



HAL
open science

Génération des scénarios d'évolution de débits de cours d'eau ou de niveaux piézométriques par modèle hydrologique global. Méthode de génération et application à la prévision.

Dominique Thiéry

► **To cite this version:**

Dominique Thiéry. Génération des scénarios d'évolution de débits de cours d'eau ou de niveaux piézométriques par modèle hydrologique global. Méthode de génération et application à la prévision.. Hydrogéologie - Géologie de l'ingénieur, 1984, 3, pp.285-304. hal-01062435

HAL Id: hal-01062435

<https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-01062435>

Submitted on 9 Sep 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.

Génération des scénarios d'évolution de débits de cours d'eau ou de niveaux piézométriques par modèle hydrologique global

Partie 1 Méthode de génération et application à la prévision

par
Dominique Thiery*

Mots-clés : Modèle, Surface piézométrique, Simulation, Exploitation, Nappe eau Oise, Somme, Picardie, Finistère(Ploudaniel)

Résumé

Cet article présente un modèle global à réservoirs de simulation de l'évolution des niveaux d'un aquifère libre soumis aux variations d'alimentation par les précipitations. Une application à 13 piézomètres indépendants situés dans la nappe de la craie en Picardie montre les résultats obtenus, les précautions à prendre pour le calage du

modèle et les surprises rencontrées. On montre ensuite comment ce modèle a été complété par un réajustement automatique en fonction des écarts observés pour une utilisation en prévision à long terme. Une prévision en avenir incertain est réalisée par utilisation de scénarios de pluies possibles pendant la période prévue.

Abstract

This paper presents a lumped hydrological model for the simulation of the levels of an unconfined aquifer influenced by the variations of recharge from rainfall. The model has been applied to 13 independent observation-wells in the Chalk aquifer in Picardie (France). This application shows the results obtained, the care to use for the calibration

of the model and the surprises encountered. It is then shown how the model has been modified, by a readaptation procedure taking into account the observed discrepancies, to be used in long term forecasting. A forecast is performed using possible scenarios of rainfall during the following months.

1. - Introduction

Les modèles hydrologiques globaux à réservoirs sont actuellement couramment utilisés pour la modélisation des débits de cours d'eau ou de source. De tels modèles peuvent être cependant facilement adaptés à la simulation de l'évolution des niveaux piézométriques des aquifères libres soumis aux variations d'alimentation par les précipitations. Ces modèles, fonctionnant généralement à un pas de temps de l'ordre du mois, permettent souvent de représenter correctement le niveau en un point d'observation et d'étendre des séries piézométriques à

partir de longues séries de précipitations à proximité du site. Cependant, il est possible de les utiliser également en prévision à relativement longue portée, compte tenu de la longue mémoire des états passés et de la lente réaction aux précipitations à venir. Pour émettre des prévisions plus efficaces, il est cependant nécessaire d'implanter dans les modèles un processus de correction automatique des écarts observés à la date d'émission de la prévision.

* Bureau de recherches géologiques et minières, B.P. 6009, 45060 Orléans Cedex.

2. - Le modèle de simulation des niveaux aquifères

2.1. - Description du modèle utilisé

Le modèle utilisé pour la simulation des niveaux aquifères est un modèle global à réservoirs extrêmement simple. Il comprend dans sa version élémentaire, 3 réservoirs (fig. 1) :

— un réservoir superficiel RU de capacité RUMAX représentant la capacité en eau du sol dans laquelle se produit l'évapotranspiration ;

— un réservoir intermédiaire H qui représente grossièrement la zone non saturée et sert à reproduire le retard entre une infiltration à la surface et la remontée du niveau de la nappe ; ce réservoir est alimenté par la fraction de la pluie qui n'est pas évapotranspirée quand le réservoir superficiel est saturé ; il se vidange exponentiellement dans un réservoir souterrain avec une constante de temps THG ;

— un réservoir souterrain qui représente la nappe : il est alimenté par le réservoir intermédiaire H et se vidange exponentiellement avec une constante de temps de tarissement TG.

Le niveau de la nappe NI est relié au niveau G de ce réservoir par la relation :

$$NI = G / EMM + GO$$

avec NI Niveau de la nappe,
G Niveau du réservoir G,
GO Niveau de base local de la nappe,
EMM Coefficient d'emmagasinement global équivalent.

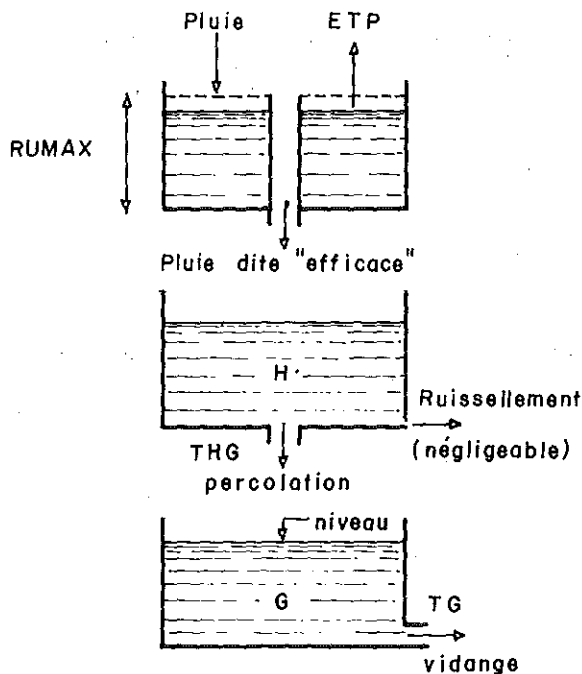


FIG. 1. — Schéma de fonctionnement du modèle de simulation

Les données d'entrées sont la série des précipitations mensuelles près du site étudié, et la série des évapotranspirations potentielles mensuelles. L'évapotranspiration potentielle n'est qu'un index calculé par la formule mensuelle de L. Turc. Cet index peut être corrigé globalement par un facteur de correction CETP (le même pour tous les mois), pour tenir compte d'une éventuelle non-représentativité des données. La série de contrôle est la série des niveaux piézométriques mensuels. La valeur utilisée est une valeur proche du milieu de chaque mois, mais le jour exact du mois est assez variable.

Il apparaît ainsi que le modèle (dans la version la plus simple) fait intervenir 6 paramètres :

- 1 : la capacité en eau maximale du sol RUMAX,
- 2 : le coefficient de correction de l'évapotranspiration potentielle CETP,
- 3 : la constante de temps de percolation THG,
- 4 : la constante de temps de tarissement TG,
- 5 : le coefficient d'emmagasinement global équivalent EMM,
- 6 : le niveau de base local GO.

2.2. - Calage du modèle de simulation

2.2.1. - Principe du calage

Les quatre premiers paramètres sont déterminés par optimisation non linéaire suivant un schéma dérivé de la méthode de ROSEMBROCK (avec un réajustement externe des paramètres ayant un effet de seuil). Les deux derniers paramètres sont déterminés immédiatement par régression entre les niveaux G calculés dans le réservoir G et les niveaux observés. Le critère d'ajustement est le coefficient de corrélation entre niveaux calculés et niveaux observés.

On considère dans cette version que le ruissellement (direct) est négligeable, ce qui est assez souvent le cas (mais pas toujours).

