



# teneurs en nitrates dans la nappe des calcaires de Beauce

modélisation et prévision



BRGM

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT  
DIRECTION DE LA PRÉVENTION DES POLLUTIONS

Service de l'Eau  
14, boulevard du Général-Leclerc - 92524 NEUILLY-SUR-SEINE CEDEX

# teneurs en nitrates dans la nappe des calcaires de Beauce

modélisation et prévision

J.-J. Seguin

avec la collaboration de

Ph. Jean

C. King

Ph. Maget

J. Martin

mars 1987

87 SGN 192 EAU

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES  
SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

Département Eau

B.P. 6009 - 45060 ORLÉANS CEDEX 2 - Tél.: 38.64.34.34

## PREFACE

---

Ce rapport a été réalisé à la demande du Ministère de l'Environnement ; il prolonge une série de travaux d'ordre méthodologique confiés par le Ministère au Département Eau et Environnement du BRGM dans le cadre de la lutte contre la pollution des eaux souterraines par les nitrates (modélisation et cartographie de la pollution, étude de la dénitrification,...).

Alors que le modèle BICHE, issu de la convention 43/83 et présenté dans le rapport 85 SGN 663 EAU, s'applique à un point donné et un seul (source ou forage) d'un aquifère et permet de suivre l'évolution des concentrations en ce point, le modèle présenté ici (SESAME) est spatialisé (maillé) : il est destiné à prendre la mesure du phénomène de pollution à l'échelle d'un aquifère, c'est-à-dire en le modélisant, à quantifier ses différentes composantes et à prévoir les conséquences à long terme sur la qualité de la ressource.

Dans cette étude des outils nouveaux (quant à l'application qui en est faite tout au moins) ont été utilisés : c'est d'abord le modèle de transport lui-même, appartenant à la catégorie des modèles à "cheminements aléatoires" ("Random Walk") ; c'est aussi le recours à l'imagerie spatiale pour la caractérisation de l'occupation du sol et l'affectation automatique des paramètres cultureux aux mailles du modèle.

Pour tester ces outils, le choix s'est porté sur la nappe des Calcaires de Beauce pour laquelle un modèle hydrodynamique existait déjà. Cette nappe constitue un support d'application du modèle, l'objectif premier du travail n'étant pas la modélisation de l'évolution des teneurs en nitrates, mais l'élaboration d'un modèle.

L'étude est donc d'abord expérimentale mais s'appuyant sur de nombreuses analyses faites sur 250 points d'eau environ, elle a été aussi mise à profit pour exploiter ces données et faire le point sur la pollution de cette nappe par les nitrates.

**TENEURS EN NITRATES DANS LA NAPPE DES CALCAIRES DE BEAUCE**  
**Modélisation et prévision**

par **JJ. SEGUIN**

collaboration : **Ph. JEAN, C. KING, Ph. MAGET, J. MARTIN**

**87 SGN 192 EAU**

**R E S U M E**

L'utilisation d'un modèle numérique de simulation dans l'étude d'un phénomène de pollution des eaux souterraines est d'un intérêt indéniable (quantification, prévision). Pour illustrer les possibilités d'un tel modèle, un travail à caractère expérimental portant sur la pollution par les nitrates de la nappe des calcaires de Beauce a été entrepris à la demande du Ministère de l'Environnement.

La première partie de ce travail, réalisée grâce à l'appui du Service Géologique Régional Centre, est consacrée à la modélisation hydrodynamique de la nappe, préalable indispensable à la mise en oeuvre d'un modèle de transfert de masse.

La deuxième partie est l'objet même de l'étude demandée : elle décrit les principales étapes de la modélisation du phénomène de pollution. Les calculs ont été réalisés à l'aide d'un programme de type "Random Walk" (à "cheminements aléatoires") qui permet d'éviter les difficultés numériques liées à une résolution suivant un schéma aux différences finies (ou aux éléments finis) de l'équation de transport.

L'utilisation du modèle a permis de préciser l'importance des flux azotés parvenant à la nappe en provenance de la surface du sol et a confirmé la tendance à la hausse générale des teneurs de la nappe déjà soulignée à l'occasion de différentes études plus ponctuelles.

## SOMMAIRE

	Page
INTRODUCTION :	1
PREMIERE PARTIE : RESTITUTION DE LA PIEZOMETRIE SUR LA PERIODE 1975-1984	3
1. <u>La nappe des calcaires de Beauce : caractéristiques et modélisation</u>	4
1.1. Le réservoir aquifère et la nappe	5
1.1.1. description du réservoir	5
1.1.2. caractérisation de la nappe	5
1.2. Le modèle de simulation	5
1.2.1. programme utilisé et maillage	7
1.2.2. schématisation du réservoir	7
1.2.3. paramètres structuraux	9
2. <u>Utilisation du modèle sur la période 1975-1984</u>	12
2.1. Les échanges sol-nappe : infiltrations et prélèvements	12
2.1.1. le problème de la recharge	12
2.1.2. calcul des pluies efficaces	13
2.1.3. prélèvements dans la nappe	19
2.2. Résultats du calage	21
2.2.1. reconstitution des historiques piézométriques	21
2.2.2. ajustement par zone de la recharge	23
2.2.3. cartes piézométriques	23
2.2.4. champ de vitesses et lignes de courant	26

## DEUXIEME PARTIE : MISE EN OEUVRE D'UN MODELE DE TRANSPORT DES NITRATES

1. <u>Choix et description du modèle</u>	29
1.1. Pourquoi un modèle à "cheminements aléatoires" ?	29
1.2. Description générale de la méthode	29
2. <u>Données nécessaires au calage</u>	30
2.1. Teneurs en nitrates : deux champs de concentrations, 1981 et 1984	30
2.1.1. localisation des points de mesures	31
2.1.2. caractérisation statistique globale	31
2.1.3. cartographie sous forme d'isovaleurs	34
2.2. Flux massiques azotés parvenant à la nappe	38
2.2.1 problématique et démarche adoptée	38
2.2.2. caractérisation de l'occupation du sol	40
2.2.3. calcul a priori des flux	43
3. <u>Calage du modèle et résultats</u>	47
3.1. Krigeage des champs de valeurs	47
3.2. Calage et résultats	49
3.3. Simulations	55
CONCLUSION	58
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	60
Annexe 1 - Comparaison graphique sur 20 piézométriques des niveaux calculés et des niveaux mesurés (période 1975-1984)	63
Annexe 2 - Cartes piézométriques	71
Annexe 3 - Pluies efficaces après calage par zone pluviométrique et par pas de temps (période 1975-1984)	75
Annexe 4 - Représentation graphique des pluies excédentaires (P - ETP) décade par décade, de 1975 à 1985. à Chartres, Châteaudun et Orléans-Bricy.	77
Annexe 5 - Volumes d'eau prélevés (AEP). Valeurs moyennes mensuelles sur la période 1975-1984.	79
Annexe 6 - Paramètres de mise en oeuvre du modèle hydrodynamique	85
Annexe 7 - Teneurs en nitrates en 1981 et 1984 sur 236 points d'eau	87
Annexe 8 - Note sur les paramètres d'une interpolation par krigeage	93
Annexe 9 -Equation du transport d'un élément en milieu saturé. Note sur les problèmes numériques liés à une résolution suivant un schéma aux différences finies.	97

## LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1	Extension géographique des calcaires de Beauce	2
Figure 2	Coupes géologiques schématiques de la Beauce	5
Figure 3	Nappe des calcaires de Beauce : carte piézométrique établie en mars 1973	6
Figure 4	Maillage du modèle hydrodynamique de la nappe des calcaires de Beauce	8
Figure 5	Distribution spatiale des perméabilités	10
Figure 6	Distribution spatiale des coefficients d'emmagasinement	11
Figure 7	Projection des variables postes "pluviométriques" dans les plans des composantes principales (1,2) et (2,3)	16
Figure 8	Situation des piézomètres de calage	22
Figure 9	Piézométrie calculée en 1984 (hautes eaux et basses eaux)	24
Figure 10	Piézométrie calculée en 1983 (hautes eaux et basses eaux)	25
Figure 11	Tracé des lignes de courant correspondant à l'état piézométrique hautes eaux de 1984	27
Figure 12	Localisation des points d'eau analysés en 1981	32
Figure 13	Localisation des points d'eau analysés en 1984	33
Figure 14	Histogrammes des teneurs en nitrates en 1981 et 1984	35
Figure 15	Carte des teneurs en nitrates en 1981	36
Figure 16	Carte des teneurs en nitrates en 1984	37
Figure 17	Un extrait de la scène 199/27 du 17/6/84 transmise par le capteur thematic mapper de landsat 5	42
Figure 18	Image "classée" obtenue après traitement de la scène 199/27	42
Figure 19	Exemple de résultats fournis par le décodage de l'image satellite	44
Figure 20	Carte krigée des teneurs moyennes en nitrates de l'année 1981	48
Figure 21	Carte krigée des teneurs moyennes en nitrates de l'année 1984	49
Figure 22	Carte de l'évolution des teneurs en nitrates obtenue par différence des cartes krigées de 1984 et 1981	52
Figure 23	Carte d'évolution des teneurs en nitrates en 1981 et 1984 obtenue après calage du modèle avec une porosité cinématique de 5 %	54
Figure 24	Carte d'évolution des teneurs en nitrates entre 1981 et 1984 obtenue après calage du modèle avec une porosité cinématique de 10 %	56
Figure 25	Carte d'évolution des teneurs en nitrates obtenue après 10 pas de simulation annuels à partir de l'état 0 de 1981	

## LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau 1	Hauteurs de pluies à la station d'Orléans-Bricy de 1970 à 1984	13
Tableau 2	Liste des postes pluviométriques couvrant la zone d'extension de la nappe des calcaires de Beauce et utilisés pour le calcul des pluies efficaces	14
Tableau 3	Variance des composantes principales 1, 2 et 3	15
Tableau 4	Hauteurs pluviométriques moyennes (période 1975-1984) calculées en 24 stations	18
Tableau 5	Hauteurs pluviométriques moyennes sur les 6 zones différenciées	17
Tableau 6	E T P sur la période 1975-1984	17
Tableau 7	Pluies efficaces annuelles sur la période 1975-1984 calculées avec une capacité de stockage en eau de 100 mm	20
Tableau 8	Débits prélevés pour l'irrigation	21
Tableau 9	Pluies efficaces par zone obtenues après calage (moyenne sur la période 1975-1984)	23
Tableau 10	Paramètres statistiques globaux relatifs aux teneurs moyennes en nitrates en 1981 et 1984 (points aux teneurs supérieures à 100 mg/l exclus)	31
Tableau 11	Paramètres statistiques globaux sur le sous-ensemble de points à teneurs comprises entre 5 et 100 mg/l	34
Tableau 12	Occupation du sol en Beauce de Patay en % de la S.A.U.	41
Tableau 13	Occupation du sol en Grande Beauce, en % de la S.A.U.	41
Tableau 14	Matrice de confusion	44
Tableau 15	Quantités d'azote N lessivable en kg/ha/an affectées aux mailles du modèle pour initialiser le calage	45
Tableau 16	Valeurs krigées des teneurs en nitrates de 1981 en chacune des mailles du modèle	50
Tableau 17	Valeurs krigées des teneurs en nitrates de 1984 en chacune des mailles du modèle	50
Tableau 18	Paramètres statistiques globaux des champs de teneurs en nitrates krigées.	49

## INTRODUCTION

Le constat est désormais bien établi d'une dégradation générale de la qualité des eaux de la nappe des calcaires de Beauce, dégradation provoquée par une élévation, parfois importante, des teneurs en nitrates. Il y a une dizaine d'années, la situation avait déjà été jugée préoccupante et une ébauche de carte des teneurs établie en 1973 laissait entrevoir des zones déjà bien contaminées. Récemment (1985), une étude conduite par l'Agence de Bassin Loire-Bretagne\* et portant sur une centaine de captages AEP situés dans le département du Loiret concluait, après analyse des teneurs sur la période 1978-1983, à une augmentation prévisible de l'ordre de 5 mg/l au bout de 10 ans sur plus de la moitié des captages étudiés (présentant déjà des teneurs comprises entre 15 et 45 mg/l).

Ce constat de mauvaise "santé" de la nappe peut être renforcé par les résultats dégagés au cours de la présente étude qui, à partir d'un échantillon de 250 points captant la nappe montre que 17 % de ces points (pour la plupart des AEP) ont, en 1984 des teneurs dépassant le seuil de 50 mg/l et que 29 % ont des teneurs supérieures à 45 mg/l (et qui seront probablement supérieures à 50 mg/l 10 ans plus tard).

Le problème se pose donc des moyens à mettre en oeuvre et des mesures à prendre pour enrayer ce phénomène de pollution et sauvegarder la qualité des eaux de cette nappe, l'une des plus grandes nappes libres de France, s'étendant sur plus de 7 000 km<sup>2</sup> au Nord de la Loire (figure 1) et alimentant plus de 300 communes.

Parmi les moyens de compréhension et de prévision du phénomène de pollution, le modèle numérique de simulation, par sa capacité à intégrer un grand nombre d'informations et par la possibilité qu'il offre de tester différentes situations envisageables, est d'un intérêt indéniable.

On présente ici la mise en oeuvre d'un modèle appartenant à la catégorie des modèles à "cheminements aléatoires" permettant de simuler le transport des nitrates dans la nappe des calcaires de Beauce, les résultats fournis par ce modèle sur la période de calage (en particulier une estimation des quantités d'azote nitrique parvenant à la nappe), ainsi que ceux obtenus en prévision. Ce modèle s'articule avec un modèle hydrodynamique, présenté en première partie de ce travail, déjà utilisé il y a une dizaine d'années pour simuler le comportement hydrodynamique de la nappe et repris ici pour le calcul des charges hydrauliques sur la période de travail considérée.

-----

\* Nitrates et nappe de Beauce dans le département du Loiret. Agence de Bassin Loire-Bretagne ETU/128, 1984

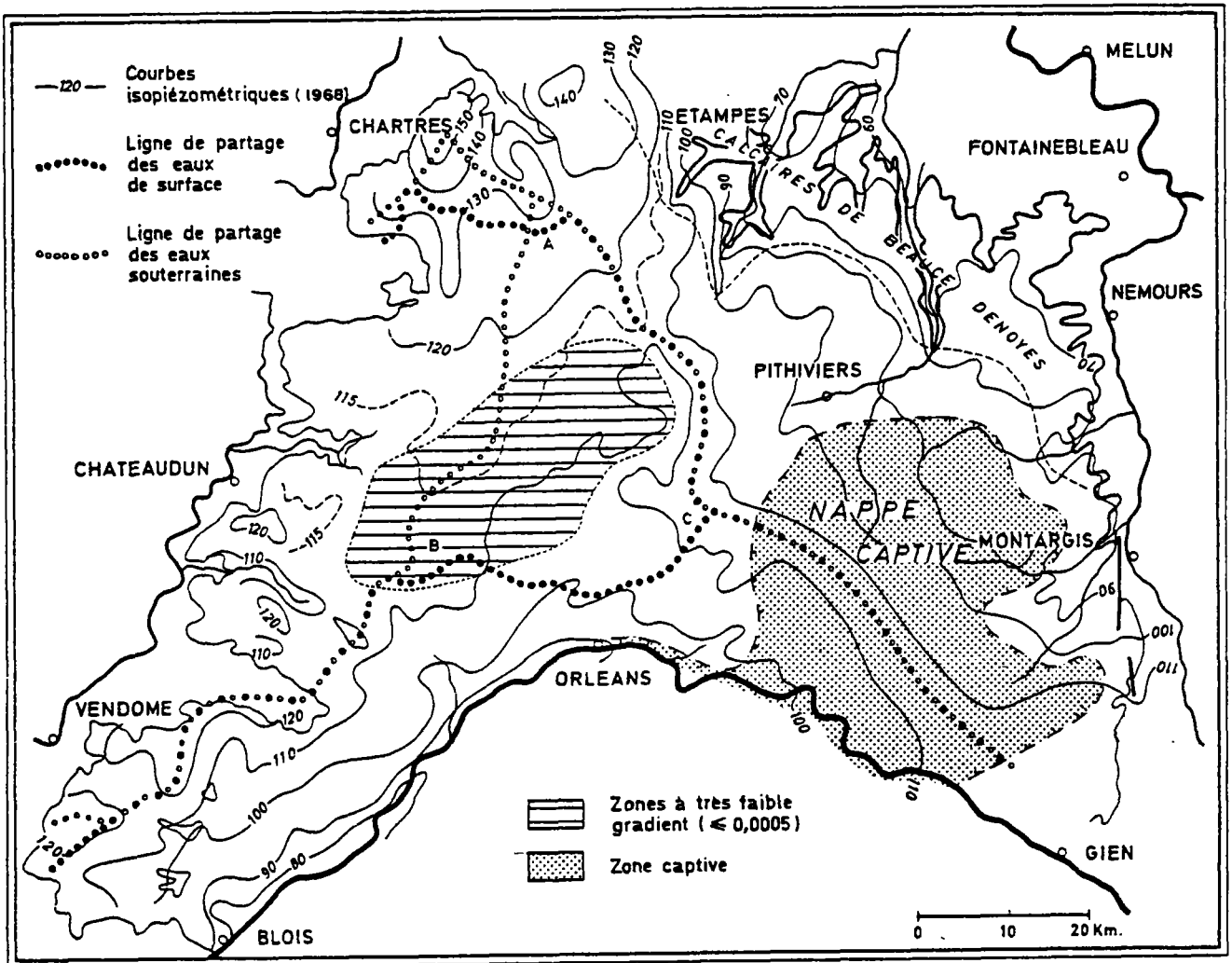


Figure 1 : Extension géographique  
de la nappe des calcaires de Beauce

**PREMIERE PARTIE**

**RESTITUTION DE LA PIEZOMETRIE**

**SUR LA PERIODE 1975-1984**

## 1. LA NAPPE DES CALCAIRES DE BEAUCE : CARACTERISTIQUES ET MODELISATION

### 1.1. Le réservoir aquifère et la nappe

#### 1.1.1. Description du réservoir

Appelée nappe des calcaires de Beauce, la nappe s'écoule en fait au travers de formations géologiques diverses où les intercalations marneuses et sableuses ne sont pas rares (Molasse du Gatinais par exemple). Les formations calcaires elles-mêmes sont relativement hétérogènes et de nombreux sondages ont mis en évidence des changements de faciès brusques et fréquents (ref. 5)

L'essentiel du réservoir est constitué par les calcaires lacustres d'Etampes et de l'Orléanais (figures 2a et 2b).

Bien que l'épaisseur des formations calcaires soit très importante (jusqu'à 190 m sous Pithiviers), seuls les 30 à 40 premiers mètres sont vraiment aquifères.

#### 1.1.2. Caractérisation de la nappe

La nappe est à surface libre sauf sous la forêt d'Orléans où elle se met en charge en raison de l'abaissement du mur de la formation peu perméable des "sables et argiles de Sologne". Elle peut devenir également captive localement sous les niveaux marneux développés dans les calcaires.

Sa profondeur varie de quelques mètres sur les limites à une trentaine de mètres dans la zone centrale. Quand elle est captive, une épaisseur de terrains de plus de 50 m peut la recouvrir.

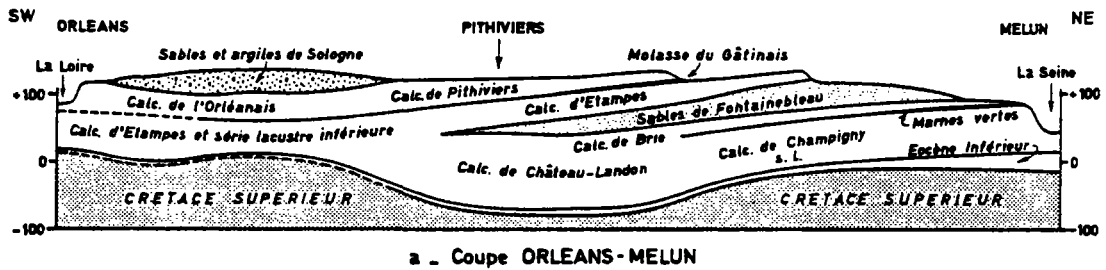
Les gradients sont faibles, généralement compris entre 1 et 2 ‰ et n'induisent donc que des mouvements d'eau très lents.

La nappe est alimentée uniquement par les pluies : tous les écoulements sont divergents à partir d'une ligne de crête principale orientée N.O.-S.E. divisant la nappe en deux bassins souterrains (cf. carte piézométrique de la figure 3 établie en mars 1973 à partir d'un relevé des niveaux effectué sur 150 points). Elle communique avec celle de la Craie à l'Ouest et celles des calcaires de Champigny et des sables de Fontainebleau au Nord.

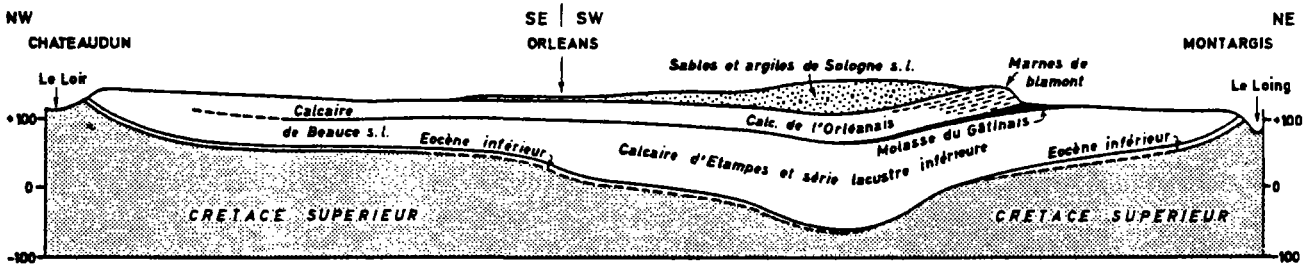
### 1.2. Le modèle de simulation

La première modélisation de la nappe remonte à l'année 1971 (ref. 2). Après une série de calages réalisés à l'aide de différents programmes, le modèle trouve sa forme définitive (maillage, conditions aux limites, paramètres) en 1975 (rapport BRGM. 75 SGN 166 BDP. ref. 4).

C'est la structure arrêtée en 1975 qui sera reprise ici, mais le programme réalisant les calculs est plus général que celui utilisé en 1975 (programme VTD1).



a - Coupe ORLEANS-MELUN



b - Coupe CHATEAUDUN-ORLEANS-MONTARGIS

Figure 2 : Coupes géologiques schématiques de la Beauce  
(extrait de : Hydrogéologie du Centre du Bassin de Paris  
par Cl. MEGNIEN, ref. 5)

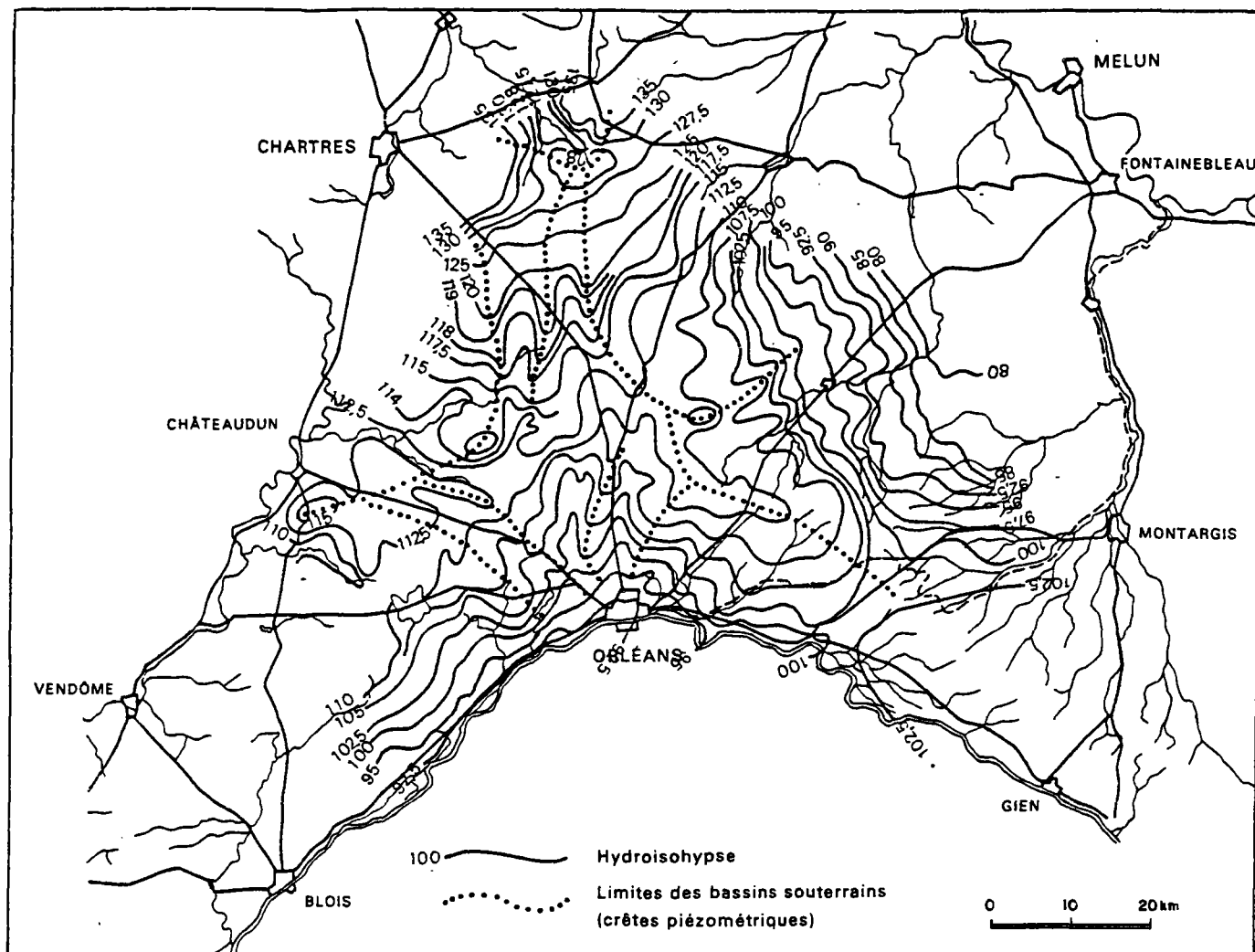


Figure 3 : Nappe des calcaires de Beauce  
Carte piézométrique établie en mars 1973

### 1.2.1. Programme utilisé et maillage

#### Programme :

Il s'agit du programme V.T.D.N. (maillage Variable, régime Transitoire, à Débordements, à N couches) qui permet de simuler des écoulements en régime transitoire dans un système aquifère multicouche, à l'aide d'un schéma aux différences finies.

Les mailles du modèle sont carrées, mais chacune d'elles peut être subdivisée en 9 autres mailles carrées qui peuvent elles-mêmes subir cette subdivision. Cette finesse de discrétisation est intéressante dans des zones à densité d'informations sur l'aquifère plus forte, ou bien pour assurer une meilleure représentation des limites de l'aquifère (rivière...)

#### Maillage :

Il comprend 1 069 mailles carrées de taille variable et couvre un territoire de 4 637 km<sup>2</sup> (les deux tiers de la nappe environ). Les mailles les plus grandes (d'ordre 1) font 10 km<sup>2</sup> et sont au nombre de 397. Les mailles issues de la subdivision en 9 des mailles d'ordre 1 sont au nombre de 591. Il existe enfin une maille subdivisée à l'ordre 3 au niveau de la ville d'Orléans (représentation des champs captants). Globalement, le maillage s'inscrit dans un rectangle contenant 28 rangées de 31 colonnes. Le découpage du domaine et le numéro des mailles sont précisées par la figure 4.

### 1.2.2. Schématisation du réservoir

L'aquifère sera considéré comme monocouche.

. **cotes du substratum** : les cotes affectées aux mailles ont été estimées à partir des courbes structurales qui les traversent. Pour des épaisseurs de réservoir supérieures à 30 m la cote du substratum dans une maille a été prise égale à la cote piézométrique diminuée de 30 m (l'aquifère étant productif sur une trentaine de mètres seulement).

. **cotes du toit** : lorsque la nappe est libre, c'est la cote moyenne de la surface topographique dans les mailles qui représente la cote du toit de la nappe. Lorsqu'elle est captive, la cote du toit est celle de la base des formations imperméables qui l'emprisonnent.

. **conditions aux limites** : les limites sont de deux types : à potentiel imposé et à flux imposé.

Sont à potentiel imposé les mailles qui, au Sud, suivent le cours de la Loire et celles qui longent les rivières à leur sortie du domaine : Conie et Aigre à l'Ouest, Voise et Juine au Nord, Essone, Fusain et Bezonde à l'Est. Au Nord-Est, une isopièze appartenant à la nappe des Sables de Fontainebleau a été considérée également comme une limite à potentiel constant.

Ailleurs, les limites sont représentées par des crêtes piézométriques (limites étanches).

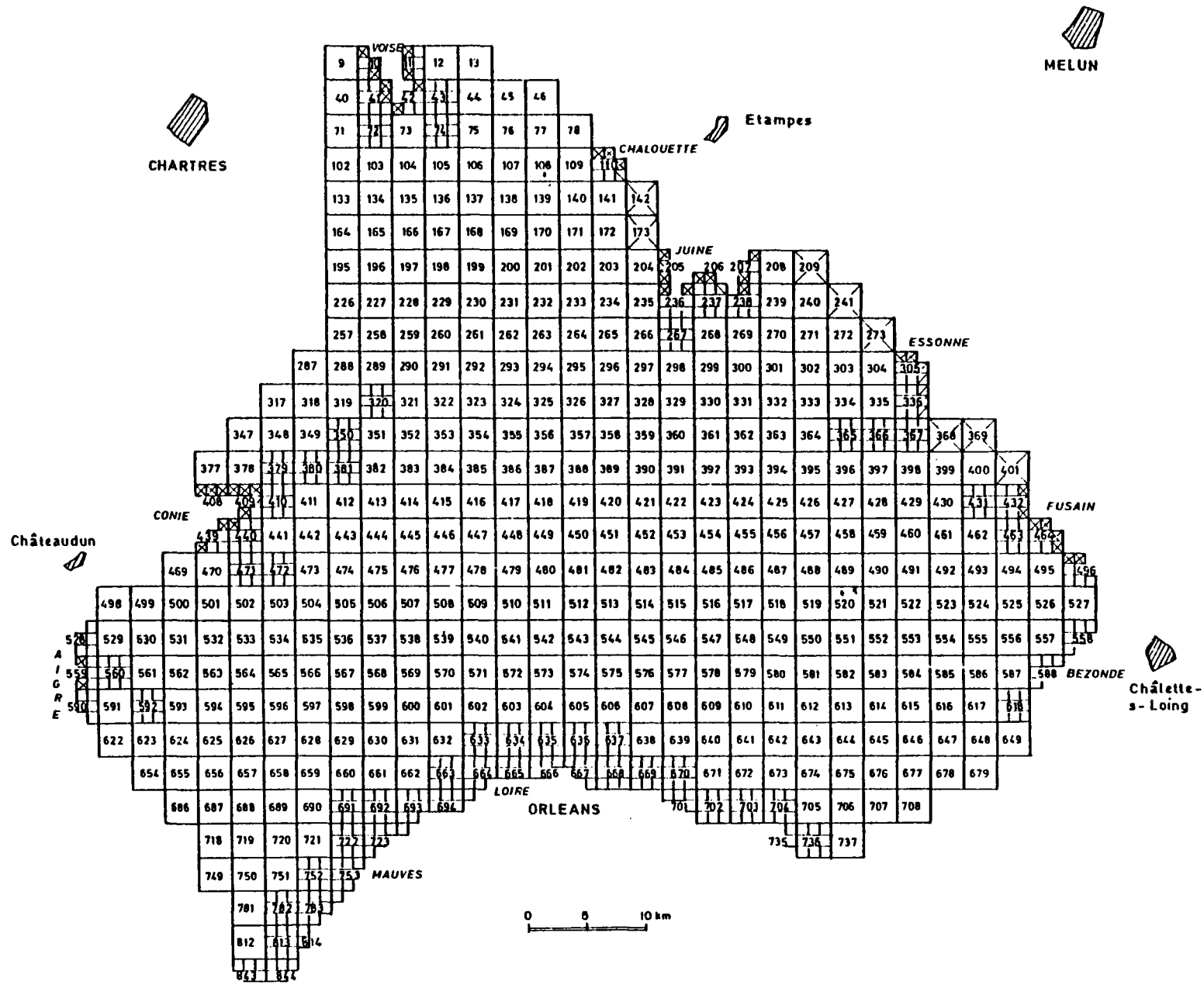


Figure 4 : Maillage du modèle hydrodynamique de la nappe des calcaires de Beauce

### 1.2.3. Paramètres structuraux

. **perméabilité** : les valeurs de perméabilité affectées aux mailles sont celles qui ont été prises en compte par le programme VTD1 en 1975. Rappelons qu'elles sont issues des valeurs de transmissivité (obtenues par calage) divisées par l'épaisseur productive du réservoir aquifère (au plus une trentaine de mètres).

