



BRGM

Département de la Sarthe

Modélisation hydrodynamique en régime permanent
des aquifères cénomaniens et turoniens
de la partie sud du département de la Sarthe

par
Ph. CARLIER et Th. COLLET

R 34257 PAL 4S 92

Mars 1992

BRGM
Agence PAYS-DE-LA-LOIRE
10, rue Henri Picherit
44071 NANTES CEDEX 03
Tél. : 40 37 15 15
Fax. : 40 74 82 12

Département de la Sarthe
Direction Départementale de
l'Agriculture et de la Forêt
BP 501
72017 LE MANS CEDEX

R E S U M E

Dans le Sud du département de la Sarthe, sur un secteur recouvrant totalement ou partiellement les cantons d'ECOMMOY, LA FLECHE, LE LUDE, LA SUZE, MALICORNE, MAYET ET PONTVALLAIN, les eaux souterraines sont exploitées dans les aquifères du Turonien et du Cénomaniens, tant pour l'alimentation en eau potable que pour l'irrigation.

Cette exploitation devant se développer à l'avenir, il est apparu nécessaire de définir, pour optimiser leur gestion, les potentialités de ces aquifères au moyen d'une modélisation.

Le rapport a pour objet de présenter :

- le modèle hydrologique simulant les infiltrations sur un bassin versant sélectionné (bassin versant de l'AUNE),
- le calage du modèle hydrodynamique en régime permanent,
- les hypothèses retenues pour le calage du modèle,
- en régime permanent, l'état de l'aquifère pour différents scénarios de production.

La modélisation hydrogéologique de l'aquifère bicouche, craie du Turonien et sables du Cénomaniens, a permis une première approche du fonctionnement de ces nappes d'eau souterraine en régime permanent.

Ce modèle permet de préciser les caractéristiques hydrogéologiques de ces aquifères, de définir les relations existantes entre les nappes du Turonien et du Cénomaniens, et de reconstituer à partir d'une série d'hypothèses l'état piézométrique moyen de la nappe.

En raison du manque de données nécessaires il n'a pas été possible de réaliser le calage du modèle en régime transitoire ; en contrepartie une modélisation en bicouche a été obtenue, c'est-à-dire en intégrant dans la modélisation, l'aquifère du Turonien. Ce choix s'est avéré judicieux, puisque les résultats montrent que les échanges entre les aquifères cénomaniens et turoniens ne sont pas négligeables et que l'évaluation du potentiel doit en tenir compte.

Les travaux de reconnaissance en cours ou à prévoir dans la zone étudiée permettront d'acquérir des données supplémentaires indispensables pour réaliser les simulations d'exploitation sur le modèle calé en régime transitoire.

Les travaux objets du présent rapport ont été financés par le Département de la Sarthe avec la participation de fonds du Service Public.

S O M M A I R E

	page
RESUME	
1 - INTRODUCTION - OBJECTIFS	1
2 - GEOLOGIE DES AQUIFERES	2
2.1 - Le Cénomanién	2
2.2 - Le Turonien	2
3 - METHODOLOGIE ET OUTILS DE CALCUL	3
3.1 - La méthodologie	3
3.2 - Les outils de calcul	3
4 - LA REALIMENTATION DE LA NAPPE : LE MODELE GARDENIA ..	3
4.1 - L'outil de calcul	3
4.2 - Les données d'entrée	4
4.3 - Le calage du modèle : les hypothèses	6
4.4 - Les résultats	10
5 - L'ECOULEMENT DE L'AQUIFERE : LE MODELE MARTHE	10
5.1 - Le maillage	10
5.2 - Les paramètres hydrodynamiques	18
5.3 - La piézométrie de référence	18
5.4 - L'alimentation des aquifères	18
5.5 - Les conditions aux limites	22
5.6 - Le substratum et l'épaisseur des aquifères ...	22
5.7 - Les prélèvements	22
5.8 - La procédure de calage du modèle	24
6 - RESULTATS DU CALAGE EN REGIME PERMANENT	25
6.1 - La distribution des perméabilités	25
6.2 - La surface piézométrique	28
6.3 - Les débits d'entrée et de sortie des aquifères	28
7 - CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	32
ANNEXE	

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Comparaison des données climatiques des stations utilisées

Tableau 2 - Pluies à MANSIGNE de 1971 à 1989 (en mm)

Tableau 3 - E.T.P. à LA FLECHE de 1971 à 1989 (en mm)

Tableau 4 - Recharges calculées de 1971 à 1989 - Bassin de l'AUNE
(en mm)

Tableau 5 - Les prélèvements connus au début du calage

Tableau 6 - Bilan annuel des débits (m³/h)

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 - Plan de situation
- Figure 2 - Comparaison de la pluie et de l'ETP
Comparaison de l'ETR et de l'ETP
- Figure 3 - Station de l'AUNE
Comparaison débits observés/débits simulés
- Figure 4 - Comparaison pluviométrie - recharge à la nappe
- Figure 5 - Evolution de la réserve superficielle ou du déficit maximal du sol
- Figure 6 - Comparaison de la pluie efficace (ruissellement + infiltration) dans la nappe avec la pluie totale
- Figure 7.1 - Maillage de l'aquifère - Turonien - Couche 1
- Figure 7.2 - Maillage de l'aquifère - Cénomanién - Couche 2
- Figure 8.1 - Piézométrie de référence de l'aquifère turonien (juillet 1990)
- Figure 8.2 - Piézométrie de référence de l'aquifère cénomanién (juillet 1990)
- Figure 9 - Flux d'échanges verticaux entre le Turonien (couche 1) et le Cénomanién (couche 2)
- Figure 10 - Répartition des hauteurs d'infiltration
- Figure 11.1 - Perméabilités du Turonien
- Figure 11.2 - Perméabilités du Cénomanién
- Figure 12 - Perméabilités de l'éponte
- Figure 13.1 - Turonien - Comparaison des charges mesurées et simulées après calage en régime permanent
- Figure 13.2 - Cénomanién - Comparaison des charges mesurées et simulées après calage en régime permanent
- Figure 14 - Débit de l'AUNE - Comparaison débit observé - Débit issu du calage en régime permanent
- Figure 15 - Zones préférentielles pour un suivi piézométrique sur ouvrages existants ou à réaliser

I - INTRODUCTION - OBJECTIFS

Dans le Sud du département de la Sarthe, sur un secteur recouvrant totalement ou partiellement les cantons d'ECOMMOY, LA FLECHE, LE LUDE, LA SUZE, MALICORNE, MAYET et PONTVALLAIN, les eaux souterraines sont exploitées dans les aquifères du Turonien et du Cénomaniens tant pour l'alimentation en eau potable que pour l'irrigation.

Cette exploitation devant se développer à l'avenir, il est apparu nécessaire de définir, pour optimiser leur gestion, les potentialités de ces aquifères au moyen d'une modélisation.

Le programme a donc pour objectifs :

- d'étudier l'état actuel des aquifères, en faisant le point des connaissances acquises,
- de reconstituer par une simulation numérique l'état moyen de l'aquifère,
- de tester le fonctionnement des nappes et leurs limites d'exploitation dans différents scénarios de pluviométrie et de production.

Le rapport a pour objet de présenter :

- le modèle hydrologique simulant les infiltrations sur un bassin versant sélectionné (bassin versant de l'AUNE),
- le calage du modèle hydrodynamique en régime permanent,
- les hypothèses retenues pour le calage du modèle,
- en régime permanent, l'état de l'aquifère pour différents scénarios de production.

En raison du manque des données nécessaires il n'a pas été possible de réaliser le calage du modèle en régime transitoire ; en contrepartie une modélisation en bicouche a été obtenue, c'est à dire en intégrant dans la modélisation, l'aquifère du Turonien. Ce choix s'est avéré judicieux, puisque les résultats obtenus montrent que les échanges entre les aquifères Cénomaniens et Turoniens ne sont pas négligeables et que l'évaluation du potentiel doit en tenir compte.

2 - GEOLOGIE DES AQUIFERES

Les ensembles géologiques étudiés sont les suivants de bas en haut :

2.1 - Le Cénomanién

Il est constitué de bas en haut par :

- Cénomanién inférieur

Argiles d'Ecommoy, sables graviers et grès ferrugineux (10 à 30 m)

- Cénomanién inférieur à moyen

Sables du Maine à intercalation argileuses (25 à 30 m en moyenne)
Les sables (hors niveaux argileux) ont une épaisseur moyenne de 30 m

- Cénomanién supérieur

- . marnes et sables à huitres (5 à 25 m)
- . sables de Bousse à passées argileuses (5 à 25 m)

2.2 - Le Turonien

Il est constitué de bas en haut par :

- Turonien inférieur :

Marnes blanches et tuffeau blanc à silex (10 à 12 m)
. craie marneuse grise
. tuffeau blanc

- Turonien moyen

Craie tuffeau jaune avec lits de silex (20 m)

La séparation entre ces deux ensembles aquifères est faite par les marnes à huitres au sommet du Cénomanién.

3 - METHODOLOGIE ET OUTILS DE CALCUL

3.1 - La méthodologie

La modélisation a intégré à la fois le comportement hydrodynamique des nappes d'eau souterraines et la réalimentation due à l'infiltration à partir des précipitations.

Deux outils de modélisation ont été utilisés, l'un pour la modélisation des apports par les pluies, qui permet de simuler la recharge des aquifères dans différentes conditions de pluviométrie ; l'autre pour simuler le comportement de l'aquifère en reconstituant son état piézométrique.

3.2 - Les outils de calcul

Pour le calcul des apports à la nappe nous avons utilisé le logiciel "Gardenia" du BRGM décrit au paragraphe 4.1.

Pour les calculs hydrodynamiques le modèle "Marthe" permet des simulations d'un aquifère multicouche ; c'est un modèle hydrodynamique tridimensionnel aux différences finies pour les calculs en régime permanent ou transitoire dans les milieux poreux. Le maillage est constitué de rectangles de dimensions variables, avec éventuellement des liaisons étanches. Il permet de calculer les écoulements bidimensionnels plans dans les aquifères en nappe libre ou captive avec débordement éventuel.

Les conditions aux limites peuvent être : un potentiel imposé (niveau d'un cours d'eau...), une limite étanche, une cote de débordement.

Le logiciel Marthe calcule les charges en tout point des maillages ce qui permet le dessin de courbes équipotentiellles. Les vitesses d'écoulement peuvent être calculées dans chaque maille et peuvent être visualisées par le tracé des lignes de courant.

4 - LA REALIMENTATION DE LA NAPPE : LE MODELE "GARDENIA"

4.1 - L'outil de calcul

Le calcul des apports à la nappe a été effectué par le logiciel "GARDENIA" du BRGM qui analyse la fonction de transfert entre les pluies, en entrée, et les ruissellements et les infiltrations, en sortie, à un pas de temps donné (journalier à mensuel). Le "calage" du modèle se fait sur une chronique de niveaux observés dans la nappe ou sur une chronique de débits mesurés à l'exutoire du bassin hydrologique modélisé. Il permet de définir une loi de répartition entre ruissellement et infiltration.

Le modèle "GARDENIA" après calage peut être utilisé pour simuler des infiltrations vers la nappe à partir d'une série quelconque d'années de pluviométries connues et de reproduire les variations interannuelles de la piézométrie en fonction des variations climatologiques.

4.2 - Les données d'entrée

Pour ajuster le modèle il faut disposer de séries continues de pluie, d'évapotranspiration potentielle (ETP) calculée à partir d'une série continue d'insolation et de température de l'air ainsi que d'une série (pas forcément continue) de débits à l'exutoire du bassin hydrologique.

Les stations de mesures (pluviométrie, évapotranspirations, débits) sont localisées sur la figure 1.

4.2.1 - La pluviométrie

Les données utilisées pour la modélisation sont fournies par une série décadaire continue de 1971 à 1989 à la station de Mansigné située à l'intérieur du bassin versant de la rivière Aune.