2.2.2. - Modélisation de 13 piézomètres de la nappe de la craie en Picardie

Le modèle décrit précédemment a été appliqué à 13 piézomètres de la nappe de la Craie en Picardie (dans la région d'Amiens, Beauvais, Compiègne) couvrant une étendue d'environ 100 km sur 80 km. 10 parmi ces piézomètres sont observés pendant la période 1966-1981, soit 16 années ; les 3 derniers ne sont observés que depuis respectivement 1971 (11 ans), 1974 (8 ans) et 1974 (8 ans). Le modèle a d'abord été calé pour chacun de la période 1966-1977, soit 12 ans (et 7 ans, 4 ans et 4 ans pour les 3 derniers).

Les résultats de ces calages sont reproduits dans le tableau I. Les ajustements sont corrects ; les coefficients de corrélation (colonne 8) sont supérieurs à 0,95 dans 10 cas sur 13.

TABL. I. — Calage du modèle pour 13 piézomètres de la nappe de la Craie en Picardie, sur les périodes 1966-1977 et 1966-1982.

Colonne	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NOH	Période	RUMAX mm	CETP %	THG mois	TG mois	GO m	EMM %	Rcal. 1966/77	Rcont 1966/81	Rcal. 1966/81
TILLOLOY	1	139	6.7	5.4	8.9	72.80	1.15	0.987	0.980	
	2	139	5.3	5.6	9.1	72.52	1.17			0.982
FEUQUIERES	1	285	-4.6	1.9	51.8	53.84	2.54	0.972	0.0	
	2	457	1.4	1.8	33.6	69.82	4.06			0.857
AUTHEUX	1	298	3.6	2.3	5.9	66.11	1.59	0.962	0.939	
	2	304	3.0	2.4	5.0	66.04	1.65			0.940
HARGICOURT	1	369	-12.1	2.6	6.4	81.58	2.13	0.955	0.916	
	2	374	-11.6	2.4	6.8	81.70	2.48			0.929
NOIREMONT	1	32	-6.0	2.4	54.1	102.20	5.98	0.951	0.903	
	2	32	-5.9	2.4	54.1	103.4	6.34			0.911
SENLIS	1	215	-15.4	3.1	8.0	58.10	2.00	0.972	0.933	
	2	250	-15.7	3.0	9.8	57.82	2.51			0.945
BLINCOURT	1	100	-1.3	5.9	8.4	48.28	1.62	0.960	0.909	
	2	89	-9.1	5.8	11.1	47.05	2.22			0.929
GAPENNES	1	248	-20.8	1.5	40.1	38.41	7.04	0.932	0.0	
	2	302	-28.3	1.7	21.9	44.38	10.4			0.809
BONNEUIL	1	40	-39.3	4.4	28.9	81.29	16.3	0.970	0.963	
	2	40	-39.3	4.4	28.9	81.36	16.6			0.962
OMIECOURT	1	362	2.6	8.8	22.3	65.59	4.89	0.984	0.949	
	2	362	10.0	15.4	19.5	65.76	3.30			0.969
LIGNIERES*	1	19	24.4	8.5	9.3	159.37	1.10	0.934	0.867	
	2	19	30.5	7.8	8.9	163.33	1.41			0.948
LAON PLAINE*	1	374	-3.8	3.1	7.8	68.19	2.71	0.946	0.0	
	2	375	-15.9	3.0	7.8	68.11	6.10			0.922
JOUY*	1	150	4.0	12.3	13.1	118.10	3.28	0.963	0.946	
	2	150	4.0	10.4	11.1	119.41	3.64			0.976

1 = calage 1966-1977

2 = calage 1966-1982

* = début des observations après 1966

Rcal = ajustement sur la période de calage

Rcont = ajustement sur la période de contrôle

Les valeurs des paramètres sont les suivantes :

a) Capacité maximale en eau du sol :

- comprise entre 200 et 400 millimètres dans 7 cas sur 13,
- inférieure à 100 mm dans 3 cas sur 13.

Ce sont donc des valeurs généralement élevées, très différentes de la valeur 100 mm souvent adoptée par défaut d'information.

b) Correction d'évapotranspiration :

- comprise entre -15 % et +15 % dans 10 cas sur 13 avec une moyenne de -2,6 %,
- anormalement élevée dans 1 cas (-39 %).

c) Constante de temps de demi-percolation :

- inférieur à 5 mois dans 8 cas sur 13,
- supérieur à 10 mois 1 fois.

d) Constante de temps de tarissement :

- comprise entre 5 et 10 mois dans 7 cas sur 13,
- supérieure à 20 mois dans 5 cas sur 13.

e) Emmagasinements équivalents :

- compris entre 1 % et 5 % dans 10 cas sur 13, avec une moyenne de 2,3 %, ce qui est très raisonnable dans cette région,

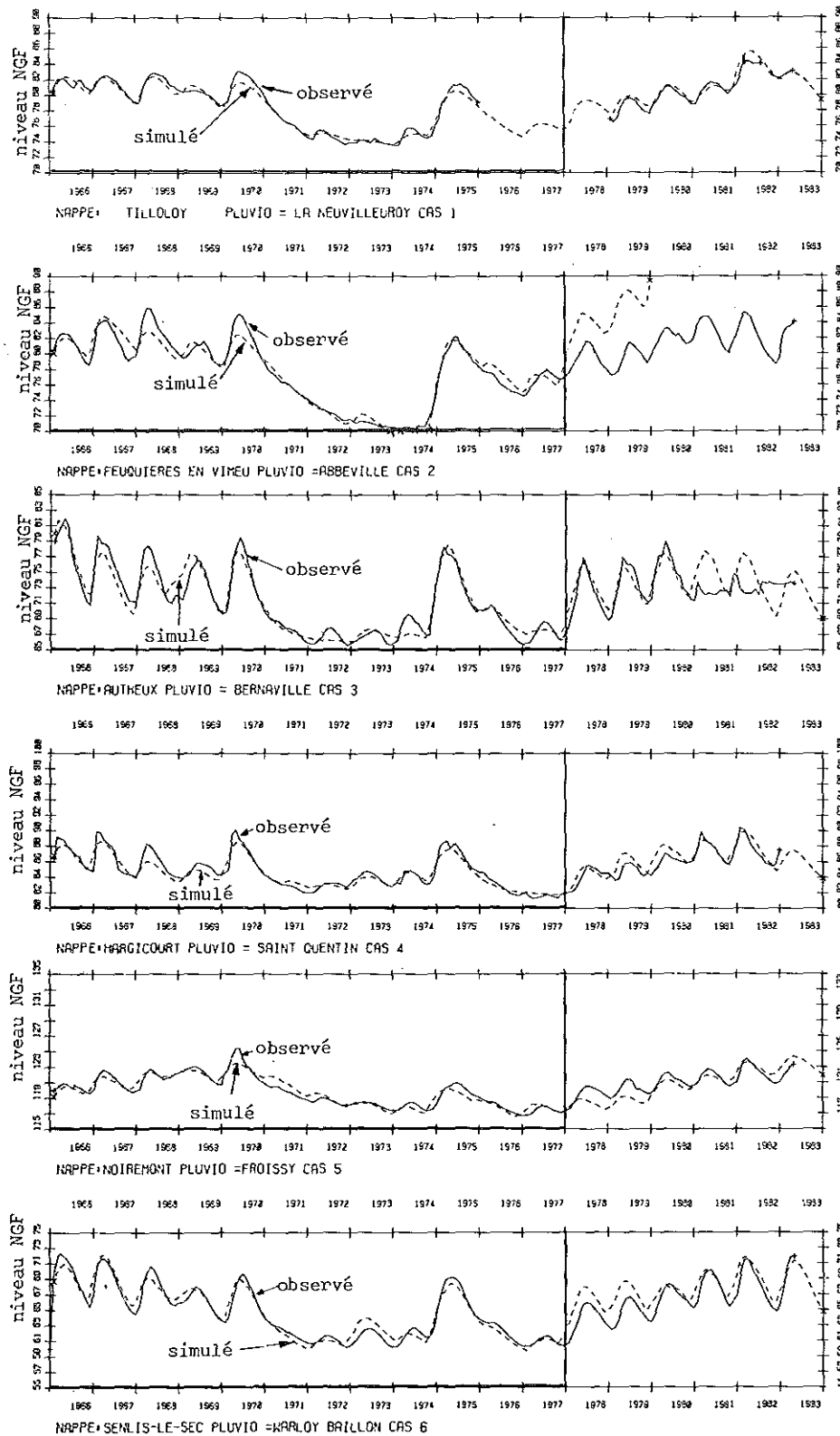


FIG. 2. — Calage de 13 piézomètres sur la période 1966-1977.

