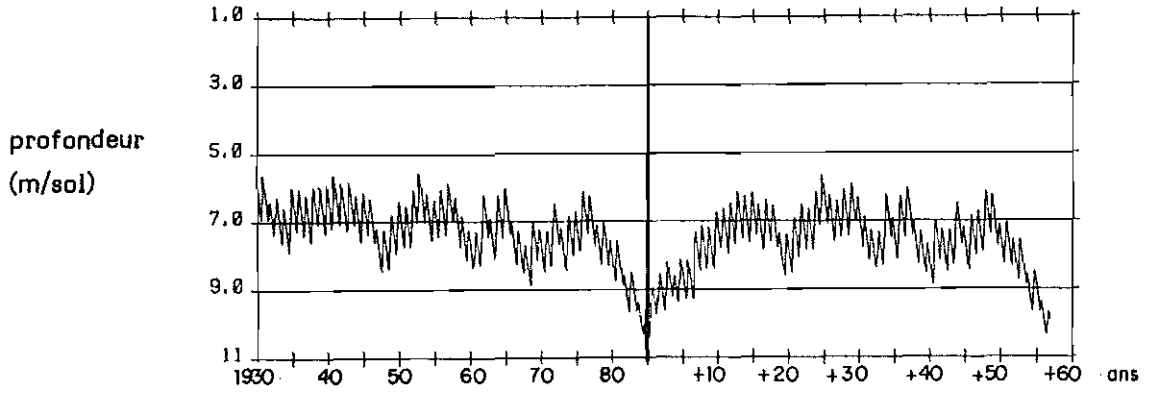


FIGURE 6 - Simulation de la période 1929-1985 prolongée par une séquence de 57 ans de pluies identique à la séquence 1929-1985

Pour situer la situation actuelle (1978-1985), on a utilisé toute la période des pluies de 1929 à 1985. Dans ce but, le modèle a été réajusté pour fonctionner avec des pluies mensuelles (les seules dont nous disposons de 1929 à 1958), et un calage très satisfaisant a été obtenu (coefficient de corrélation de 0,96). Toute la période 1929-1985 a alors été simulée et pour voir l'influence d'un retour des précipitations abondantes, on a imaginé qu'on retrouvait après 1985 la séquence des 57 années de 1929 à 1985. La figure 6 montre d'une part que les niveaux de la période 1978-1985 sont certainement les plus bas depuis 1929 et d'autre part que si une séquence plus humide survenait maintenant, on observerait une remontée des niveaux qui prendrait 7 à 10 ans pour revenir à une profondeur de 7 m par rapport au sol.

CONCLUSIONS

On a montré qu'un modèle hydrologique global pluie - niveau très simple permettait de reproduire correctement une série piézométrique dans un climat semi-aride. Il met en évidence que les niveaux de la période observée (1978-1985) sont les plus bas de la période des 57 années d'historiques de pluies, et peuvent très bien être expliquées par les variations climatiques naturelles, sans invoquer une modification des prélèvements urbains ou végétaux.

Deux scénarios de retour à des pluies plus abondantes montrent que la nappe -qui n'est a priori pas actuellement dans un état critique- remonterait régulièrement pour atteindre un niveau moyen après 7 à 10 années.

II - MODELISATION GLOBALE DES CONCENTRATIONS EN NITRATES DANS UNE SOURCE

1. INTRODUCTION

Dans les régions agricoles, l'évolution des teneurs en nitrates est contrôlée par les épandage d'engrais, les consommations des cultures et par les conditions climatiques. C'est un phénomène complexe, néanmoins la teneur en nitrates au captage résulte des caractéristiques de tout le bassin versant, ce qui justifie une approche globale. La prévision de l'évolution des concentrations dans une source a déjà été abordée généralement sur de courtes périodes (Prat, 1982) ou sur de tous petits bassins (Bergström et al., 1987). Pour réaliser aussi bien des prévisions à long terme de concentrations à l'exutoire de grands bassins que dans des captages de nappes souterraines, un modèle global -appelé BICHE (BIlan CHimique dans les Eaux) (Thiery et Seguin, 1985a, 1985b)- a été spécialement développé. Ce modèle dérive du modèle hydrologique global GARDENIA dans lequel un schéma de transfert a été simulé par un mélange entre phases dans chacun des réservoirs du modèle. Au total, les transferts de nitrates sont simulés par un schéma de mélange couplé à une modélisation hydrologique globale.