La carte de la figure 5 fournit une distribution spatiale de ce paramètre par découpage en 5 classes de valeurs. L'éventail des valeurs est assez large : les perméabilités les plus faibles inférieures à  $10^{-3}$  m/s, se rencontrent essentiellement sous la forêt d'Orléans et en bordure Nord du maillage. Les valeurs les plus fortes, supérieures à  $8.10^{-3}$  m/s n'intéressent que quelques dizaines de mailles, essentiellement localisées sur la limite Ouest. Une plage de valeurs assez fortes (de 4 à  $8.10^{-3}$  m/s) apparaît dans la zone centrale.

. **coefficients d'emmagasinement** : il faut distinguer les coefficients caractérisant la partie libre de la nappe et ceux relatifs à la partie captive. La carte de la figure 6 présente une répartition spatiale de ces coefficients qui varient de 5 à 20 % lorsque la nappe est libre et de 0,1 à 1 ‰ lorsqu'elle est captive.

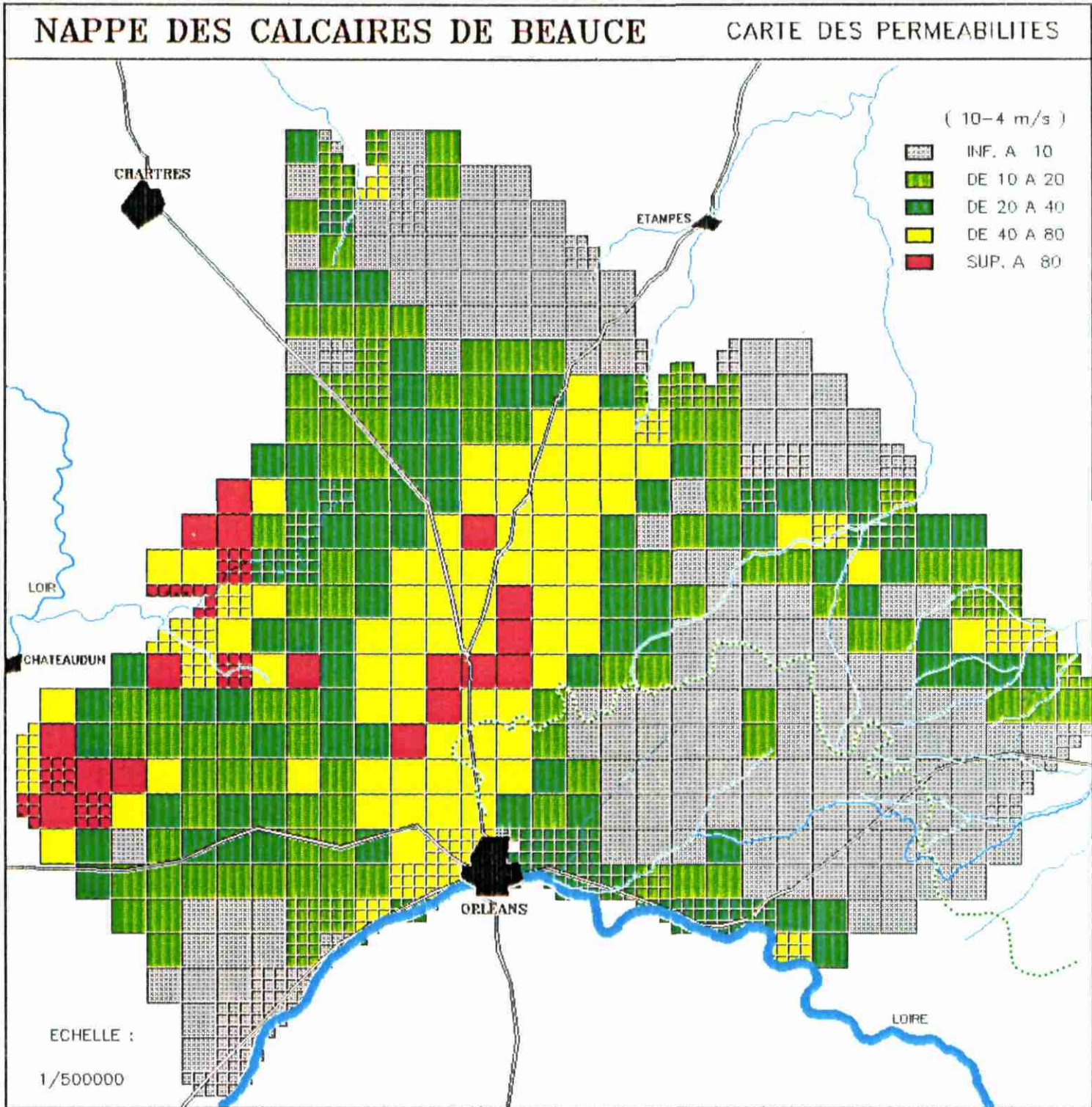


Figure 5 : Distribution spatiale des perméabilités.

# NAPPE DES CALCAIRES DE BEAUCE CARTE DES EMMAGASINEMENTS

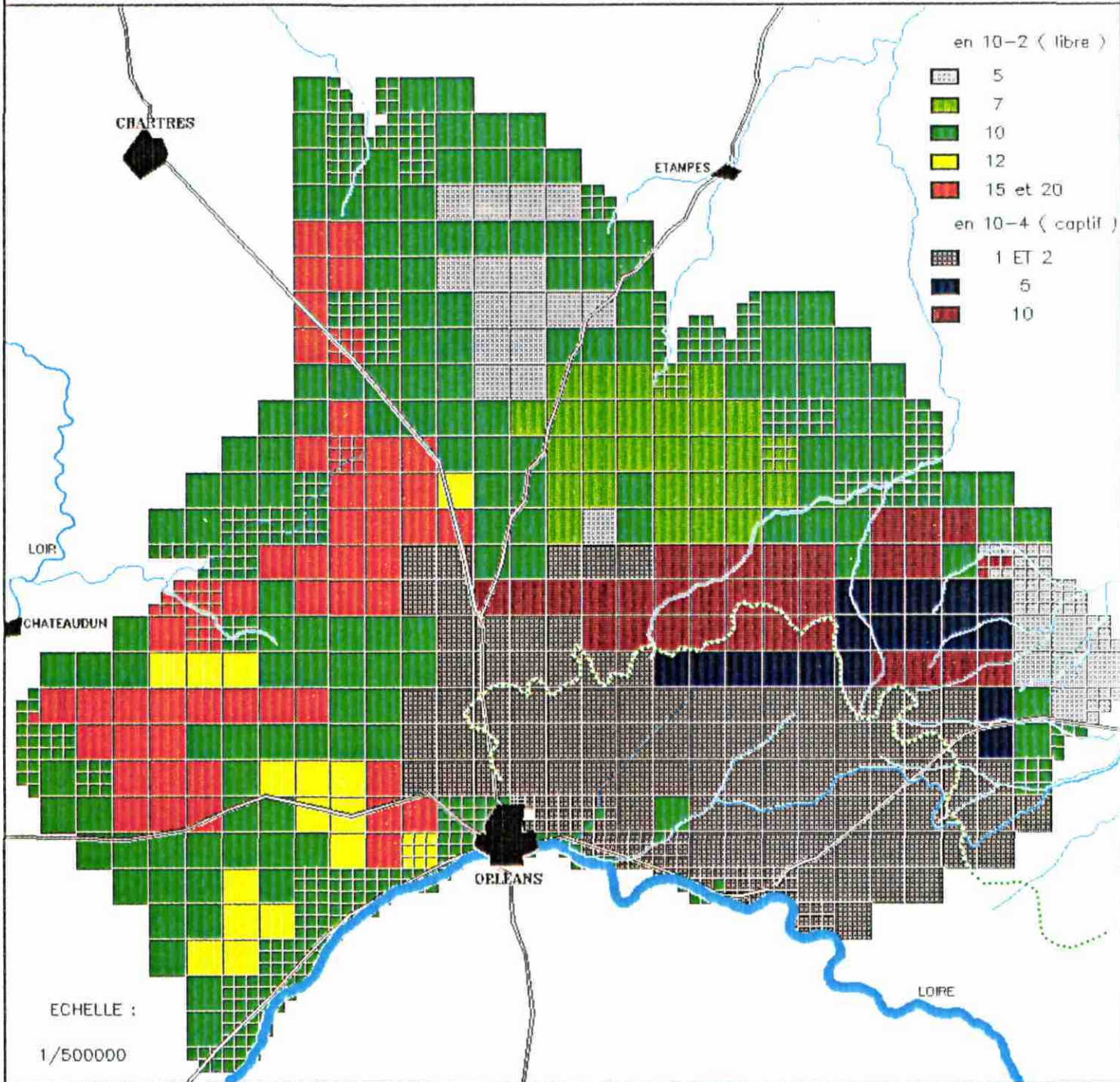


Figure 6 : Distribution spatiale des coefficients d'emmagasinement.

## **2. UTILISATION DU MODELE SUR LA PERIODE 1975-1984**

Compte-tenu de la durée de la période de simulation, 10 ans, un pas de temps semestriel a été retenu (approximativement chaque année, hautes eaux et basses eaux) soit donc 20 pas de simulation au total.

A chacun de ces pas de temps correspondent des conditions variables d'alimentation de la nappe ainsi que des sollicitations variables par prélèvements divers (A.E.P., industries, irrigation).

Ces apports et ces prélèvements doivent donc, pour chaque pas de simulation, être évalués ou bien restitués au mieux à l'aide d'un calage.

### **2.1. Les échanges sol-nappe : infiltrations et prélèvements**

#### **2.1.1. Le problème de la recharge**

Entre 1971 et 1975, le modèle de la nappe des calcaires de Beauce a fait l'objet d'une série de calages en régime permanent d'abord, puis en régime transitoire, calages qui ont permis de cerner, puis de fixer les paramètres du modèle, en particulier perméabilité et coefficient d'emmagasinement (ref. 2 et 4).

En principe, un modèle une fois calé peut être utilisé sur une période de temps quelconque si l'on connaît (en chacune des mailles) les flux d'infiltration efficace. En fait, l'estimation directe de ces flux est un problème délicat. L'approche la plus simple, classiquement utilisée, repose sur le calcul d'une "pluie efficace" à l'aide d'un bilan de type Thornthwaite faisant intervenir une évapotranspiration potentielle calculée et une valeur de capacité superficielle de stockage en eau. Mais cette méthode, outre son imprécision, ne tient pas compte du retard à l'infiltration c'est-à-dire du déphasage qui existe entre le moment où la pluie s'infiltré dans le sol et le moment où une fraction de cette pluie parvient à la nappe.

Ce retard à l'infiltration (qui s'accompagne également d'un "amortissement" du flux infiltré) est fonction :

- de l'épaisseur de la zone non saturée,
- de la conductivité hydraulique de celle-ci (le transfert peut être accéléré en cas de fissuration importante de la zone non saturée).

Pour connaître les flux d'alimentation de la nappe différents procédés peuvent être mis en oeuvre : modèle global, fonction de transfert... ; une solution simple, apparentée à un calage, consiste à utiliser le modèle lui-même si l'on dispose, sur la période de temps considérée, soit de cartes piézométriques à différentes dates, soit d'historiques piézométriques en un certain nombre de points disséminés sur le domaine étudié. Différentes valeurs d'alimentation sont alors testées (en général par zones), jusqu'à ce que cartes ou historiques piézométriques soient restitués (ou approchés) par le modèle.

C'est la démarche qui a été adoptée ici et qui a été également celle utilisée en 1975.

Dans le cas de la nappe des calcaires de Beauce, le retard à l'infiltration peut, dans certaines zones où la nappe est très profonde, être de plusieurs mois, et lors du calage de 1975, réalisé sur une période de 1 an, de mars 1972 à mars 1973, les valeurs suivantes avaient été retenues :

- 20 jours pour une profondeur inférieure à 15 m,
- 50 jours pour des profondeurs comprises entre 15 et 25 m,
- 100 jours pour des profondeurs supérieures à 25 m.

Lors de ce calage également, trois grandes zones de pluie efficace avaient été distinguées :

- . l'une caractérisée par des hauteurs infiltrées supérieures à 130 mm
- . une autre définie par des hauteurs infiltrées inférieures à 90 mm,
- . la troisième se situant entre ces deux bornes.

### Remarque

La pluviométrie des années 1970 à 1974 a été nettement plus faible que celle des années qui ont suivi (mise à part l'année 1976, exceptionnelle par sa sécheresse) ainsi que le soulignent les valeurs moyennes annuelles suivantes relevées à la station d'ORLEANS-BRICY au cours de la période 1970-1984 (tableau 1).

Années	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984
Hauteurs de pluies (mm)	589	461	584	494	639	733	473	759	706	787	690	805	728	668	846
Moyennes (mm)	553					719									

Tableau 1 : Hauteurs de pluie à la station d'Orléans-Bricy de 1970 à 1984

## 2.1.2. Calcul des pluies efficaces

### 2.1.2.1 Analyse de la pluviométrie

Cette analyse a été menée à l'aide des hauteurs de pluies relevées sur la période 1975-1984 au niveau de 24 postes pluviométriques gérés par la Météorologie Nationale. La liste de ces postes (déjà pris en compte en 1975) est donnée dans le tableau 2.

Pour étudier la répartition spatiale des pluies sur les 10 années considérées, détecter des stations statistiquement apparentées sur cette période et donc déduire quelques grandes zones de pluviométrie, une analyse en composantes principales a été mise en oeuvre ; les 24 stations ont été prises comme variables et les hauteurs d'eau mensuelles comme observations soit 120 observations par station.

LOIRET	BRICY 1 BAULE 9 CHAMBON LA FORET 10 CHECY 11 COMBREUX 12 GIROLLES 13 INTVILLE LA GUETARD 14 LORRIS 15 LOURY 16 PITHIVIERS LE VIEIL 17 TRINAY 18
EURE-ET-LOIR	CHARTRES 2 FONTENAY SUR CONIE 4 GALLARDON 5 POINVILLE 6 SAINVILLE 7 VOVES 8
LOIR-ET-CHER	CHATEAUDUN 3
ESSONNE	BOIGNEVILLE 20 BOUVILLE 21 CHATIGNONVILLE 22 MERVILLE 23 ORMOY LA RIVIERE 24
SEINE-ET-MARNÉ	MONDREVILLE 19

Tableau 2 : liste des postes pluviométriques couvrant la zone d'extension de la nappe des calcaires de Beauce et utilisés pour le calcul des pluies efficaces

La projection des variables a été faite dans deux plans définis par les trois premières composantes principales. Dans chacun des plans, les variables projetées sont situées à l'intérieur d'un cercle de rayon 1 permettant de mettre en évidence les relations entre composantes principales et variables (fig. 7).

Le plan des composantes 1 et 2 n'apporte guère d'information sur la répartition spatiale cherchée, toutes les stations étant très liées à la première composante (qui explique 87 % de la variance, cf. tableau 3)

Composantes	1	2	3
Variance	20.1	0.68	0.46
Pourcentage de variance expliquée	87 %	3 %	2 %

Tableau 3 : variance des composantes principales 1, 2 et 3.

Cette composante ne fait que refléter la relative homogénéité qui existe à l'échelle de la zone étudiée.

Par contre, le plan des composantes 2 et 3 est plus intéressant et fait entrevoir un certain nombre de regroupements possibles de stations.

La deuxième composante joue le rôle d'un axe géographique de direction S.O-N.E que l'on peut faire coïncider avec une ligne reliant Orléans à Etampes. Toutes les stations (hormis Baule) liées au demi-axe négatif F2 sont situés à l'ouest de cette ligne et la pluviométrie moyenne annuelle inter-stations dans cette zone est légèrement inférieure à celle de la zone Est (687 mm contre 702 mm).

En fait, des disparités existent au sein de chacune de ces deux zones et la troisième composante intervient en démarquant notamment les groupes de stations suivants :

- Chartres, Gallardon, Sainville au Nord-Ouest ; la pluviométrie moyenne annuelle inter-stations est de 668 mm,
- Chateaudun, Fontenay-sur-Conie, Poinville, Voves, Trinay dans la région Centre-Ouest avec une pluviométrie moyenne annuelle inter-stations de 687 mm,
- Combreux, Lorris, Girolles au Sud-Est : la moyenne pluviométrique annuelle inter-stations est beaucoup plus élevée : 759 mm.

Cette augmentation des précipitations de l'Ouest vers l'Est (128 mm de différence en moyenne entre Chartres et Girolles) épargne le secteur situé au Nord de la Forêt d'Orléans et à l'Est de l'Essonne comprenant les stations de Chambon, de Pithiviers et de Mondreville où les hauteurs d'eau annuelles moyennes sont respectivement de 633 mm, 627 mm et 660 mm.

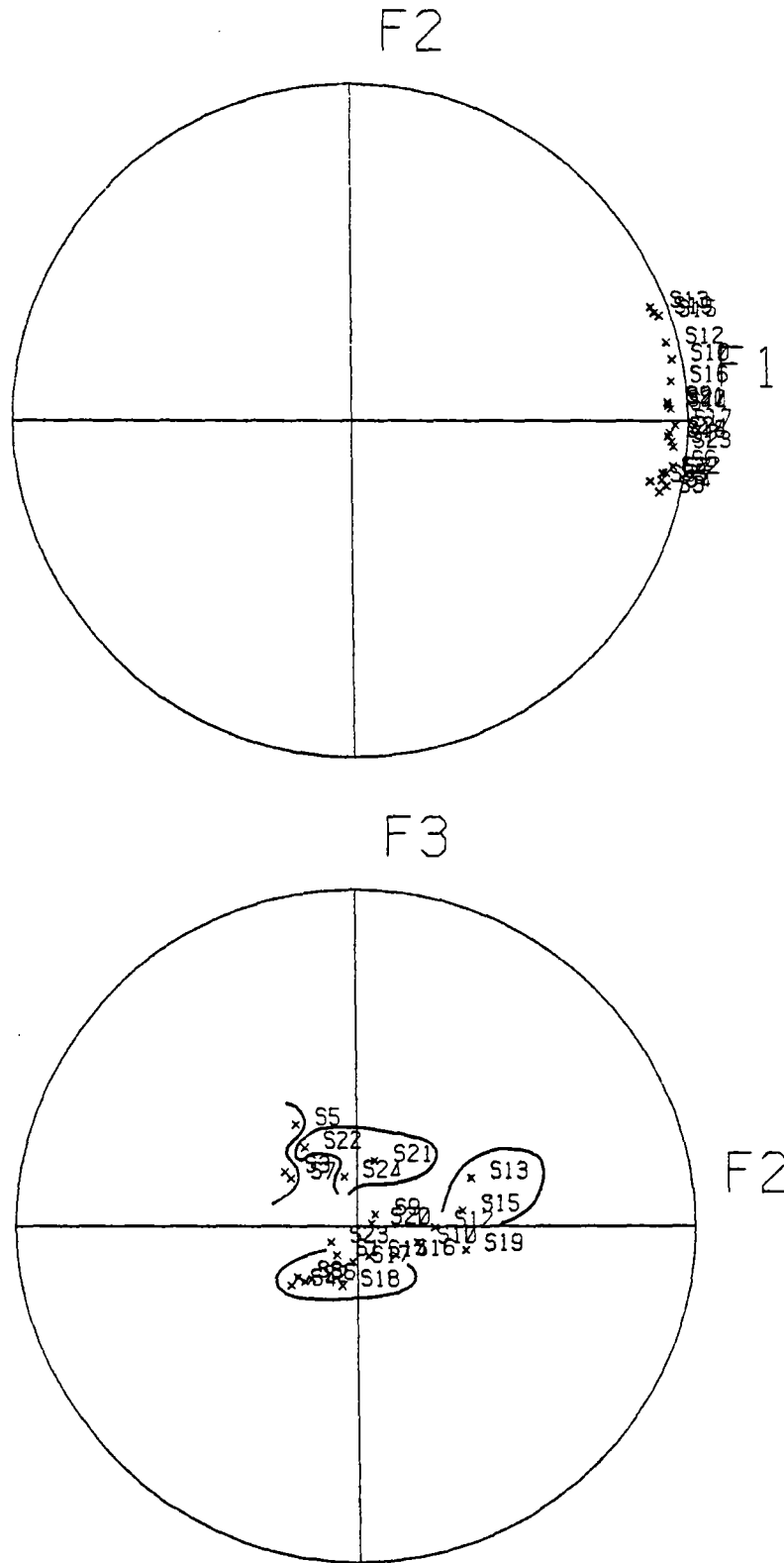


Figure 7 : Projection des variables "postes pluviométriques" dans les plans des composantes principales (1,2) et (2,3) (la numérotation correspond à celle du tableau 2)

En définitive, 6 groupes ont été constitués par aggrégation des stations autour des "noyaux" mis en évidence par l'A.C.P. Les stations caractérisant ces zones ainsi que les hauteurs d'eau moyennes qu'elles ont reçues ont été reportées dans le tableau 4 ci-contre.

Les moyennes inter-stations pour chacun des 6 groupes figurent dans le tableau 5 :

	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6
Stations	3, 5, 7	20, 21 22, 24	2, 4, 6 8, 18	12, 13 15, 16	10, 14 17, 19, 23	1, 9
Hauteurs moyennes en mm	668	706	687	755	652	727

tableau 5 : hauteurs pluviométriques moyennes sur les 6 zones différenciées. On notera l'écart de plus de 100 mm entre le groupe 4 et le groupe 5 géographiquement proche.

#### 2.1.2.2. L'évapotranspiration potentielle (ETP)

L'E.T.P. a été calculée au pas de temps décadaire à partir des températures et durées d'insolation relevées aux stations d'Orléans-Bricy, de Chateaudun et de Chartres. Les totaux annuels sur la période 1975-1984 figurent dans le tableau 6.

ANNEES	BRICY	CHATEAUDUN	CHARTRES
.1975	672	68.1	646
.1976	774	756	747
.1977	633	616	612
.1978	627	608	606
.1979	620	610	604
.1980	608	601	600
.1981	60.1	588	601
.1982	69.1	672	675
.1983	687	664	680
.1984	667	646	656
moyenne	658	644	643

Tableau 6 : E.T.P. (en mm) sur la période 1975-1984.

On peut constater à la lecture de ce tableau que les valeurs calculées à Chateaudun et Chartres sont peu différentes, les valeurs moyennes étant, quant à elles, identiques.

#### 2.1.2.3. Pluies efficaces

Les pluies efficaces ont été calculées à l'aide d'un bilan au pas de temps mensuel en faisant intervenir une valeur de réserve en eau du sol (bilan de type Thorntwaite). Cette valeur a été prise égale à 100 mm ; il s'agit d'une valeur classiquement retenue qui constitue un point de repère commode dans le calcul des pluies efficaces, mais la capacité de stockage d'un sol peut s'écarter notablement de cette valeur et à l'échelle régionale il faut s'attendre à une certaine variabilité de ce paramètre.

Zones	Stations pluviométriques	1er trimestre	2ième et 3ième trimestres	4ième trimestre	Année
Z1	3 CHARTRES	162	305	185	656
	5 GALLARDON	162	326	177	665
	7 SAINVILLE	170	325	188	683
Z2	22 CHATIGNONVILLE	186	338	196	720
	21 BOUVILLE	169	337	186	692
	20 BOIGNEVILLE	177	339	185	701
	24 ORMOY	178	343	189	710
Z3	2 CHATEAUDUN	170	322	189	681
	4 FONTENAY	171	344	196	711
	6 POINVILLE	162	327	182	671
	8 VOVES	172	332	192	696
	18 TRINAY	171	326	180	677
Z4	12 COMBREUX	204	359	211	774
	13 GIROLLES	206	373	205	784
	15 LORRIS	197	328	194	719
	16 LOURY	191	354	197	742
Z5	10 CHAMBON	167	296	170	633
	14 INTVILLE	175	323	183	681
	17 PITHIVIERS	163	295	169	627
	19 MONDREVILLE	175	322	163	660
	23 MEREVILLE	169	324	167	660
Z6	1 BRICY	181	339	199	719
	9 BAULE	187	333	215	735

Tableau 4 : Hauteurs pluviométriques moyennes (période 1975-1984) calculées en 24 stations (en mm)

Quoiqu'il en soit, les résultats obtenus permettent d'initialiser le processus de calage et l'on peut raisonnablement penser que les valeurs "vraies" n'en sont pas trop éloignées. Ces résultats sont présentés dans le tableau 7 (valeurs trimestrielles année par année).

### Remarque

La délimitation spatiale des différentes zones pluviométriques a été réalisée à l'aide de la méthode de Thiessen. Aux mailles situées dans une zone donnée a été attribué le numéro de cette zone et la valeur de pluie efficace correspondante. Pour une année  $i$ , on a considéré que les hautes eaux étaient déterminées par les pluies efficaces du dernier trimestre de l'année  $i-1$  et par le premier trimestre de l'année  $i$ .

#### 2.1.3. prélèvements dans la nappe

. A.E.P. : plus de 300 communes ont été recensées dans le domaine étudié, la plupart s'alimentant à partir de la nappe. Les volumes d'eau prélevés chaque année sont donc importants et leur prise en compte dans le modèle s'avère nécessaire.

Ces volumes ont été recueillis auprès des Agences de Bassin Seine-Normandie et Loire-Bretagne sous la forme de volumes semestriels (hautes eaux et basses eaux).

Afin de simplifier, étant donné le nombre des données (20 semestres, plus de 200 communes consommatrices transmises), une valeur moyenne annuelle a été calculée pour chaque commune, cette valeur moyenne étant alors affectée aux mailles concernées par les prélèvements (214 captages d'importance pris en compte. cf. annexe 5)

#### . Industries :

La variabilité des prélèvements industriels (surtout pour les industries saisonnières) n'a pas autorisé le mode de calcul ci-dessus.

Les débits prélevés ont donc été affectés pas de temps par pas de temps aux mailles concernées (une quinzaine).

. Irrigation : il existe de très nombreux forages utilisés pour l'irrigation et les quantités d'eau extraites en période estivale ne sont en général pas connues avec précision et ne font d'ailleurs pas l'objet de relevés systématiques.

Les débits prélevés ont donc été estimés à partir de superficies irriguées au niveau de chaque commune et des doses moyennes d'irrigation appliquées sur les cultures.

Les superficies irriguées proviennent du dernier recensement général de l'Agriculture. Elles ont été rapportées à la superficie agricole utilisée afin d'opérer un regroupement des communes en fonction du pourcentage irrigué. Ont été ainsi constituées les classes de superficie irriguées suivantes :

< 5%, 5 à 10 %, 10 à 15%, 15 à 25%, 25 à 35%, 35 à 45%.

Ces classes d'irrigation ont été cartographiées pour délimiter des secteurs homogènes et la carte a été superposée au maillage du domaine ce qui a permis d'affecter à chacune des mailles l'un des 6 pourcentages précédents.

PLUIES EFFICACES AVEC RU=100. GROUPEMENT : 1 *STATIONS 3,5,7						
1er TRIM.	2ieme TRIM.	3ieme TRIM.	4ieme TRIM.	ANNEE		
78.3	0.0	0.0	0.0	78.	1975	
24.2	0.0	0.0	0.0	24.	1976	
87.7	0.0	0.0	6.6	94.	1977	
200.9	13.7	0.0	0.0	215.	1978	
157.7	9.9	0.0	56.2	224.	1979	
142.7	0.0	0.0	26.5	169.	1980	
124.0	25.6	0.0	150.5	300.	1981	
51.6	0.0	0.0	91.6	143.	1982	
64.4	50.6	0.0	0.0	115.	1983	
36.6	0.0	0.0	132.5	169.	1984	
Moyennes sur les 10 annees :						
96.8	10.0	0.0	46.4	153.		

PLUIES EFFICACES AVEC RU=100. GROUPEMENT : 2 * STATIONS 20,21,22,24						
1er TRIM.	2ieme TRIM.	3ieme TRIM.	4ieme TRIM.	ANNEE		
68.1	0.0	0.0	48.3	116.	1975	
26.9	0.0	0.0	0.0	27.	1976	
104.7	0.0	0.0	6.2	111.	1977	
230.5	19.0	0.0	3.5	253.	1978	
201.4	20.8	0.0	84.4	307.	1979	
145.3	0.0	0.0	24.4	170.	1980	
142.7	27.5	0.0	121.3	292.	1981	
77.2	0.0	0.0	108.8	186.	1982	
80.3	72.1	0.0	0.0	152.	1983	
33.7	6.0	0.0	111.8	152.	1984	
Moyennes sur les 10 annees :						
111.1	14.5	0.0	50.9	176.		

PLUIES EFFICACES AVEC RU=100. GROUPEMENT : 3 * STATIONS 2,4,6,8,18						
1er TRIM.	2ieme TRIM.	3ieme TRIM.	4ieme TRIM.	ANNEE		
62.1	15.5	0.0	45.9	124.	1975	
27.6	0.0	0.0	21.4	49.	1976	
125.1	0.0	0.0	21.2	146.	1977	
189.0	13.7	0.0	0.4	203.	1978	
197.2	12.7	0.0	71.1	281.	1979	
146.1	0.0	0.0	10.4	157.	1980	
125.5	42.2	0.0	97.2	265.	1981	
65.3	0.0	0.0	101.7	167.	1982	
72.6	77.4	0.0	0.0	150.	1983	
28.1	1.6	0.0	115.4	145.	1984	
Moyennes sur les 10 annees :						
103.9	16.3	0.0	48.5	169.		

PLUIES EFFICACES AVEC RU=100. GROUPEMENT : 4 * STATIONS 12,13,15,16						
1er TRIM.	2ieme TRIM.	3ieme TRIM.	4ieme TRIM.	ANNEE		
68.4	3.3	0.0	79.6	151.	1975	
34.8	0.0	0.0	39.7	75.	1976	
154.9	10.6	0.0	32.1	198.	1977	
252.1	22.6	0.0	0.0	275.	1978	
215.8	24.1	0.0	71.0	311.	1979	
147.8	0.0	0.0	27.6	175.	1980	
163.1	49.5	0.0	171.2	384.	1981	
113.2	0.0	0.0	131.6	245.	1982	
120.3	109.8	0.0	0.0	230.	1983	
68.0	1.6	0.0	157.9	228.	1984	
Moyennes sur les 10 annees :						
133.8	22.2	0.0	71.1	227.		

PLUIES EFFICACES AVEC RU=100. GROUPEMENT : 5 * STATIONS 10,14,17,19,23						
1er TRIM.	2ieme TRIM.	3ieme TRIM.	4ieme TRIM.	ANNEE		
46.2	0.0	0.0	42.2	88.	1975	
25.8	0.0	0.0	0.0	26.	1976	
114.9	0.0	0.0	0.0	115.	1977	
211.2	6.4	0.0	0.0	218.	1978	
160.0	9.7	0.0	52.3	222.	1979	
134.7	0.0	0.0	1.8	137.	1980	
121.3	34.8	0.0	76.5	233.	1981	
76.2	0.0	0.0	94.5	171.	1982	
81.3	72.4	0.0	0.0	154.	1983	
33.1	0.0	0.0	102.0	135.	1984	
Moyennes sur les 10 annees :						
100.5	12.3	0.0	36.9	150.		

PLUIES EFFICACES AVEC RU=100. GROUPEMENT : 6 * STATIONS 1,9						
1er TRIM.	2ieme TRIM.	3ieme TRIM.	4ieme TRIM.	ANNEE		
61.5	20.9	0.0	82.7	165.	1975	
35.4	0.0	0.0	46.4	82.	1976	
135.2	10.2	0.0	28.1	174.	1977	
220.3	20.2	0.0	10.5	251.	1978	
201.1	8.2	0.0	72.7	282.	1979	
149.6	0.0	0.0	17.9	168.	1980	
138.0	42.7	0.0	120.0	301.	1981	
75.8	0.0	0.0	138.8	215.	1982	
105.9	77.6	0.0	0.0	184.	1983	
49.8	13.3	0.0	176.1	239.	1984	
Moyennes sur les 10 annees :						
117.3	19.3	0.0	69.3	206.		