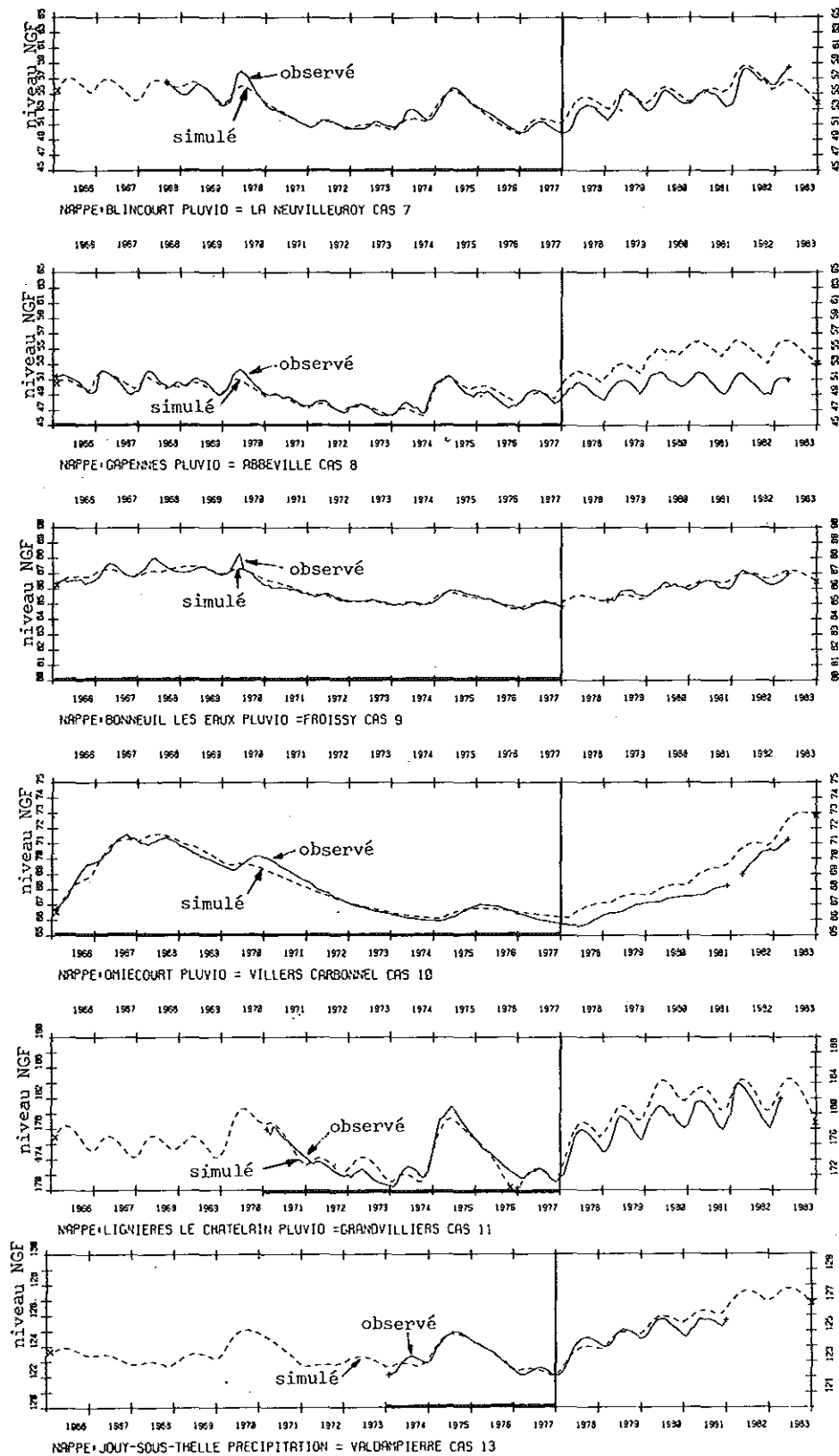


FIG. 3. — Calage de 13 piézomètres sur la période 1966-1977 (suite)

— égal à 16 % à Bonneuil : cette valeur n'a pas de sens, et est influencée par la présence de limites à niveau imposé près du piézomètre et par la réduction d'évapotranspiration potentielle trop importante.

2.3. - Contrôle de la fiabilité du calage

2.3.1. - Simulation d'une plus longue période

Pour contrôler la fiabilité du calage, on a simulé avec le calage 1966-1977, la période totale 1966-1981, soit 4 années de plus qui correspondaient à une remontée constante de la nappe. L'ajustement a été contrôlé d'une part par les graphiques observation-simulation (fig. 2 et 3), et d'autre part par les coefficients d'ajustement. Le coefficient d'ajustement R a été défini par :

$$R = \left[1 - \frac{\sum^n \text{DIF}^2}{n \cdot \text{Var (OBS)}} \right]^{1/2}$$

avec OBS = niveau observé
DIF = différence NI - OBS
Var = Variance

Ce coefficient d'ajustement ne correspondrait à un coefficient de corrélation que si on calculait le niveau NI par régression à partir du niveau observé OBS (en réajustant le coefficient d'emmagasinement et le niveau de base), ce qui n'est pas le cas. En particulier, si l'erreur quadratique moyenne ($\sum \text{DIF}^2/n$) est supérieure à la variance des observations — ce qui peut arriver — R^2 sera négatif et on définira un coefficient d'ajustement égal à zéro.

La comparaison de la colonne (9) avec la colonne (8), ainsi que l'examen des dessins montre que sur les 10 piézomètres calés pendant 12 ans :

- 5 sont très bien simulés pendant les 4 années supplémentaires,
- 2 sont moyennement bien simulés,
- 3 divergent très nettement : Feuquières, Gapennes et Omiécourt (un peu).

Il est intéressant de remarquer que pour ces 3 piézomètres les niveaux calculés de 1978 à 1981 sont beaucoup trop hauts : ceci semble montrer que après une période très sèche (à la suite de l'année 1976), les nappes ont plus de difficultés à remonter que le suggérerait un modèle simple.

Sur les 3 piézomètres calés pendant 4 à 7 ans, 1 seul est bien simulé, les 2 autres étant surestimés par le modèle, ce qui n'est pas surprenant vu la trop courte période de calage.

2.3.2. - Recalage des modèles

Pour analyser les causes de divergence, on a refait un calage des 10 + 3 piézomètres pendant la période complète 1966-1981. Les résultats sont reportés dans le tableau I. La comparaison des colonnes (9) et (10) de ce tableau et l'examen

TABLE II. — Calage du piézomètre Senlis pour différentes périodes.