Les valeurs manquantes de la station de Mansigné ont été complétées par celles de la station d'Ecommoy située à 12 km au nord-est dans le même bassin versant. La comparaison des données statistiques brutes sur les 3 stations utilisées pour cette étude montre qu'elles sont proches (tableau 1).

Tableau 1 - Comparaison des données climatiques des stations utilisées



NOM DE LA STATION	PRECIPITATIONS			ETP	Recharge Bassin de l'Aune
	La Flèche	Ecommoy	Mansigné	La Flèche	
Période	1961-1989	1961-1989	1961-1989	1971-1989	1971-1989
Moyenne annuelle (mm)	693	685	678	747	146
Ecart-type	88	98	83	59	41
Années complètes	26/29	25/29	22/29	19/19	19/19




La méthode des doubles cumuls montre une corrélation de 0,88 entre les stations pour les valeurs de pluviométrie.

R 34 257
PAL 4S 92

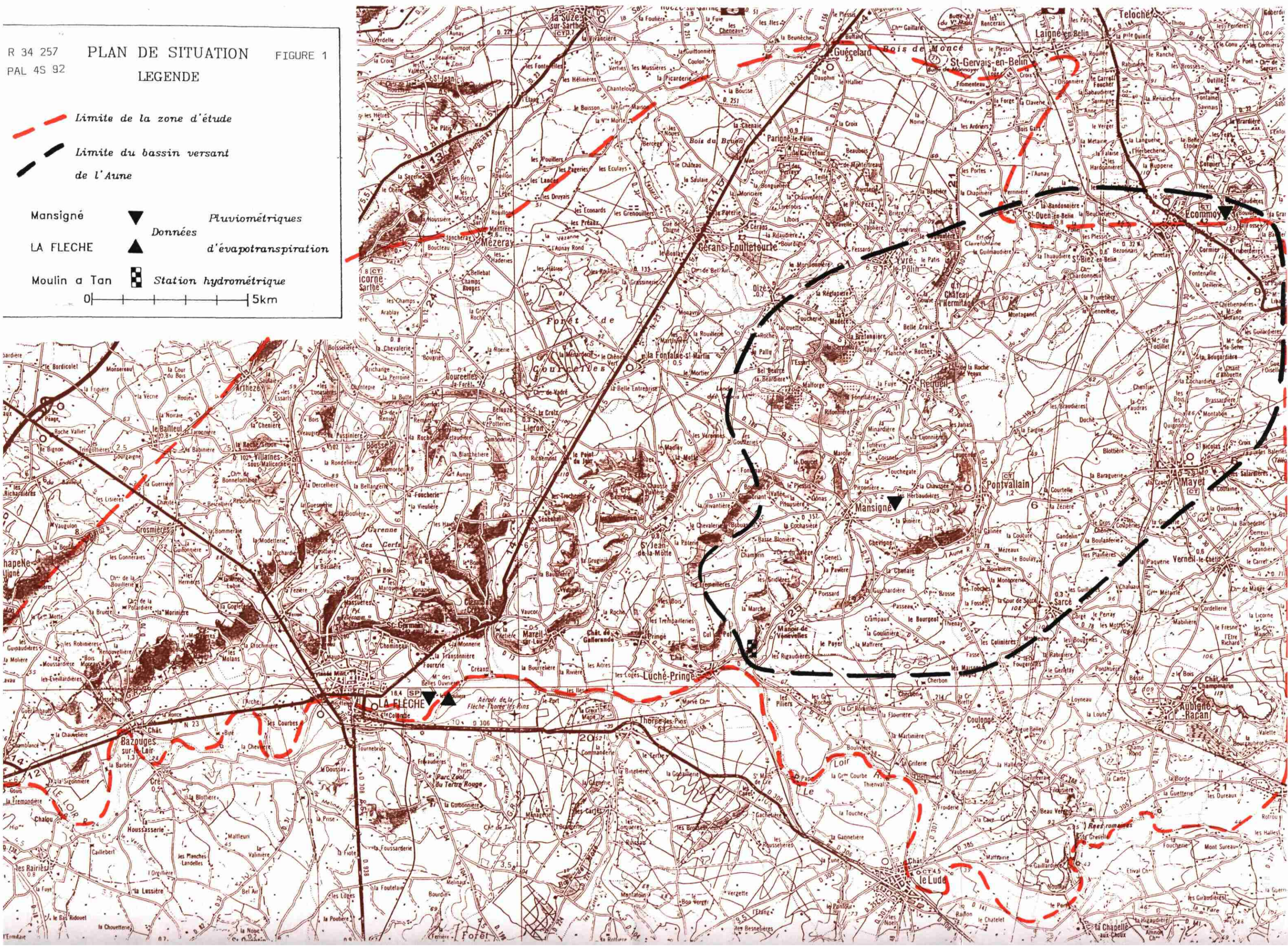
PLAN DE SITUATION LEGENDE

FIGURE 1

-  Limite de la zone d'étude
-  Limite du bassin versant de l'Aune

- Mansigné  Pluviométriques
- LA FLECHE  Données d'évapotranspiration
- Moulin à Tan  Station hydrométrique

0 |-----| 5km



Le tableau n° 2 présente la pluie mensuelle à la station de Mansigné de 1971 à 1989.

4.2.2 - L'évapotranspiration potentielle (ETP)

La station la plus proche du bassin-versant de l'Aune possédant des mesures de l'insolation et de la température est celle de la Flèche. Une série décadaire continue de l'ETP correspondant à la même période que la pluie (1971-1989) a été utilisée pour la modélisation.

Le tableau n° 3 présente l'ETP mensuelle à la station de la Flèche de 1971 à 1989. Les figures 2 (2.1 et 2.2) permettent de comparer la pluie et les évapotranspirations potentielles (ETP) et réelles (ETR).

4.2.3 - Les débits

La station hydrométrique de Moulin a Tan est située à l'aval du bassin de l'Aune près de Luché-Pringé, elle contrôle une superficie de 224 km². Nous disposons d'une série continue de mesures journalières de 1971 à 1989, correspondant à la série des pluies et des ETP. L'influence des crues du Loir perturbe le fonctionnement de cette station et rend le calage plus difficile.

4.3 - Le calage du modèle : les hypothèses

Le comportement d'un système aquifère peut être schématiquement représenté par un ensemble de réservoirs se vidant les uns dans les autres : sol, zone non saturée, zone saturée.

Des fonctions de transferts non linéaires sont introduites pour corriger cette approximation simplifiée.

Le modèle réalise un bilan entre les apports (précipitations) et les sorties (écoulements et évapotranspiration) pour chacun des pas de calcul. Le calcul comporte deux parties appelées fonction "production" et fonction "transfert". La fonction "production" détermine la quantité d'eau apportée au modèle et la quantité d'eau évaporée ou infiltrée. La fonction "transfert" a pour objet de calculer à quel moment l'eau qui n'a pas été évapotranspirée ressortira à l'exutoire du bassin (ruissellement) ou arrivera à la nappe (recharge).

Les années prises en compte avant les premières observations hydrologiques permettent la mise en régime du système, les conditions d'une année donnée n'étant pas indépendante des conditions précédentes. Les calculs sont effectués à partir des pluies, ETP et débits au pas de temps décadaire. Les valeurs optimales des paramètres globaux non mesurés sur le bassin sont déterminées par un processus itératif à partir de valeurs initiales par recherche du meilleur ajustement entre observations et valeurs de sorties calculées par le modèle.

TABLEAU 2

PLUIES A MANSIGNE 1971 à 1989 (en mm)

R 34 257
PAL 4S 92

ANNEE	JANV	FEVR	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCTO	NOVE	DECE	TOTAL
1971	7.5	69.9	57.5	28.5	69.2	79.1	45.3	34.8	82.3	125.2	77.2	23.7	700.2
1972	61.0	70.2	42.8	53.9	92.0	39.8	87.6	76.2	48.7	13.7	31.7	16.3	633.9
1973	7.4	59.5	30.0	31.7	40.7	44.8	135.4	51.2	56.8	63.2	55.8	38.8	615.3
1974	69.6	30.3	69.4	61.3	57.0	12.2	23.4	89.3	46.2	88.8	70.7	65.5	683.7
1975	53.4	117.9	74.8	40.0	70.7	46.5	86.6	73.5	57.3	22.4	79.9	36.8	759.8
1976	25.1	12.4	30.6	83.2	54.2	11.7	58.9	64.1	20.5	1.0	34.6	50.6	446.9
1977	68.6	73.6	35.4	95.9	110.1	57.3	38.5	30.8	76.2	57.0	36.7	46.6	726.7
1978	43.9	70.0	24.6	44.5	101.6	56.5	1.2	45.6	129.2	40.3	15.6	65.2	638.2
1979	140.1	107.2	34.0	98.7	64.5	39.2	17.1	91.5	68.0	78.7	44.3	88.9	872.2
1980	93.9	35.9	41.2	38.3	42.6	86.8	51.3	143.2	113.3	88.0	11.9	45.3	791.7
1981	74.8	82.1	50.3	64.4	43.9	31.1	12.8	101.0	65.5	70.4	56.3	105.4	758.0
1982	82.8	30.9	24.2	81.4	43.0	57.4	47.6	128.4	19.7	35.4	84.0	52.1	686.9
1983	31.3	141.7	92.2	17.8	20.3	81.7	57.1	38.8	95.5	74.3	54.2	53.8	758.7
1984	46.0	94.2	74.5	76.5	36.6	42.8	37.5	97.7	127.5	46.3	100.4	76.6	856.6
1985	40.5	105.4	34.8	72.8	46.8	47.6	22.0	6.3	58.1	20.8	39.1	33.1	527.3
1986	73.8	23.4	22.9	28.3	43.0	41.2	47.3	81.2	136.6	37.0	43.4	87.0	665.1
1987	25.5	41.0	37.8	82.7	23.3	118.0	95.3	127.9	50.4	14.3	48.4	39.7	704.3
1988	141.2	23.1	81.8	55.1	84.6	69.4	19.5	26.1	82.4	49.1	33.3	56.6	722.2
1989	63.7	54.5	44.1	40.6	63.0	40.4	6.8	85.8	51.6	60.1	20.8	58.7	590.1

691

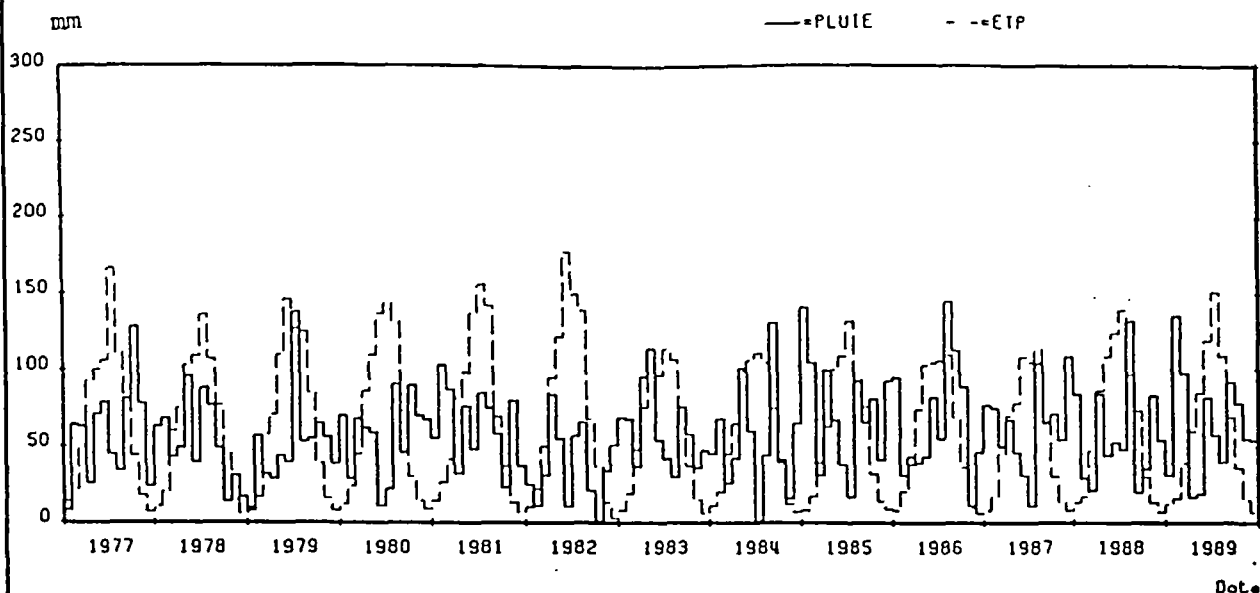
Moyenne

FIGURE 2

R 34 257
PAL 4S 92

COMPARAISON DE LA PLUIE ET DE L'ETP
COMPARAISON DE L'EVAPOTRANSPIRATION
REELLE (ETR) ET POTENTIELLE (ETP)