2. MODELISATION CHIMIQUE

Les données chimiques servant d'entrée au modèle sont : l'épandage de fertilisants sur la surface du bassin pendant la période de croissance des cultures, les besoins des cultures selon la saison, la minéralisation naturelle

du sol, les résidus culturaux à l'automne après récolte.

Le modèle calcule à chaque pas de temps le bilan des quantités de nitrates qui sont apportées (par épandage et par minéralisation), consommées par les plantes ou qui s'écoulent hors du système par les exutoires.

Les entrées ne sont pas connues précisément à cause de beaucoup de raisons : l'extension du bassin d'une source n'est pas connue exactement, les quantités de fertilisants épandus sur le bassin ne sont qu'estimées par des enquêtes dans un nombre limité d'exploitations ou par analyses des ventes d'engrais les besoins des plantes ne sont que des estimations surtout pour les petites cultures ou les prairies, la minéralisation de l'azote du sol est un phénomène complexe difficile à apprécier.

Des coefficients globaux de correction permettent éventuellement d'ajuster légèrement les entrées pour équilibrer les sorties du modèle (concentrations). La synchronisation des valeurs calculées est réalisée en simulant la diffusion par des mélanges dans les réservoirs du modèle hydrologique (dont on admet en quelque sorte une réalité physique). Chaque réservoir est divisé en quatre parties : une quantité variable d'eau libre qui représente la phase mobile, une quantité constante d'eau liée qui représente la phase stationnaire. Les deux phases ont chacune une concentration ; elles se mélangent avec la constante de temps de mélange.

Il y a donc deux paramètres par réservoir : une capacité d'eau liée et une constante de temps de mélange. Un autre paramètre permet en outre de contrôler la dilution par la pluie, de l'engrais qui est épandu sous forme solide à la surface du sol. Ce paramètre est la capacité de dilution de la pluie et est exprimé en terme de concentration maximale.

3. APPLICATION AU BASSIN DES SOURCES DE LA VOULZIE

Les sources de la Voulzie constituent un exutoire de la nappe des calcaires de Champigny. Ces sources, dont le débit moyen est de l'ordre de 1 m^3/s, sont captées pour l'alimentation en eau de la Ville de Paris. L'évolution de leurs débits et concentrations en nitrates qui sont suivis par la Ville de Paris, a été simulée au pas de temps mensuel à l'aide du modèle BICHE jusqu'en 1983 (Thiery et Seguin, 1985a et b). Le calage a été validé plus tard quand 3 années de mesures supplémentaires ont été disponibles (Seguin, 1988 ; Thiery et Seguin, 1988b).

4. MODELISATION HYDROLOGIQUE

La période de calage s'étend de 1947 à 1983. Pour permettre l'initialisation des états dans les réservoirs du modèle, et donc une simulation correcte des premières années, on a commencé la simulation en 1907, soit 40 ans auparavant. Pendant cette période de démarrage, on a utilisé les pluies calculées à partir des pluies à Paris-Montsouris et à Orléans. Le calage au pas de temps mensuel a été réalisé en essayant de simuler au mieux les débits observés. Il est satisfaisant (coefficient de corrélation égal à 0,80) avec cependant une sous-estimation pendant la période de 1966 à 1970. La période de contrôle 1984-1986 est également bien simulée. Les valeurs des paramètres sont très réalistes : la capacité de rétention du sol est égale à 150 mm ; le temps de demi-tarissement est de 17 mois et celui de la composante très lente de 100 mois, ce qui ne peut être identifié que sur une très longue séquence d'observation (37 années) et à condition d'utiliser une très longue période d'initialisation (fixée ici à 40 ans).

5. MODELISATION CHIMIQUE

Pour caler le modèle sur la période 1947-1983, on a ajusté les paramètres de transfert de nitrates, de façon à obtenir la meilleure simulation possible des concentrations mensuelles observées (on n'a pas cherché à reproduire le flux de nitrates observé, car ces variations sont beaucoup plus semblables à celles du débit ; les variations de concentrations étant beaucoup plus régulières, permettent un calage beaucoup plus fiable).

Les concentrations ne sont pas connues avant 1947 ; on a donc fait l'hypothèse d'une concentration initiale égale à 10 mg/l en 1907, soit 40 ans avant les premières mesures.