Numéro du calage	Période	Durée Années	Caractéristiques	Niveau moyen (m)	Écart -type (m)	Coefficient		Réserve utile (mm)	Correctif ETP (%)	Temps montée (mois)	Temps Tarissement (mois)	Niveau de base (m)	Emmagasinement (%)	Infiltration calculée sur la période totale (mm)
						Calage	Tte Période							
1	1966-1970	5	Période haute	67.65	2.39	0.950	0.922	244	-11	4.1	5.0	59.22	1.22	222
2	1966-1974	9	Période haute, puis basse	64.98	3.54	0.970	0.941	244	-16	3.2	8.0	57.84	1.97	247
3	1966-1977	12	Période mixte	64.57	3.48	0.972	0.935	217	-15	3.2	7.9	58.18	1.96	244
4	1977-1982	6	Période haute postérieure	65.31	2.96	0.974	0.854	80	-8	4.1	11.4	50.79	1.67	253
5	1966-1982	17	Toute la période	65.05	3.28	0.948	0.948	244	-18	3.2	8.5	57.5	2.32	259

des dessins (non présentés ici) montrent que dans les 3 cas de divergence le calage est un peu amélioré, mais reste mauvais, sauf pour Omiécourt qui est réajusté. On note également une nette amélioration pour les 2 piézomètres ayant une courte durée d'observation.

L'examen des nouveaux paramètres identifiés (deuxièmes lignes) montre qu'ils ne varient que relativement peu (sauf pour ceux qui étaient mal simulés), ce qui est important.

2.3.3. - Comparaison des paramètres suivant la période de calage

On a effectué cette comparaison sur le piézomètre de Senlis qui est relativement bien simulé. Cinq périodes de calage d'une durée de 5 à 17 ans ont été choisies. Les paramètres obtenus, ainsi que les caractéristiques de l'ajustement, ont été reportés sur le tableau II.

Il apparaît ainsi que pour ce piézomètre les paramètres identifiés sont très semblables dans 4 cas sur 5. Le calage n° 4 sur une période excédentaire de 5 ans conduit par contre à une réserve utile beaucoup trop petite. La figure 4 montre les 5 ajustements obtenus sur toute la période de 18 ans. Ces ajustements sont satisfaisants dans 4 cas sur 5 (coefficients d'ajustements supérieurs à 0,92), mais le calage n° 4 (ajustement 0,85) conduit à une sous-estimation considérable des périodes très déficitaires.

Dans les 5 cas, on arrive cependant à des calculs d'infiltration assez peu différents, compris entre 220 et 260 millimètres par an. Ceci est important, car — pour ce piézomètre du moins — même si les paramètres ne sont pas toujours définis de manière unique, l'infiltration est relativement bien estimée (à 10 ou 20 % près). On verra cependant plus loin qu'une certaine incertitude subsiste.

2.4. - Contrôle du processus de calage

Nous avons précisé que, pour être objectif, le calage a été effectué de manière automatique par un algorithme d'optimisation non linéaire. La méthode de calage, issue de l'algorithme de Rosembrock, a généralement donné une convergence vers la solution optimale. Cependant, il existe parfois des zones de calages dans lesquelles la qualité de l'ajustement est quasiment équivalente (zones de gradients extrêmement plats ou lignes de crêtes). La détermination de l'optimum devient alors pratiquement impossible compte tenu de la précision des calculs qui n'est pas absolue, et introduit de très légères erreurs numériques aléatoires sur le coefficient d'ajustement. Ces petites erreurs peuvent, dans ces zones, être supérieures aux variations locales du coefficient d'ajustement et conduire à un optimum local qui n'est pas l'optimum absolu.

Pour illustrer ce phénomène, nous avons cartographié la valeur du coefficient d'ajustement (le coefficient de corréla-

tion) pour le piézomètre Senlis-le-Sec. Nous avons fixé les valeurs des demi-temps de percolation et de tarissement à leurs valeurs optimales : 2,65 mois et 9,65 mois. La figure 5 montre les variations du coefficient de corrélation (multiplié par 1 000) en fonction de la valeur de la réserve utile et du coefficient de correction de l'ETP. On remarque immédiatement les points suivants :

— Il existe un optimum pour une réserve utile de 170 mm environ, avec une correction d'ETP de +11 %. Le coefficient de corrélation est de 0,959.

— Il existe un deuxième optimum local avec une réserve utile comprise entre 370 et 400 mm pour une correction d'ETP d'environ -5 %. Le coefficient de corrélation est de 0,954.

— Il existe des zones de gradient très faible :
réserve utile entre 160 et 205 mm,
correction d'ETP entre -5 % et -20 %,

Cette zone est un optimum local $r = 0,9395$.
réserve utile entre 235 et 300 mm,
correction d'ETP entre -5 % et -20 %,
 $r = 0,9435$.

— Il existe une zone dans laquelle le coefficient de corrélation ne dépend pas de la réserve utile, mais uniquement de la correction d'ETP :
réserve utile entre 230 et 400 mm,
correction d'ETP entre -3 % et +6 %.

Suivant la valeur de départ, on arrivera donc à un optimum ou à un autre ou à aucune solution. On a donc, au vu de la figure 5, essayé 4 valeurs de départ différentes. Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau III (en notant RU la capacité en eau du sol et CETP la correction d'ETP).

Ce tableau III montre que les points d'arrivées sont bien ceux qui étaient prévisibles. Les calages à partir des départs b) et d) arrivent près des optimum locaux identifiés. Les calages à partir des départs a) et c) en zones sans gradient ne peuvent quitter ces zones. Il est très intéressant de remarquer que bien que tous ces calages soient acceptables et donnent des simulations finalement assez proches, on obtient des infiltrations moyennes très différentes comprises entre 130 et 230 mm par an. L'ajustement du coefficient d'emmagasinement permet en effet d'obtenir un niveau de nappe ayant une amplitude identique à celle du niveau observé.

L'examen des autres piézomètres a montré que le calage est généralement moins délicat, mais qu'il convient d'être prudent dans l'analyse comparative des paramètres des modèles. Il est évident que le flou du calage est dû au fait qu'on ne connaît pas le paramètre d'amplitude (le coefficient d'emmagasinement), ce qui donne un très grand degré de liberté. D'autre part, les paramètres sont d'autant mieux déterminés que la période de calage est longue et comprend à la fois des années sèches et humides et que le système réagit rapidement.