Tableau 7. : pluies efficaces annuelles sur la période 1975-1984 calculées avec une capacité de stockage en eau superficielle de 100 mm (valeurs trimestrielles).

Les débits prélevés par maille ont alors été calculés de la façon suivante :

en désignant par  $S_i$  la surface d'une maille  $i$ ,  $\alpha_i$  le pourcentage irrigué,  $D$  une dose moyenne d'irrigation annuelle (en mm d'eau), le débit cherché (réparti sur toute la maille et exprimé en  $m^3/km^2/an$ ) est :

$$q_i = \frac{Q_i}{S_i} = \alpha_i \cdot D \cdot 10^3$$

Dans la région, on peut tabler sur une dose moyenne d'irrigation de 100 mm (réf. 6)

En prenant pour chacune des classes de superficie irriguée la valeur centrale, on obtient les valeurs de débits rassemblées dans le tableau 8.

$\alpha_i$ %	débit en $m^3/km^2/an$	débit en $m^3/km^2/jour$
2,5	2 500	13,7
7,5	7 500	41,1
12,5	12 500	68,4
20	20 000	109,5
30	30 000	164,3
40	40 000	219,0

Tableau 8 : débits prélevés pour l'irrigation.

### Remarque

L'hypothèse est faite que les quantités d'eau apportées aux plantes sont intégralement utilisées par celles-ci et qu'il n'y a donc pas de percolation en profondeur.

## 2.2. Résultats du calage :

Vingt piézomètres, répartis sur l'ensemble de la nappe, pour lesquels on disposait d'historiques piézométriques sur la période 1975-1984 ont servi au calage. La localisation de ces piézomètres est précisée par la carte de la figure 8 tandis que leurs caractéristiques sont reportées en annexe 1. La simulation a démarré avec l'état piézométrique d'octobre 1974 (calculé par le modèle VTD1) (réf. 4).

### 2.2.1. reconstitution des historiques piézométriques :

Les résultats du calage peuvent être appréciés en superposant aux courbes piézométriques mesurées les courbes calculées par le modèle aux mêmes points.

Les graphiques permettant la comparaison sont rassemblés en annexe 1; leur examen permet de conclure à un ajustement relativement correct (comptetenu des remarques ci-dessous) avec, dans tous les cas, une bonne restitution des remontées de la nappe.

### Remarques

Les fluctuations saisonnières parfois très accusées observées sur certains points (par exemple piézomètre de Batilly en Gâtinais, maille 459) n'ont pas toujours pu être reconstituées. Cela tient au pas de simulation choisi, le semestre, qui ne permet pas de reproduire tous les événements qui ont pu être enregistrés soit de façon continue, soit lors de relevés mensuels.

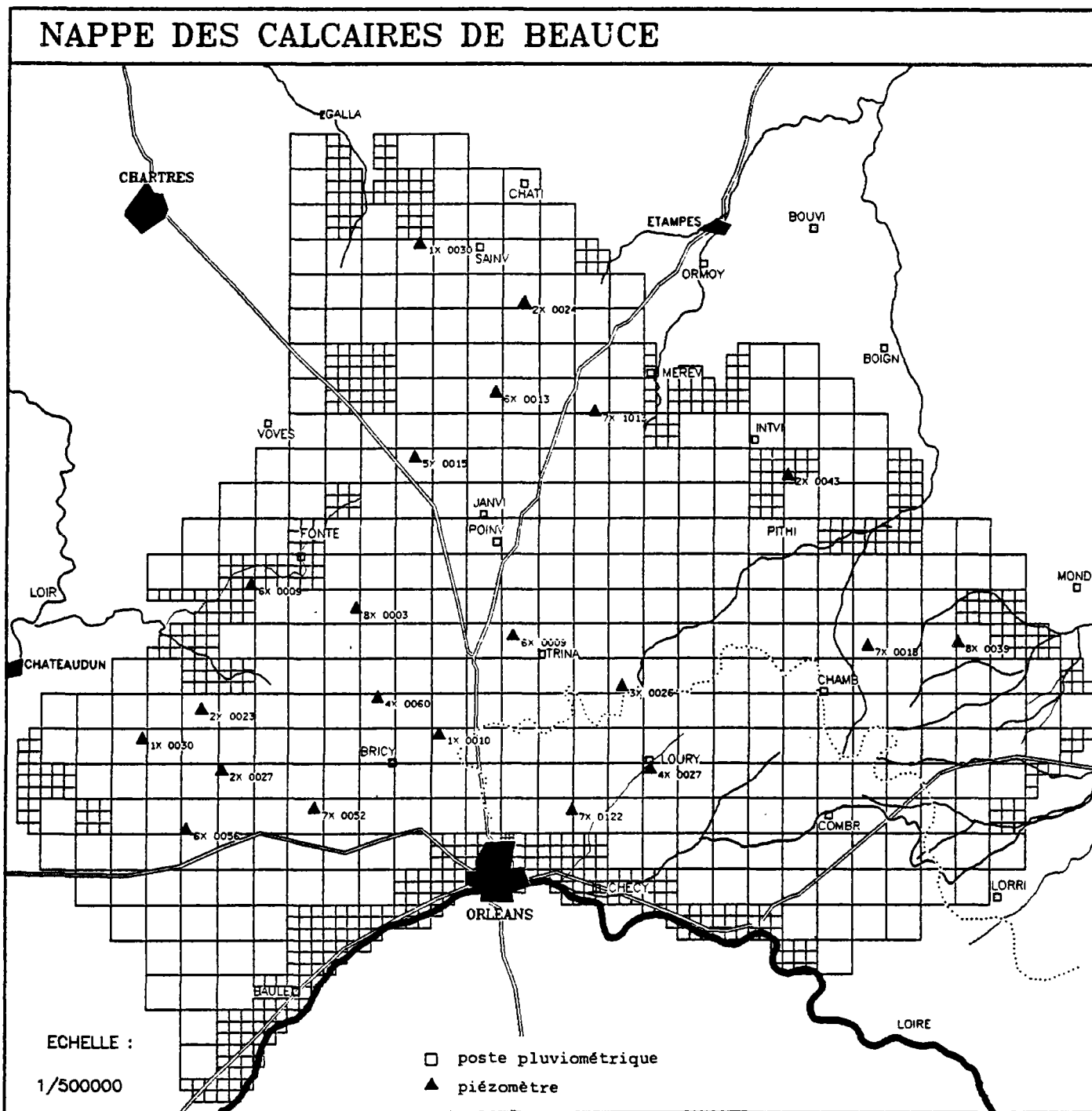


Figure 8 : Situation des piézomètres de calage

Il faut également noter que les charges hydrauliques sont calculées au centre des mailles et que les piézomètres de calage peuvent être excentrés (au plus à une distance  $a\sqrt{2}$  du centre, avec  $a$  le côté de la maille, soit 2 km environ pour une maille de 3 km de côté). La position excentrée d'un piézomètre dans une maille peut donc se traduire, si le couple piézomètre-centre de maille est orienté suivant la direction d'écoulement (cas le plus défavorable) par des différences de niveau non négligeable (par exemple, pour un gradient de 1 ‰ et une excentricité de 2 km, la différence entre le piézomètre et le centre de maille sera de 2 m).

### 2.2.2. Ajustement par zone de la recharge

La reconstitution des historiques piézométriques précédents a été obtenue en modifiant passage par passage, les valeurs de pluies efficaces calculées (cf 2.1.3.). On trouvera en annexe 3 le détail des valeurs retenues en dernier lieu pour chacun des semestres et pour chaque zone pluviométrique.

Le tableau 9 ci-dessous globalise ces résultats en présentant par zone les moyennes des pluies efficaces sur la période de 10 ans considérée et le pourcentage que celles-ci représentent par rapport aux moyennes des pluies sur la même période.

Zones	Moyenne des pluies sur la période 1975/1984 (mm)	Moyenne des pluies efficaces calculées avec une capacité de stockage superficielle de 100 mm	Moyenne des pluies efficaces après calage (mm)	Pluie efficace après calage en % des pluies
Z1	668	153	158	24 %
Z2	706	176	198	28 %
Z3	687	169	235	34 %
Z4	755	227	124	16 %
Z5	652	150	201	31 %
Z6	727	206	171	23,5 %

Tableau 9 : Pluies efficaces par zone obtenues après calage (moyenne sur 1975/1984)

Si l'on excepte la zone de la forêt d'Orléans (zone 4), c'est donc de 1/4 à 1/3 des pluies qui ont participé à l'alimentation de la nappe durant la période 1975-1984, soit une moyenne de 193 mm sur l'ensemble de la partie libre de la nappe (zone 4 exclue) pour 688 mm de pluie. Cette moyenne est un peu plus élevée que celle obtenue à l'aide d'un bilan global sur la période 1966/1968 et qui était de 177 mm pour une précipitation moyenne comparable : 689 mm (cf réf. 1).

### 2.2.3. cartes piézométriques

Elles permettent de visualiser le champ des charges hydrauliques calculées en chacune des mailles du modèle. Les cartes relatives aux années 1983 et 1984 sont présentées en figures 9 et 10 (avec une équidistance des courbes de 5 m). Elles sont dans leurs grandes lignes très semblables (inertie de la nappe). La seule différence sensible est imputable à la partie captive de la nappe qui, en 1983 (hautes eaux), se caractérise par l'émergence d'un dôme piézométrique important (130 mm d'infiltration efficace) se résorbant les semestres suivants (moins de 60 mm de pluie efficace).

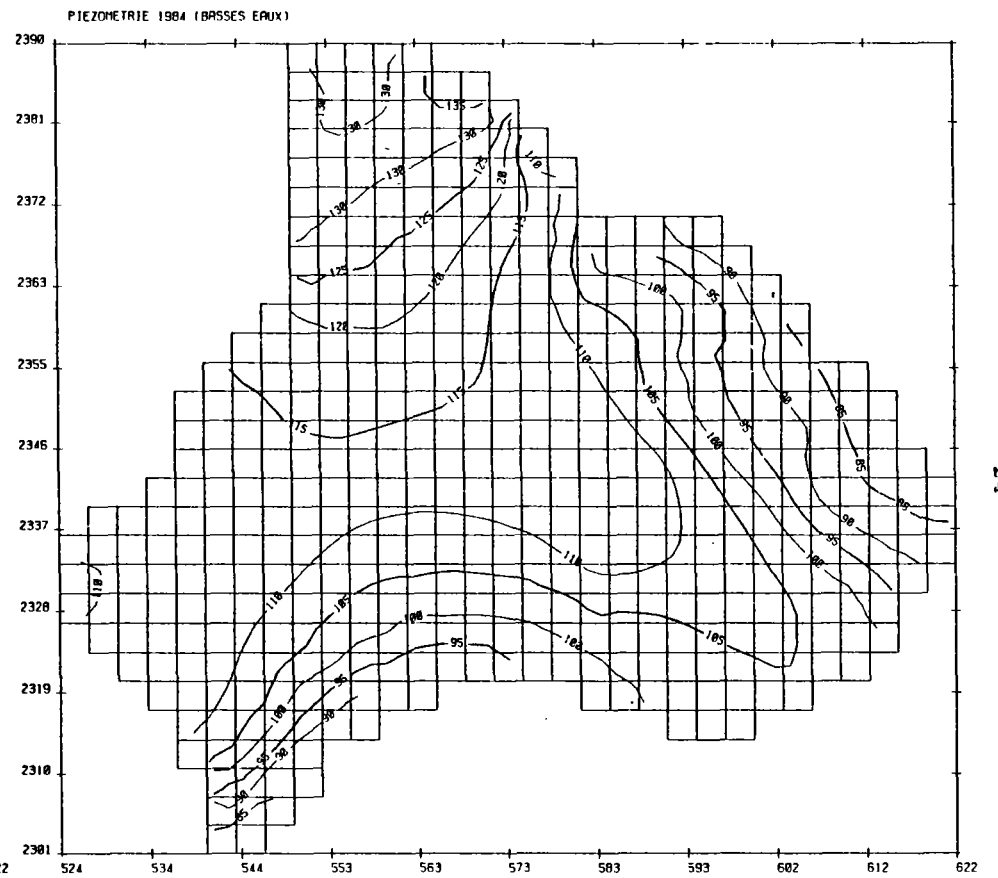
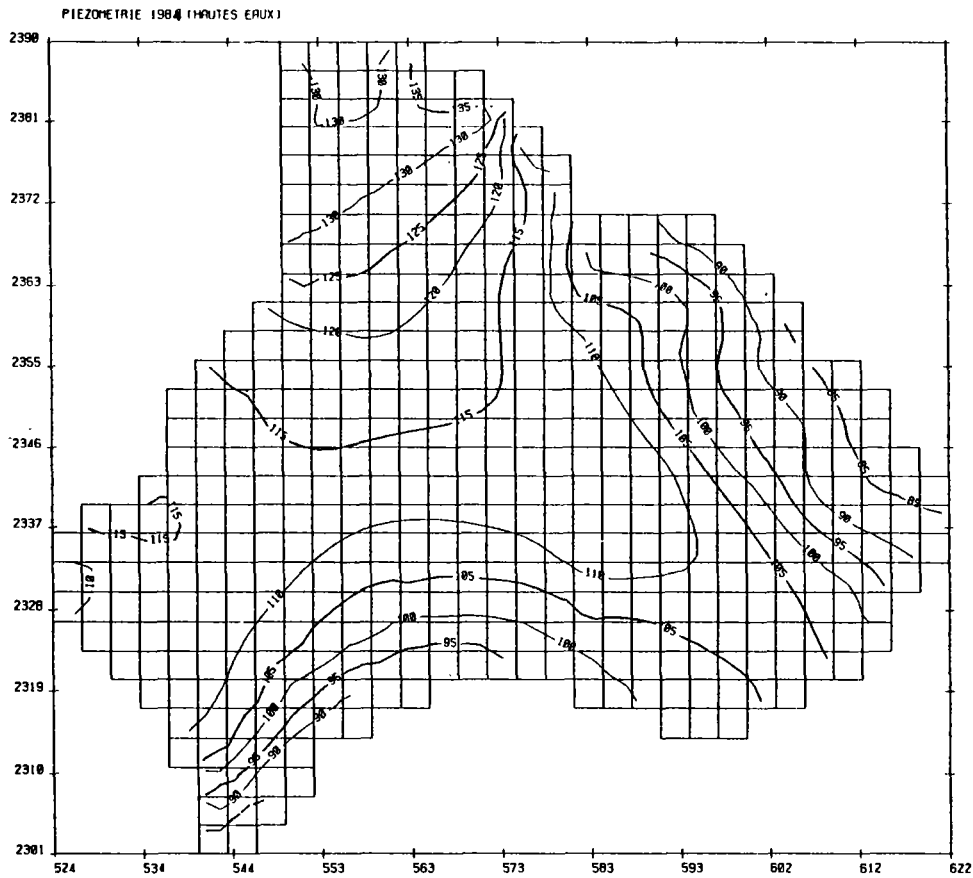


Figure 9 : piézométrie calculée en 1984 (hautes eaux et basses eaux)

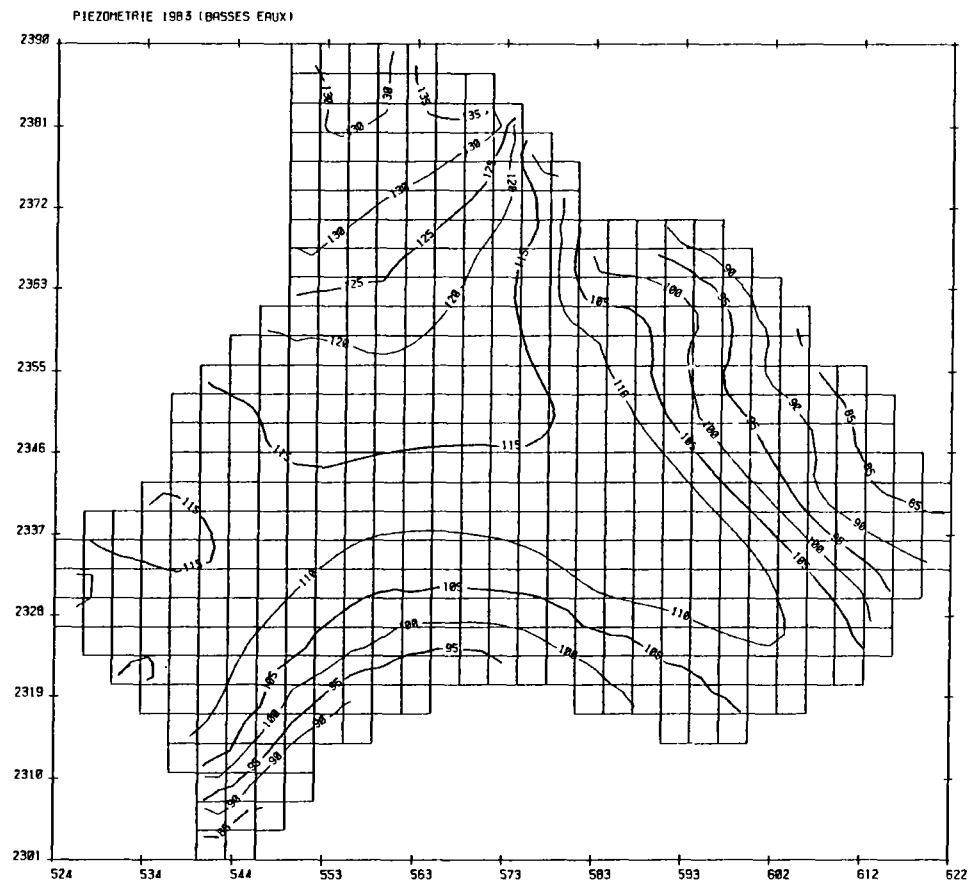
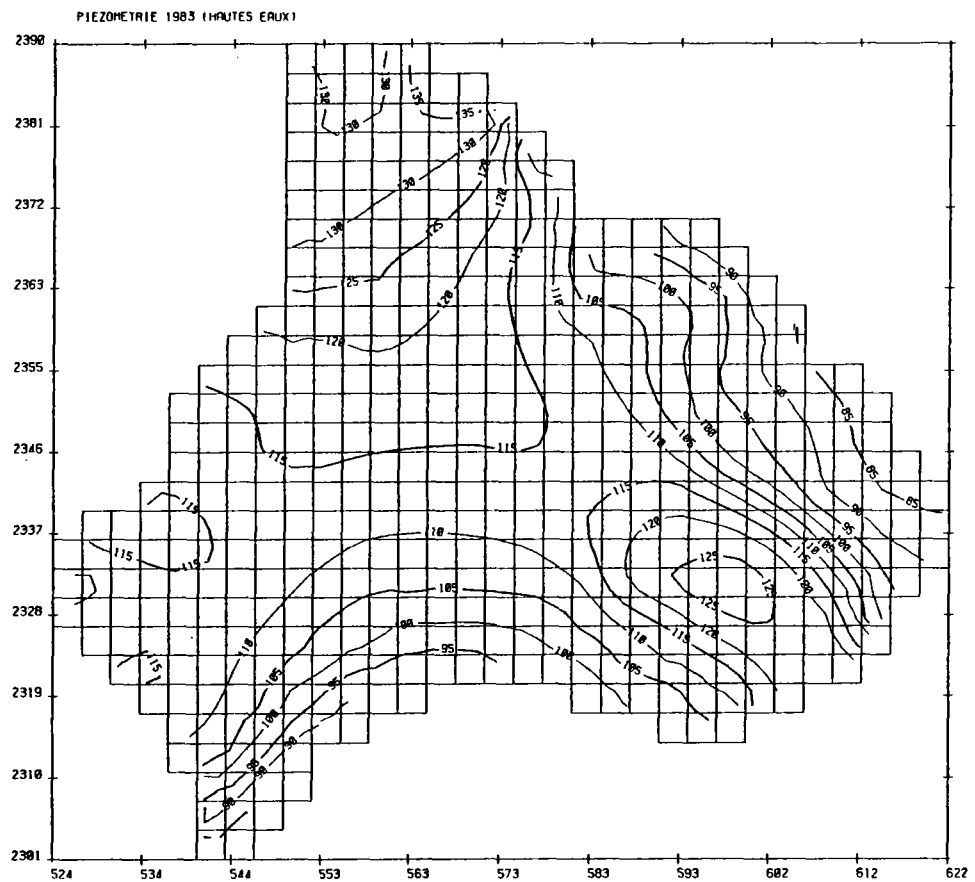


Figure 10 : piézométrie calculée en 1983 (hautes eaux et basses eaux)

#### 2.2.4. Champ de vitesses et lignes de courant (programme VIKING)

Le champ de vitesses calculé correspond à l'état piézométrique hautes eaux de 1984. Les charges hydrauliques correspondant à cet état ainsi que les perméabilités du modèle sont transmises au programme de calcul. Pour passer des vitesses de Darcy aux vitesses réelles, une porosité cinématique de 5 % a été affectée à chacune des mailles (la porosité cinématique s'obtient en interprétant des résultats de traçage ; en l'absence de tels résultats, l'hypothèse a été faite d'une porosité cinématique constante dans tout le milieu aquifère).

Les vitesses réelles moyennes calculées en chacune des mailles sont comprises entre 1 et  $320 \cdot 10^{-6}$  m/s (de 0.09 à 28 m/jour). L'intervalle de variation est donc très étendu mais la plupart des mailles (78 %) ont des vitesses contenues dans l'intervalle  $[10^{-5}, 10^{-4}]$  m/s avec une valeur moyenne de  $3,8 \cdot 10^{-5}$  m/s (3.3 m/jour).

Les vitesses dépassent rarement  $10^{-4}$  m/s (8 % des mailles).

Le champ de vitesses se caractérise donc par des contrastes assez forts et des valeurs faibles à très faibles.

La carte de la figure 11 présente le tracé de 40 lignes de courant calculées à partir du champ de vitesses précédent. Cette carte fait clairement apparaître le caractère divergent des écoulements, la subdivision de la nappe en deux grands bassins et le dôme piézométrique au niveau de la forêt d'Orléans.

Le bassin sud est drainé essentiellement par la Loire, le bassin nord par le chevelu hydrographique issu de la Forêt d'Orléans, l'Essonne, la Juine et la Voise.

A titre indicatif, une particule qui partirait de l'extrémité amont de la ligne de courant qui apparaît la plus longue sur la carte (dans le bassin sud) mettrait 35 ans pour parvenir à la Loire (distance parcourue : 5.1 km, vitesse moyenne : 4 m/jour).

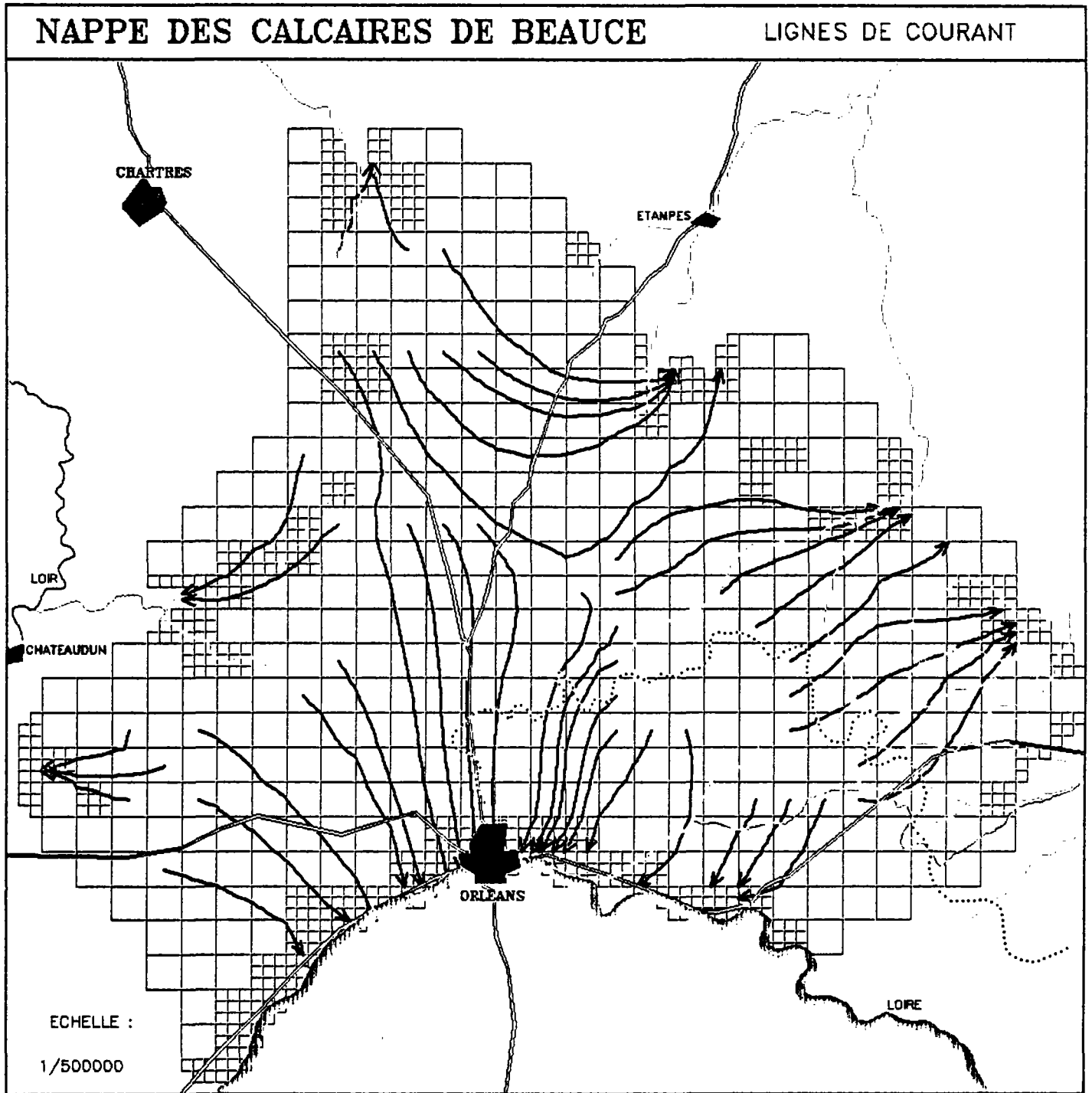


Figure 11 : Tracé des lignes de courant correspondant à l'état piézométrique hautes eaux de 1984

DEUXIEME PARTIE

MISE EN OEUVRE D'UN MODELE  
DE TRANSPORT DES NITRATES

## 1. CHOIX ET DESCRIPTION DU MODELE

### 1.1. Pourquoi un modèle à "cheminements aléatoires"

Classiquement, le transport d'éléments en solution dans un milieu poreux saturé est décrit par l'équation de dispersion-convection (cf. annexe 9); à cette équation peuvent être éventuellement adjoints des termes "source" ou "puits" pour prendre en compte des phénomènes susceptibles d'intervenir en cours de transport (adsorption, décroissance radioactive, échanges...).

Classiquement également, cette équation peut être résolue numériquement suivant un schéma aux différences finies (ou aux éléments finis) avec discrétisation simultanée des termes convectif et dispersif. Ce mode de résolution présente l'inconvénient d'engendrer des perturbations numériques : diffusion numérique et parfois oscillations des solutions (cf. annexe 9). Pour contrecarrer ces perturbations, éviter leur amplification, des pas de temps et d'espace adéquats doivent être choisis. Dans le cas d'un écoulement quelconque, bidimensionnel, le problème est complexe et le schéma de discrétisation à retenir sera fonction de l'orientation du maillage par rapport aux directions principales d'écoulement.

Les méthodes dites de "marche au hasard" ("à cheminements aléatoires") permettent de s'affranchir de ces difficultés (elles n'induisent pas de diffusion numérique).

La formalisation de cette approche est déjà ancienne mais l'application à des problèmes de transfert en milieux poreux est relativement récente (réf. 8, 9, 10).

### 1.2. Description générale des méthodes de "marche au hasard"

Le transport d'un élément en solution est simulé à l'aide de particules : chacune de ces particules, porteuse d'une certaine masse de l'élément considéré, migre d'abord sous l'effet de la convection, puis subit dans un deuxième temps un déplacement aléatoire pour représenter l'effet dispersif.

#### **Déplacement des particules**

Pour calculer le déplacement dû à la dispersion, on se donne la loi de probabilité des positions susceptibles d'être occupées par une particule quand on fait subir à cette particule de petits déplacements (pour simuler la dispersion) à partir de la position atteinte par convection. En général quand le nombre de "sauts" est suffisamment grand, on admet que cette loi de probabilité tend vers une loi normale de moyenne nulle et de variance proportionnelle à la dispersivité du milieu.

En prenant comme exemple un écoulement monodimensionnel de vitesse réelle  $u$ , le déplacement élémentaire d'une particule pendant un pas de temps  $\Delta t$  et à partir d'une position  $x(t)$  sera donné par :

$$dL = x(t + \Delta t) - x(t) = u \cdot \Delta t + N \sqrt{2\sigma_L \cdot u \cdot \Delta t}$$

-  $u\Delta t$  représente le déplacement par convection,

-  $N \cdot \sqrt{2\alpha_L \cdot u \cdot \Delta t}$  représente le déplacement supplémentaire (aléatoire) dû à la dispersion,  $\alpha_L$  désignant la dispersivité du milieu et  $N$  étant un nombre aléatoire obtenu à partir d'une distribution normale centrée-réduite et prenant ses valeurs dans un intervalle donné  $[-a, +a]$ .

-  $\sigma^2 = 2\alpha_L \cdot u \cdot \Delta t$  représente la variance de la distribution des positions de la particule autour de la position  $x = u \cdot \Delta t$ .

### Simulation des apports à la nappe

Si l'on connaît dans une maille la masse  $M$  de l'élément qui parvient à la nappe pendant un certain intervalle de temps  $\Delta t$ , des particules seront générées au hasard dans cette maille en nombre  $n$  tel que l'on ait :

$$M \Delta t = n \cdot m$$

$m$  étant la masse attribuée à une particule.

### Calcul des concentrations

La concentration dans une maille à un temps  $t$  est obtenue très simplement :

- . en sommant les particules situées dans la maille, ce qui permet de connaître la masse de substance contenue dans la maille, chaque particule portant une masse élémentaire  $m$ .
- . en calculant le volume d'eau de la maille, connaissant la cote du toit et du substratum.

$$C(t) = \frac{n(t) \cdot m}{w_c \cdot (H-S) \Delta x \Delta y}$$

$n(t)$  est le nombre de particules dans la maille à la date  $t$   
 $H$  et  $S$  sont les cotes du toit et du substratum  
 $w_c$  est la porosité cinématique  
 $\Delta x$  et  $\Delta y$  sont les cotés de la maille.

## 2. DONNEES NECESSAIRES AU CALAGE

### 2.1 Teneurs en nitrates : deux champs de concentration, 1981 et 1984

Toute simulation menée dans le temps nécessite un point de départ (une condition initiale) et, lorsqu'il y a incertitude sur les valeurs de certains paramètres, un ou plusieurs points de repère dans le temps pour assurer le calage du modèle.

Pour cette étude, deux champs de concentrations moyennes, relatives aux années 1981 et 1984, ont pu être constitués à partir des analyses faites en plus de 200 points pour la plupart des captages d'alimentation en eau potable échantillonnés régulièrement depuis quelques années par les D.D.A.S.S. du Loiret et de l'Eure-et-Loir.

"Une grande partie de ces analyses provient de la Banque de données du Bassin Loire-Bretagne : DDASS 45. Il s'agit des analyses effectuées entre 1978 et 1985 sur les AEP captant la nappe des calcaires dans le Loiret (environ 2.000 analyses) ; les analyses faites sur les captages situés en Eure-et-Loir, ont été directement communiquées par la DDASS concernée."

Une dizaine de points d'eau dont les teneurs en nitrates avaient été mesurées dans le cadre d'études menées par le Service Géologique Régional Centre ont été également pris en compte.

### Remarque

En raison d'un nombre de points analysés jugé insuffisant antérieurement à l'année 1981, il n'a pas été possible de constituer deux états de teneurs séparés par cinq ans au moins (ou mieux 10 ans) bien que cela eût été souhaitable pour dégager nettement une tendance évolutive et faciliter ainsi le calage.

#### 2.1.1. Localisation des points de mesures

Les cartes des figures 12 et 13 précisent la situation des points de mesures en 1981 (251 points) et 1984 (249 points). Sur ces cartes sont également reportées les valeurs moyennes calculées sur chacun des points en 1981 et 1984 (2 ou plus de 2 analyses par an pour de nombreux points).

Les points sont assez bien répartis à l'intérieur du domaine étudié. Ils sont par contre peu nombreux en limite Nord et Sud-Ouest.