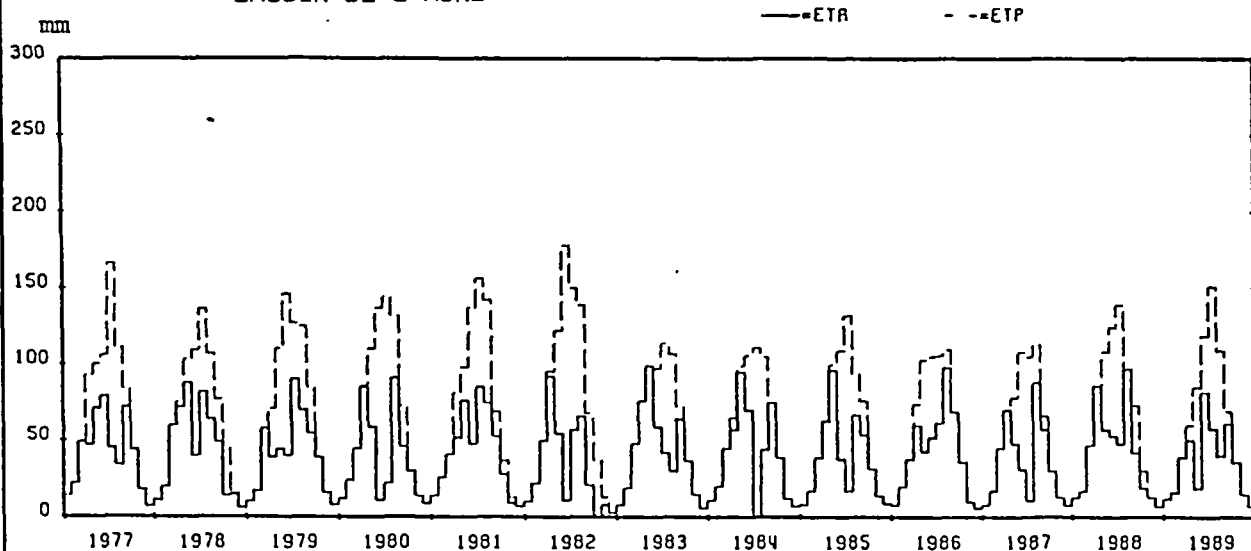
BASSIN DE L'AUNE



Dot.

1) Comparaison de la pluie et de l'ETP

BASSIN DE L'AUNE



Dot.

2) Comparaison de l'Evapotranspiration réelle (ETR) et potentielle (ETP)

4.4 - Résultats

Le calage est difficile à réaliser en raison, vraisemblablement, du fait que les mesures de débit sont influencées par les crues du Loir et par des prélèvements en amont de la station.

Les années 1971 à 1976 servent à la mise en régime du système (années de démarrage), les années 1978 à 1985 sont assez bien représentatives à l'exception des crues et des étiages les plus prononcés (Figure 3).

La recharge de la nappe, représentant son alimentation par les pluies, est calculée au pas de temps décadaire en sortie du modèle. Les précipitations moyennes pour la période 1971-1989 sont de 691 mm à Mansigné et la recharge moyenne calculée de 146 mm, soit 21 % d'infiltration à la nappe par rapport à la pluie totale.

Le pourcentage d'infiltration diminue lors des années déficitaires en pluie : 10 % en 1973 soit 62 mm pour des précipitations de 615 mm (si les précipitations sont trop faibles la reconstitution de la réserve superficielle du sol utilise une part importante de la hauteur d'eau tombée). A l'inverse une année excédentaire en pluie accroît l'importance de la recharge : 25 % en 1979 soit 214 mm pour 872 mm de pluie.

La figure n° 4 et le tableau n° 4 présentent les recharges calculées en somme mensuelle (le pas de calcul est décadaire) pour la période 1971 à 1989.

Ces valeurs correspondent à une moyenne sur le bassin de l'Aune mais ne peuvent être extrapolées à l'ensemble de la zone d'étude sans précaution.

Les figures n° 5 et 6 montrent la part de la réserve superficielle du sol et la répartition entre la pluie et la pluie efficace (ruissellement + recharge de la nappe).

5 - L'ÉCOULEMENT DE L'AQUIFÈRE : LE MODÈLE "MARTHE"

5.1 - Le maillage

Le milieu aquifère a été discrétisé suivant un réseau de mailles carrées régulières de 1000 m de côté orientées dans l'axe des coordonnées Lambert.

Les figures 7.1 et 7.2 montrent l'implantation des mailles réparties en deux couches superposées, pour chacune des deux formations : la craie turonienne pour la couche 1 et les sables cénomaniens pour la couche 2.

La couche 1 comporte 451 mailles et la couche 2 745 mailles.