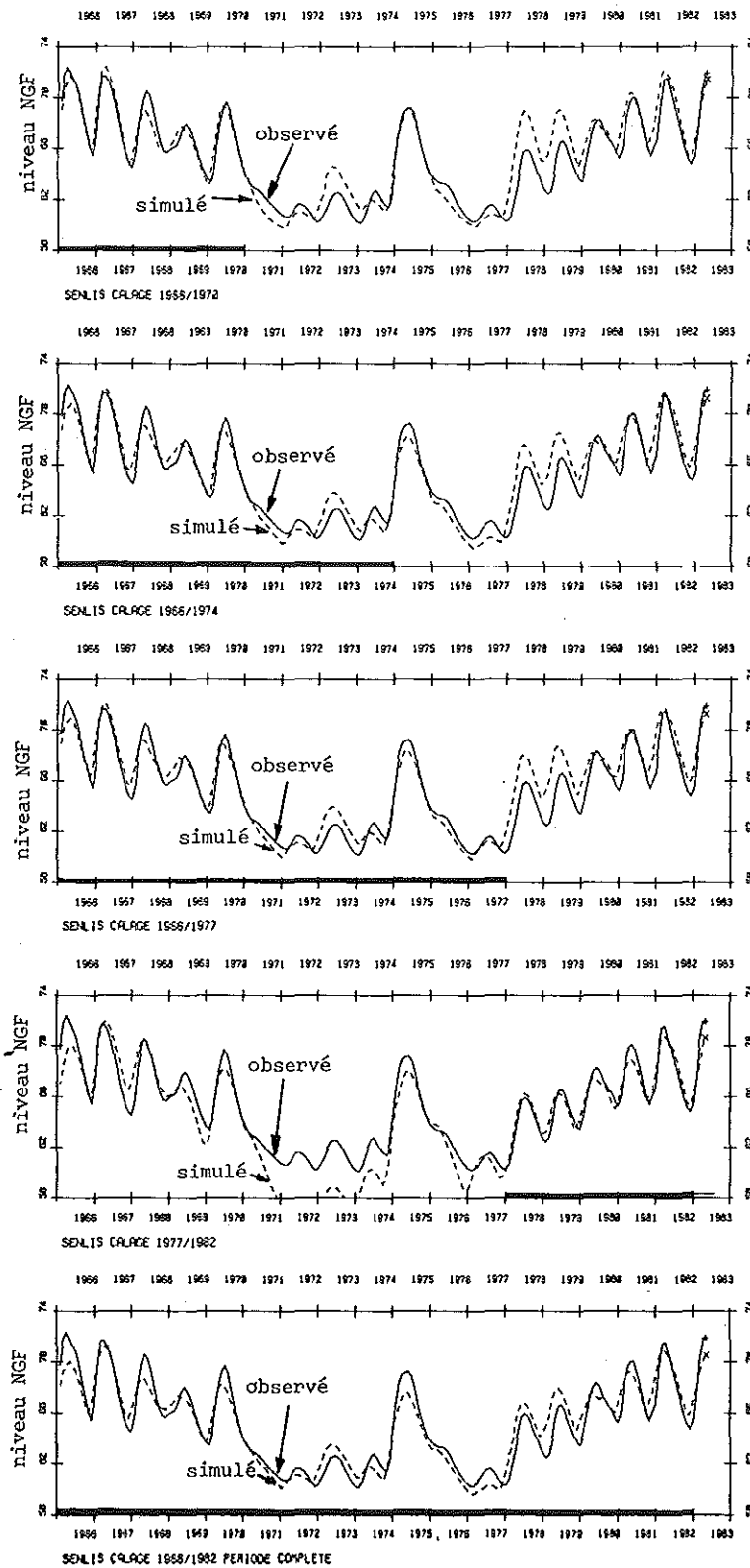


FIG. 4. — Piézomètre Senlis : calage sur 5 périodes différentes.

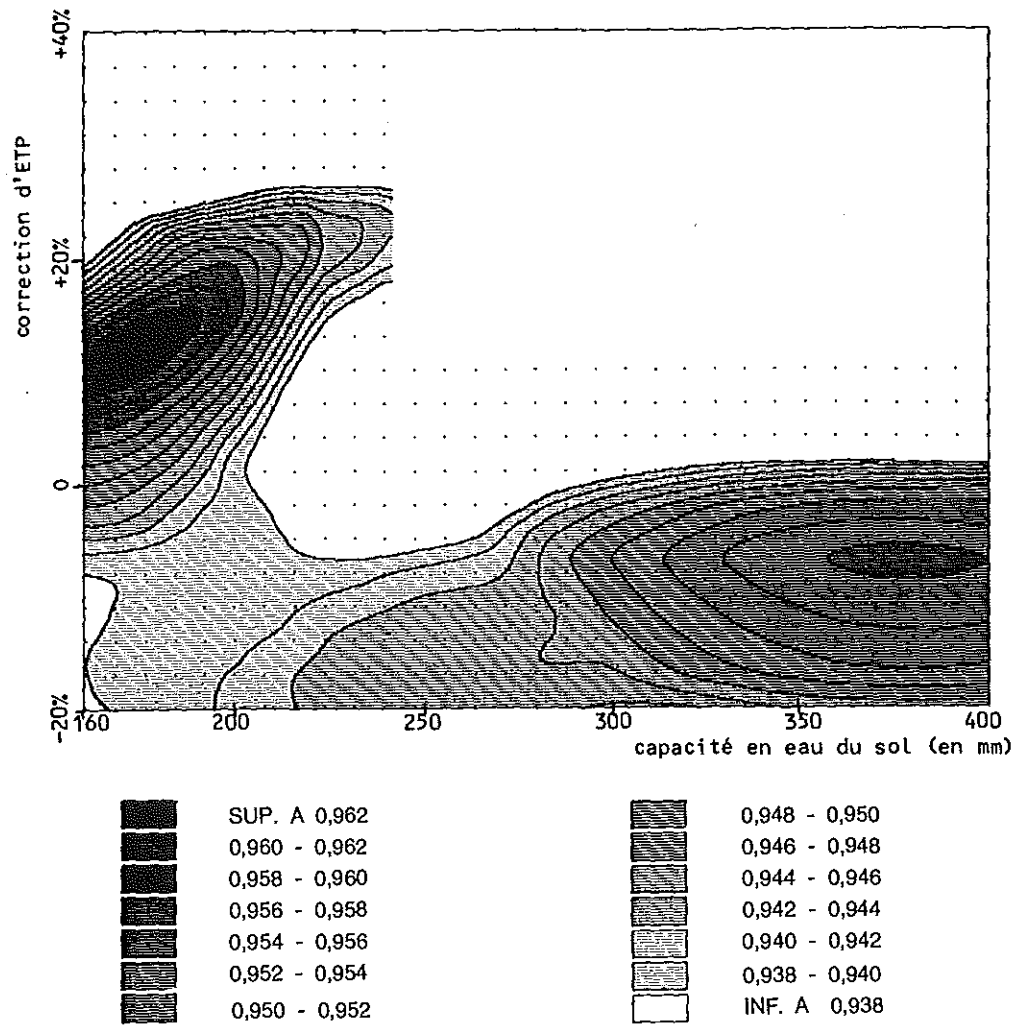


FIG. 5. — Piézomètre Senlis : variation du coefficient d'ajustement en fonction de la capacité en eau du sol et de la correction d'ETP.

TABL. III. — Différents points de départ du calage automatique au piézomètre Senlis.

numéro	D E P A R T		A R R I V E E				
	RU (mm)	CETP (%)	RU (mm)	CETP (%)	Coefficient de corrélation	Infiltration moyenne 1966-1981 (mm)	Coefficient d'emmagasinement (%)
a	184	-11	192	-9,8	0,939	204	2,45
b	166	- 5	175	+12,9	0,961	130	1,80
c	232	- 2	262	-14	0,944	225	2,54
d	380	0	379	- 4,9	0,955	164	2,46

3. - Le modèle de prévision

3.1. - Principe du réajustement

On considère que le modèle ne peut pas représenter parfaitement le système aquifère, car :

- la pluie et l'évapotranspiration potentielle ne sont connues qu'aux erreurs d'échantillonnage et de calcul près,
 - la capacité du sol n'est peut-être pas parfaitement constante au cours des saisons,
- ce qui introduit une certitude DALIMH sur la pluie efficace.