#### 2.1.2. Caractérisation statistique globale

On se limite ici à un simple descriptif statique des deux champs de concentration constitués pour les besoins de l'étude. Pour une analyse plus détaillée des teneurs en nitrates de la nappe, on pourra se reporter à l'étude réalisée par l'Agence de Bassin Loire-Bretagne dans le département du Loiret (1984, réf. 11).

Le tableau 10 rassemble les valeurs de quelques paramètres statistiques élémentaires et les histogrammes de la figure 14 précisent l'allure des distributions des deux champs de valeurs.

	Nombre de points	Valeur minimale	Valeur maximale	Moyenne arithmétique (mg/l)	Ecart-type (mg/l)	Coefficient de variation
1981	247	0,1	92,0	30,4	19,0	0,68
1984	239	0,1	91,0	34,0	19,8	0,58
-----						
	Points communs aux 2 années					
1981		0,1	92,0	31,2	18,9	0,60
1984	232	0,1	91,0	33,9	20,0	0,59

Tableau 10 : paramètres statistiques globaux relatifs aux teneurs moyennes en nitrates en 1981 et 1984 (points aux teneurs supérieures à 100 mg/l exclus).

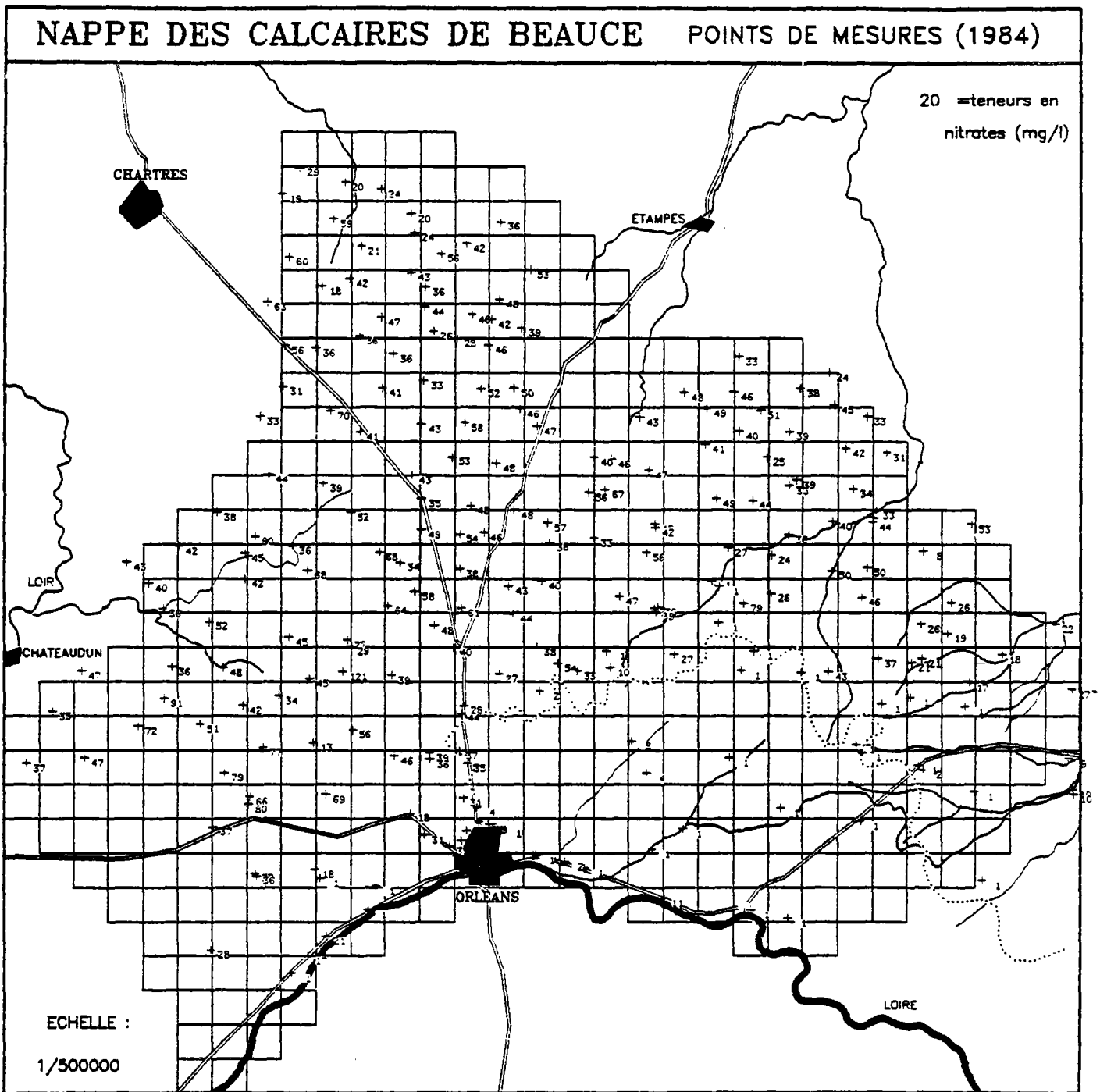


Figure 12 : localisation des points d'eau analysés en 1984

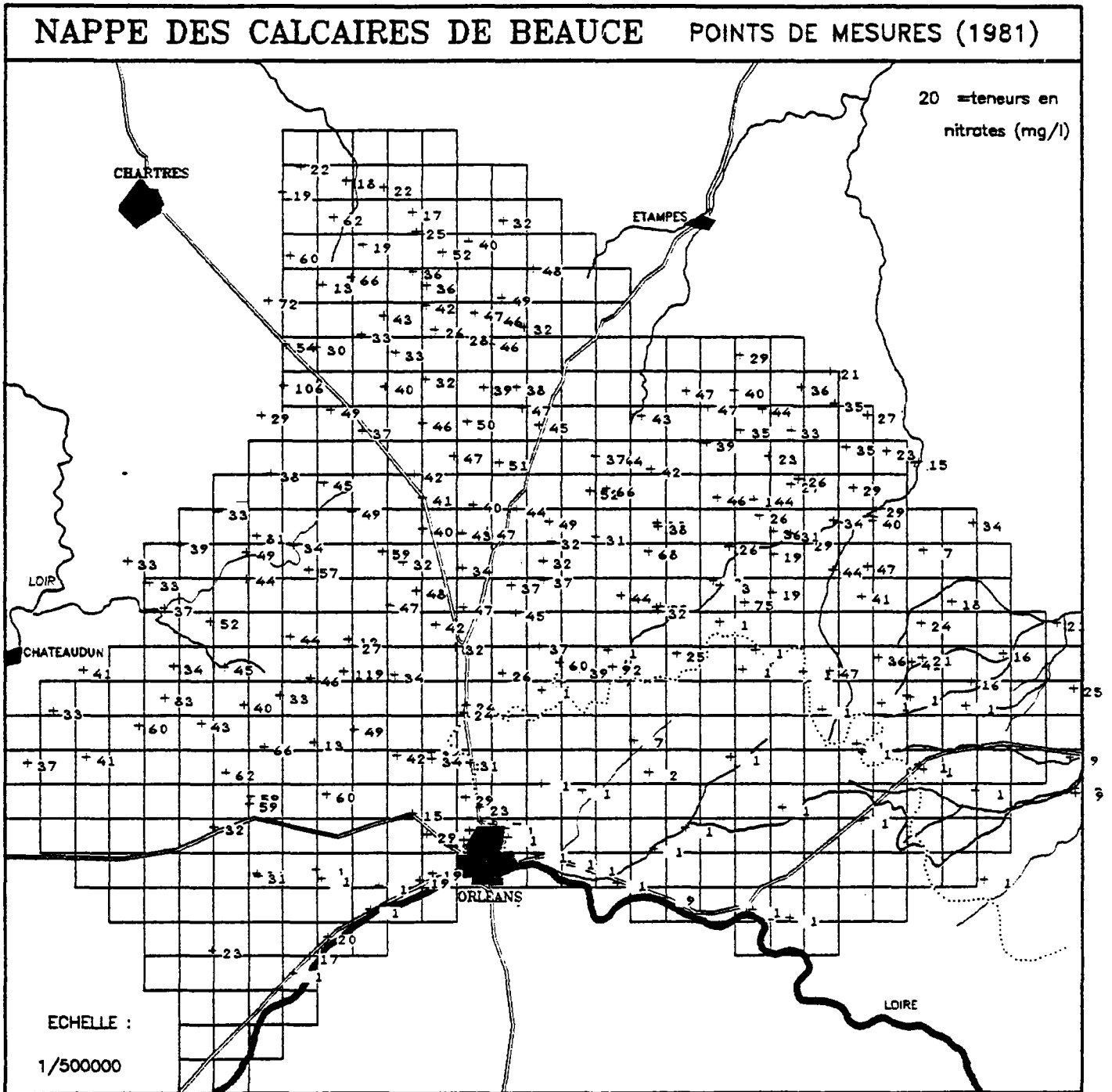


Figure 13 : localisation des points d'eau analysés en 1981

En 1981, la moyenne des teneurs calculée sur 247 points s'établissait à 30 mg/l avec un écart type assez fort de 19 mg/l. En 1984, la valeur moyenne calculée sur 239 points était de 34 mg/l et l'écart-type proche de 20 mg/l. L'augmentation des teneurs se manifeste donc déjà sensiblement sur cette courte période de temps.

### Remarques

Les points aux teneurs très nettement supérieures à 100 mg/l n'ont pas été pris en compte, soit 4 points en 1981 et 2 points en 1984.

En retenant uniquement les points communs aux deux années (232 points) on obtient des moyennes de 31,2 et 33,9 mg/l en 1981 et 1984 respectivement.

Afin de resserrer l'éventail des valeurs, le calcul des moyennes a été fait en éliminant les points aux teneurs inférieures à 5 mg/l (42 points en 1981 et 36 en 1984) situés pour la plupart sous la forêt d'Orléans). Les valeurs moyennes passent respectivement à 36,6 mg/l et 39,9 mg/l (tableau 11).

	Nombre de points	Valeur minimale (mg/l)	Valeur maximale (mg/l)	Moyenne arithmétique (mg/l)	Ecart-type (mg/l)	Coefficient de variation
1981	205	6,5	92,0	36,6	14,6	0,40
1982	203	8,0	91,0	39,9	15,1	0,38

Tableau 11 : paramètres statistiques globaux sur le sous-ensemble de points à teneurs comprises entre 5 et 100 mg/l.

Les histogrammes (fig. 14) fournissent une répartition en classes de teneurs. Ils sont de type bimodal, la classe [0 - 10] mg/l, assez bien représentée (près de 20 % des points) correspondant aux points situés sous la forêt d'Orléans. On constate également à partir de ces histogrammes l'évolution des teneurs qui s'est produite durant les 3 années considérées en particulier diminution de la classe [30 - 40] mg/l et augmentation de la classe [40 - 50] mg/l.

### **2.1.3. Cartographie sous forme d'isovaleurs**

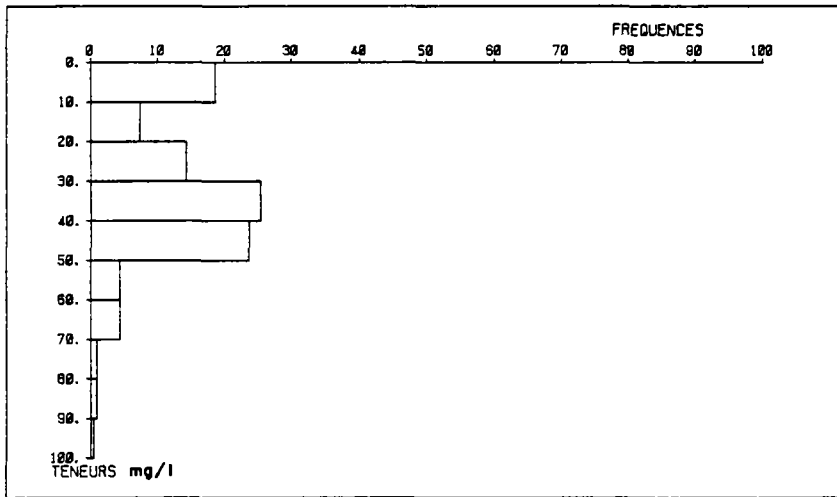
Afin de dégager d'éventuelles zonalités dans les deux champs de concentrations et mieux faire ressortir l'extension spatiale de la contamination nitrique une cartographie sous la forme d'isovaleurs a été réalisée à l'aide du logiciel UNIRAS (UNIVERSAL RASTER SYSTEM)\*.

Les cartes obtenues par interpolation (de type déterministe avec combinaison d'interpolations linéaires, quadratiques et pondérations en fonction de la distance) sont présentées en figures 15 et 16.

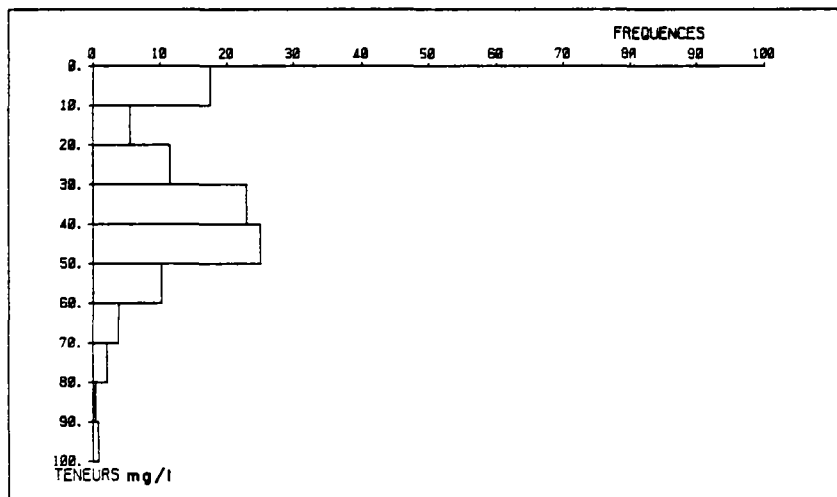
D'emblée, il apparaît que la partie captive de la nappe échappe à la pollution, les teneurs restant inférieures à 5 mg/l.

Pratiquement sans transition, on passe ensuite à des teneurs comprises entre 25 et 40 mg/l.

-----  
\* RASPAK, 1982, User Manual, European Software Contractors (Danemark)



(a)



(b)

Figure 14 - Histogrammes des teneurs en nitrates en 1981 (a) et en 1984 (b)

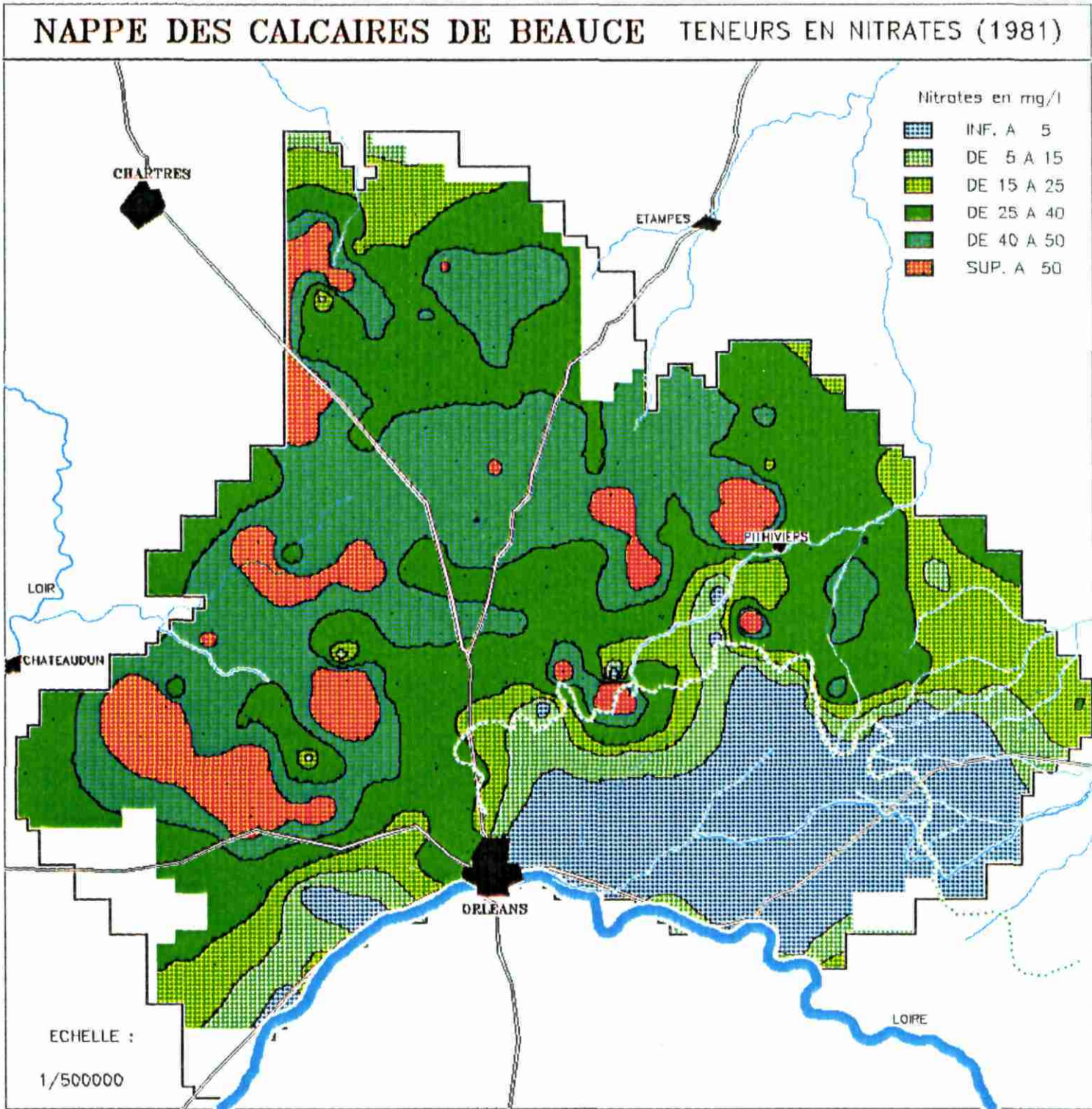


Figure 15 : Carte des teneurs en nitrates en 1981

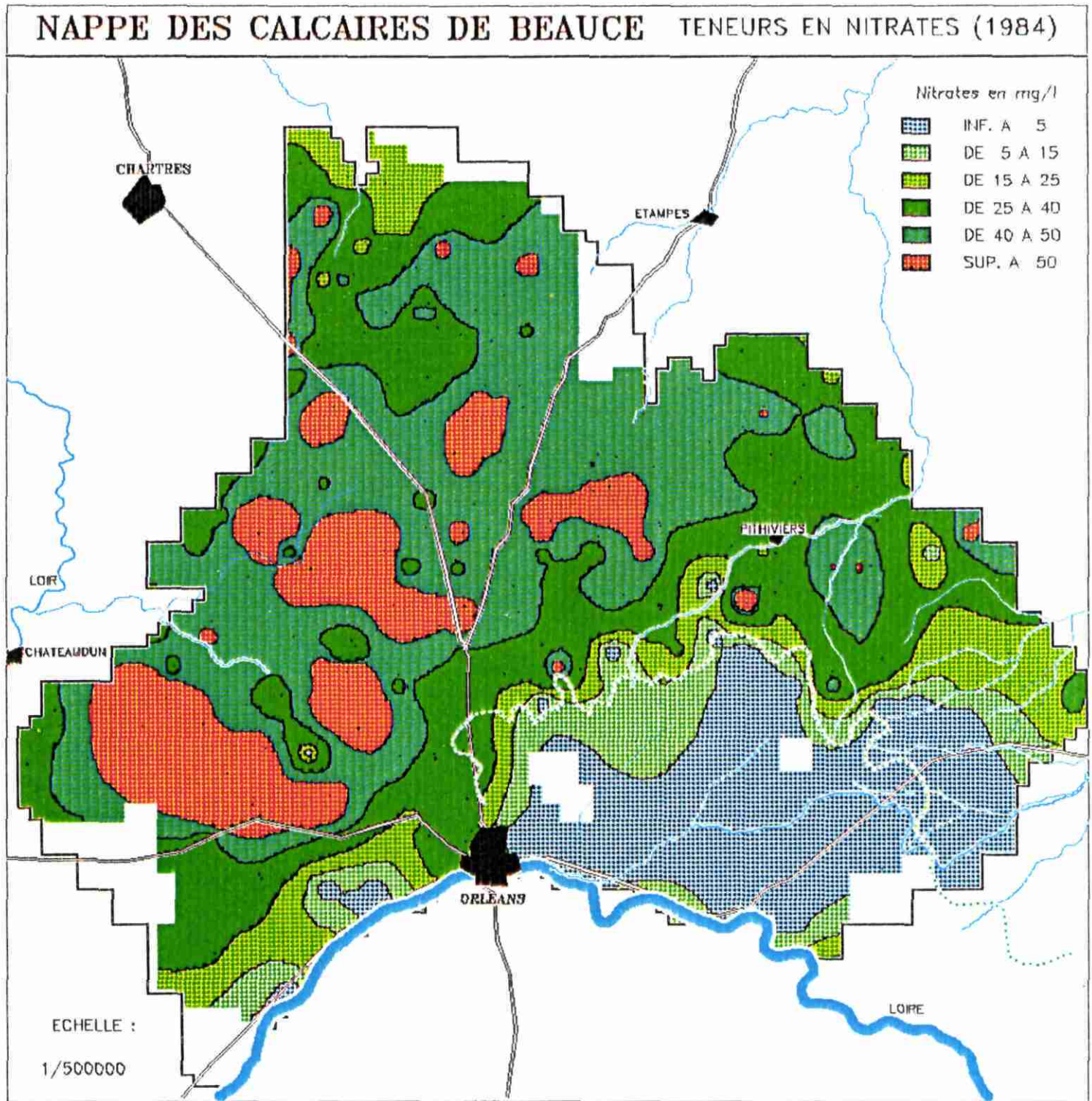


Figure .16 : Carte des teneurs en nitrates en 1984

La comparaison des deux cartes (.1981 et .1984) permet de noter l'"avancée" de la plage des teneurs [40 - 50] mg/l (en direction du Nord d'une part, du Sud-Est d'autre part) et l'extension des zones aux teneurs supérieures à 50 mg/l, à l'Est de Chateaudun notamment.

### Remarques

- 1/ En 1981, le nombre de points aux teneurs supérieures à 50 mg/l représentait 11 % de l'échantillon (26 points) ; en 1984 le pourcentage était de 17 % (41 points).
- 2/ On notera sur les cartes de nombreuses petites inclusions correspondant à autant de "singularités" des champs de valeurs (des ruptures de continuité). On peut trouver :
  - des effets de "trous" qui se manifestent par la prise en compte d'un point dont la teneur est beaucoup plus faible que les teneurs des points environnants. C'est le cas par exemple d'un point situé sur la commune de Moinville : 13 mg/l en 1981 dans un environnement à plus de 25 mg/l et d'un point de la commune de Loigny : 12 mg/l en 1981 alors que les teneurs du voisinage sont beaucoup plus fortes.
  - des effets de "pépites" qui se traduisent par des tâches isolées de fortes concentrations alors que le voisinage est moins touché par la pollution (un point au Sud de Pithiviers par exemple, à 75 mg/l en 1981, 79 mg/l en 1984, environné de points à teneurs inférieures à 25 mg/l).

## 2.2. Flux massiques azotés parvenant à la nappe

### 2.2.1. Problématique. Démarche adoptée

D'une façon générale, à l'échelle régionale, l'enrichissement en nitrates des eaux d'une nappe est la résultante des contributions de nombreuses sources de matières azotées :

- . minéralisation de la matière organique des sols,
- . engrais azotés non consommés par les cultures ou entraînés hors de portée du système racinaire à l'occasion de fortes pluies,
- . eaux usées domestiques, en l'absence de station d'épuration,
- . eaux des réseaux de drainage, souvent dirigés, en Beauce, vers des puits absorbants.

Si les rejets ponctuels peuvent expliquer les fortes teneurs susceptibles d'être observées très localement, il est néanmoins indéniable dans une région de céréaliculture intensive comme la Beauce, que les deux premières sources citées sont à l'origine de la pollution diffuse constatée.

Des multiples études qui ont été consacrées au devenir des engrais azotés dans les sols (en particulier, cf. réf. 13), il ressort que la participation à la charge polluante des eaux de drainage des engrais directement épandus est, au cours d'une année de pluviométrie "normale" minime. La principale source émettrice d'azote nitrique est en fait un pool de matière organique siège d'une activité microbienne minéralisatrice stimulée par les apports d'engrais annuels. Ce phénomène de minéralisation est complexe sous la dépendance des conditions climatiques et des caractéristiques physiques du sol (pH, température, teneur en eau, taux de calcaire et d'argile...). En conditions optimales, la quantité d'azote nitrique qui ainsi formée peut, au début de l'automne, être importante et elle sera d'autant plus facilement lessivable que la couverture des sols en automne-hiver sera faible (ce qui est souvent le cas dans un système de céréaliculture où les sols sont laissés nus en hiver).

L'échelle régionale impliquant généralement un large éventail de situations : mosaïque de sols et de cultures, diversité des pratiques culturales s'échelonnant tout au long d'une saison agricole, l'entreprise qui consisterait à estimer (à l'aide d'un bilan de type "entrées-sorties" par exemple), en chacune des mailles d'un modèle, un stock d'azote nitrique **potentiellement** lessivable serait non seulement ardue (enquête agricole exhaustive) mais aussi illusoire (précision du résultat ?) en raison de la diversité et de la complexité des facteurs intervenant.

De plus, même si l'on suppose qu'il est possible de parvenir à une assez bonne connaissance, une année donnée, des flux nitriques quittant les couches superficielles du sol, on demeurera dans l'incertitude quant à la conservation de ces flux au cours du transfert dans la zone non saturée, incertitude d'autant plus grande que le milieu traversé sera hétérogène (intercalation argileuses par exemple).

Enfin, lorsque la nappe est profonde et que les vitesses de transfert dans la zone non saturée sont faibles, il est à peu près certain que les quantités d'azote lessivées dans l'année ne parviendront pas cette même année à la nappe (sauf peut-être une fraction en cas de fissurations importantes). Il faudrait alors en principe disposer d'un historique cultural (par maille) et d'une fonction de transfert (au sens large).

En définitive, une approche simplifiée a été choisie. Elle repose :

- . d'une part sur le fait que l'on dispose de deux champs de concentration et qu'il est alors théoriquement possible, **si tous les paramètres de transfert sont par ailleurs connus**, d'obtenir **par calage** les flux moyens annuels qui ont engendré le deuxième champ de teneurs,
- . d'autre part, sur une campagne de mesures menées de 1976 à 1979 dans une parcelle drainée située sur la commune de Chaussy (à 30 km au Nord d'Orléans), qui a permis de préciser un certain nombre de points parmi lesquels les pertes d'azote par drainage évaluées à une vingtaine de kg au cours des années hydrologiques 1977-1978 et 1978-1979 (réf. 14).

Par suite, on a considéré qu'une maille occupée en totalité par une culture annuelle forte consommatrice d'engrais (blés, betteraves, maïs en particulier) pouvait émettre en moyenne annuelle 20 kg d'azote N/ha.

Considérant ensuite, pour s'affranchir des temps de transfert que le système cultural avait peu varié en Beauce durant les 10 dernières années, on a admis que 20 kg d'azote parvenait aussi à la nappe au droit d'une telle maille.

Enfin, sur tout le maillage ce chiffre a été pondéré par le taux d'occupation dans les mailles des cultures annuelles.

### 2.2.2. Occupation du sol

L'augmentation des teneurs en nitrates dans la nappe durant ces vingt dernières années résulte de la mise en place d'un système de cultures intensif caractérisé par la très faible part des surfaces fouragères et la prédominance des céréales. Les tableaux 12 et 13 présentent, pour deux régions agricoles (Beauce de Patay et Grande Beauce), quelques chiffres issus des R.G.A. de 1955 et 1980 permettant de juger de l'évolution du système de cultures en 25 ans. Ainsi, dans la Beauce de Patay, blé, orge, et maïs occupent 90 % de la S.A.U. (contre 60 % en 1955) et dans le Grande Beauce 78 % (contre 57 % en 1955).

Durant cette période des sols de moins en moins profonds ont été mis en valeur, affectés notamment à la culture de maïs qui occupait en 1980 29 % de la superficie agricole en Beauce de Patay (moins de 1 % en 1955).

Sur l'ensemble du domaine étudié, l'occupation du sol a pu être caractérisé à l'aide de données :

- . extraites du dernier Recensement Général de l'Agriculture (R.G.A. 1979/1980 : inventaires communaux).
- . transmises par le capteur Thematic Mapper du satellite Landsat (scène 199/27 du 17 Juin 1984).

### Exploitation des données fournies par Landsat 5

Le grand intérêt de cette exploitation réside dans la possibilité de superposer à l'image fournie par le satellite le maillage du domaine étudié et donc de caractériser directement chacune des mailles du modèle sur le plan cultural.

Cette procédure a été mise en oeuvre à partir de la scène 199/27 qui couvre une bande de 30 km de large entre Orgères en Beauce à l'Ouest et Beaumont du Gâtinais, à l'Est, territoire représentant environ 40 % du maillage. La figure 17 présente une partie de l'image satellite obtenue par composition des réponses de la zone couverte dans 4 bandes spectrales (deux canaux du visible, un du proche infra-rouge et un autre du moyen infra-rouge).

Note sur la méthode : on trouvera dans la référence 15 une description détaillée de la méthode d'analyse d'une "image satellite" que l'on veut interpréter en termes d'occupation du sol. La démarche à suivre sera seule évoquée ici.

Beauce de Patay comprenant les communes de ROUVRAY STE CROIX, COINCES, GERMIGNY, ST SIGISMOND, TOURNOISIS, ROZIERES, HUISSEAU, COULMIERS, EPIED et CHARSONVILLE

	Fourrages	Blés	Orge	Maïs	Betteraves et pommes de terre
R. G. A. 1955	29,7	29,4	31,0	0,1	8,9
R. G. A. 1980	2,7	48,5	12,9	28,9	1,9

Tableau 12 : occupation du sol en Beauce de Patay, en % de la S.A.U. (Superficie Agricole Utilisée).

Grande Beauce comprenant les communes de RUAN, VILLEREAU, NEUVILLE, BOUGY, TREILLAY, OUTARVILLE, FARONVILLE, ST PERAVY EPREUX, ALLAINVILLE, AUTRY, PANNECIERES, THIGNONVILLE, LEOUVILLE, CHARMONT, AUDEVILLE, CHATILLON LE ROI, BOUZONVILLE, RAMOULU.