FIGURE 3

R 34 257
PAL 4S 92

STATION DE L'AUNE
COMPARAISON DEBITS OBSERVES/DEBITS SIMULES

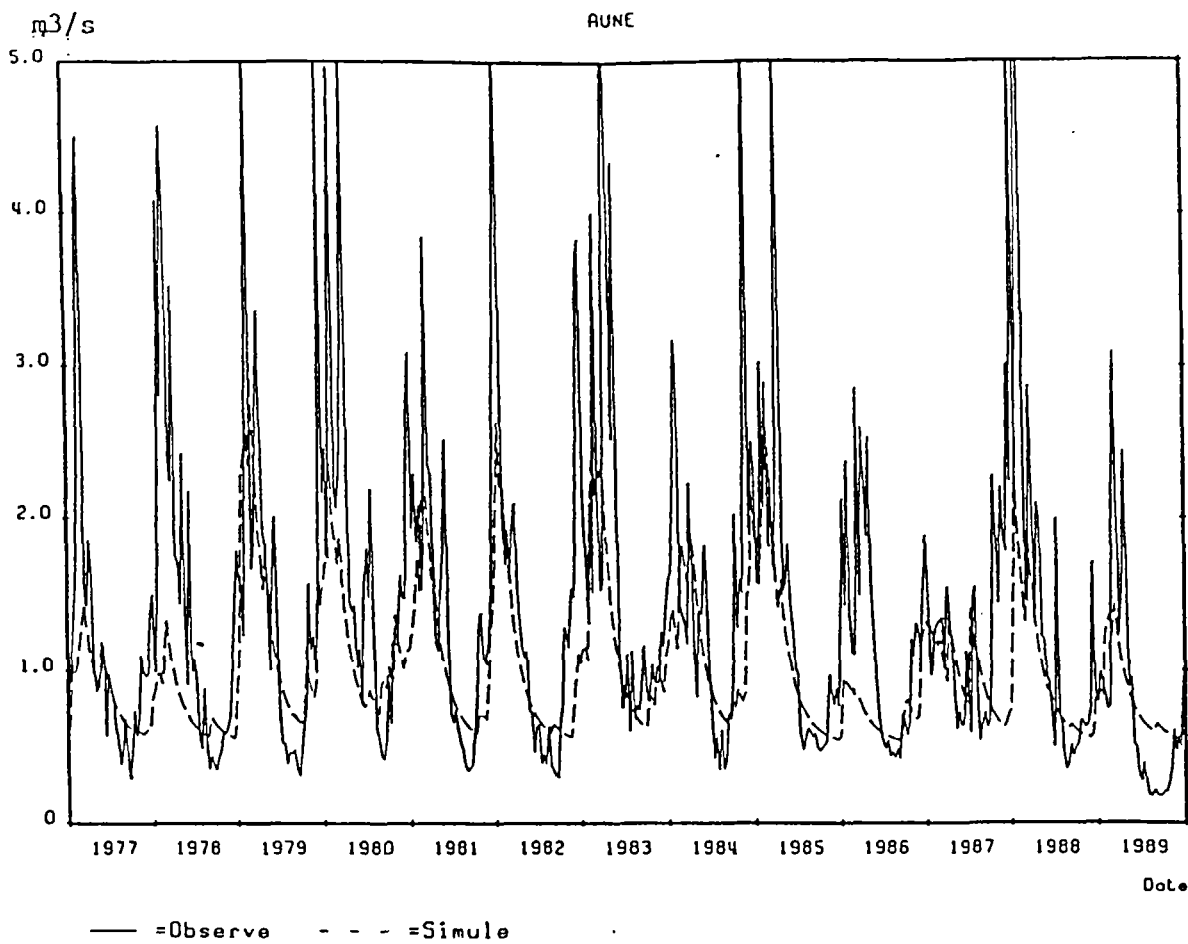


FIGURE 4

COMPARAISON PLUVIOMETRIE
RECHARGE A LA NAPPE

R 34 257
PAL 4S 92

BASSIN DE L'AUNE

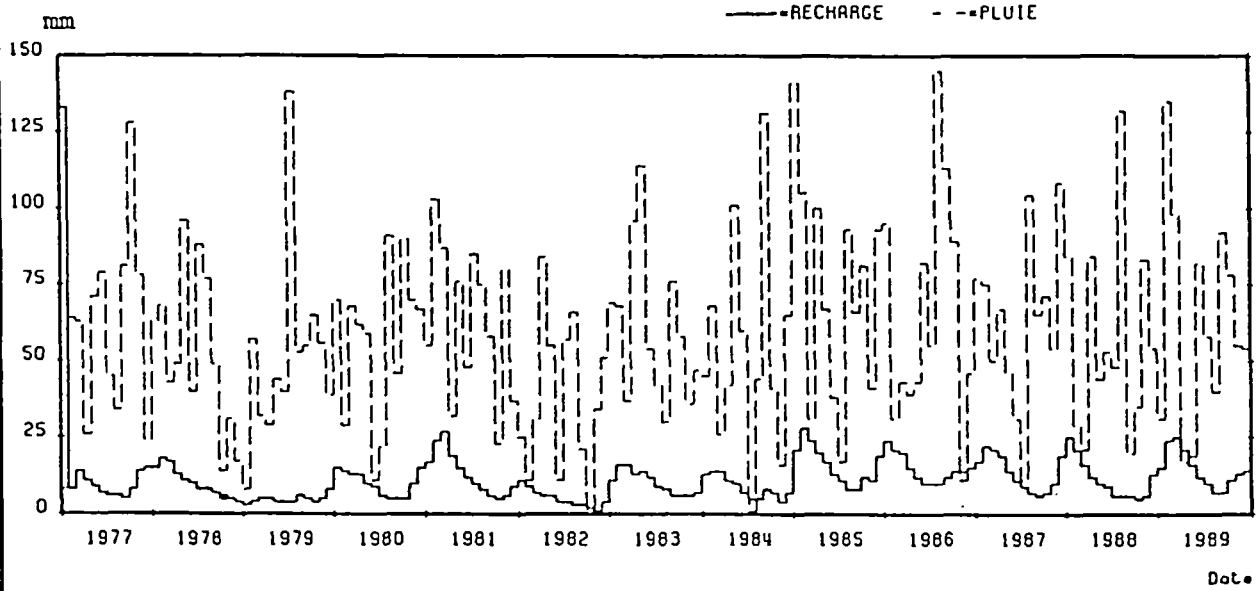


FIGURE 5

EVOLUTION DE LA RESERVE SUPERFICIELLE
OU DU DEFICIT MAXIMAL DU SOL

R 34 257
PAL 4S 92

BASSIN DE L'AUNE

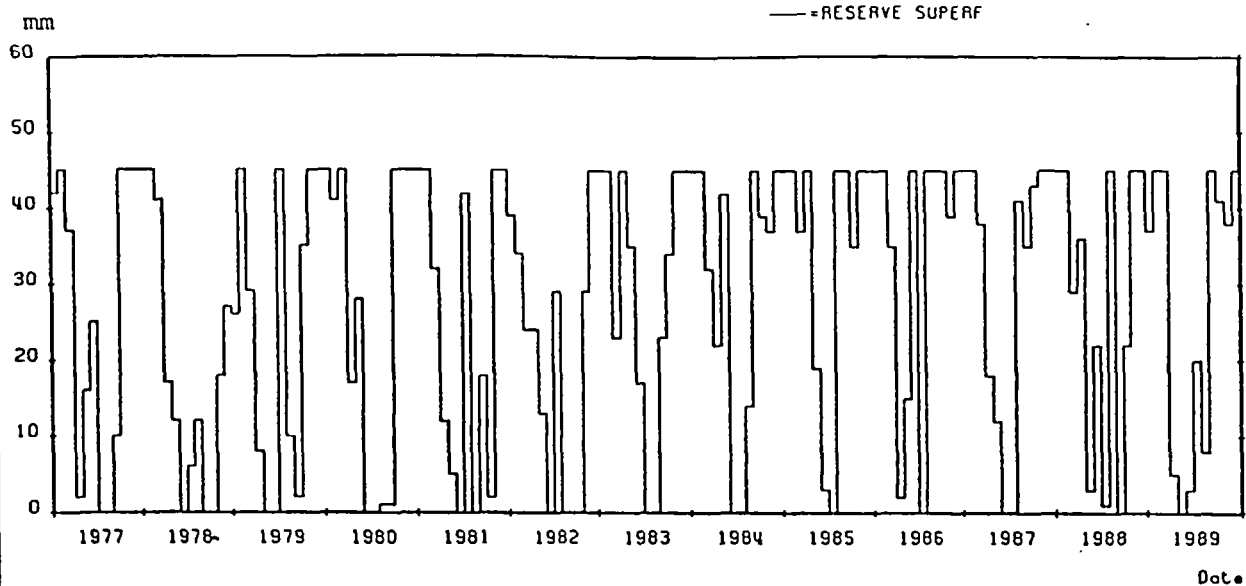
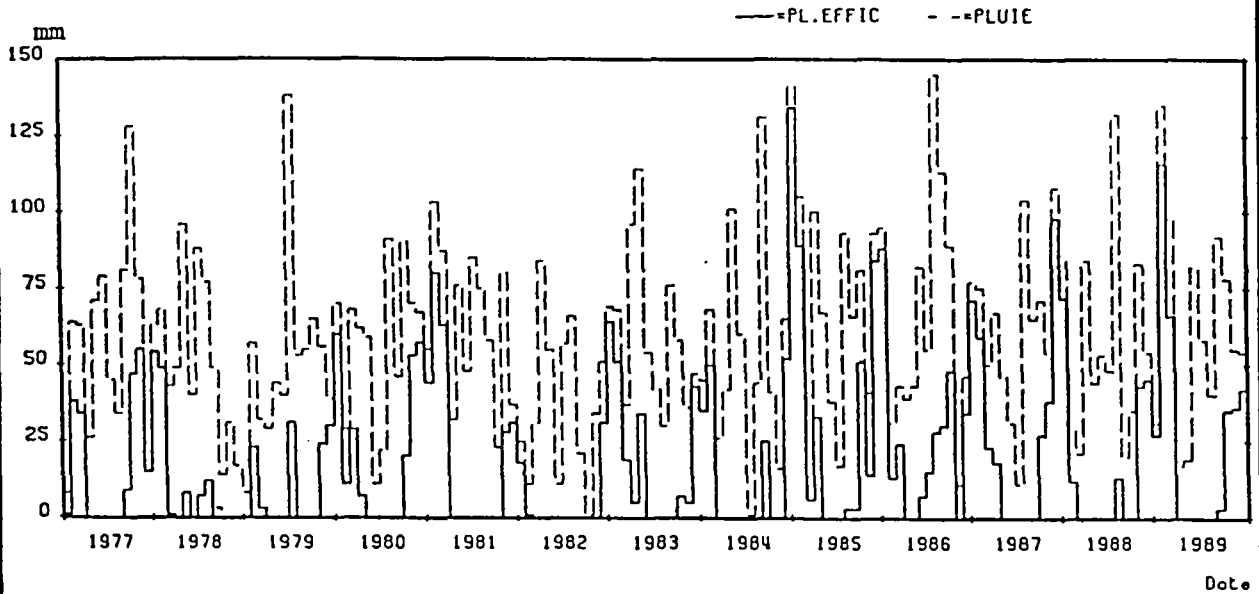


FIGURE 6

COMPARAISON DE LA PLUIE EFFICACE
(RUISSELLEMENT+INFILTRATION DANS LA NAPPE)
AVEC LA PLUIE TOTALE

R 34 257
PAL 4S 92

BASSIN DE L'AUNE



5.2 - Les paramètres hydrodynamiques

Au moment de la réalisation du modèle, très peu de mesures issues de pompages d'essai étaient disponibles. On ne disposait donc pas de références pour le calage des paramètres hydrodynamiques : transmissivité, et coefficient d'emmagasinement.

Il a été affiché des valeurs vraisemblables compte tenu des caractéristiques lithologiques des formations.

5.3 - La piézométrie de référence

Un état piézométrique de basses eaux a permis d'obtenir une représentation approchée de la surface de la nappe (voir figures 8.1 et 8.2).

La piézométrie de référence ne peut fournir qu'une vue générale de l'écoulement de la nappe pour les raisons suivantes :

- le secteur étudié couvre 750 km² avec des mailles de 1 km de côté,
- la densité de mesures piézométriques est relativement faible :
 - . Turonien 118 pour 450 km², soit 1 mesure pour 3,8 km²
 - . Cénomaniens 109 pour 750 km², soit 1 mesure pour 6,9 km²
- le découpage des vallées n'est pas pris en compte dans le détail, or les cours d'eau servent de drains aux nappes .

Il est donc nécessaire de pouvoir contrôler le calage avec des mesures synchrones sur l'ensemble du bassin hydrogéologique.

5.4 - L'alimentation des aquifères

La nappe turonienne (couche 1) est alimentée essentiellement par l'infiltration liée à la recharge par la pluie (75 %) par la drainance en provenance de la nappe du Cénomaniens (15%) et par les apports des cours d'eau et de la limite Nord-Est (10% cumulés).

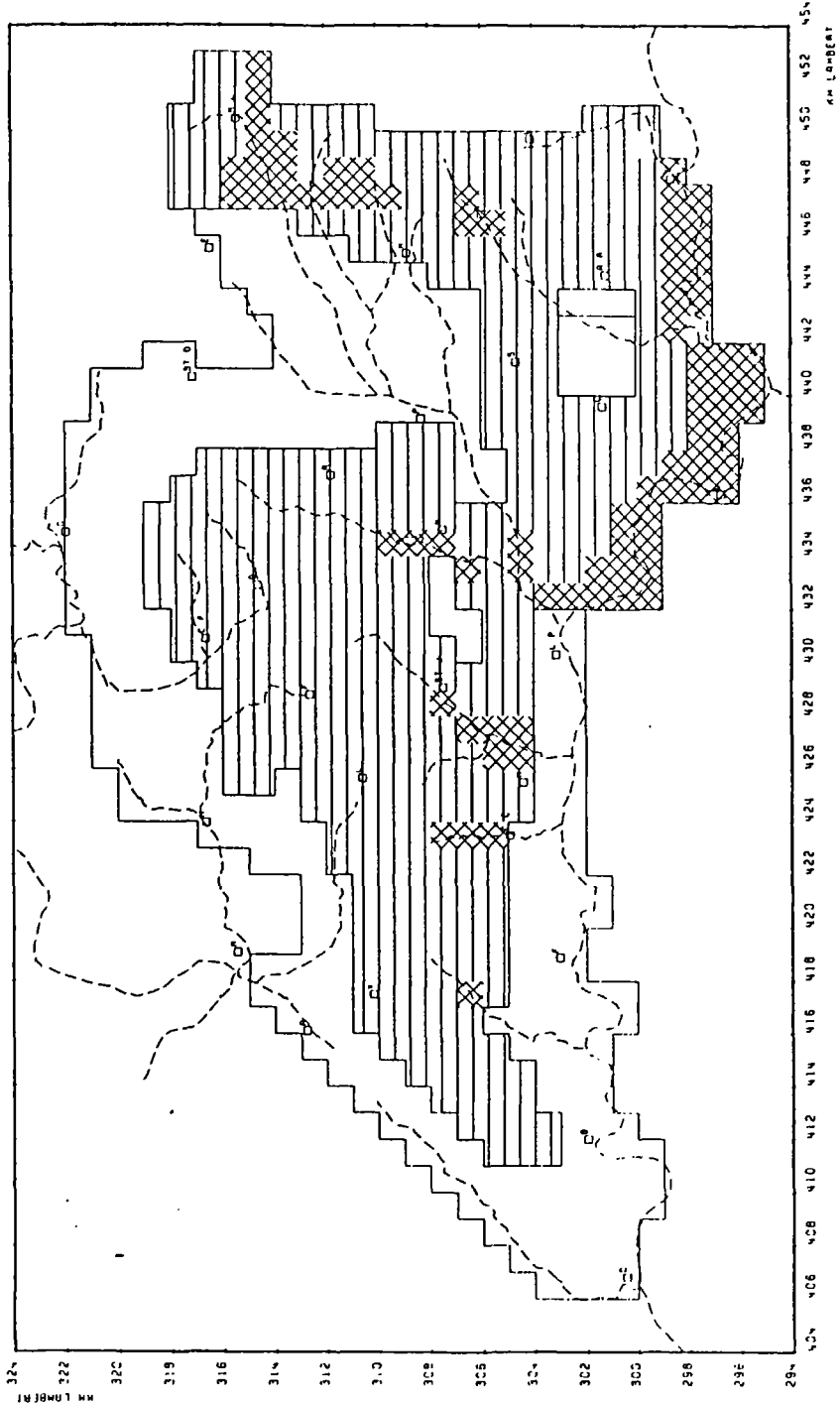
La nappe cénomaniens est alimentée aussi par l'infiltration de la pluie sur la partie non recouverte par la craie turonienne, environ 300 km² recevant 60 % des apports, par la drainance de la nappe du Turonien (35%) et par l'apport des cours d'eau et de la limite Nord-Est (5% cumulés).

Les phénomènes de drainance entre les 2 couches sont présentés sur la figure 9.

FIGURE 9

FLUX D'ECHANGE VERTICAUX ENTRE LE
TURONIEN (COUCHE 1) ET LE CENOMANIEN (COUCHE 2)

R 34 257
PAL 4S 92



- ≡ flux de la couche 1 vers la couche 2
- XXXX flux de la couche 2 vers la couche 1

Le modèle "GARDENIA" (voir paragraphe 4) a permis de calculer approximativement la recharge sur le bassin de l'Aune pour la période 1971 à 1989, soit 29 années. Ces valeurs ont été extrapolées sur les autres bassins de la région étudiée : les caractéristiques hydrologiques et hydrogéologiques des différents bassins versants étant voisines.

Le calage a toutefois nécessité des ajustements de la hauteur d'infiltration de 50 à 150 mm par an.

La figure 10 montre la répartition des zones d'infiltration de la pluie.

5.5 - Les conditions aux limites

Les entrées d'eau dans les aquifères proviennent essentiellement de la recharge par la pluie. Les sorties, sont les ouvrages de captage et le drainage par les cours d'eau principalement vers la Sarthe au Nord et vers le Loir au Sud.

Le pourtour de la région étudiée est représenté par des limites à charges imposées reliées par des segments étanches et une limite à flux imposés à l'Est : de Marigné-Saillé à Savernat (figures 7.1 et 7.2).

5.6 - Le substratum et l'épaisseur des aquifères

Les cotes du substratum imperméable des aquifères ont été estimées à partir des informations fournies par les forages de la région.