D'autre part, les constantes de temps de percolation et de tarissement ne sont peut-être pas parfaitement fixes, mais peuvent par exemple dépendre :

- de l'état de saturation de la zone non saturée pour la percolation,
- de l'épaisseur mouillée pour le tarissement.

Les états des 3 réservoirs peuvent donc à un moment donné être erronés et ne pas permettre une prévision correcte pendant toute une période : le temps nécessaire à l'erreur pour être oubliée.

Quand un décalage apparaît, il est tentant de le corriger en réajustant les états des réservoirs, mais une telle correction peut être dangereuse si l'écart est dû à une erreur de mesure du niveau de la nappe ou à une influence locale de courte durée qui ne peut être prise en compte par le modèle.

Connaissant l'écart :

$$DNI = NI - SI$$

avec NI = niveau mesuré
SI = niveau simulé

on peut recalculer l'écart correspondant dans les réservoirs, en effet :

- soit une différence DALIMH d'alimentation du réservoir H et DALIMG du réservoir G,
- soit H(t-1) et G(t-1) les niveaux dans les réservoirs H et G à la fin du pas de temps précédent et soit ALIMH l'alimentation calculée du réservoir H au pas de temps de calcul.

On considère qu'en début de pas de temps, on ajoute DALIMH et DALIMG respectivement dans les réservoirs H et G. En fin de pas de temps, on provoque dans G une différence de niveau DG par rapport au niveau sans correction :

$$DG = DALIMH \cdot (TG - 1) / TG / THG \\ + DALIMG \cdot (TG - 1) / TG$$

Pour une différence de niveau souhaitée, il faut choisir une répartition entre les 2 corrections DALIMH et DALIMG. On pose :

$$DALIMH = k \cdot \sigma \text{ ALIMH}$$

$$DALIMG = k \cdot \sigma \text{ ALIMG}$$

σ désignant l'écart-type,

c'est-à-dire qu'on corrige d'autant plus un réservoir que son alimentation est variable (et que sa mémoire est courte).

Avec cette règle, on obtient (à la fin du pas de temps) :

$$DG = \frac{DG \cdot \sigma \text{ ALIMH}}{\sigma \text{ ALIMG} + \sigma \text{ ALIMH} / \text{THG}} \cdot \frac{TG}{TG - 1} \cdot \frac{\text{THG} - 1}{\text{THG}}$$

et

$$DG = DNI \cdot \text{EMM}$$

En fait on n'effectue pas ces corrections à 100 %, mais on applique un taux de correction de r % ($r < 1$) et on corrige les réservoirs de DH' et DG' :

$$DH' = r \text{ DH}$$

$$DG' = r \text{ DG}$$

De la même manière, si on s'attache à modéliser le débit à l'exutoire, on a la relation :

$$QG = G / TG$$

avec QG : débit en millimètres.

Si on constate un écart par rapport au débit observé (en millimètre), on peut réaliser des corrections d'alimentation des réservoirs H et G. On obtient alors une variation :

$$DQG = DALIMH / \text{THG} / TG + DALIMG / TG$$

soit par identification, à la fin du pas de temps :

$$DH = \frac{DQG \cdot \sigma \text{ ALIMH}}{\sigma \text{ ALIMG} + \sigma \text{ ALIMH} / \text{THG}} \cdot TG \cdot \frac{(\text{THG} - 1)}{\text{THG}}$$

$$DG = \frac{d \text{ QG}}{\sigma \text{ ALIMG} + \sigma \text{ ALIMH} / \text{THG}} \cdot \sigma \text{ ALIMH} \cdot \frac{\text{THG} - 1}{\text{THG}} \\ + \sigma \text{ ALIMG} \cdot (\text{THG} - 1)$$

En pratique, pour éviter des corrections trop brutales et dangereuses, on ne corrige les niveaux H et G que quand on observe un écart DNI (ou DQG) du même signe que celui du pas de temps précédent de façon à éviter de corriger par exemple de +55 mm à 1 pas et de -50 mm le pas suivant, à cause d'une observation erronée du niveau piézométrique.

Le calcul du taux de correction r s'effectue par analyse des résultats sur la période d'observation. On procède de la manière suivante :

- On se fixe une durée de prévision d (par exemple 8 mois).
- On se fixe un taux de correction r compris entre 0 % et 100 %. Pour chaque pas de temps de la période d'observation :

TABL. IV. — Réajustement piézomètre Senlis. Prévision à 1 mois, 3 mois et 8 mois.

Durée de la prévision (mois)	Taux de correction optimal	Ecart-type de l'erreur de prévision (en m)		
		Correction 0 %	Correction 100 %	Correction optimale
1 mois	78 %	1,04	0,70	0,68
3 mois	12 %	1,03	0,97	0,93
8 mois	8 %	1,02	1,15	0,97

- on calcule le niveau avec le modèle,
- on calcule l'écart avec l'observation à ce pas,
- on réajuste les réservoirs (avec le taux r),
- on prévoit avec le modèle les d pas suivants à partir des précipitations, mais bien entendu sans réajuster les niveaux,
- on calcule l'erreur de prévision sur les d pas.

Pour chaque taux de correction r, on a donc un écart quadratique moyen de prévision. On choisit alors le taux qui a donné l'écart quadratique minimal.

3.2. - Application au piézomètre Senlis 1977-1983

On a appliqué la méthode décrite à la prévision des niveaux du piézomètre de Senlis, pendant les 8 mois suivant le mois d'avril. Une optimisation du coefficient de réajustement a conduit à une valeur de 8 % par pas de temps. Cette valeur est relativement faible et s'explique par la durée de la période prévue. En effet, en corrigeant trop rapidement un écart constaté le mois de la prévision, il y a un risque important, si cet écart est dû à une erreur de mesure de niveau (ou à une influence très locale), de surcorriger le modèle et de commettre une erreur pendant 8 mois. Le taux de réajustement varie suivant la durée de la prévision (voir tabl. IV).

Pour une prévision à court terme, il est intéressant de corriger presque au maximum, car les risques ne sont pas grands.

Lors de la prévision à 8 mois les corrections moyennes dans les réservoirs sont de :

- 1 mm dans le réservoir H, avec un écart-type de 27 mm,
- 0,5 mm dans le réservoir G, avec un écart-type de 14 mm,

ce qui correspond à une correction sur le niveau mesuré ayant un écart-type de 11 cm, ce qui est plausible compte tenu de la variabilité de la date de mesure au cours du mois.

La figure 6 montre 3 exemples de réadaptation au piézomètre de Senlis-le-Sec, au mois d'avril des années 1968, 1975 et 1979. On voit que la correction est variable suivant les années. En 1968, il n'y a pratiquement pas de réajustement, car l'écart s'est produit brutalement le dernier mois ; par contre, en 1975 et surtout en 1979, l'ajustement s'est produit au cours des mois précédents, et permet une nette amélioration de la simulation des mois futurs.

L'aptitude à la prévision (les pluies futures étant supposées connues) à un pas d'avance a été vérifiée de la manière suivante. On note :

— Différence prévue : $DP = H \text{ prévu } (t+1) - H \text{ prévu } (t)$

— Différence observée : $DO = H \text{ obs. } (t+1) - H \text{ obs. } (t)$

— Différence simulée : $DS = H \text{ sim. } (t+1) - H \text{ sim. } (t)$

Pour les 17 années d'observation, les valeurs sont les suivantes :

	DS	DP	DO
Moyennes (mètres)	- 0,122	- 0,03	0,14
Ecart-type (mètres)	0,30	0,31	0,63

En étudiant les relations entre les 3 séries, on obtient :

[1] $DO = 1,83 DS + 0,37$, avec un coefficient de corrélation $r = 0,88$,

[2] $DO = 1,85 DP + 0,20$, avec un coefficient de corrélation $r = 0,92$.