	Fourrages	Blés	orge	Maïs	Betteraves et pommes de terre
R. G. A. 1955	23,1	27,9	29,2	0,2	18,5
R. G. A. 1980	3,5	39,6	21,8	12,2	15,1

Tableau 13 : occupation du sol en Grande Beauce, en % de la S.A.U. (Superficie Agricole Utilisée)

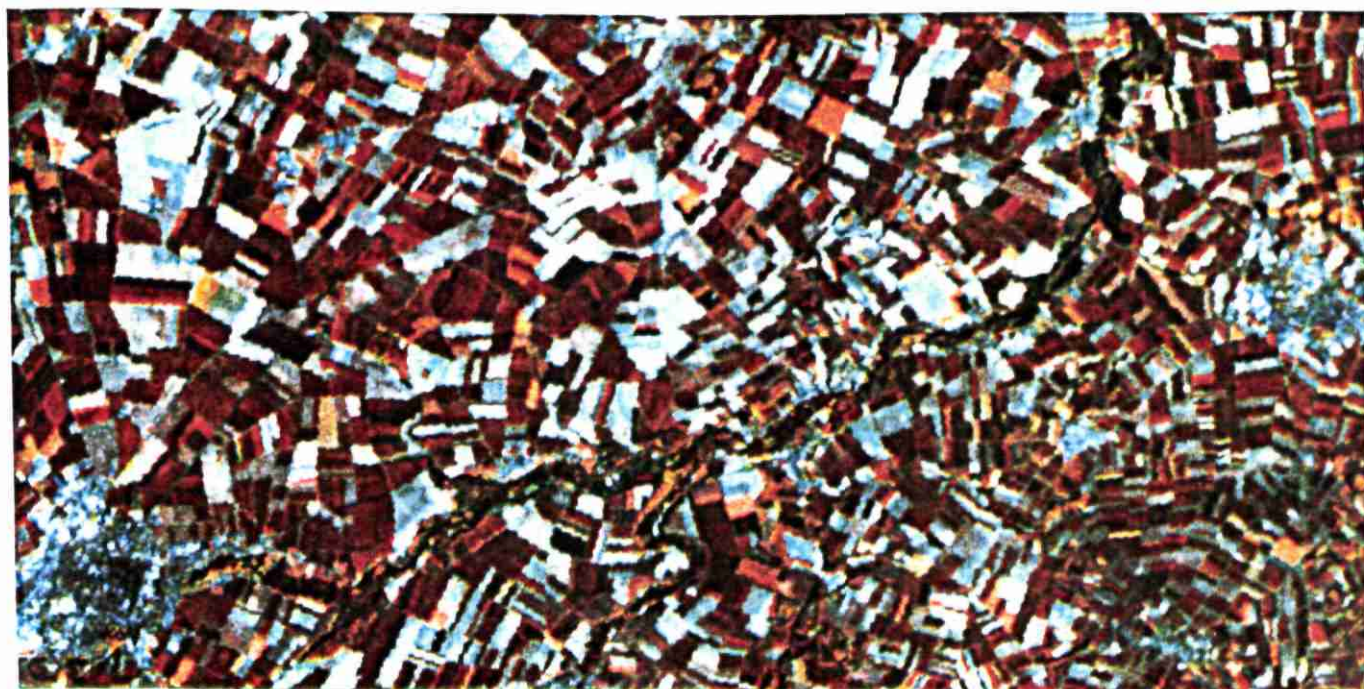
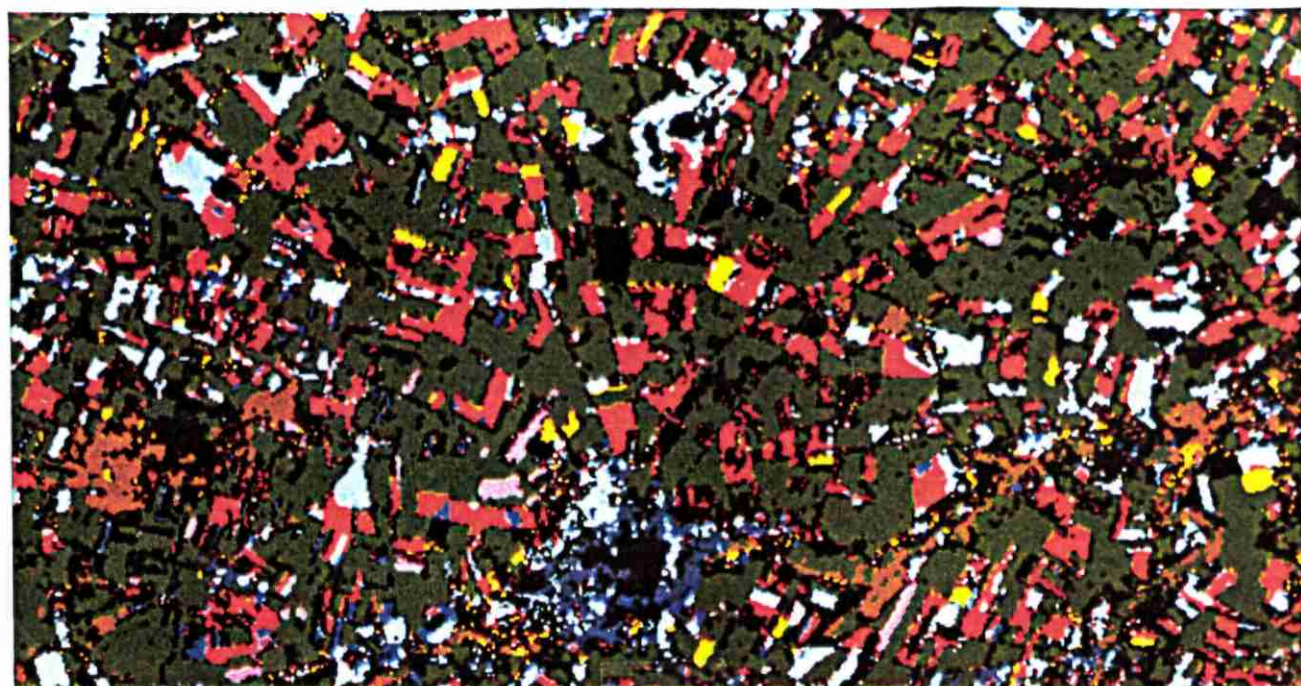


Figure 17 : un extrait de la scène 199/27 du 17/06/84 transmise par le capteur Thematic Mapper de Landsat 5



**CEREALES** **BETTERAVES** **MAIS**

Figure 18 : Image "classée" obtenue après traitement de la scène 199/27 et correspondant à l'extrait ci-dessus de cette scène.

Le décodage de l'image nécessite la sélection préalable d'un certain nombre de parcelles de référence. Le choix s'effectue en fonction de la couleur des parcelles en faisant défiler l'image sur une console graphique. A cette phase succède une enquête sur le terrain pour identifier sur les parcelles sélectionnées, les cultures en place au moment de la prise de vues. Des classes d'occupation du sol sont alors constituées a priori.

Un traitement statistique est ensuite réalisé sur les pixels inclus dans les parcelles de référence (qui ont été soigneusement délimitées sur console graphique au cours de la phase de sélection). L'aboutissement de ce traitement est une matrice, dite matrice de confusion, qui permet d'examiner la séparabilité des différentes classes d'occupation du sol, c'est-à-dire de savoir dans quelle mesure ces classes sont bien individualisées (tableau 14). Compte tenu des résultats fournis par cette matrice ont été retenues en définitive les 9 classes suivantes (sur 15 classes initialement) : céréales, maïs, betteraves, petits-pois, colza, cultures diverses, sols nus, forêts, agglomérations.

L'image est ensuite traitée en totalité et les pixels qui la constituent sont rangés automatiquement dans l'une ou l'autre des 9 classes ci-dessus. On obtient une "image résultat" en attribuant à chaque classe une couleur particulière (figure 18).

Parallèlement, on obtient pour chaque maille incluse dans la zone couverte, le pourcentage des différentes classes d'occupation du sol dans cette maille (figure 19).

### 2.2.3. Calcul a priori des quantités d'azote lessivables

Ces quantités, exprimées en kg/ha/an d'azote N ont été calculées conformément à la méthode décrite en 2.2.1 et compte tenu de l'occupation du sol dans les mailles. Le secteur de la forêt d'Orléans a été exclu du calcul. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 15.

On remarquera la faible variabilité spatiale des quantités calculées, ce qui s'explique par l'homogénéité culturelle de la Beauce. Les valeurs sont néanmoins plus fortes dans le quart Sud-Ouest du domaine, de 16 à 19 kg/ha/an, tandis qu'à l'Est les valeurs sont comprises entre 8 et 13 kg/ha/an.

#### Remarques

L'occupation du sol, dans les mailles non couvertes par la photo satellite, a été définie à l'aide d'un travail cartographique utilisant les résultats communaux du dernier recensement général de l'agriculture.

Rappelons que les quantités d'azote calculées ci-dessus et affichées dans le tableau 15 sont des quantités indicatives qui seront utilisées pour initialiser le processus de calage.

	TOT	N.C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
CLASSE 1	896.	2.	93.	70.	54.	.	.	.	69.	.	.	.	.	.	.	14.	.
CLASSE 2	776.	3.	94.	58.	41.	.	.	.	55.	.	.	.	.	.	.	9.	.
CLASSE 3	321.	20.	75.	55.	71.	.	.	.	27.	.	.	.	.	.	.	10.	.
CLASSE 4	577.	15.	.	.	77.	70.	.	.	.	.	1.	.	.	.	1.	.	.
CLASSE 5	564.	14.	.	.	63.	84.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
CLASSE 6	63.	6.	.	.	.	.	.	94.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
CLASSE 7	270.	10.	.	.	.	.	.	.	90.	.	.	.	.	.	.	.	.
CLASSE 8	399.	12.	.	.	1.	.	.	.	1.	87.	.	.	.	.	.	.	.
CLASSE 9	598.	20.	.	.	.	3.	3.	.	.	.	69.	13.	1.	.	4.	.	.
CLASSE 10	645.	18.	.	.	.	20.	5.	.	.	.	30.	56.	.	.	1.	.	.
CLASSE 11	18.	6.	.	.	.	.	.	.	.	.	28.	.	94.	.	.	.	.
CLASSE 12	25.	4.	.	.	.	24.	.	.	.	.	.	.	.	96.	.	.	.
CLASSE 13	187.	5.	1.	.	1.	.	.	.	1.	.	.	.	.	.	92.	2.	.
CLASSE 14	85.	22.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	78.	.
CLASSE 15	376.	10.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	90.

Tableau 14 : matrice de confusion

CLASSE 1 CEREALES A PAILLE  
 CLASSE 2 = 1  
 CLASSE 3 = 1  
 CLASSE 4 MAIS  
 CLASSE 5 = 4  
 CLASSE 6 PETITS POIS  
 CLASSE 7 CEREALES A PAILLE COMPLEMENT  
 CLASSE 8 COLZA  
 CLASSE 9 BETTERAVE  
 CLASSE 10 = 9  
 CLASSE 11 TOURNESOL  
 CLASSE 12 LUZERNE  
 CLASSE 13 SOLS NUS SOMBRES  
 CLASSE 14 FORETS  
 CLASSE 15 AGGLOMERATIONS

TOT = nombre total de pixels inclus dans les parcelles de référence.

NC = nombre de pixels non classés au sein de ces parcelles.

1, 2, ...i = dans la classe i est indiqué le pourcentage de pixels attribué à une classe numérotée j.

On remarquera en particulier que les classes 1, 2, 3 et 7 (céréales) sont très confondues. Elles ont donc été par la suite regroupées pour former une seule classe.

```

328
** HIST183FEB08** 07-MAY-84 NBIT= 8 LINE1= 456 SAMP1= 1326 INPUT FILE: EROTOTAL.PIC
INPUT FILE: 1 BIT TYPE: B EROTOTAL.PIC
(SL:SS:NL:NS) 456, 1326, 105, 105 IMAGE (NL:NS) 1000, 2700
HISTOGRAM: NUMBER OF POINTS = 11025. NLINES= 105 NSAMPS= 105

WITHOUT ZERO DENSITY: MEAN = 2.16 STANDARD DEVIATION = 2.05 COEF. SKEW = -0.566
WITH ZERO DENSITY: MEAN = 1.69 STANDARD DEVIATION = 2.02 COEF. SKEW = -0.341

DN PERCENT CUM.Z FREQ. VOL.Z VOLUME= 18606.
0 21.859 0.00 2410.*****
1 70.470 70.47 6071.*****
2 4.225 74.70 364.*****
3 1.579 76.27 136.***
4 9.182 85.46 791.*****
5 0.221 85.68 19.
6 7.580 93.26 653.*****
7 5.749 99.02 497.*****
8 0.151 99.18 13.
9 0.824 100.00 71.*
*** END OF PROCESSING ***
    
```

Figure 19 : exemple de résultats fournis par le décodage de l'image satellite : pourcentage de 9 classes d'occupation du sol dans une maille.



### **3. CALAGE DU MODELE ET RESULTATS**

Le choix a été fait de procéder aux simulations du transport des nitrates à régime hydraulique constant (l'inertie de la nappe est telle que les gradients hydrauliques et donc les vitesses de déplacement des particules seraient peu affectés par des fluctuations pluviométriques d'un pas de simulation au suivant). L'état piézométrique retenu est celui des hautes eaux de 1984.

Pour le calcul des vitesses de transport, il faut également disposer, en chaque maille, de la perméabilité et de la porosité cinématique ; pour cette dernière une valeur de 5 %, constante sur tout le domaine, a été retenue (cf. première partie 2.2.4.).

Enfin, les cotes du toit de la nappe (qui se confondent avec les charges hydrauliques quand la nappe est libre) et celles du substratum sont nécessaires aux calculs des concentrations (leur différence, multipliée par la porosité, définit le volume de dilution).

Un maillage d'ordre 1, issu du regroupement des mailles d'ordre 2 et 3 du modèle hydrodynamique, a été utilisé (soient 478 mailles de 3.162 km de côté).

#### **Remarque**

Dans le cas d'une maille qui était subdivisée (ordre 2 ou 3), la valeur du paramètre affectée à la maille d'ordre 1 résultante est une moyenne arithmétique des valeurs des mailles d'ordre 2 ou 3 qui la constituait.

#### **3.1. Krigeage des champs de concentrations**

Le calage nécessite deux champs de concentrations au moins. Les cartes des figures 15 et 16 commentées ci-dessus (cf. 2.1.3.) font apparaître les "irrégularités" des champs de valeurs étudiés, ce qui se traduit au niveau de la représentation par de nombreuses inclusions correspondant à des teneurs ou beaucoup plus fortes ou beaucoup plus faibles que celles du voisinage des points concernés. Une telle représentation peut fort bien convenir si l'on souhaite faire ressortir l'hétérogénéité d'un champ de valeurs. Par contre, pour une modélisation, il est plus pratique de disposer d'une carte "lissée" que l'on essaiera d'abord de restituer au mieux.

C'est la raison pour laquelle une interpolation par krigeage a été réalisée en prenant comme dimension de maille de calcul la dimension des mailles du modèle, soit 3.162 km. Outre la carte des isovaleurs, on obtient les valeurs krigées au centre de chacune des mailles.

Les cartes krigées (figures 20 et 21) ont été construites en prenant un rayon d'interpolation de 10 km et en fixant à 8 le nombre minimum de points à prendre en compte (cf. annexe 8). Elles apparaissent bien plus lissées que les cartes des figures 15 et 16 et ne restituent que les grands traits du phénomène de pollution ; leur comparaison permet de mettre nettement en évidence la progression de la plage de teneurs (40-50) mg/l et l'extension de la zone de teneurs supérieures à 50 mg/l entre Chateaudun et Orléans.

Les valeurs affectées aux mailles sont précisées dans les tableaux 16 et 17 ci-contre. Les caractéristiques statistiques des champs de valeurs krigées sont rassemblées dans le tableau 18 :

Année	Nombre de points	Valeur mini (mg/l)	Valeur maxi (mg/l)	Moyenne arith. (mg/l)	Ecart-type (mg/l)	Coefficient de variation
1981	464	0,1	56,2	28,7	15,9	0,55
1984	464	0,1	69,3	31,8	17,1	0,54

tableau 18 : paramètres statistiques globaux des champs de teneurs en nitrates krigées.

Si l'on compare ce tableau au tableau 10 (cf. 2.1.2.), on constate que les valeurs maximales observées en 1981 et 1984 (supérieures à 90 mg/l) ne sont pas restituées, les valeurs maximales krigées étant respectivement de 56 mg/l et 69 mg/l.

Quant aux valeurs moyennes (calculées sur 464 points krigés), elles sont à peu près identiques à celles du tableau 10 : 29 mg/l en 1981, contre 30 mg/l et 32 mg/l en 1984, contre 34 mg/l.

Les singularités des champs de teneurs observées sont donc estompées, les cartes krigées ne laissant transparaître que les tendances "en grand" du phénomène.

### 3.2. Calage et résultats

#### 3.2.1. Domaine modélisé et carte de référence

La partie captive de la nappe, s'étendant principalement sous la forêt d'Orléans, a été exclue de la modélisation : elle correspond à une zone bien individualisée, non seulement sur le plan structural mais aussi sur le plan des teneurs en nitrates (qui sont en totale discontinuité avec celles de la partie libre comme le montre les différentes cartes isovaleurs établies).

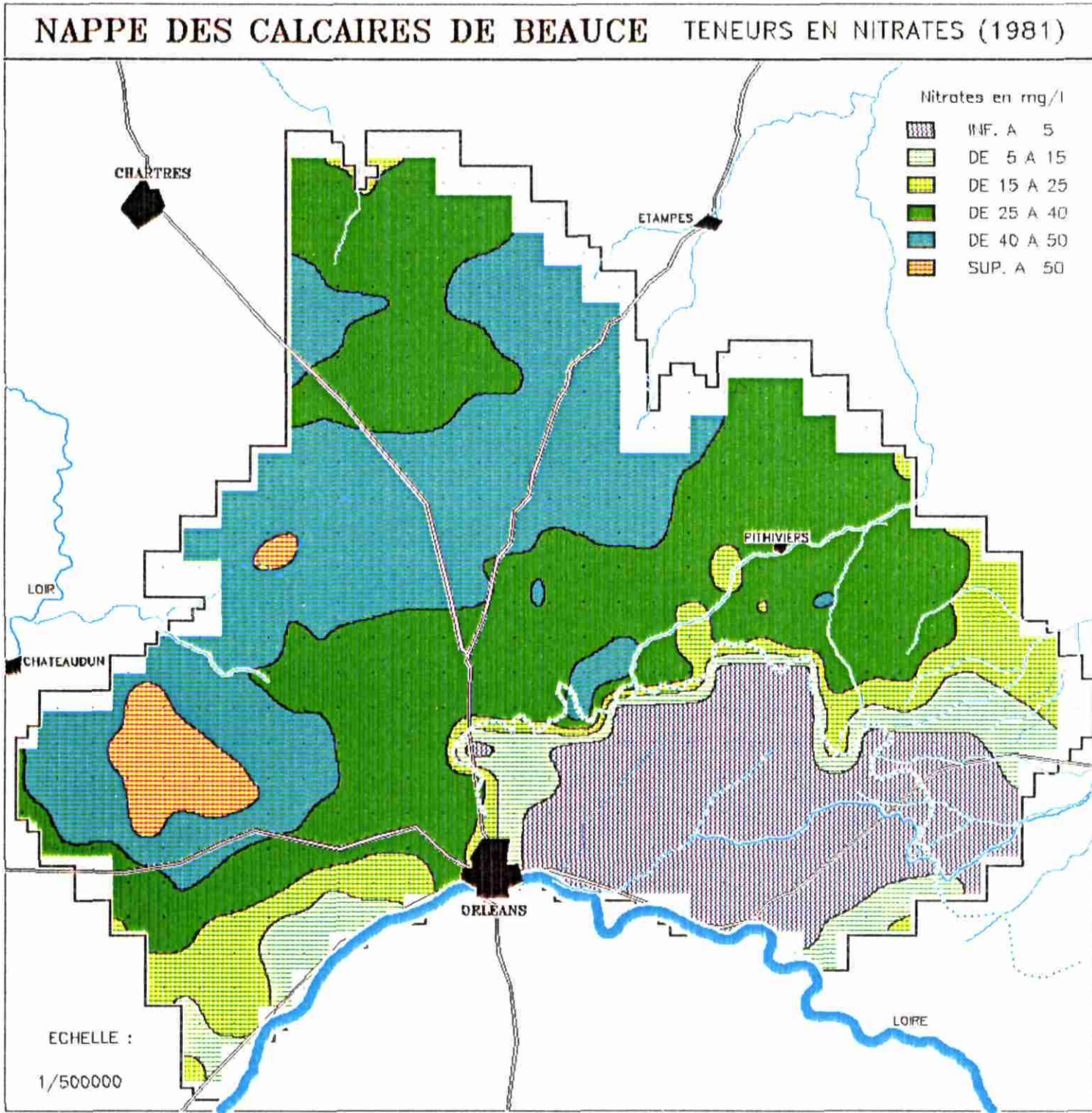


Figure 20 : carte krigée des teneurs moyennes en nitrates de l'année 1981

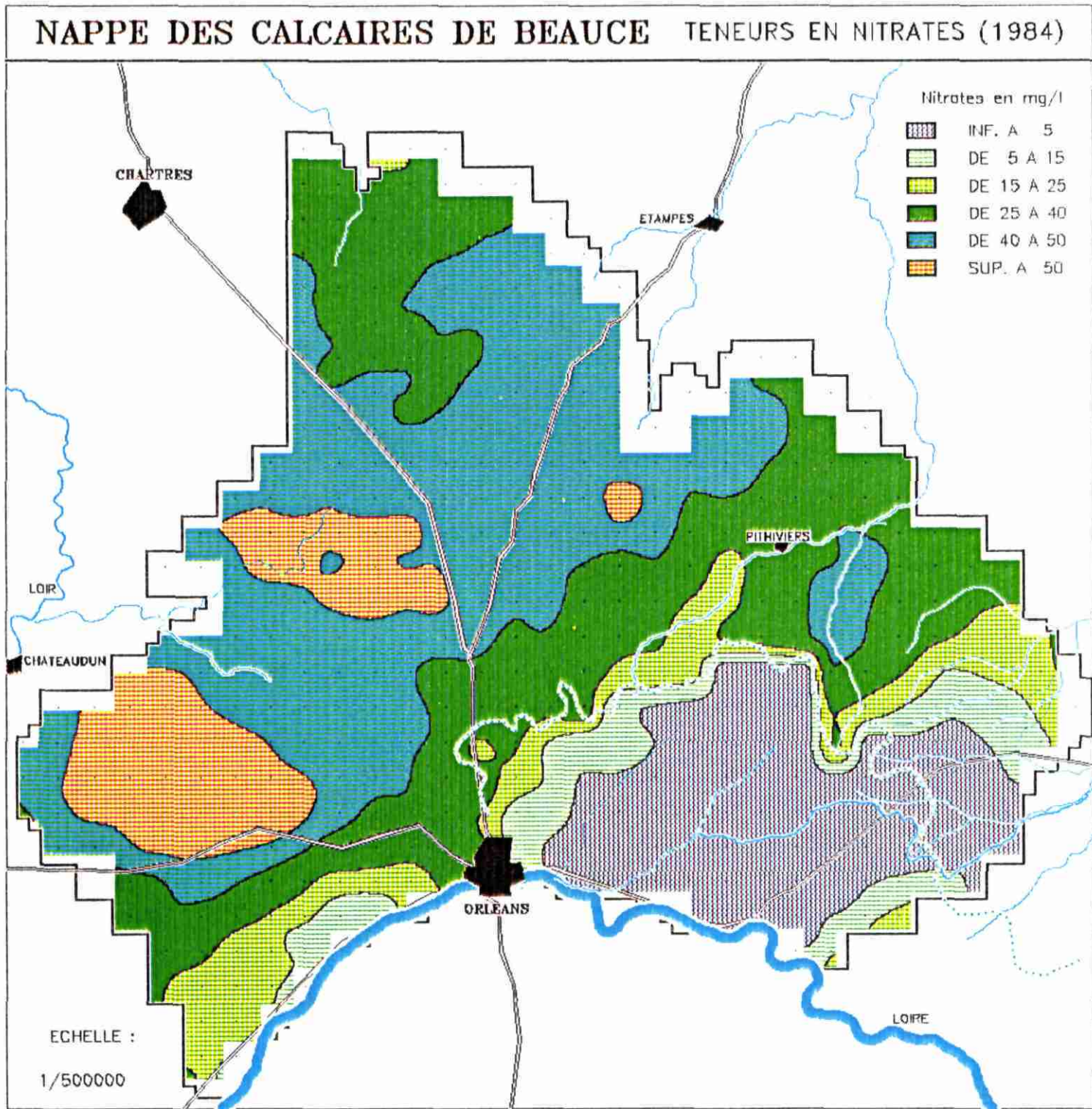


Figure 21 : carte krigée des teneurs moyennes en nitrates de l'année 1984



Cette zone exclue, on peut remarquer que la quasi-totalité des points de mesure ont des teneurs qui ont augmenté durant la période de 3 ans considérée; il est alors possible de caler le modèle en travaillant non pas sur les champs de valeurs eux-mêmes, mais sur leur différence, ce qui revient donc à partir d'un état initial de teneurs nulles sur tout le domaine et à tenter de restituer, par ajustements successifs des flux massiques injectés, les différences calculées.

Une carte des différences a donc été construite à partir des deux états krigés ci-dessus (cf. 3.1.).

Cette carte (fig. 22) servira de référence pour le calage. Elle fait notamment apparaître deux zones assez étendues, où les teneurs ont augmenté de plus de 4 mg/l, l'une située à l'Ouest de la route Orléans-Chartres, l'autre à l'Est de Pithiviers. Au sein de la première de ces zones, des secteurs aux augmentations plus fortes (de 8 à 12 mg/l ou plus de 12 mg/l) émergent, au Sud de Chateaudun en particulier.

# NAPPE DES CALCAIRES DE BEAUCE VARIATIONS NO3 (1984-1981)

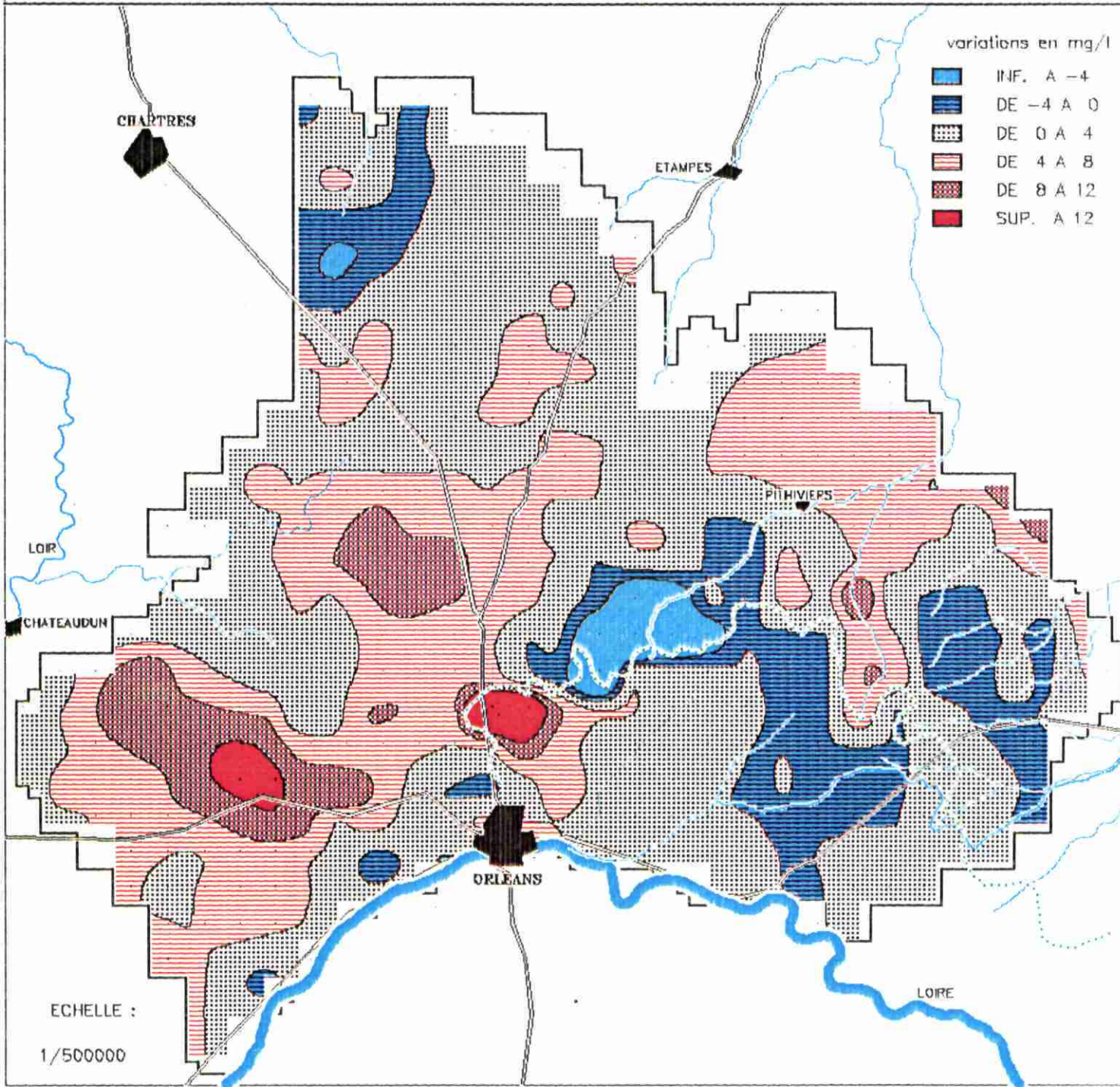


Figure 22 : carte de l'évolution des teneurs en nitrates obtenue par différence des cartes krigées de 1984 et 1981.

### 3.3.3. résultats

#### . Présentation cartographique :

A l'issue d'une dizaine de passages, la carte présentée en figure 23 a pu être obtenue. Elle est d'allure très semblable à la carte de référence (fig. 22), en particulier la classe d'augmentation (4-8) mg est bien restituée en situation et extension ; par contre. il n'a pas été possible de reproduire les augmentations de plus de 12 mg/l si ce n'est en désaggrégeant sensiblement la carte présentée ici (qui a donc été seule retenue).

#### . Flux massiques azotés :

Les flux massiques annuels moyens parvenant à la nappe s'étagent de 5 à 30 kg d'azote N par hectare. Pour 85 % des mailles, ils sont inférieurs à 20 kg/ha et ne sont de l'ordre de 30 kg/ha que pour 8 % des mailles (dans le quart Sud-Ouest notamment).

Les ordres de grandeur de ces flux sont en accord avec les chiffres généralement avancés sur les quantités d'azote susceptibles de rejoindre les nappes en régions de cultures annuelles.

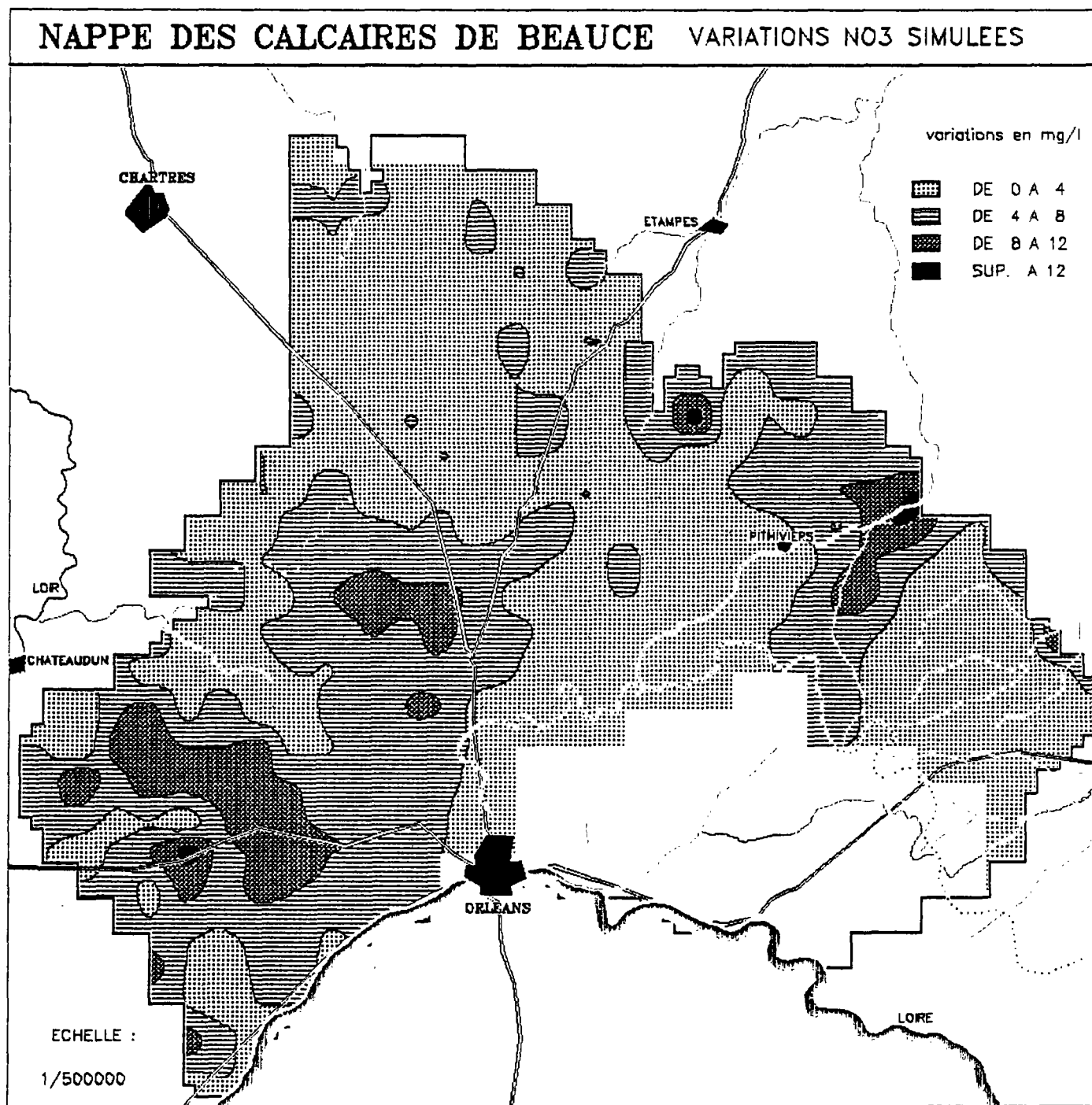


Fig. 23 Carte d'évolution des teneurs en nitrates entre 1981 et 1984 obtenue après calage du modèle avec une porosité cinématique de 5 %.