La couche 2 (Cénomanién) a une épaisseur moyenne de 50 mètres, elle est recouverte par une épente de 10 m d'épaisseur moyenne la séparant de la couche 1 (Turonien) épaisse de 20 m en moyenne.

L'épaisseur de ces 3 formations varie autour de ces valeurs et diminue généralement vers les bordures.

La couche 1 étant formée d'une nappe libre, la position relative du niveau piézométrique par rapport au substratum correspond à l'épaisseur de la nappe alors que la couche 2 peut être captive lorsqu'elle est recouverte par une épente faiblement perméable, son niveau piézométrique est alors au-dessus du toit de la nappe.

5.7 - Les prélèvements

A partir des données connues au début du calage du modèle et à l'aide de la notice explicative de la feuille Ecommoy de la carte géologique de la France à 1/50 000, les prélèvements suivants ont été retenus.

MODELE 'SARTHE': HAUTEUR D'INFILTRATION.

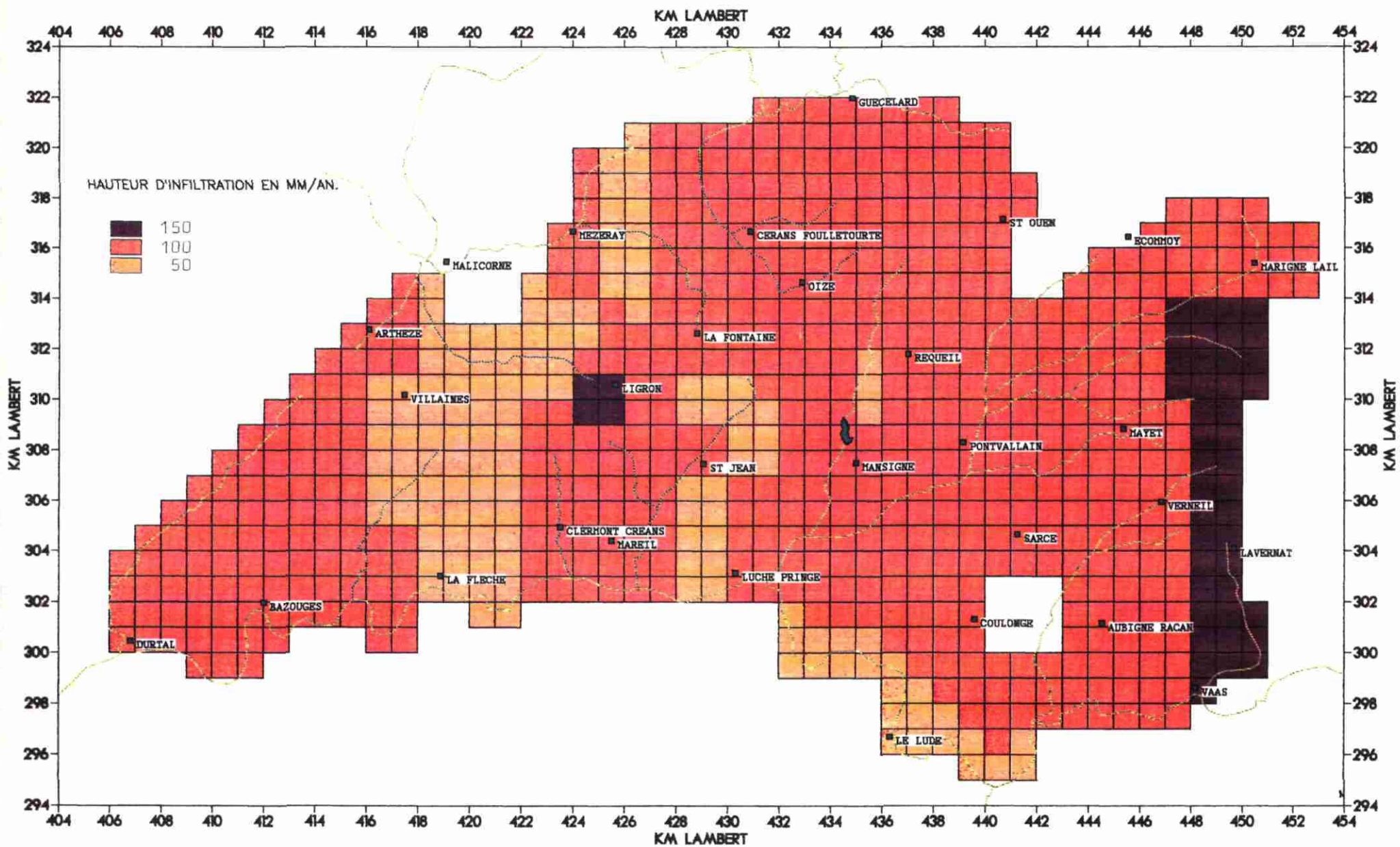


FIGURE 10 REPARTITION DES HAUTEURS D'INFILTRATION R 34 257 PAL 4S 91

TABLEAU 5 - LES PRELEVEMENTS CONNUS AU DEBUT DU CALAGE

COMMUNE	DESIGNATION	DEBIT MOYEN D'EXPLOITATION (m ³ /h)	FORMATIONS AQUIFERES TRAVERSEES	PROFONDEUR (en m)
Cérans-Foullletourte	AEP Collège	8	Turonien (craie)	16,00
Oizé	AEP La Barre	50	" (craie + sable)	23,60
Marigné-Saillé	AEP2 Mayet	31	" (craie)	15,00
Aubigné-Racan	AEP1+	18	" "	6,15
"	AEP3	82	" "	21,80
Mayet	AEP1	54	" "	22,50
		TOTAL = 243		
Cérans-Foullletourte	AEP	31	Cénomannien (sables)	56,10
Ecommoy	AEP2) 20	"	32,50
"	AEP3)	"	14,80
Luché-Pringé	AEP1	46	" + alluvions	45,00
"	AEP3	29	"	62,00
Pontvallain	AEP	37	"	38,00
Mansigné	Puits communal	6	" + Turonien (craie)	46,00
Mayet	Laiterie	96	" + Turonien (craie)	87,10
		TOTAL = 265		

Par manque d'information, à la date du début de réalisation du modèle les données récentes des forages AEP et des forages d'irrigation n'ont pas été prises en compte. Cependant, des renseignements précis concernant l'implantation de ces forages et leur débit d'exploitation ont depuis été recensés par le Service d'Hydrogéologie du Conseil Général de la Sarthe (voir tableau en annexe). Ces données seront intégrées aux futures utilisations du modèle et permettront de réaliser des simulations d'exploitation fiables.

5.8 - La procédure de calage du modèle

Un modèle hydrodynamique calcule la surface piézométrique résultant d'un ensemble d'hypothèses sur :

- la géométrie des réservoirs : extension, cote du toit et du substratum, importance de l'éponte séparant les 2 couches,
- la distribution géographique de la perméabilité K et du coefficient d'emménagement S (seulement en régime transitoire),

- les conditions aux limites : charges imposées, débits imposés, flux nuls,
- les débits de prélèvements (pompage) ou d'alimentation (infiltration),
- le caractère poreux du milieu considéré à l'échelle régionale, les formations pouvant être localement fissurées.

Le procédé de discrétisation suivant la méthode des différences finies permet d'affecter des valeurs des différents paramètres mentionnés ci-dessus, suivant les noeuds d'un maillage carré régulier.

Par approximations successives, on s'efforce d'obtenir des distributions de ces paramètres qui permettent une restitution au mieux de la surface piézométrique observée à une date donnée (d'après les relevés des niveaux d'eau dans les ouvrages existants).

Le choix de ces distributions sont eux-mêmes guidés par les résultats de l'analyse hydrogéologique : essais de pompage et interprétation géologique des données de forage.

Un modèle sert dans un premier temps à vérifier la cohérence des différentes hypothèses adoptées ; une fois celle-ci admise, il devient alors représentatif du comportement hydrodynamique du système aquifère et permet d'effectuer les simulations de scénarios prévisionnels d'exploitation : modèle de gestion et/ou de planification.

Le calage est effectué en deux étapes :

- dans une première étape la distribution de la perméabilité K est ajustée de façon à reproduire en régime permanent une surface piézométrique comparable à celle observée en période d'infiltration moyenne ;
- puis dans une seconde étape, le coefficient d'emménagement S est introduit dans le modèle pour prendre en compte des états transitoires et simuler des pompages et des variations de l'alimentation par la pluie pendant des temps donnés. Ce deuxième calage devra être effectué dans une future mise à jour du modèle, lorsque les données sur les caractéristiques des aquifères seront plus nombreuses.

6 - RESULTATS DU CALAGE EN REGIME PERMANENT

6.1 - La distribution des perméabilités

La distribution des perméabilités K obtenue au droit de chacune des mailles est représentée figure 11.1 pour la couche 1 (Turonien) et figure 11.2 pour la couche 2 (Cénomaniens).

MODELE 'SARTHE': PERMEABILITES DU TURONIEN.

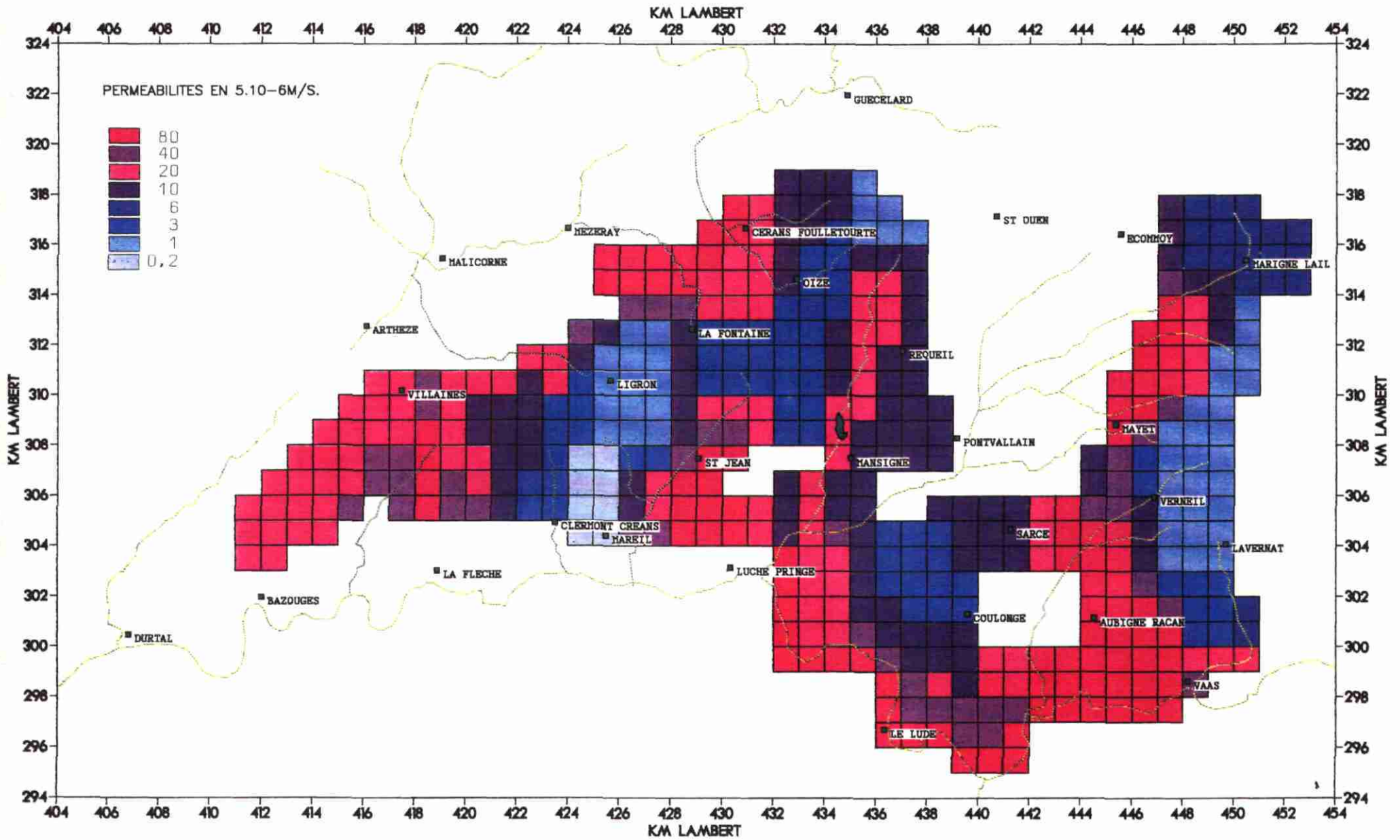


FIGURE 11.1 PERMEABILITES DU TURONIEN

MODELE 'SARTHE': PERMEABILITES DU CENOMANIEN.