L'équation [1] permet donc de prévoir la variation de niveau avec un écart-type de 0,30 m, soit un intervalle de confiance à 80 % formé par les variations calculées $\pm 0,39$ m. L'équation [2], avec réajustement, permet de prévoir les variations à 0,32 m près dans 80 % des cas (voir fig. 7).

3.3. - Réajustement de 13 piézomètres de la nappe de la craie en Picardie

Les 13 piézomètres modélisés précédemment ont été réajustés suivant la méthode décrite ci-dessus. La période d'observation s'étend de 1966 à 1981 et la portée de la prévision de 9 mois. Pour chacun des piézomètres, le tableau V donne : le taux de réajustement, l'écart-type de l'erreur de prévision sur les 9 mois futurs avec et sans réajustement.

Ce tableau montre que les succès de réajustement sont variables : pour 5 piézomètres sur 13, l'écart-type de la prévision est à peu près divisé par 2 par le réajustement. Les piézomètres pour lesquels le réajustement n'apporte que peu d'amélioration, sont ceux dont l'erreur n'est pas due à une mauvaise appréciation de l'alimentation, mais est plutôt due à une influence extérieure sur les niveaux : pompage ou imprécision des mesures.

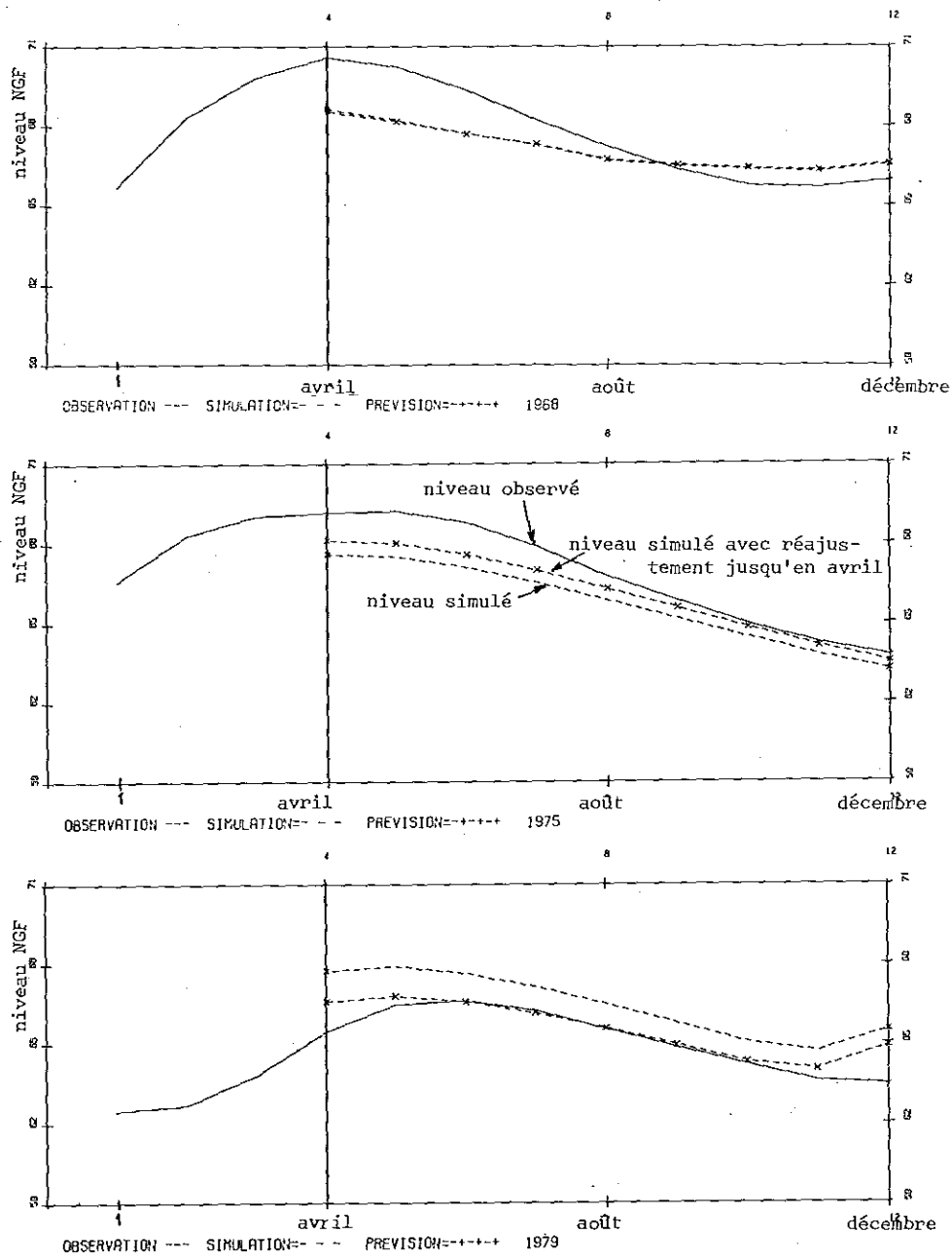


FIG. 6. — Piézomètre Senlis : prévision avec réajustement jusqu'au mois d'avril.

3.4. - Prévision réelle en avenir incertain, avec prise en compte des pluies à venir

En pratique, il est bien évident qu'à une date donnée, on ne pourrait prévoir avec certitude les niveaux à venir que si on connaissait les pluies des mois futurs. Comme il n'est pas possible de connaître ces pluies, il faut donc faire des prévisions conditionnelles. Il est possible de faire des statistiques pour chacun des 12 mois de l'année, mais le niveau après

plusieurs mois dépend de la succession des pluies de ces mois. Il n'est pas possible de déterminer la succession des pluies qui, compte tenu de l'état initial des réservoirs, produirait un niveau de temps de retour de 2 ans, 5 ans ou 10 ans après d mois.

On procède donc de la manière suivante :

— on utilise le modèle, avec réajustement, avec les pluies observées jusqu'à la date d'émission de la précision ;

TABL. V. — Réajustement de 13 piézomètres de la nappe de la craie en Picardie.

Nom du piézomètre	Taux de réajustement (%)	Ecart-type sur la prévision	
		avec réajustement (m)	sans réajustement (m)
TILLOLOY	84	1,48	3,54
FEUQUIÈRES	78	1,64	2,29
AUTHEUX	100	1,63	1,83
HARGICOURT	26	0,88	1,04
NOIREMONT	3	0,71	0,71
SENLIS	14	1,07	1,27
BLINCOURT	12	0,84	1,17
GAPENNES	30	0,74	1,41
BONNEUIL	16	0,32	0,61
OMIECOURT	92	0,34	0,44
LIGNIÈRES	16	0,96	1,11
LAON-PLAINE	4	0,34	0,35
JOUY	96	0,74	2,88

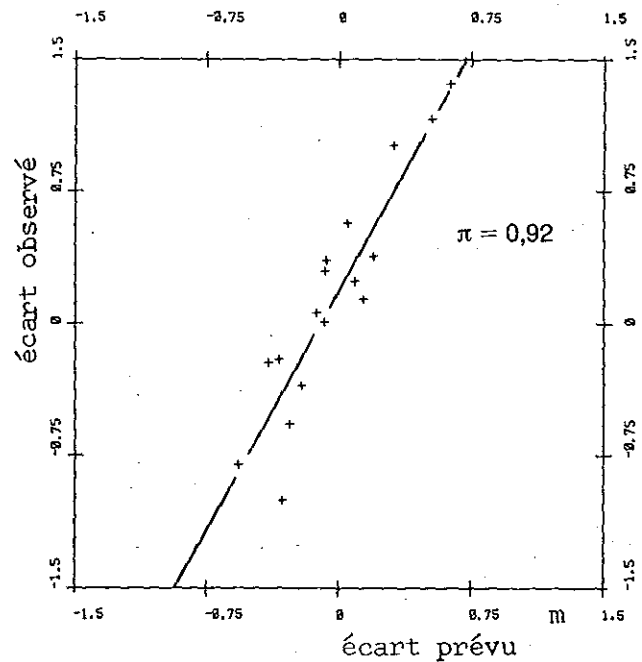


FIG. 7. — Piézomètre Senlis : prévision du mois de mai émise en avril.