### 3.3. Simulations

#### . Calage avec une porosité cinématique de 10 %.

Afin de tester la sensibilité du modèle aux valeurs de porosité cinématique, une deuxième série de passages a été réalisée avec une porosité de 10 %. La carte obtenue (fig. 24) se rapproche beaucoup de la carte précédente (fig. 23) mais il a fallu multiplier à peu près par 3 les flux azotés, les valeurs de ces flux (de 15 à 90 kg/ha/an) devenant alors par trop éloignées des valeurs classiquement admises ou obtenues par expérimentations locales.

#### . Essai de prévision sur 10 ans (1981-1990)

A régimes constants, hydraulique et flux azotés, un essai de prévision a été tenté sur 10 pas de temps annuels en partant de l'état de 1981. La carte d'évolution obtenue (fig. 25) comparée à la carte d'évolution de référence (fig. 22) montre très nettement la progression de la pollution : disparition quasi-générale de la plage (0-4) mg/l remplacée par la classe (4-8) mg et forte extension des zones à teneurs supérieures à 12 mg/l entre Orléans et Chateaudun.

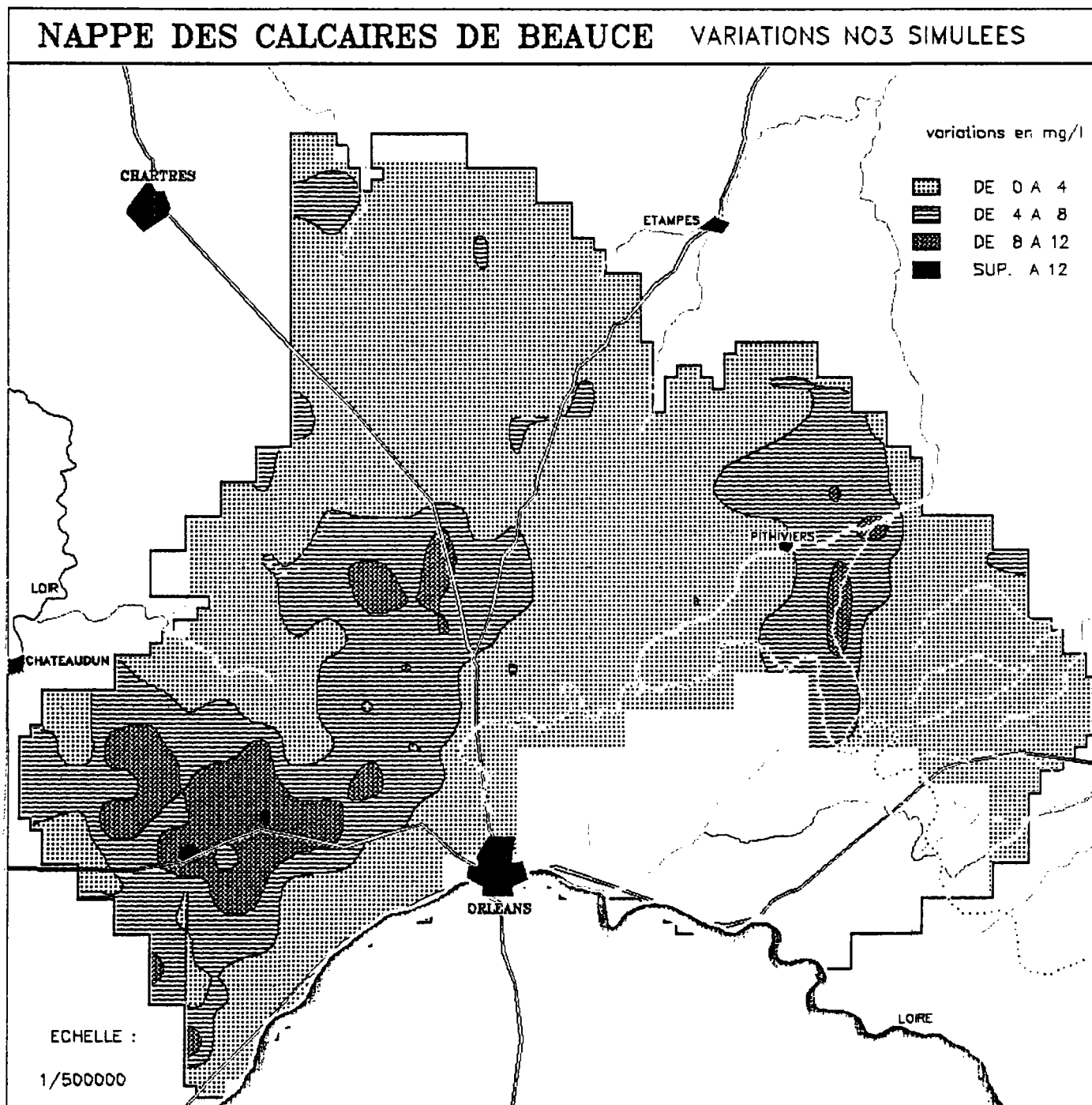


Figure 24 : carte d'évolution des teneurs en nitrates entre 1981 et 1984 obtenue après calage du modèle avec une porosité cinématique de 10% (flux azotés multipliés par 3).

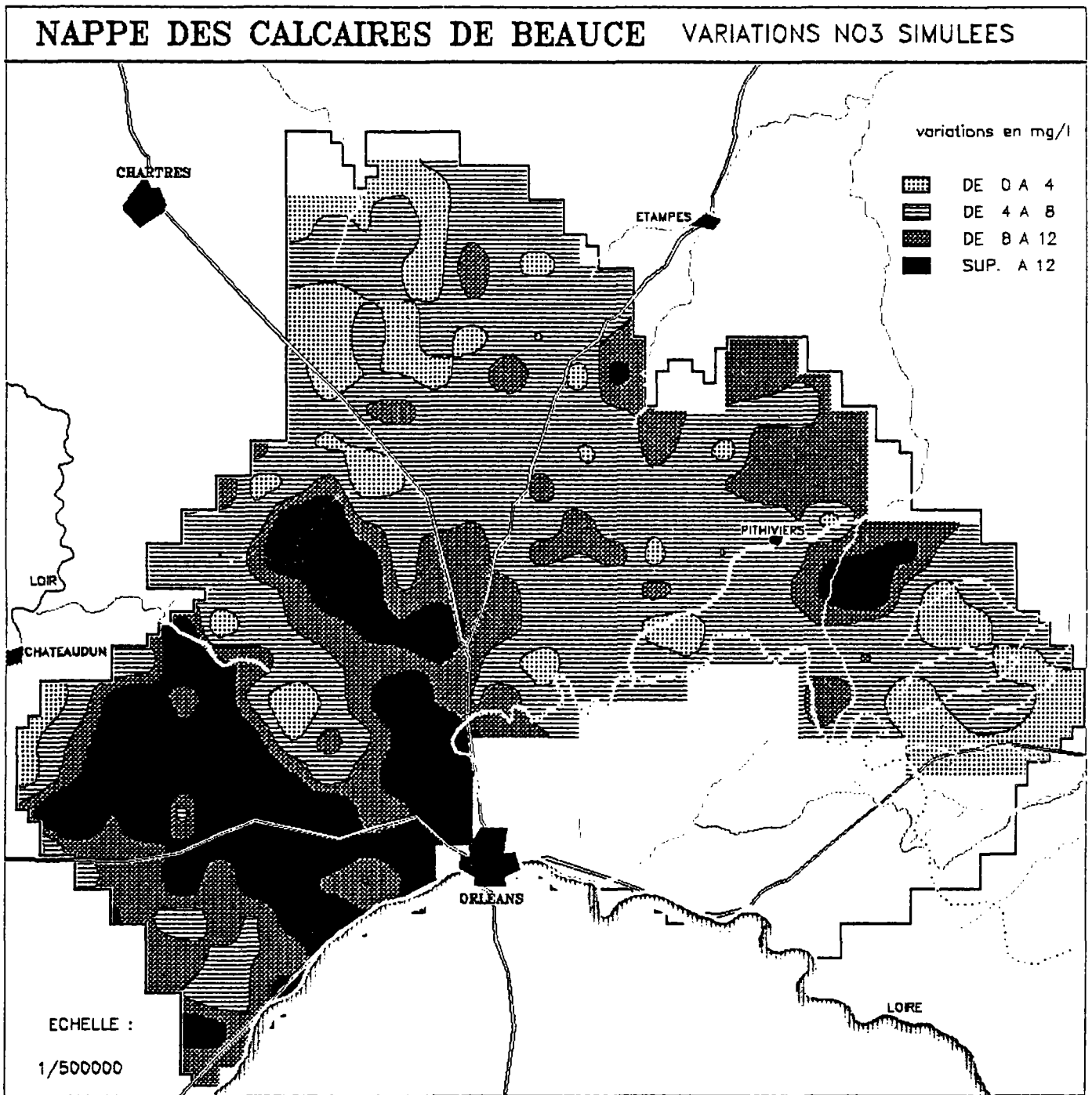


Figure 25 : carte d'évolution des teneurs en nitrates obtenue après 10 pas de simulation annuels à partir de l'état 0 de 1981.

## CONCLUSION

La crédibilité des résultats obtenus à l'issue d'une modélisation est bien sûr fonction de la qualité des données fournies en entrée et de la solidité des hypothèses que l'on est conduit à poser soit pour simplifier une situation difficile à prendre en compte dans toute sa complexité soit pour pallier à un manque d'informations.

Dans le cas de la modélisation d'une pollution par des nitrates la qualité des données est d'abord celle de l'échantillonnage de teneurs utilisé. Cette qualité peut se définir essentiellement en termes de représentativité des valeurs obtenues aux points de mesures.

En effet, pour un phénomène qui évolue dans le temps, et qui peut présenter, sur une période de temps comme l'année par exemple, des fluctuations d'apparence erratique (et tel est souvent le cas des teneurs en nitrates), il importe d'avoir aux points de mesures des séries de valeurs permettant le calcul en ces points de valeurs moyennes auxquelles on pourra attribuer la capacité de refléter "l'état moyen" du phénomène sur la période de temps considérée (ce qui n'est pas toujours le cas).

Cette représentativité temporelle a son pendant dans l'espace : la teneur en un point que l'on utilise dans la modélisation (comme état initial en ce point), ou dans l'élaboration d'une carte (comme support de calage), devrait correspondre à une teneur moyenne sur l'épaisseur de la nappe (dans l'hypothèse d'une stratification) et c'est d'ailleurs une teneur moyenne que le modèle calcule en rapportant la totalité de la masse de polluant dans une maille au volume d'eau dans cette maille. Or, les données sont recueillies sur des forages qui sont en général différents les uns des autres au niveau de la construction (de la profondeur en particulier).

L'hétérogénéité de l'échantillonnage, à laquelle il semble difficile d'échapper compte-tenu des contraintes pesant sur la collecte des données, peut néanmoins être "atténuée" si le nombre de points de mesure est suffisamment grand. La construction de cartes de teneurs, à différentes dates si possible, permet alors de tester la cohérence d'ensemble de toutes les données recueillies et de détecter éventuellement des anomalies.

La deuxième catégorie de problèmes à laquelle on se trouve confronté dans l'interprétation des résultats d'une modélisation est celui de la pertinence et de la solidité des hypothèses faites. Bien souvent, en effet, et c'était le cas au cours de cette étude, il manque des éléments d'information sur le fonctionnement d'une partie du système à modéliser (le transfert dans la zone non saturée par exemple) ou bien sur les valeurs des paramètres du transport (la porosité cinématique notamment et dans une moindre mesure, pour une pollution diffuse, la dispersivité).

Une solution consiste alors à faire fonctionner le modèle sous différentes hypothèses et à soumettre les résultats obtenus à des critères de plausibilité. Un exemple a été fourni dans cette étude où l'on a fait varier la valeur de porosité cinématique de 5 % à 10 %. On a pu constater alors que les flux massiques d'azote parvenant à la nappe étaient trop importants pour être vraisemblables quand la porosité utilisée était de 10 %.

A ces hypothèses relatives à l'état actuel, il faut bien sûr ajouter celles que l'on fait quand on exploite le modèle pour obtenir une prévision. Les hypothèses les plus contraignantes sont bien sûr celles du régime constant dans le temps, régime hydraulique et régime d'apports de nitrates à la nappe.

Compte-tenu de la grande inertie de la nappe des calcaires de Beauce, l'hypothèse de régime hydraulique constant est relativement secondaire.

La constance des flux azotés parvenant à la nappe est peut-être un peu plus sujette à caution, mais sur une assez longue période de temps elle peut se justifier. (d'autant plus que l'homogénéité culturale de la Beauce est grande et qu'un "plafonnement" des épandages d'engrais semble être atteint).

Enfin, cette étude a permis de mettre en relief un certain nombre de points susceptibles d'appuyer une politique de préservation de la qualité de l'eau de la nappe. Si la propagation de la pollution par les flux souterrains horizontaux, relayant les flux verticaux de la zone non saturée, est lente en raison des faibles vitesses de circulation de l'eau (quelques mètres par jour), elle est néanmoins indéniable et les cartes de teneurs présentées montrent une augmentation générale des teneurs de l'amont vers l'aval, en particulier une progression de la plage de teneurs de 40 à 50 mg/l. Cette plage de teneurs affectera donc assez rapidement de plus en plus de forages ce qui pose des problèmes de prévention que les seuls périmètres de protection ne sauraient, à cette échelle, résoudre.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

PREMIERE PARTIE :

1. B.R.G.M. 1976 : ATLAS Hydrogéologique de la Beauce
2. CAUDRON M., DESPREZ N, RAMPON G., ROUSSELOT D., VIOT A. 1971  
Mise en valeur et exploitation des données acquises sur la nappe des Calcaires de Beauce - première phase - réalisation d'un modèle mathématique de simulation des écoulements bidimensionnels en milieux poreux, en régime permanent : DRPER (novembre 1971)  
Rapport BRGM 71 SGN 331 BDP
3. CAUDRON M., DESPREZ N., MARTINS Cl., RAMPON G. 1973.  
Mise en valeur et exploitation des données acquises sur la nappe des Calcaires de Beauce en vue de la réalisation d'un modèle mathématique de simulation en régime transitoire (novembre 1973).  
Rapport BRGM 73 SGN 365 BDP
4. CAUDRON M., DESPREZ N., MARTINS Cl., RAMPON G., VANDENBEUSCH M. 1975.  
Elaboration et exploitation d'un modèle de gestion de la nappe des Calcaires de Beauce (mars 1975).  
Rapport BRGM 75 SGN 166 BDP
5. MEGNIEN C., 1976 Hydrogéologie du centre de Bassin de Paris  
Contribution à l'étude de quelques aquifères principaux.  
Thèse de doctorat d'Etat, Univ. Pierre et Marie Curie, PARIS 6.
6. Compagnie d'Aménagement des Côteaux de Gascogne 1976.  
Guide de l'irrigation dans le département du loiret.
7. Service Régional de l'Aménagement des Eaux - région Centre 1985.  
Variation piézométrique de la nappe des Calcaires de Beauce en 1984.

**DEUXIEME PARTIE :**

**- Sur les modèles de "marche au hasard" :**

8. ACKERER (P.) 1985 - Propagation d'un fluide en aquifère poreux saturé en eau. Prise en compte et localisation des hétérogénéités par des outils théoriques et expérimentaux.

Thèse de Docteur Ingénieur, Univ. Louis Pasteur de Strasbourg

9. BERNHARD (C.) 1985 - Evaluation du risque de contamination des eaux souterraines du Ried Central de l'Ill par les nitrates. Thèse de Docteur Ingénieur Univ. Louis Pasteur de Strasbourg.

10. PRICKETT (T.A.), NAYMICK (T.G.), LONNQUIST (C.G.) 1981

A "Random Walk" Solute transport model for selected groundwater quality evaluations.

Illinois State Water Survey - Champaign. Bulletin 65

**- Sur la pollution par les nitrates :**

11. BILLAULT (P.). 1984 - Nitrates et nappe de Beauce dans le département du Loiret. Agence de Bassin Loire-Bretagne. ETU/128.

12. Chambre d'Agriculture du Loiret 1981 - Origine et lessivage des nitrates dans les sols de Beauce.

13. BONIFACE (R.), GUIRAUD (G.), MARIOTTI (A.) 1986 - Engrais azotés. alimentation des plantes et pollution. Rapport final de fin de contrats N° 3262 (1987) et N° 4186 (1982).

14. DUTRIAUX (M.C.) 1980 - Essai sur l'origine des nitrates dans les eaux souterraines : applications du tracage isotopique naturel de l'azote 15 à l'étude d'un périmètre de drainage en région cultivée (Beauce).

Thèse 3ème cycle Univ. Pierre et Marie Curie (PARIS 6)

**- Sur la caractérisation de l'occupation du sol par télédétection**

15. KING (C.), DUTARTRE (P.), MALON (J.F.), 1985 - Analyse de la réponse spectrale des couverts végétaux en milieu tempéré.

Les données de thematic Mapper en Beauce chartraine.

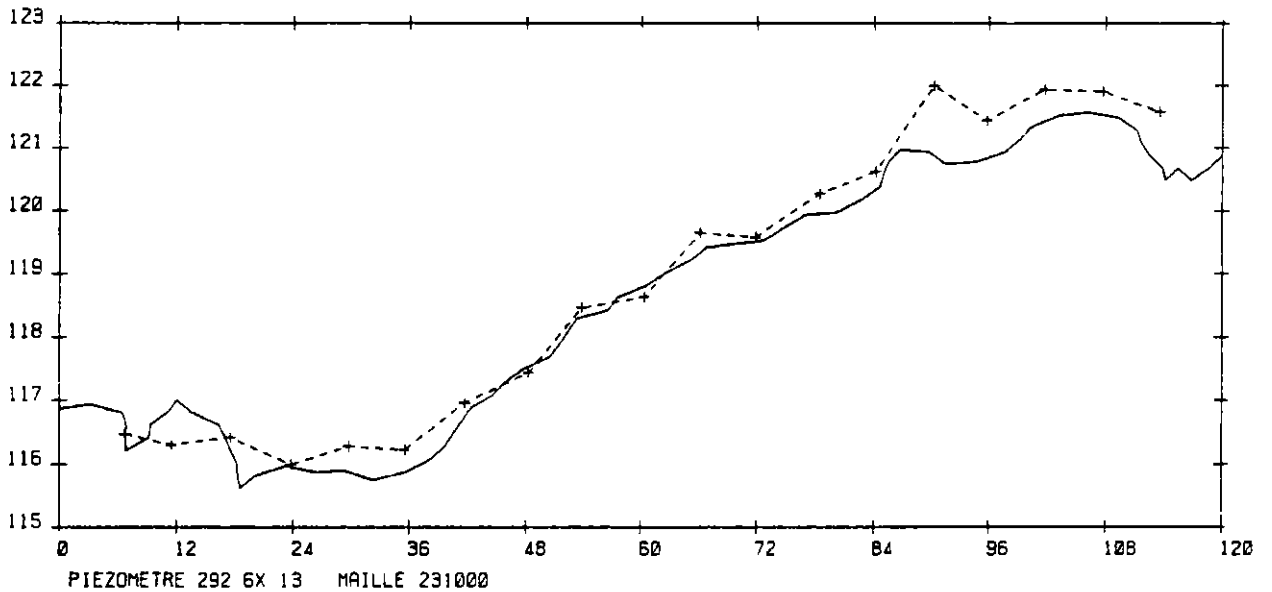
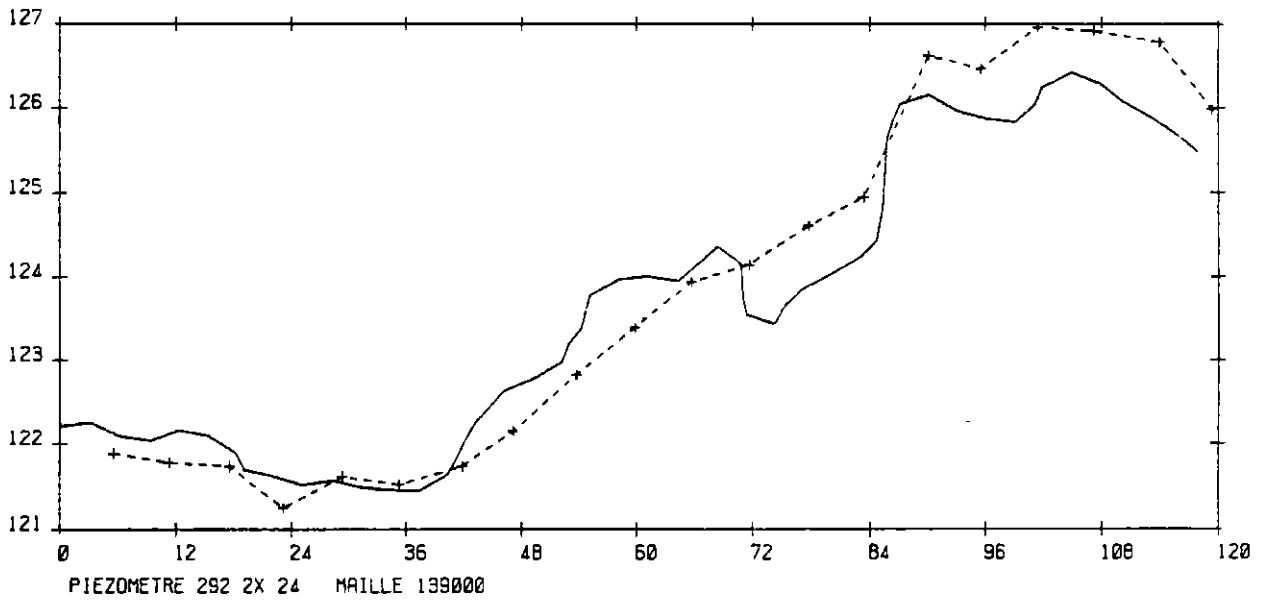
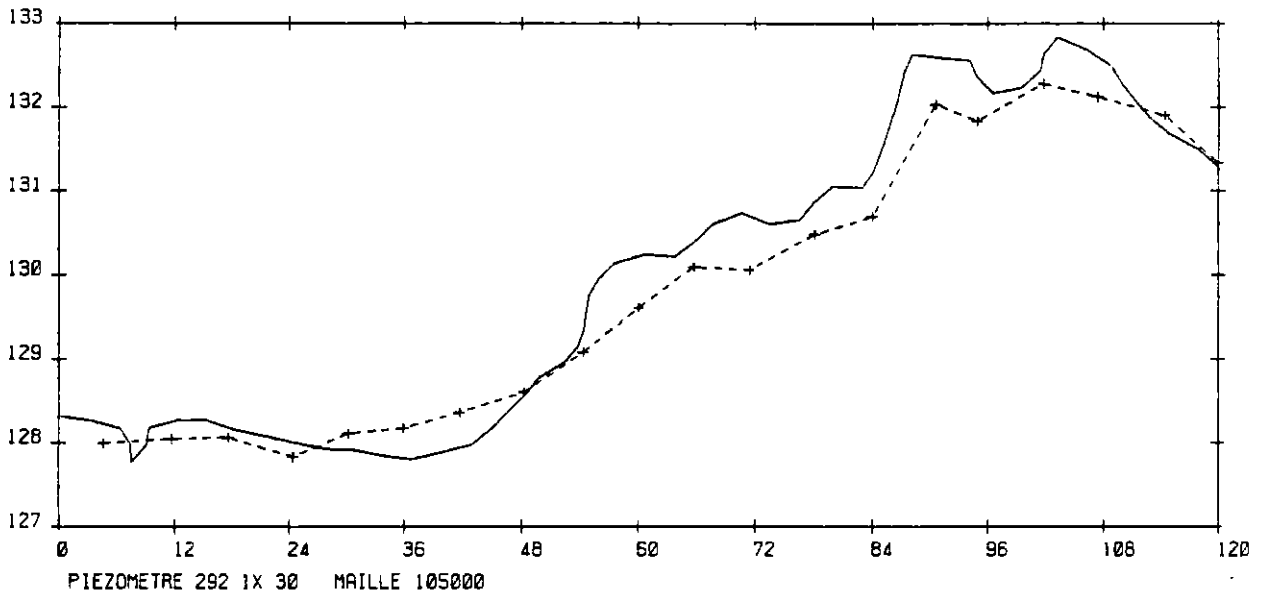
Rapport BRGM 86 SGN 264 GEO.

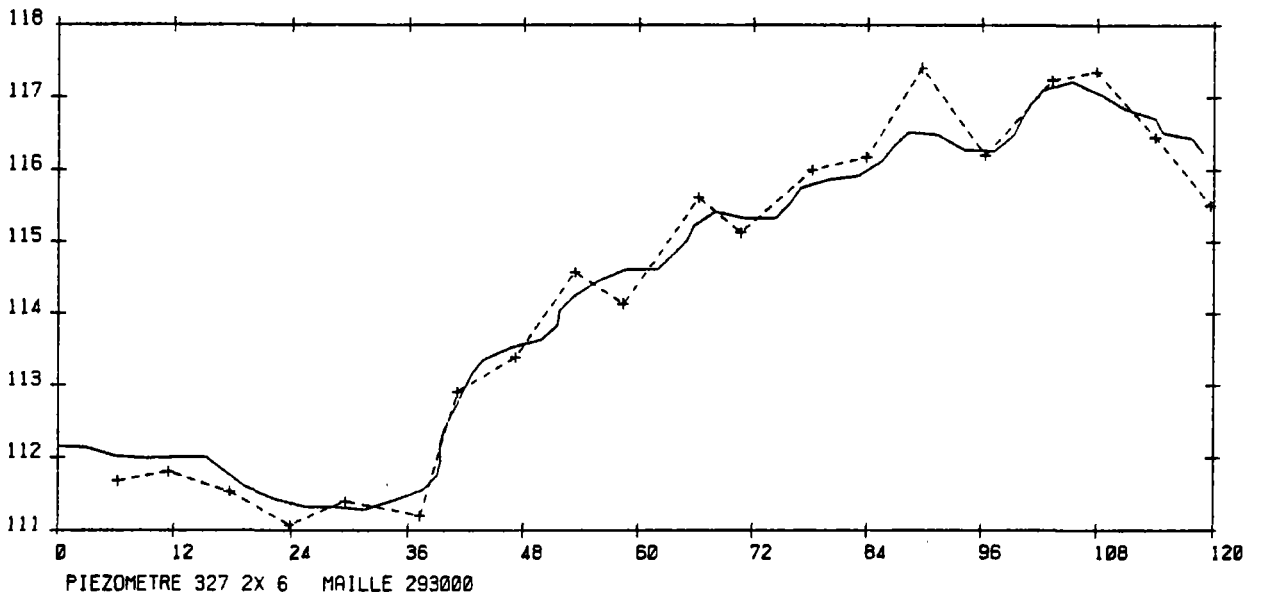
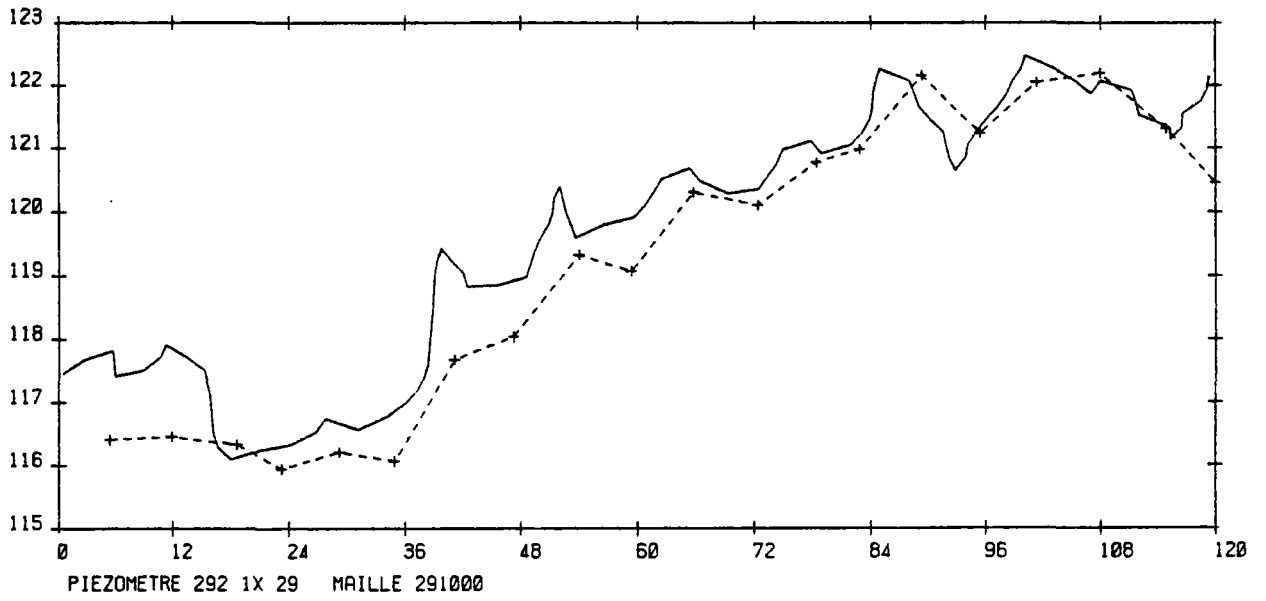
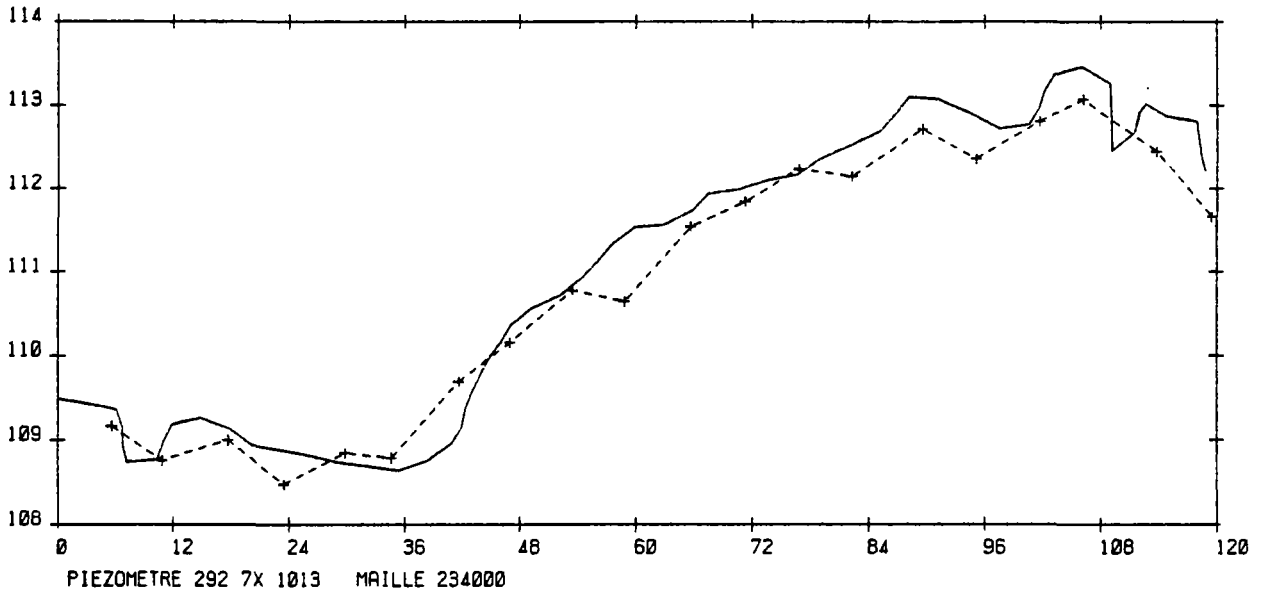