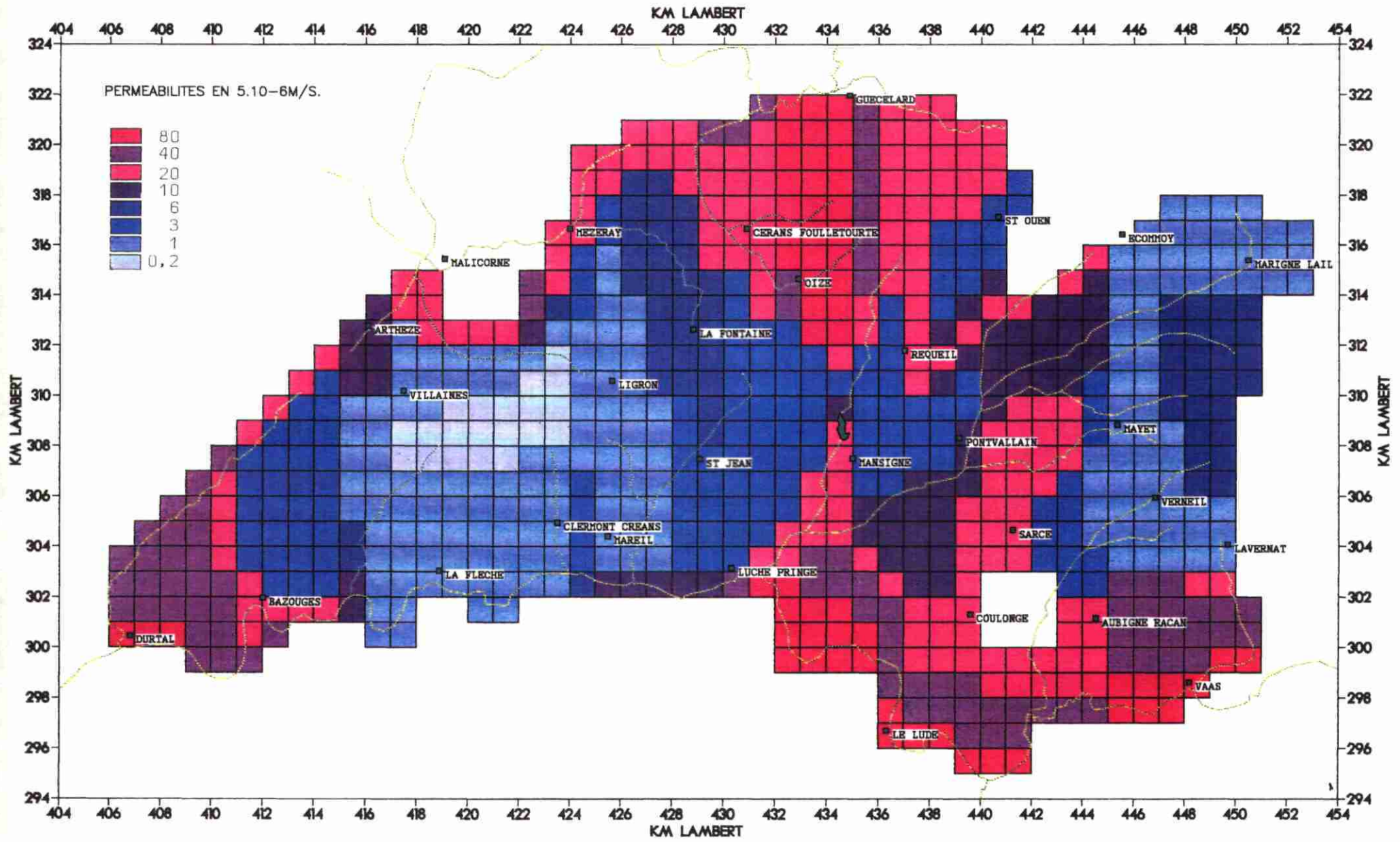


FIGURE 11.2 PERMEABILITES DU CENOMANIEN

Pour rendre compte de la surface piézométrique de la nappe, les valeurs de perméabilité doivent être fortement contrastées :

- de 4.10^{-4} à 6.10^{-6} m/s, soit un rapport de 700 à 1 pour la couche 1
- de 4.10^{-4} à 5.10^{-7} m/s soit un rapport de 800 à 1 pour la couche 2

Ceci est la conséquence de la grande hétérogénéité des aquifères et en particulier du Cénomaniens. Ce dernier est constitué d'alternances de sables et d'argiles dont les épaisseurs relatives peuvent varier fortement dans l'espace.

Les valeurs de la perméabilité verticale de l'épente séparant la couche 1 de la couche 2 varient de 10^{-7} à 10^{-10} m/s (voir figure 12).

La réalisation de pompages d'essai permettra de valider les valeurs de la perméabilité obtenues à l'issue du calage du modèle en tenant compte du fait que l'épaisseur de la nappe n'est pas connue partout avec précision.

6.2 - La surface piézométrique

La figure 13.1 pour la couche 1 (Turonien) et la figure 13.2 pour la couche 2 (Cénomaniens) permettent de comparer les isopièzes calculés par le modèle avec ceux extrapolés à partir des points de mesure de juillet 1990 après une année de faibles précipitations.

Les cotes piézométriques calculées par le modèle à partir des paramètres pris en compte et des conditions aux limites montrent par comparaison avec les cotes mesurées, une représentativité satisfaisante de la simulation.

Le calage des courbes isopièzes a permis de préciser les flux d'échange entre les deux aquifères. Il apparaît que 35 % de l'alimentation du cénomaniens provient de la drainance du Turonien.

6.3 - Les débits d'entrée et de sortie des aquifères

Le bilan des débits entrant et sortant dans l'aquifère bi-couche est résumé dans le tableau ci-après :

MODELE 'SARTHE': PERMEABILITE DE L'EPONTE.

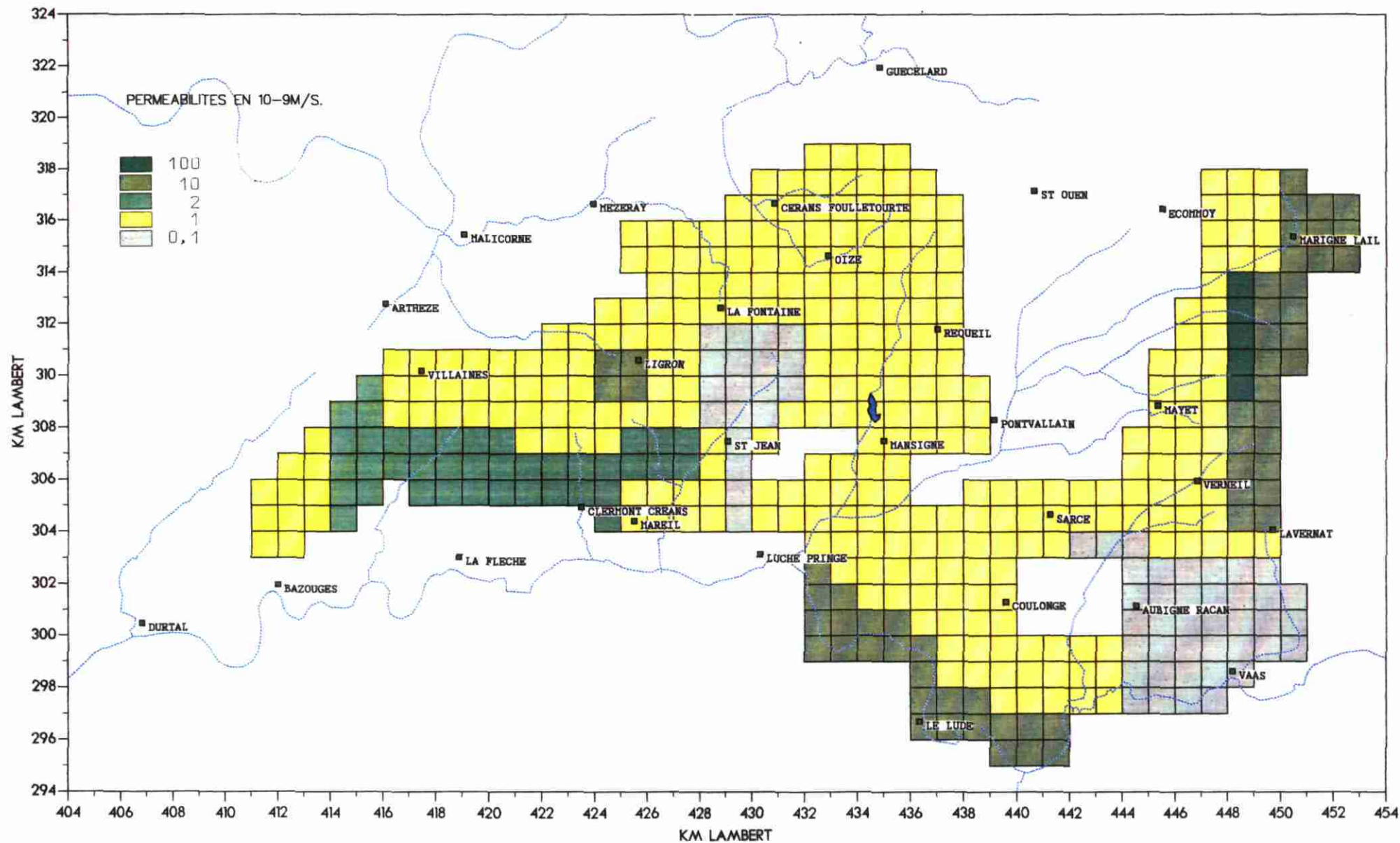
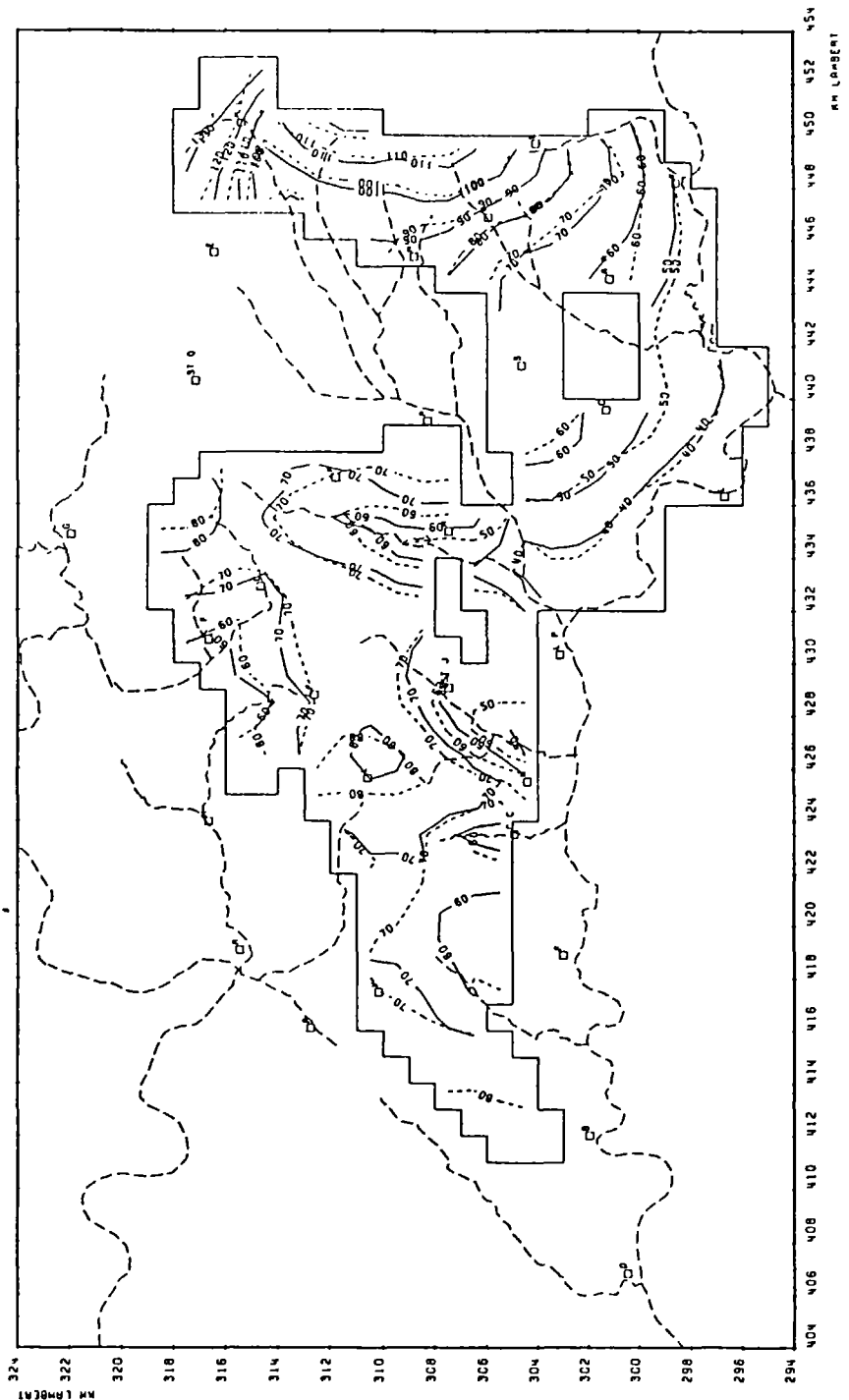