— à partir des niveaux des réservoirs obtenus, on utilise le modèle (sans réajustement, car on ne connaît pas l'erreur commise), sur les d mois suivants en utilisant successivement les pluies observées au cours de n années précédentes pendant ces d mois ;

— pour chacun des d mois de la période prévue, on fait des statistiques sur les n niveaux calculés pour ce mois. On en déduit pour chacun de ces mois un niveau de temps de retour T .

La figure 8 montre une application au piézomètre Senlis en 1983. Le réajustement n'a pas permis un recalage au mois

d'avril, car l'écart de simulation n'est apparu brutalement que les deux mois précédents. 17 séquences de pluies des mois de mai à décembre ont été utilisées (les pluies observées de 1966 à 1982) et ont produit 17 évolutions possibles des niveaux. A la fin de l'année, on a constaté que l'évolution réelle des niveaux a été très proche de l'enveloppe minimale, car pratiquement aucune pluie n'a été efficace au cours des mois suivant avril 1983.

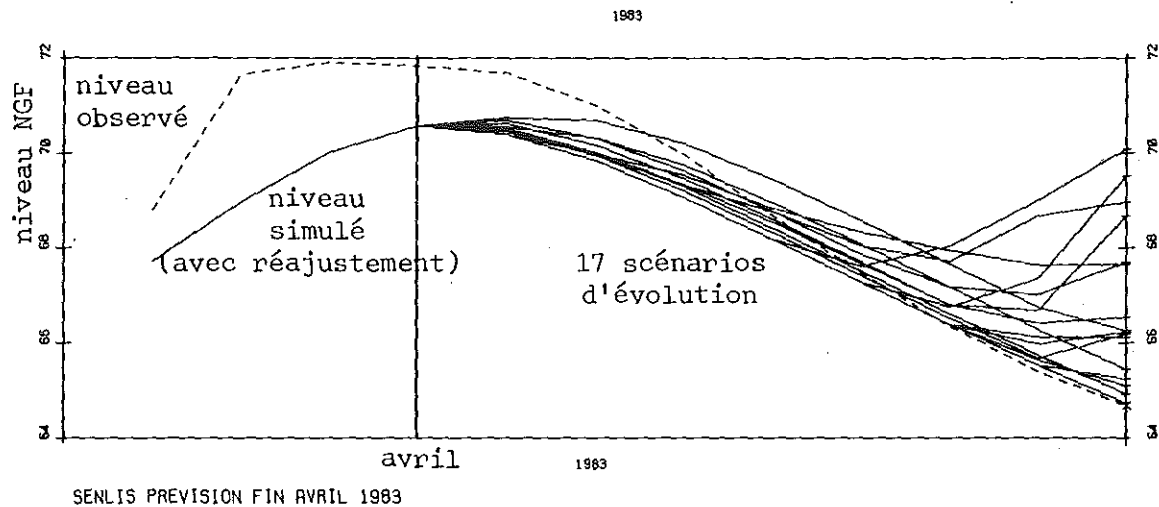


FIG. 8. — Piézomètre Senlis : prévision réelle en avenir incertain, en 1983.

4. - Conclusion

Le modèle global à réservoirs présenté dans cet article permet généralement une simulation correcte de l'évolution du niveau d'un point d'un aquifère libre soumis aux variations d'alimentation par les précipitations. Cependant le calage du modèle ne peut être réalisé de manière fiable que sur une longue période d'observation et on a montré sur un exemple qu'on peut encore obtenir des surprises avec 12 ans de mesures.

Un processus simple de réadaptation du modèle en fonction des écarts observés permet d'améliorer parfois significativement la qualité de prévisions à longue portée. Il faut cependant prendre en compte des scénarios possibles de précipitations à venir pour réaliser des prévisions graduées en probabilité.

Références bibliographiques

- ROCHE P.A. — Filtrage de Kalman sur un modèle hydrologique global. Analyse des incertitudes. BRGM Orléans, SGN/EAU, Note technique n° 81/11, 64 p.
- ROSENBROCK H.H. (1960). — An automatic method for finding the greatest or the least value of a function. *Comput. J.*, **33**, pp. 175-184.
- SHERMAN L.K. (1932). — Streamflow from rainfall by the unit hydrograph method. *Engn News Rec.*, **108**, pp. 501-505.
- THIERY D. (1980). — Simulation de bassins hydrologiques par modèles globaux. Le programme AMANDE. Bur. Rech. Géol. Min. (BRGM, Orléans, Rapp. Inter. 80 SGN 192 HYD, mars 1980.
- THIERY D. (1983). — Description du modèle CREACHIM. BRGM Orléans, SGN/EAU Note technique interne n° 83/15, 53 p.
- THIERY D., CAOUS J.Y. (1979). — Application d'un modèle conceptuel de prévision d'étiages à la nappe de la craie en Picardie. Bur. Rech. géol. minières (BRGM), Orléans, rapp. inter. 79 SGN PIC, octobre 1979.
- TURC L. (1961). — Evaluation des besoins en eau d'irrigation. Evapotranspiration potentielle. *Ann. Agronomique*, 1961-12.

Partie 2

Application à la gestion et au dimensionnement des ouvrages d'exploitation

par

Pierre-Alain Roche*

Résumé

Une approche statistique est souvent nécessaire lorsqu'il s'agit d'évaluer les possibilités d'exploitation d'un aquifère : les apports en eau sont soumis aux aléas climatiques, et les prélèvements sont réalisés pour satisfaire des demandes qui sont elles-mêmes variables dans le temps, et souvent liées aux variables climatiques. Les études hydrogéologiques s'attachent généralement à l'analyse du fonctionnement hydraulique du système aquifère, mais on se limite souvent à quelques simulations des exploitations envisagées sur des chroniques particulières.

En utilisant un modèle global prenant en compte des influences multiples du type décrit en partie 1, il est possible de générer de

nombreux scénarios sur lesquels on simule différentes exploitations. L'effet de ces exploitations à long terme est résumé par les modifications qui sont introduites dans les statistiques de niveaux piézométriques. On définit ainsi les statistiques de volumes productibles pour une demande donnée.

On présente les simplifications qui ont été introduites pour rendre ces calculs accessibles sur le plan numérique (réduction de la dimension du système), et une application sur un cas réel où l'on discute le dimensionnement d'une exploitation pour des besoins permanents ou intermittents.

* CERGRENE, La Palatine, 17, avenue Choisy, Paris, France.