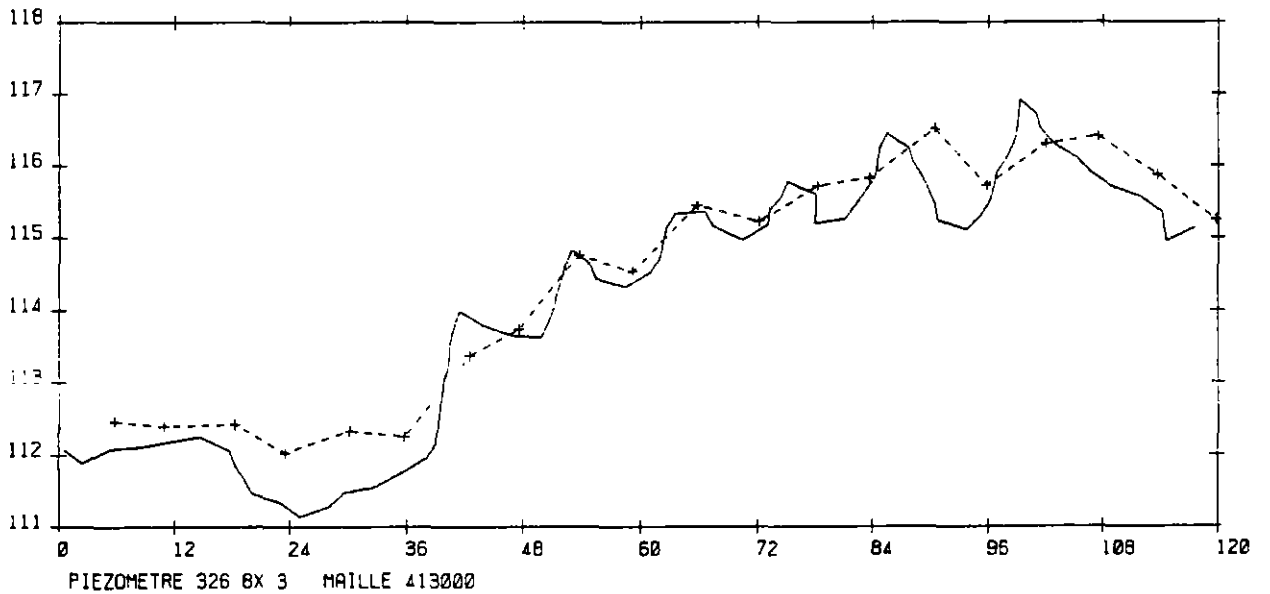
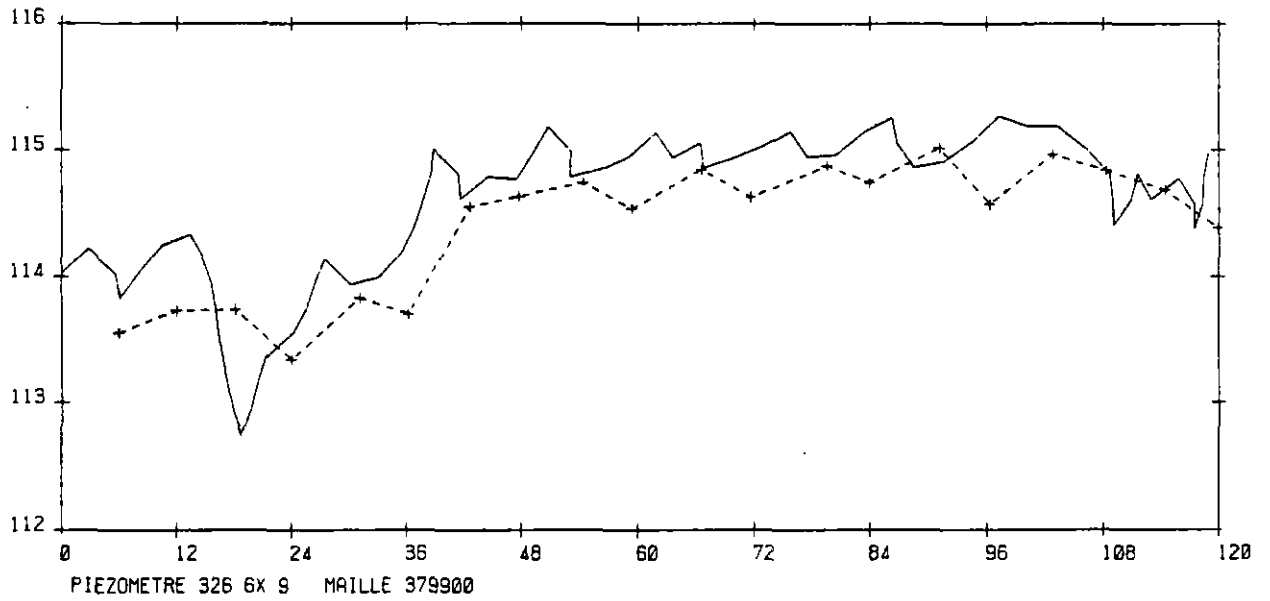
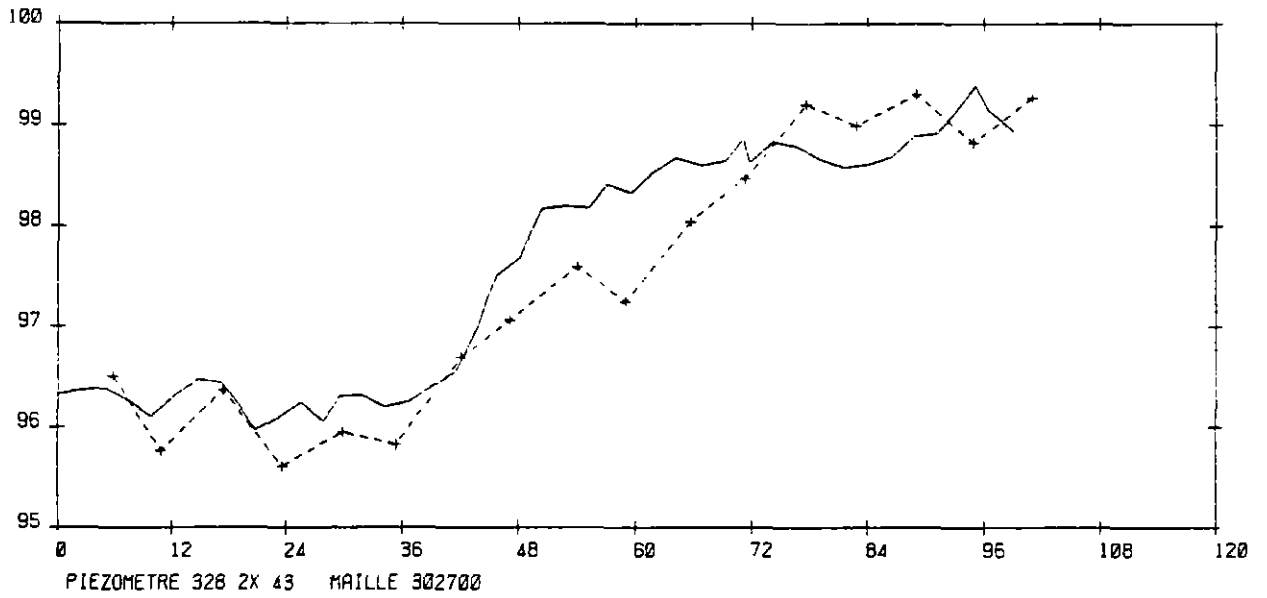
ANNEXE 1  
COMPARAISON GRAPHIQUE  
SUR 20 PIEZOMETRES  
DES NIVEAUX CALCULES  
ET DES NIVEAUX MESURES

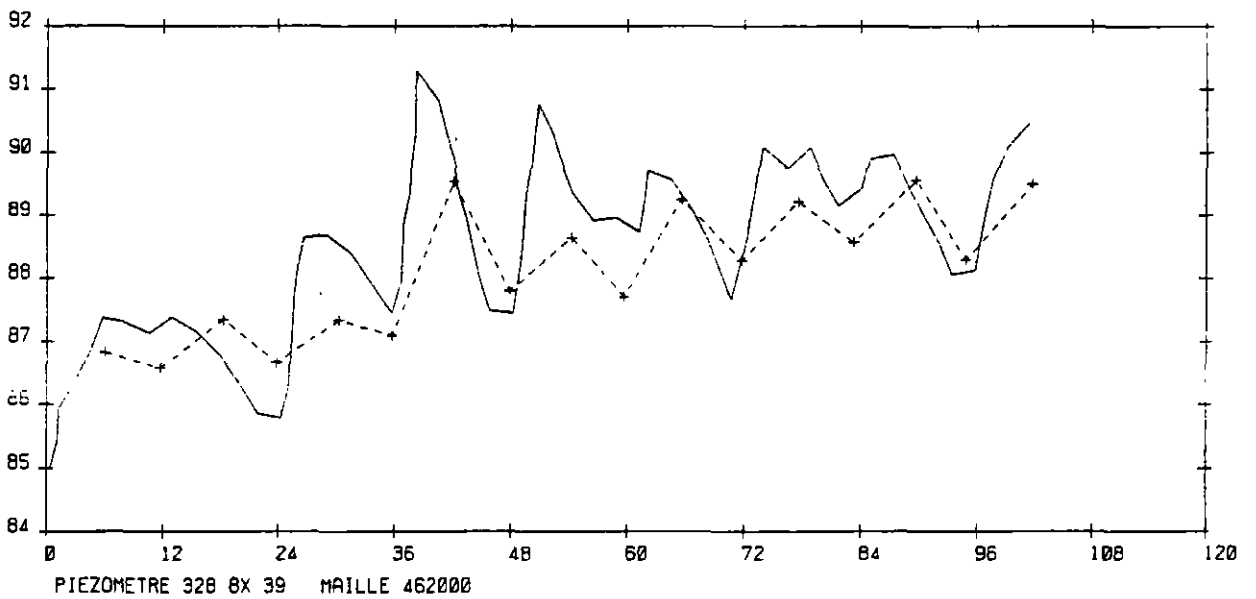
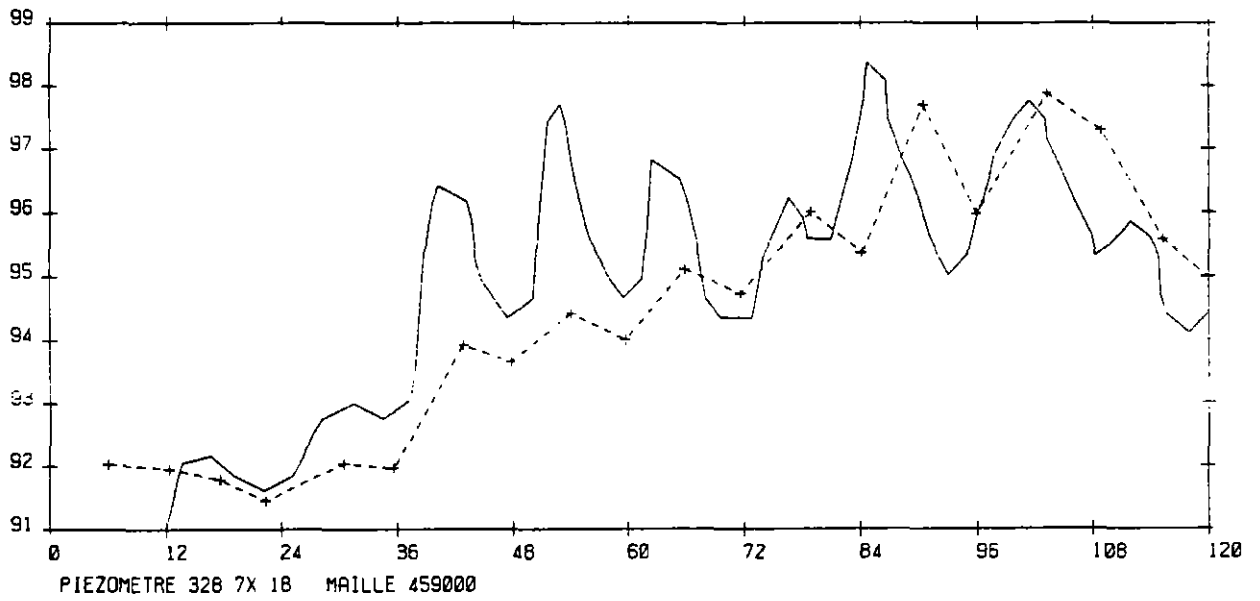
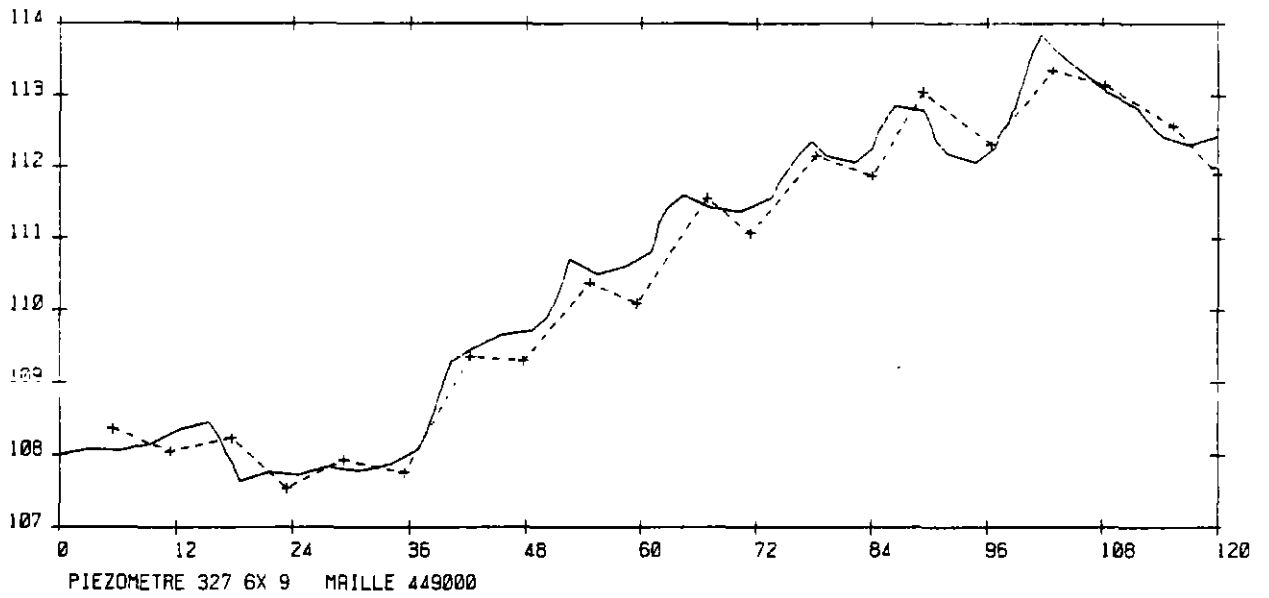
PERIODE 1975-1984

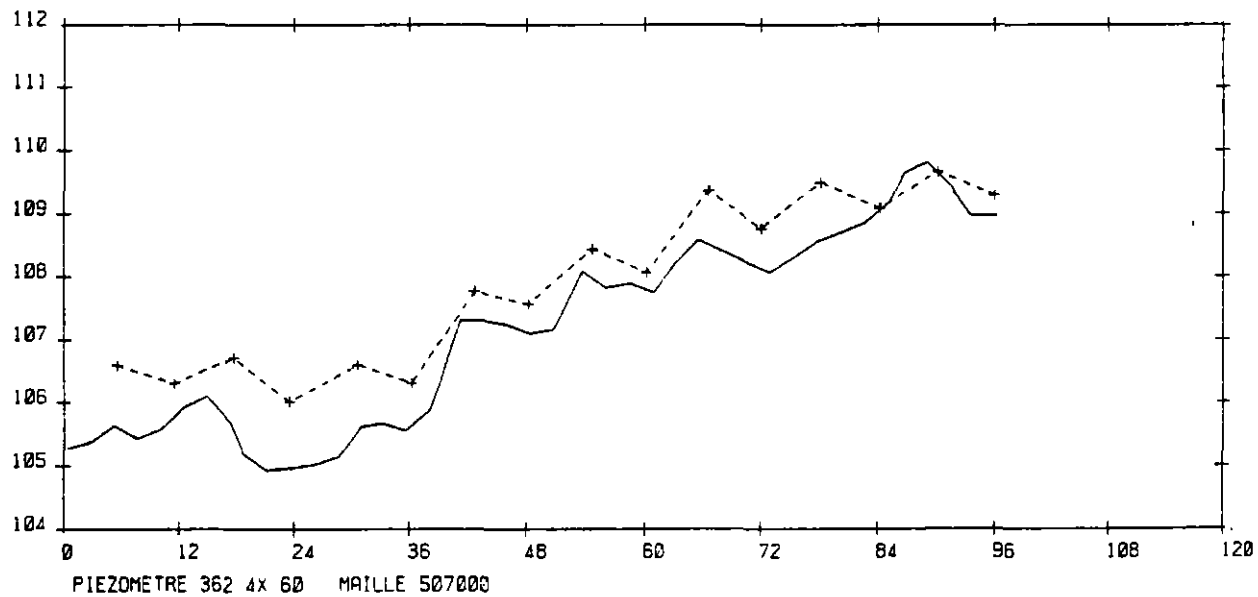
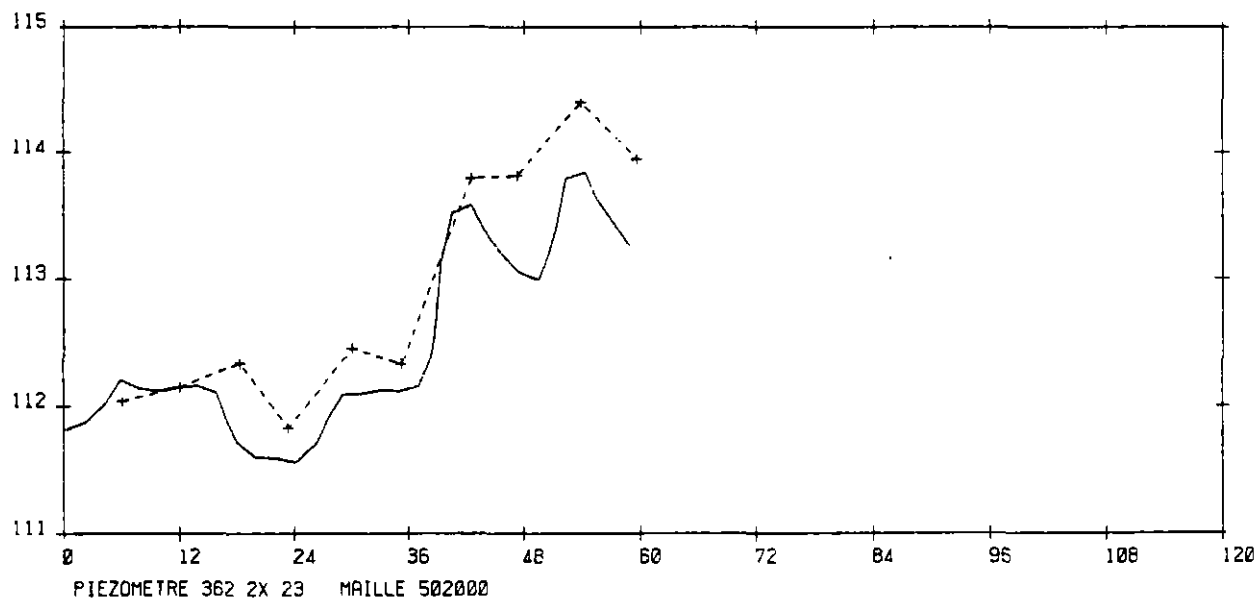
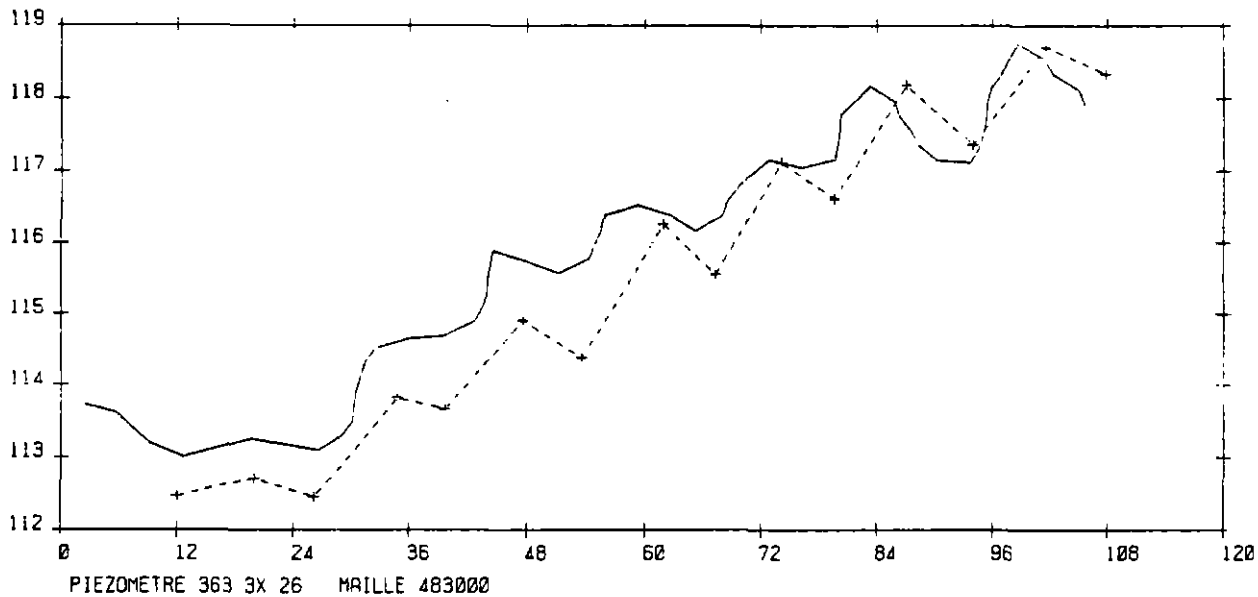
en abscisses: nombre de mois  
en ordonnees: niveaux piezométriques (en m)  
  
en trait plein: niveau mesuré  
en pointillés : niveau calculé

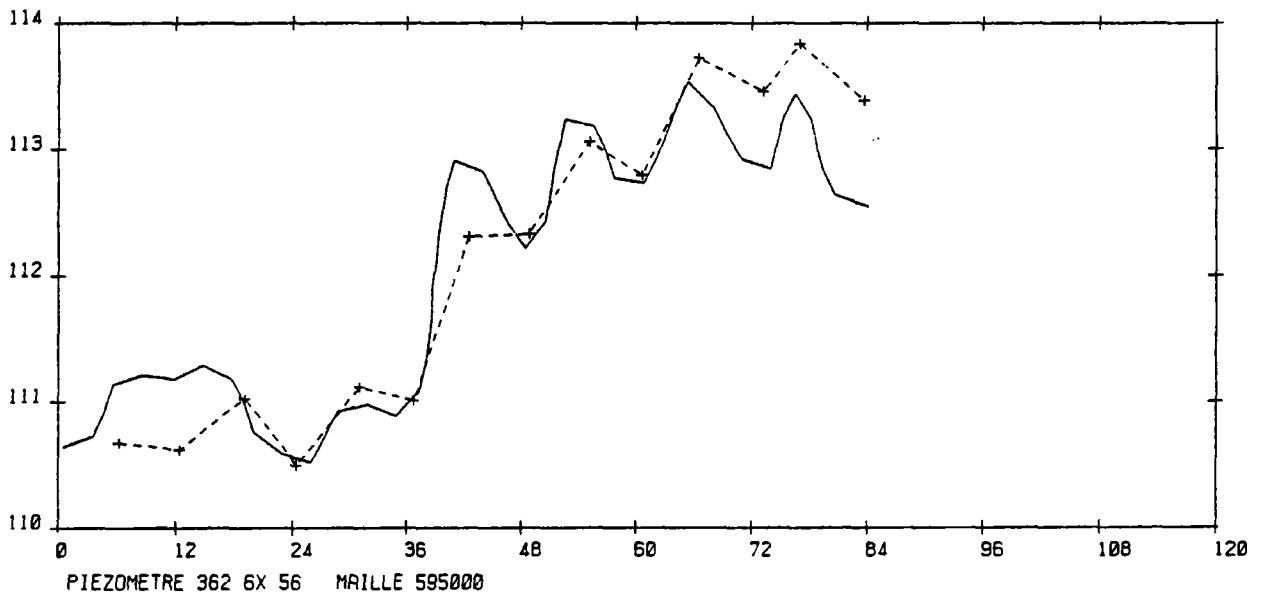
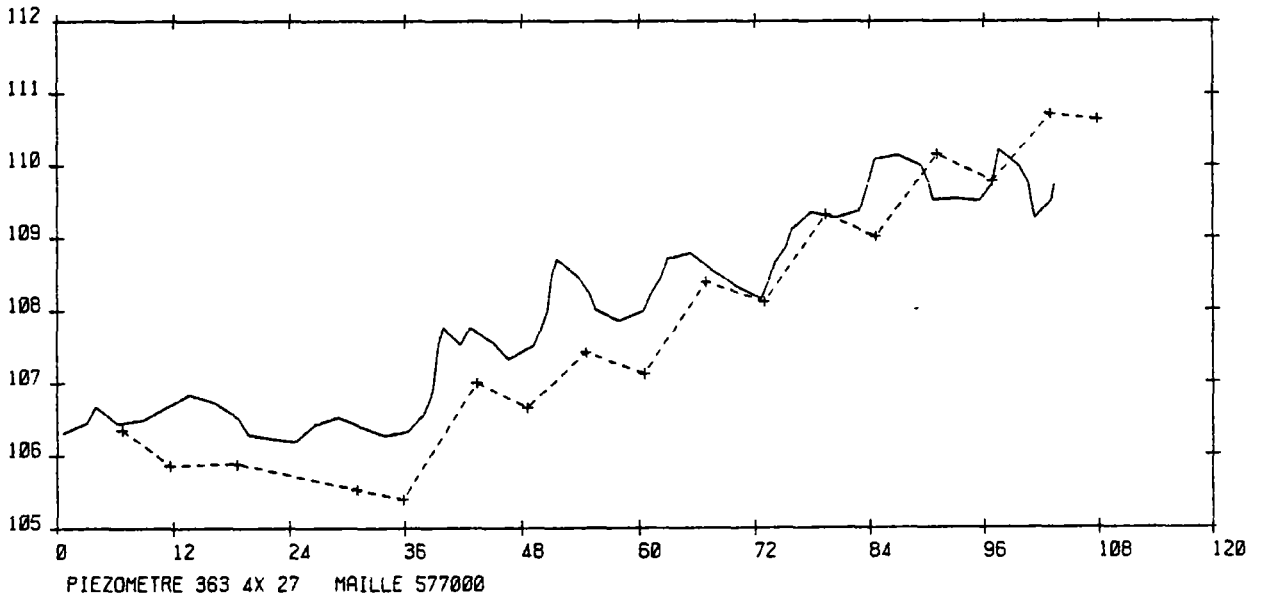
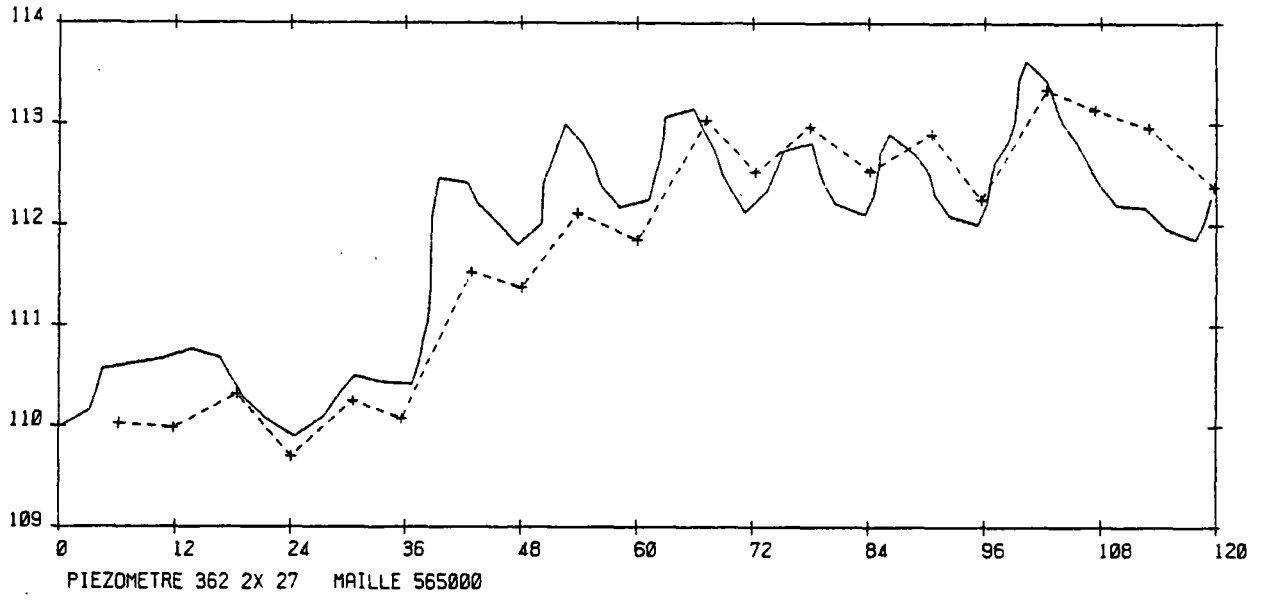


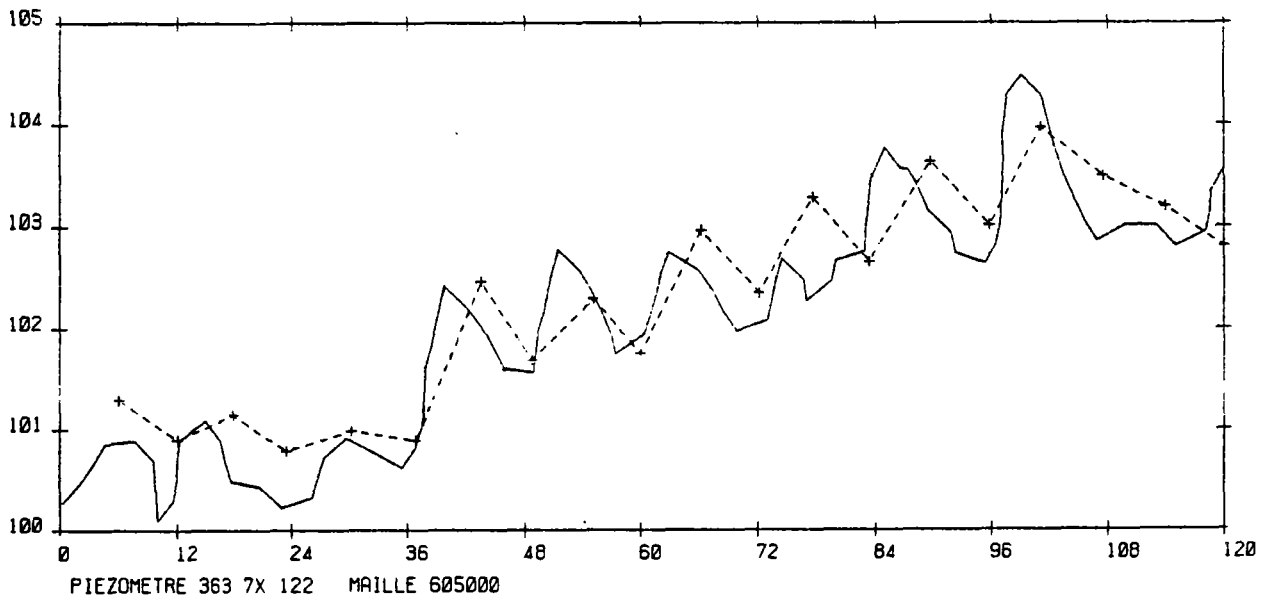
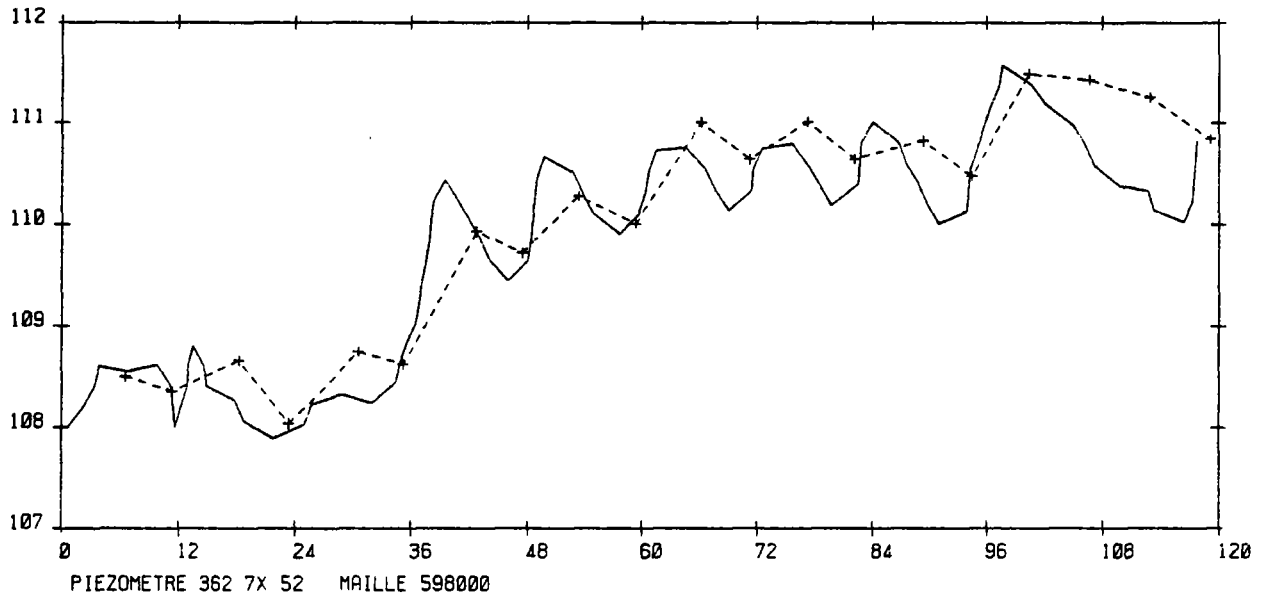