FIGURE 12 PERMEABILITE DE L'EPONTE

FIGURE 13.1

TURONIEN
COMPARAISON DES CHARGES MESUREES ET SIMULEES
APRES CALAGE EN REGIME PERMANENT

R 34 257
PAL 4S 92

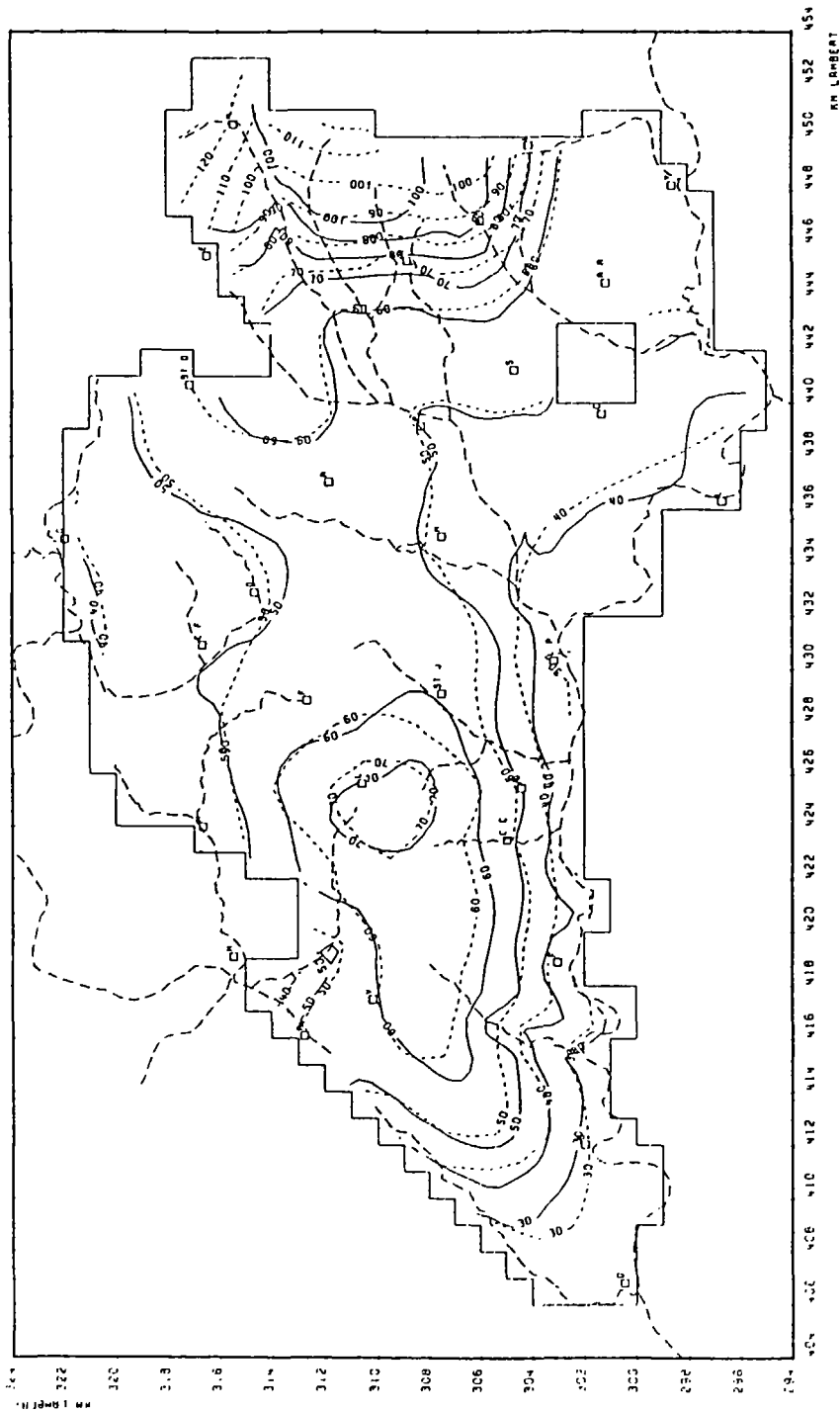


— 60 — courbe isopièze mesurée en mètres NGF
- - 60 - - courbe isopièze simulée en mètres NGF

FIGURE 13.2

R 34 257
PAL 4S 92

CENOMANIEN
COMPARAISON DES CHARGES MESUREES ET
SIMULEES APRES CALAGE EN REGIME PERMANENT



— 60 — courbe isopièze mesurée en mètres NGF
- - - 60 - - - courbe isopièze simulée en mètres NGF

TABLEAU 6 - BILAN ANNUEL, DES DEBITS (m3/h)

<u>ENTREES</u>	COUCHE 1 TURONIEN	COUCHE 2 CENOMANIEN
- infiltration par la pluie	4 910	3 100
- apports par les cours d'eau	270	250
- apports de la limite Nord-Est	390	10
- drainance :		
. couche 1 vers couche 2		1 850
. couche 2 vers couche 1	1 010	
	_____	_____
TOTAL	6 580	5 210
 <u>SORTIES</u>		
- drainage par les cours d'eau	4 490	3 930
- pompages AEP	240	270
- drainance :		
. couche 1 vers couche 2	1 850	
. couche 2 vers couche 1		1 010
	_____	_____
TOTAL	6 580	5 210

La somme des débits du bassin de l'Aune serait de l'ordre de 2 420 m³/h soit 0,67 m³/s. Cette valeur correspond effectivement au débit de base estimé de ce cours d'eau (figure 14).

7 - CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

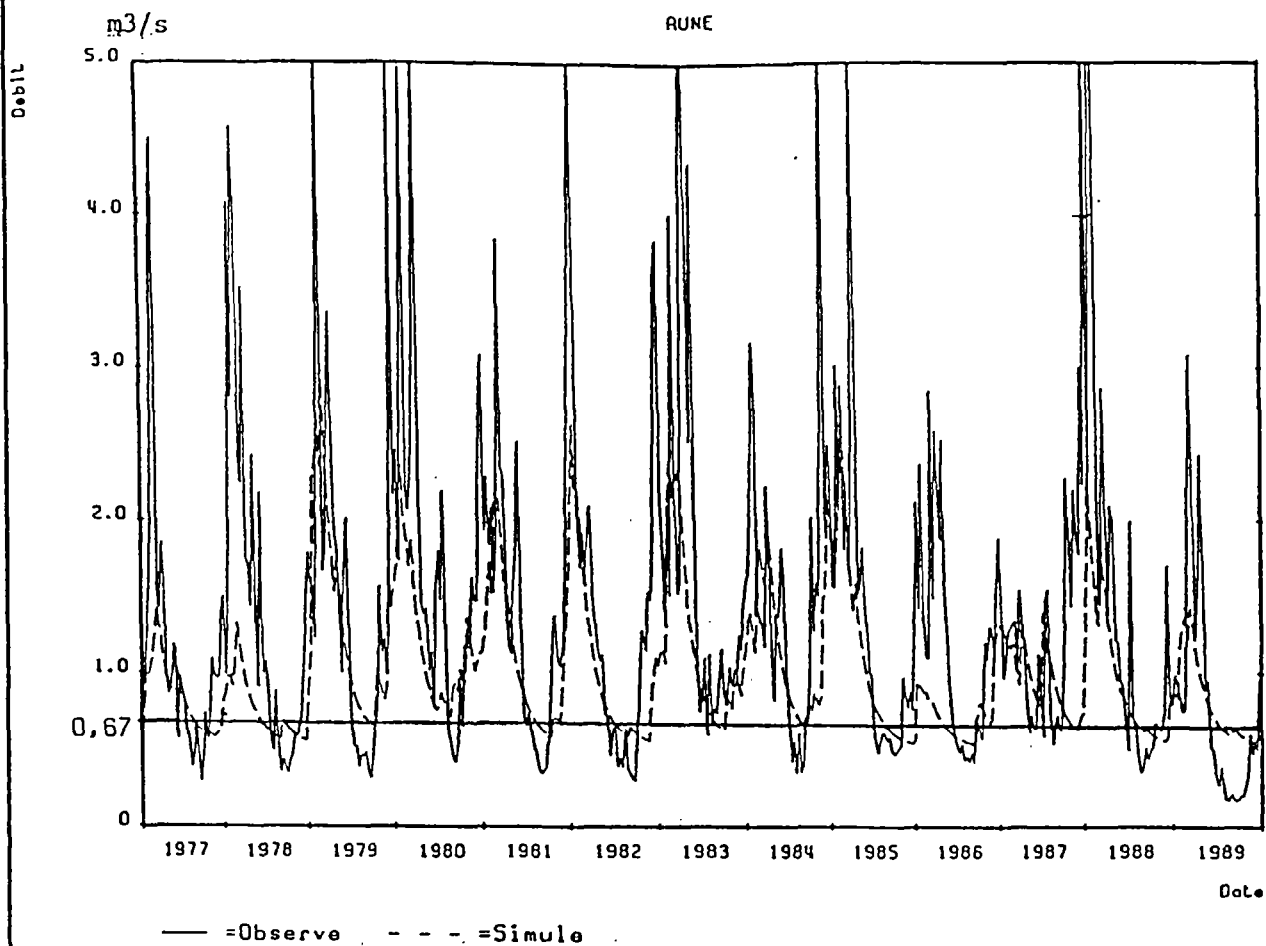
La modélisation hydrogéologique de l'aquifère bicouche : craie du Turonien et sables du Cénomaniens a permis une première approche du fonctionnement de ces nappes en régime permanent.

Ce modèle permet de caractériser ces aquifères d'un point de vue hydrodynamique, de définir les relations existantes entre les nappes du Turonien et du Cénomaniens, et de reconstituer à partir d'une série d'hypothèses l'état piézométrique moyen de la nappe.

FIGURE 14

DEBIT DE L'AUNE
COMPARAISON DEBIT OBSERVE - DEBIT
ISSU DU CALAGE EN REGIME PERMANENT

R 34 257
PAL 4S 92



Le modèle en régime permanent est donc une étape dans l'étude de ces aquifères.