Le coefficient d'ajustement est égal à 0,953. Afin de disposer d'une période de contrôle plus étendue, un calage automatique a été réalisé sur la seule période 1947-1976 avec

contrôle a posteriori sur les 10 années suivantes. Les valeurs des paramètres obtenus sont peu différentes de celles du calage de référence, de même que la valeur du coefficient d'ajusteent (qui passe à 0,956). La courbe d'évolution calculée est présentée par la figure 7 qui montre que la reconstitution des teneurs sur la décennie 1977-1986 est excellente sur les 5 premières années ; la brusque montée des concentrations observée en 1978 est en particulier fort bien reproduite. De 1981 à 1986, les teneurs calculées sont un peu plus fortes que celles qui ont été observées, mais on ne note pas de divergence sur les tendances ; il y a quasi-stabilisation dans les deux cas.

6. EXPLOITATION DU MODELE

Une fois calé et validé, le modèle peut servir à étudier des scénarios d'évolution de concentrations en fonction des variations d'épandage et de besoins des plantes. Il peut également servir à mettre en évidence l'influence de la variabilité climatique sur les concentrations dans la source.

L'influence des épandages d'engrais a été étudiée de la manière suivante : on a supposé qu'après 1983, on retrouvait périodiquement la séquence des 77 années de précipitations observées de 1907 à 1983. Deux scénarios d'épandage (et de besoins) ont alors été simulés :

a) situation inchangée : épandage et besoins de 1983 maintenus pendant 48 ans,

b) épandages ramenés à partir de 1983 à leur valeur de 1964, c'est-à-dire réduction extrême (et quasiment improbable).

Le premier scénario montre que la concentration pourrait continuer à augmenter et atteindre 100 mg/l après 40 ans, au lieu de 54 mg/l en 1983. Pendant le second scénario, la concentration se maintiendrait pendant une quinzaine d'années avant de décroître lentement pour atteindre 40 mg/l après 40 ans.

Compte-tenu de l'inertie du système, une réduction, même très forte des épandages, ne produirait pas d'effets très nets avant plusieurs dizaines d'années.

Pour mettre en évidence l'effet de la succession des périodes sèches et humides, on a réalisé, avec la série d'épandages observés, une simulation avec les mêmes pluies sur les 80 années de la simulation, mais avec une répartition différente dans le temps : on a remplacé la séquence 1907-1986 par la succession des séquences 1927-1986 et 1907-1926.

La figure 8 montre qu'on n'observe plus un accroissement brutal des concentrations de 1977 à 1986, comme c'était le cas avec la séquence des pluies observées. L'analyse du bilan résultant de cette simulation montre nettement que la brusque augmentation de concentration en 1977 ne doit pas être attribuée à un excédent (théorique) de nitrates de 236 mg/l (au lieu de 205 mg/l en moyenne les 3 années précédentes), mais surtout à des pluies

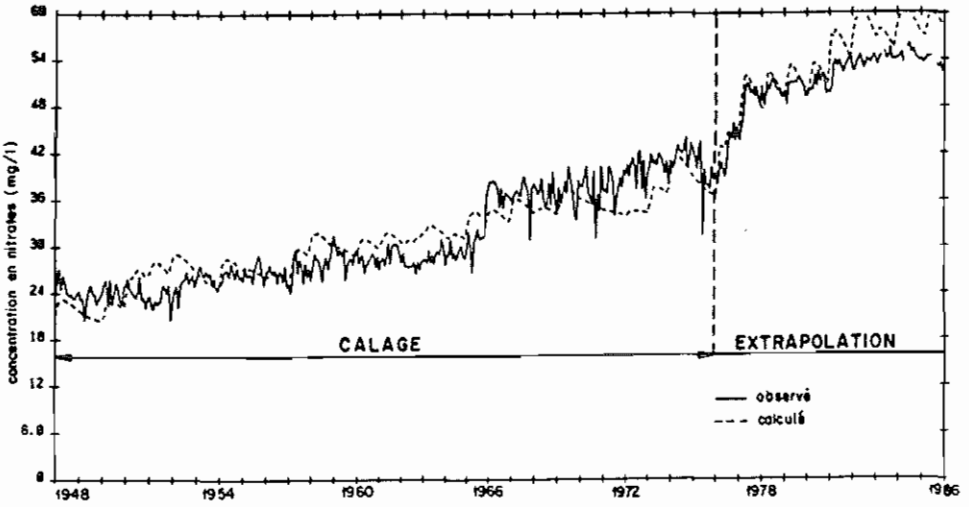


FIGURE 7 - Calage sur la période 1948-1976 et contrôle sur les 10 dernières années

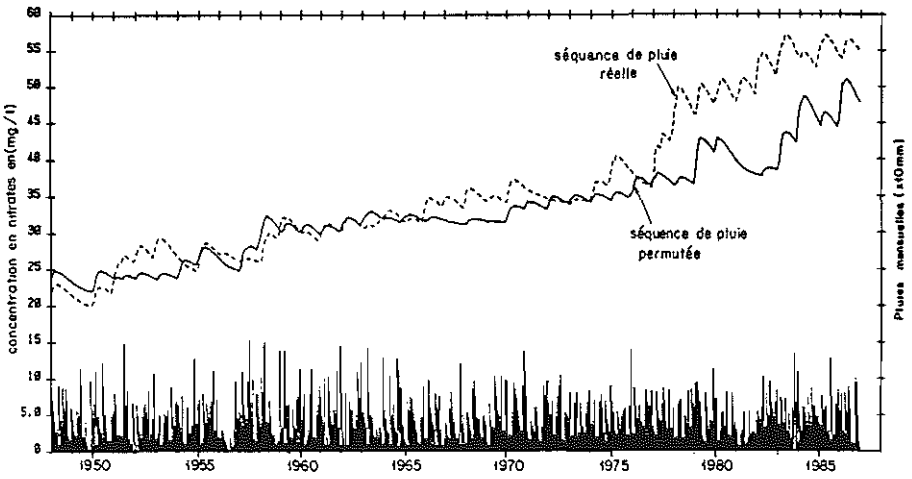


FIGURE 8 - Source de Provins : influence des pluies sur l'évolution des teneurs en nitrates

efficaces très faibles en 1976 qui ont provoqué un stockage de nitrates (dans la zone non saturée) suivies de pluies efficaces très abondantes en 1977 qui ont remobilisé brutalement ces nitrates stockés.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BERGSTROM S., BRANDT M., GUSTAFSON A. (1987). Simulation of runoff and nitrogen leaching from two fields in Southern Sweden. Hydrological Sciences -Journal- des Sciences Hydrologiques, 32, 2, 6/1987

DILUCA C., MULLER M. (1985). Evaluation hydrogéologique des projets d'hydraulique en terrains cristallins du bouclier ouest africain. CIEH, Série Hydrogéologie

LEMOINE L., PRAT J.C. (1972). Cartes d'évapotranspiration potentielle calculée par la formule de L. TURC pour les pays membres du CIEH. Ouagadougou, janvier 1972

PRAT M. (1982). Simulation numérique du transport de produits réactifs dans les sols. Cas de l'azote dans les relations bassin versant-rivière. Thèse Docteur-Ingénieur Institut National Polytechnique de Toulouse

ROCHE P.A., THIERY D. (1984). Simulation globale de bassins hydrologiques. Introduction à la modélisation et description du modèle GARDENIA. Rapport BRGM 84 SGN 337 EAU, Nov. 1983

SEGUIN J.J. (1988). Modélisation globale des transferts de nitrates dans un bassin hydrogéologique pour prévoir l'évolution des concentrations dans les eaux souterraines. Le modèle BICHE : analyse de sensibilité. Rapport BRGM 88 SGN 369 3E

THIERY D. (1985). Pourquoi un modèle à réservoirs permet-il de simuler correctement le tarissement d'une nappe ou d'une source ? BRGM, Note technique EAU 85/23, oct. 1985

THIERY D., SEGUIN J.J. (1985a). Modélisation des transferts de nitrates dans une nappe souterraine ou dans une source. Application à un site près de Pithiviers et aux sources de Provins. Congrès International "Les nitrates dans les eaux", Paris, 22-23-24 octobre 1985

THIERY D., SEGUIN J.J. (1985b). Modélisation globale des transferts de nitrates dans un bassin hydrogéologique pour prévoir l'évolution des concentrations dans les eaux souterraines. Description du modèle BICHE -trois exemples d'application-. Ministère de l'Environnement, Direction de la Prévention des Pollutions, Sce Eau. Rapport BRGM 85 SGN 663, déc. 1985

THIERY D. (1988a). Forecast of changes in piezometric levels by a lumped hydrological model. J. Hydrology, 97 (1988), pp. 129-148

THIERY D. (1988b). Prévision des variations de concentrations en nitrates dans une source au moyen d'un modèle hydrologique global. Communication au 4ème Symp. Int. sur l'Application de l'Analyse des Systèmes à la Gestion des Ressources en Eau, Octobre 1988, Rabat (Maroc), 89-100