Les travaux de reconnaissance en cours ou à prévoir dans la zone étudiée permettront d'acquérir des données supplémentaires indispensables pour réaliser des simulations d'exploitation sur le modèle calé en régime transitoire.

Les travaux suivants sont à prévoir :

- Suivi piézométrique sur au moins une dizaine de piézomètres existants ou à réaliser dans les 11 zones précisées sur la figure 15. Ce suivi devra être au minimum mensuel pendant une durée de l'ordre de 3 ans permettant de contrôler l'influence d'épisodes pluvieux et secs sur les deux aquifères.

Il serait intéressant de disposer d'un ou plusieurs piézomètres captant l'aquifère turonien à proximité d'un ou plusieurs forages exploitant l'aquifère cénomanien (zones 8 et 11 de la figure 15). Il faudrait également envisager le suivi de deux piézomètres implantés dans les zones 5 et 7 de la figure 15, sur des bassins d'effondrement contenant des accumulations de formations tertiaires. On pourrait ainsi préciser la continuité hydraulique au sein des aquifères de part et d'autre des bordures du bassin faillé. Dans ce suivi peuvent être intégrés les suivis instrumentés déjà prévus par le Conseil Général (par exemple zones 9 et 10 - figure 15). Un suivi conjoint des deux nappes permettra de préciser localement le phénomène de drainance entre les deux aquifères.

- Amélioration de la connaissance des paramètres hydrodynamiques (couples transmissivité/coefficient d'emménagement) au moyen de quelques pompages d'essai sur des forages d'exploitation ou de reconnaissance.
- Obtention des débits d'exhaure des forages d'exploitation dans les deux aquifères (en particulier pour les forages d'irrigation). Ces données devront être connues le plus précisément possible au même pas de temps que les mesures du suivi piézométrique.

Les nouvelles données permettront de confirmer ou d'infirmer les hypothèses retenues pour le calage, en particulier en ce qui concerne les perméabilités des aquifères et leur épaisseur.

On peut noter que les perméabilités retenues pour le calage du modèle apparaissent très contrastées dans la zone d'étude. Les résultats des travaux en cours seront nécessaires pour valider ces hypothèses.

Il sera également utile de confirmer et de préciser la drainance entre les deux aquifères au travers de l'éponte semi-perméable. Les nouvelles données (épaisseurs, perméabilités, etc ...) qui seront obtenues durant les travaux en cours justifieront, si leur densité est suffisante, une mise à jour du modèle.

Par ailleurs, si l'accroissement prévisionnel des débits d'eau extraits des aquifères pour l'AEP et l'irrigation est confirmé, il sera utile de réduire la taille des mailles où se concentrent les pompes pour simuler au mieux les rabattements induits. Cette modification pourrait être effectuée dans le cadre d'une future mise à jour qui comprendra également un nouveau calage en régime permanent et en régime transitoire.

ANNEXE

DONNEES RECENTES SUR LES
FORAGES AEP ET FORAGES
D'IRRIGATION

AEP Prélèvements 1990

n° BSS BRGM	COMMUNE	LIEU-DIT	X	Y	Volume Annuel (m3)	Aquifère
393-1X-6	Cérans-Fouletourte	La Croix des Champs	429.980	320.080	100 000	C
393-2X-12	Cérans-Fouletourte	Les Tourbières	431.880	315.500	173 000	T
392-8X-6 et 12	Ligron	La Fribaudière	424.190	309.610	376 000	C + T
393-5X-10	Luché-Pringé	Les Croix Blanches	430.280	303.270	121 000	C
393-5X-9	Luché-Pringé	St Jean de la Motte	430.300	303.300	126 000	C
391-1X-5	La Suze	Les Noues	429.990	2320.100	250 000	C
393-6X-2	Pontvallain	Le Tirouet	437.260	306.200	185 000	C
393-6X-4 et 7	Pontvallain	Casse Landevy	437.230	309.490	283 000	C
425-4X-7	Mayet	La Cave	450.670	299.900	650 000	T
425-4X-43		et Grande Barre	450.660	300.200		
393-8X-6	Aubigné-Racan	Le Bois	444.930	302.470	105 000	T
393-7X-2		ou La Grenouillère	444.250	302.850		
393-4X-12	Ecommoy + Marigné-Laille		448.400	313.420	382 000	C
393-4X-2 et 3			449.030	312.300		
C : Cénomaniens T : Turonien						

NOUVEAUX FORAGES D'IRRIGATION DEPUIS 1990

n° BSS BRGM	COMMUNE	DESIGNATION	X	Y	Z (m)	TURONIEN			CENOMANIEN			Transmissivité x 10E -3 (m2/s)	Capacité installée (m3/h)
						Toit NGF	Mur NGF	NST NGF	Toit NGF	Mur NGF	NSC NGF		
425-6X-	Dissé sous le Lude	Forage Touchard Le Bordelière	436.59	2291.63	56		46,5 cimentation		21	-37	41,1	6,1	80
393-8X-	Verneil le Chétif	GAEC de Crannes	445.82	2303.13	80		72 cimentation		38	-13	60,35	4,6	80
393-5X-	St Jean de la Motte	GAEC de la Motte	429.79	2309.54	81	-	-	-	30	-21	51,8	5	90
393-8X-	Verneil le Chétif	Forage Papin La Croix	447.50	2302.87	90		52 cimentation		32	-33,5	59,3	5,2	100
425-4X-51	La Bruère sur Loir	Le Tuffeau M. Gauthier	450.56	2295.15	62	-	-	-	37	-26	45,59	19	80
393-7X-	Sarcé	M. Loyer La Cellerie	442.82	2305.125	89		62,5 cimentation		22,5	-14,5	57	1,6	55
393-5X-	Ligron	Forage La Mare des Prés	424.52	2308.81	88	0	-1,5	85,12	-	-	-	1,9	50
						calcaires tertiaires							
393-5X-	Ligron	Sondage La Mare des Prés	424.81	2308.75	98	-	-	-	-2,5 ?	< -52,5			Abandonné
393-7X-	Mayet	M. Papin La Chesnaye	443.83	2310.75	62	-	-	-	56	24	63,25 artésien	4	65
392-4X-	Courcelles la Forêt	M. Bousard Le Domaine	424.67	2313.03	70	-	-	-	48	-3	49,6	1	60
392-8X-	Ligron	M. David Remars	422.09	2311.36	59	-	-	-	15	-25	51,3	1,7	60
393-6X-	Mansigné	Forage La Roche aux Guèpes	437.30	305.26	49	-	-	-	10,5	-39,5	40,3	7	110
425-4X-2	Vaas	M. Barre Le Petit Fief	448.83	2300.31	77		47 cimentation		31	-40	55	3,2	60
393-1X-	Cérans-Fouletourte	M. Ménage La Mulotière	430.20	2317.42	73	-	-	-	24	-32	49,25	1,1	60
393-5X-	St Jean de la Motte	M. Lorière Les Varennes	430.10	310.21	81	-	-	-	33	-24	52,3	8,8	100
393-2X-	Cérans-Fouletourte	M. Camenbert La Saulaie	433.90	2317.58	82	-	-	-	39	-9	43,15	7,7	100
392-	Vilaines ss Malicorne	puits Les Mersaudières				-	-	-	z	z-16			40
									sable de Bousse				
425-4X-	Lavernat	M. Fouquet Les Guillaumeries	451.25	2300.48	94	79	47 cimentation		30	-35	60	3,9	60

NOUVEAUX FORAGES D'IRRIGATION DEPUIS 1990

n° BSS BRGM	COMMUNE	DESIGNATION	X	Y	Z (m)	TURONIEN			CENOMANIEN			Transmissivité x 10E -3 (m2/s)	Capacité installée (m3/h)
						Toit NGF	Mur NGF	NST NGF	Toit NGF	Mur NGF	NSC NGF		
393-5X-20	St Jean de la Motte	M. Pineau L'Aulnay Briand				-	-	-	z	z-13			15
	Bazouges sur le Loir	M. De La Rue De Can Marigné				-	-	-	z-3	z-25 incomplet	-3,6		45
	Lavernat	M. Hurlteloup Grenetmy	453.96	2301.33	91	78	41 cimentation		17	-51	61	8	70
392-8X-	Ligron	M. Langlais Les Grandes Poteries	424.16	2311.18	75	75	57	73,7	-	-	-		40
392-8X-	Ligron	M. Langlais Les Grandes Poteries	424.08	2311.31	75	75	55	71,5	-	-	-		65
393-4X-	Ecommoy	M. Vasseur Rochereau	447.75	2313.84	84	-	-	-	84	61,5 incomplet	81,8		30
393-8X-	Lavernat	GAEC Morançais Le Grand Bon	449.37	2303.42	92	90	75,5 cimentation	90	-	-	-		40
393-7X-	Sarcé	M. Griveau La Basse Sauvagère	441.12	2303.32	80		69 cimentation		56	-1	57,6	10	100
393-2X-	Yvré le Polin	M. Letourmy La Gravelle	435.45	2316.67	88		71 cimentation		40	-11	49,3	5,1	80
392-4X-	Courcelles la Forêt	GAEC Maudoux Mont Lévrier	424.50	2313.65	67	-	-	-	49,5	5,5	48,4	6,4	60
392-8X-	Ligron	M. Esnault La Chouanière	423.24	2310.74	70			66	-	-	-		30
393-1X-14	La Suze	Puits n°3 Haute Vieille Morte	428.85	2320.14	43	-	-	-		27,5		2,8	40
393-5X-	Luché Pringé	M. Covallier La Touche	426.69	2304.15	37	-	-	-		-13,5	33,6	17	90
393-5X-	Luché Pringé	M. Covallier Les Aulnais	427.54	2303.32	33					18,5			40
393-5X-	Luché Pringé	M. Covallier Les Aulnais	427.42	2303.43	33					<22,5			40
393-6X-	Mansigné	M. Coubard Le Can	434.05	2304.10	38	-	-	-	-4,5	-44,5	42,5 artésien	6,6	80
393-6X-27	Coulongé	M. Dupuy La Monchevallerie	437.56	2302.36	54		<30	51					40
393-6X-	Mansigné	M. Dupuy Bel Air	436.64	2304.067	56		50		46	<29			20

NOUVEAUX FORAGES D'IRRIGATION DEPUIS 1990

n° BSS BRGM	COMMUNE	DESIGNATION	X	Y	Z (m)	TURONIEN			CENOMANIEN			Transmissivité x 10E -3 (m2/s)	Capacité installée (m3/h)
						Toit NGF	Mur NGF	NST NGF	Toit NGF	Mur NGF	NSC NGF		
393-2X-	Yvré le Polin	M. Ribeau GAEC Ourne	436.40	2315.075	74	-	-	-	36	-10	53,2	2,2	85
393-2X-	Oizé	M. Tansorier La Guilberdière	435.00	2312.45	70		52 cimentation		22	-25	58,5	2,5	60
393-7X-	Mayet	M. Gassé La Zézière	442.77	2307.12	57	-	-	-	56,5	16,5	55,2	13	85
393-2X-	Oizé	M. Vallée La Foucherie	433.60	2314.19	90	78	64 cimentation		34	-3	50	2,1	60
393-8X-	Verneil le Chétif	MM. Fourreau-Fourrie La Basse Cour	447.71	2304.91	95	-	-	-	53	4	63	8,1	120
392-4X-	Mezeray	M. Mahuet Le Gasseau	424.42	2317.46	40	-	-	-	39,5	27,5	39		20
392-7X-	La Flèche	Puits n° 2 Les Bas Molans	414.91	2303.73	32	-	-	-	32	<24	31		30
392-7X-	La Flèche	Puits n° 3 Les Bas Molans	414.80	2303.75	32	-	-	-	32	20	31		12
393-8X-	Lavernat	M. Legendre La Gagnerie	449.46	2304.16	96	96	83		-	-	-		10
393-8X-	Lavernat	M. Legendre La Gagnerie	449.35	2303.97	98	98	84	95	-	-	-		25