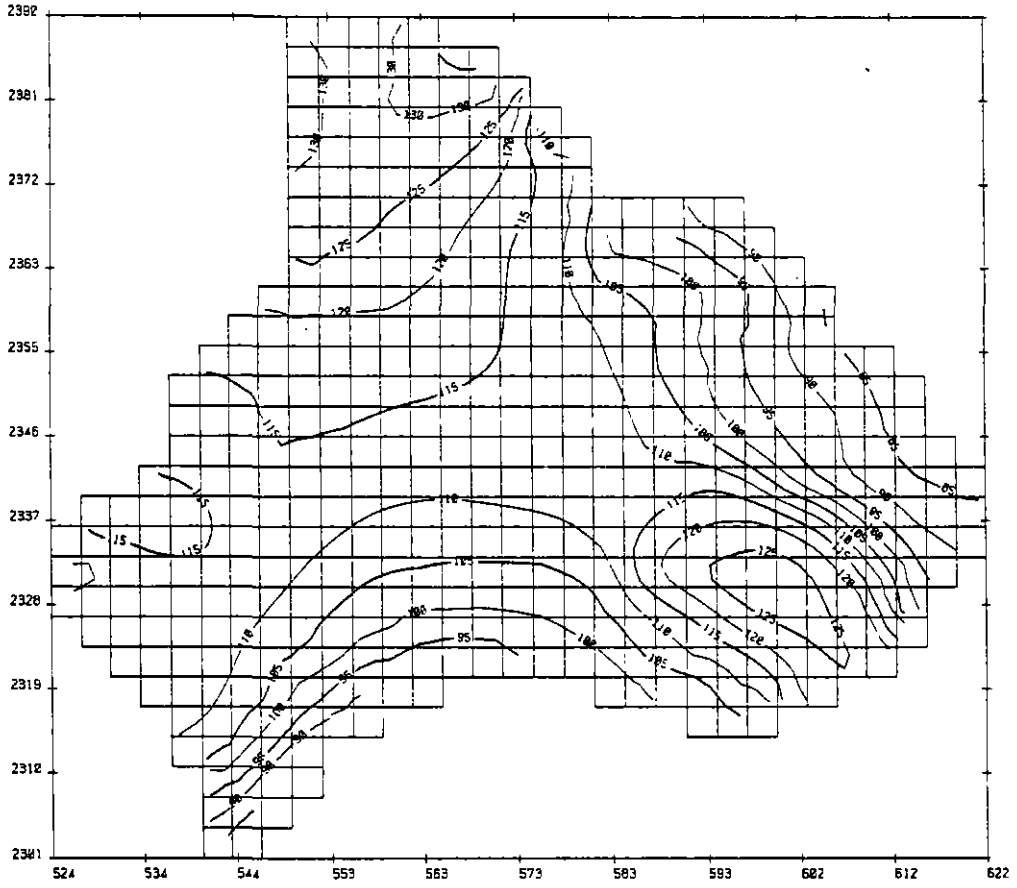




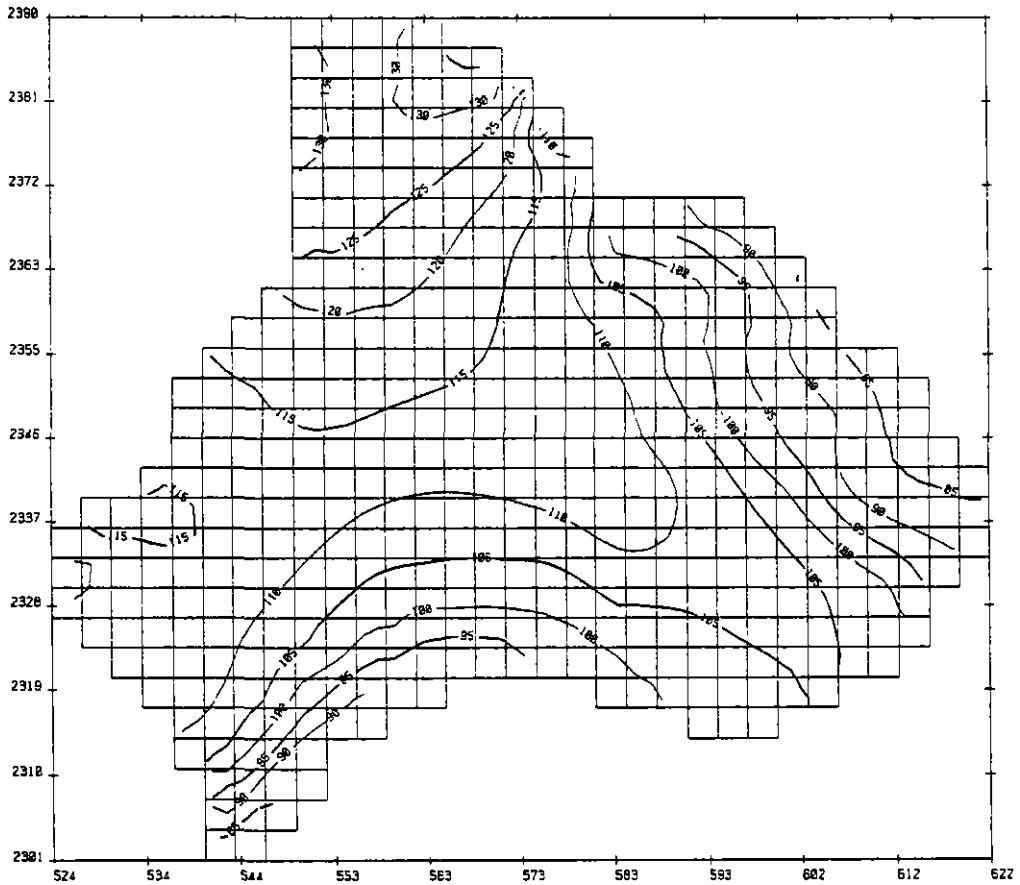


ANNEXE 2  
CARTES PIEZOMETRIQUES

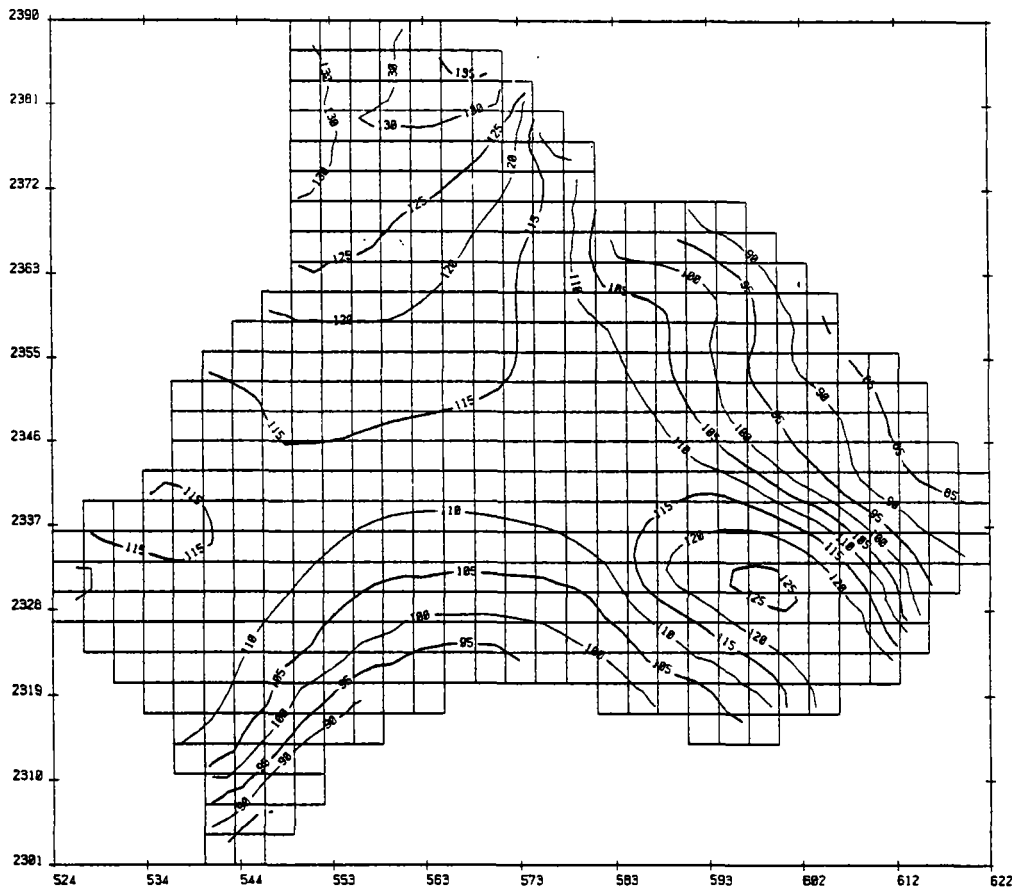
PIEZOMETRIE 1988 HAUTES EAUX



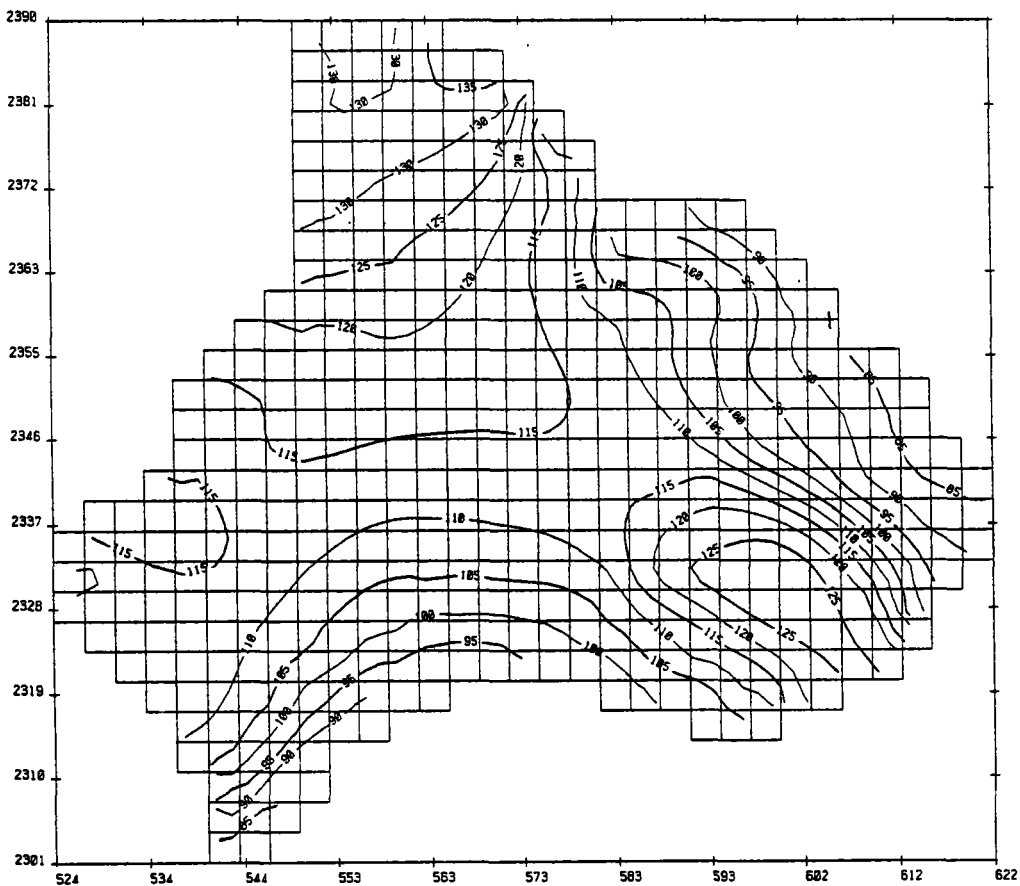
PIEZOMETRIE 1988 BASSES EAUX



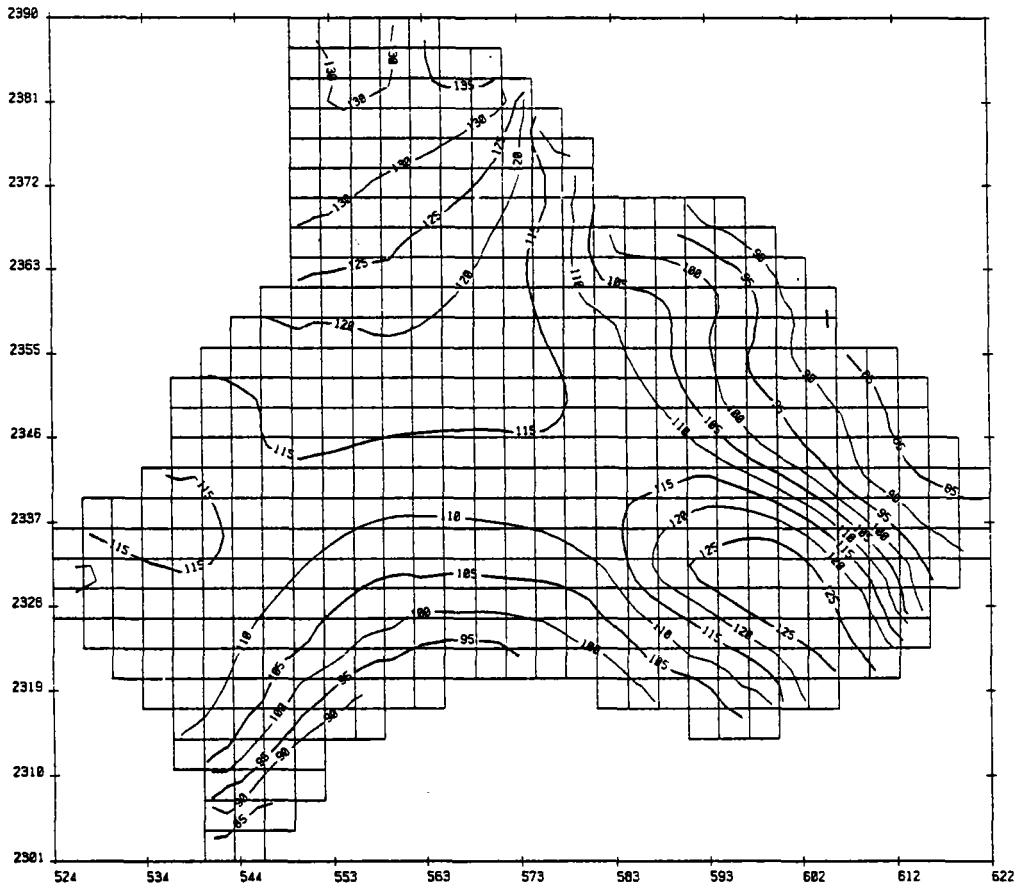
PIEZOMETRIE 1981 HAUTES EAUX



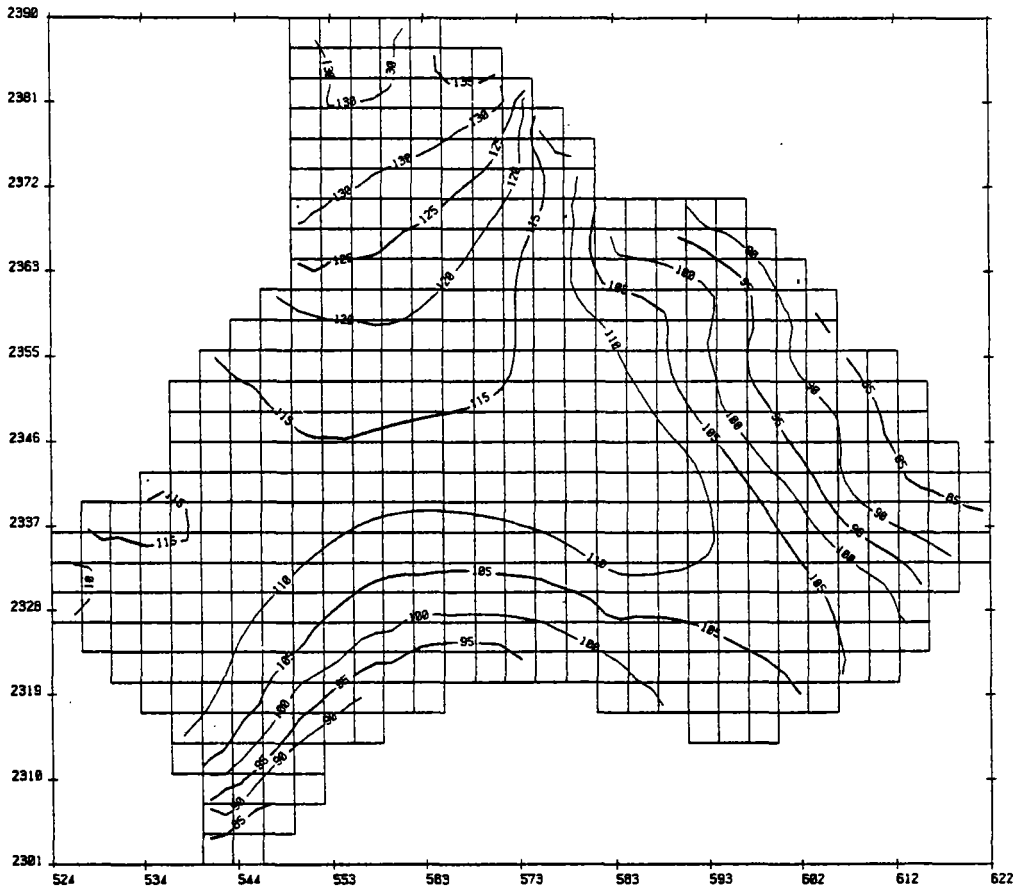
PIEZOMETRIE 1981 BASSES EAUX



PIEZOMETRIE 1982 HAUTES EAUX



PIEZOMETRIE 1982 (BASSES EAUX)



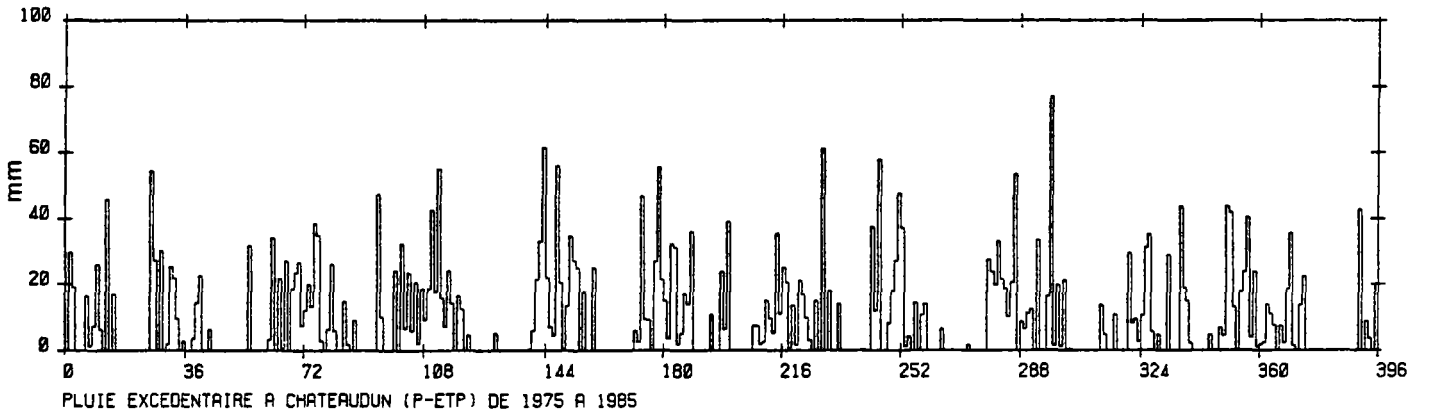
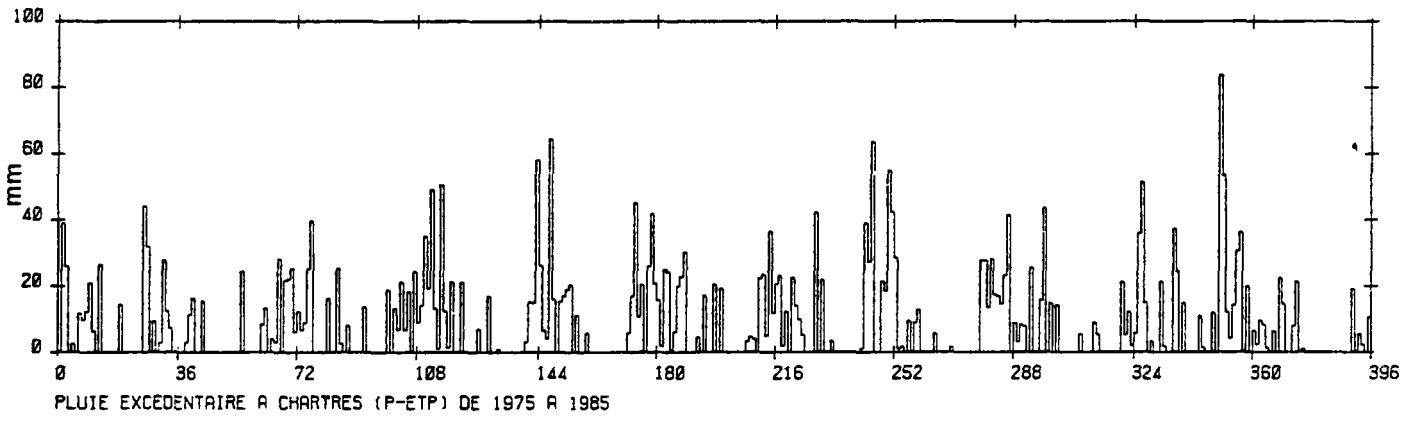
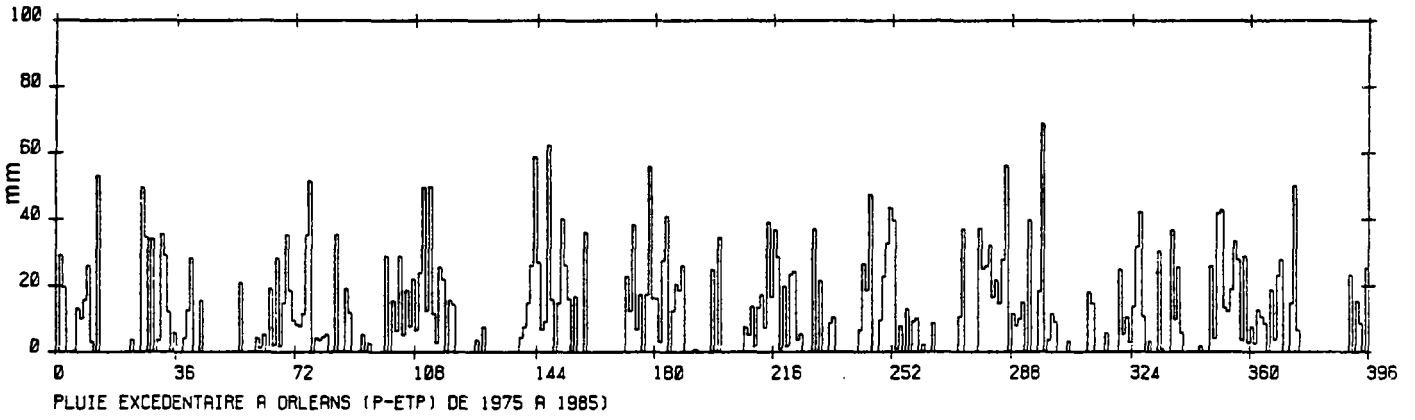
ANNEXE 3  
PLUIES EFFICACES APRES CALAGE  
PAR ZONE PLUVIOMETRIQUE  
ET PAR PAS DE TEMPS  
PERIODE 1975-1984

INFILTRATION EFFICACE PAR SEMESTRE (EN MM)

\* 1975-1984 \*

ZONE 1	ZONE 2	ZONE 3	ZONE 4	ZONE 5	ZONE 6
30.0	30.0	36.0	12.0	30.0	36.0
60.0	30.0	78.0	0.0	0.0	66.0
60.0	90.0	60.0	54.0	120.0	108.0
30.0	30.0	30.0	0.0	0.0	0.0
90.0	90.0	102.0	60.0	90.0	132.0
60.0	30.0	60.0	30.0	60.0	60.0
72.0	192.0	210.0	180.0	144.0	222.0
84.0	114.0	144.0	18.0	102.0	60.0
108.0	180.0	198.0	96.0	120.0	132.0
90.0	66.0	78.0	24.0	60.0	48.0
114.0	210.0	222.0	144.0	162.0	192.0
60.0	60.0	90.0	30.0	150.0	30.0
96.0	138.0	186.0	132.0	168.0	126.0
84.0	60.0	162.0	30.0	120.0	30.0
204.0	204.0	240.0	144.0	156.0	78.0
60.0	30.0	30.0	30.0	90.0	30.0
126.0	204.0	210.0	132.0	156.0	192.0
66.0	132.0	162.0	60.0	162.0	78.0
72.0	72.0	36.0	48.0	90.0	60.0
18.0	18.0	24.0	12.0	30.0	30.0

ANNEXE 4  
REPRESENTATION GRAPHIQUE  
DES PLUIES EXCEDENTAIRES (P - ETP),  
DECADE PAR DECADE. DE 1975 à 1985  
A CHARTRES. CHATEAUDUN ET ORLEANS-BRICY



**ANNEXE 5**  
**VOLUMES D'EAU PRELEVES (AEP)**  
**VALEURS MOYENNES MENSUELLES**  
**SUR LA PERIODE 1975-1984**

DEBITS MOYENS (en 1000 m3/mois ) affectes aux mailles (colonne 5 du fichier)

Lorsque la variabilite des debits etait jugee trop grande (coefficient de variation superieur a 0.5 ) il n y a pas eu affectation de valeurs moyennes dans les mailles concernees:les debits preleves ont alors ete pris en compte pas de temps par pas de temps (semestre par semestre)

=====  
Colonne 1: numero de maille  
Colonne 2: nombre d annees disponibles sur la periode de 20 semestres  
Colonne 3: valeur moyenne semestrielle( 1000 m3)  
Colonne 4: coefficient de variation  
Colonne 5: valeur moyenne mensuelle (=celle qui a ete affectee aux mailles)  
=====

9	6	9.7	0.43	1.617
10	6	16.8	0.19	2.792
10	6	12.9	0.21	2.150
11	4	19.3	0.11	3.217
40	6	5.8	0.09	0.967
42	10	174.3	0.07	29.042
72	10	39.4	0.08	6.567
74	6	38.8	0.12	6.467
102	5	17.0	0.05	2.833
102	5	17.0	0.05	2.833
102	5	17.0	0.05	2.833
105	6	30.1	0.14	5.025
107	5	25.3	0.22	4.217
133	6	27.8	0.12	4.633
140	4	19.1	0.15	3.192
165	7	7.4	0.01	1.242
166	7	11.9	0.11	1.992
171	1	41.5	0.00	6.917
171	10	72.0	0.18	12.000
195	7	33.5	0.20	5.592
198	5	8.2	0.20	1.367
205	6	61.7	0.10	10.283
205	4	30.5	0.73	5.092
205	6	42.2	0.30	7.033
205	5	24.3	0.38	4.050
205	5	7.2	0.30	1.200
208	6	8.1	0.36	1.350
226	8	8.4	0.30	1.400
228	8	16.1	0.26	2.683
233	10	91.1	0.27	15.175
237	1	11.1	0.00	1.842
237	3	70.6	0.39	11.758
238	3	68.4	0.08	11.400
238	7	143.9	0.83	23.975
240	6	8.9	0.09	1.483
257	8	94.2	0.23	15.692
258	8	19.2	0.28	3.200
259	8	16.6	0.18	2.775
260	3	18.0	0.02	3.008
267	10	39.5	0.15	6.575
271	4	10.6	0.07	1.775
272	4	11.6	0.11	1.925
287	1	13.6	0.00	2.267
289	8	19.1	0.35	3.183
290	8	1.1	0.12	0.192
296	10	40.3	0.15	6.708
298	3	1.5	0.07	0.242
298	6	14.2	0.12	2.367
301	5	12.9	0.10	2.158
317	8	29.8	0.27	4.967
323	2	11.7	0.03	1.950

324	10	86.2	0.19	14.358
327	10	53.9	0.48	8.983
331	6	21.9	0.13	3.642
334	4	9.9	0.06	1.642
335	6	23.0	0.26	3.825
352	5	9.8	0.14	1.633
356	10	262.8	0.19	43.792
358	10	65.8	0.29	10.967
360	6	20.4	0.28	3.400
363	8	25.6	0.56	4.267
364	10	72.2	0.33	12.033
364	10	417.6	0.17	69.608
364	10	165.1	0.22	27.525
364	6	20.9	0.22	3.475
364	6	14.7	0.12	2.450
365	6	22.0	0.21	3.658
367	10	33.7	0.23	5.617
369	4	11.7	0.13	1.950
379	6	5.1	0.46	0.850
381	8	25.3	0.20	4.208
381	8	10.8	0.10	1.800
383	8	13.0	0.22	2.167
384	4	11.6	0.41	1.925
386	2	14.8	0.01	2.467
388	10	31.1	0.56	5.192
393	10	49.2	0.23	8.200
396	10	15.0	0.40	2.500
397	6	15.5	0.13	2.583
399	4	33.8	0.15	5.633
408	8	8.8	0.15	1.458
408	1	11.3	0.00	1.875
410	7	7.2	0.15	1.192
411	3	3.0	0.23	0.508
412	7	8.1	0.13	1.358
414	8	18.3	0.26	3.042
415	8	11.4	0.23	1.900
416	8	1.5	0.42	0.250
418	1	5.1	0.00	0.842
420	10	34.3	0.15	5.708
421	5	11.1	0.07	1.842
424	10	28.0	0.14	4.675
426	10	51.3	0.15	8.550
427	10	23.3	0.14	3.875
428	10	51.3	0.12	8.542
431	10	23.6	0.13	3.942
431	10	24.8	0.13	4.125
439	8	11.1	0.23	1.858
439	8	14.9	0.20	2.483
440	7	10.0	0.00	1.667
442	8	6.9	0.11	1.158
442	8	23.8	0.08	3.958
444	8	32.8	0.23	5.475
446	5	9.4	0.08	1.575
449	5	10.3	0.12	1.708
456	8	28.4	0.20	4.725
457	10	55.8	1.56	9.308
458	10	30.5	0.13	5.083
461	10	44.7	0.75	7.450
472	7	7.4	0.24	1.242
474	8	102.5	0.05	17.083
475	1	6.1	0.00	1.008
477	8	15.6	0.08	2.608
478	8	61.8	0.37	10.300
478	8	32.9	0.37	5.483

480	4	5.9	0.06	0.983
481	7	8.3	0.09	1.375
482	8	12.4	0.14	2.075
483	8	60.2	0.17	10.033
483	8	117.1	0.13	19.508
485	10	68.1	0.15	11.350
488	10	26.9	0.16	4.483
489	6	22.9	0.23	3.817
490	5	12.1	0.12	2.025
492	10	63.3	0.42	10.558
492	5	44.8	0.33	7.458
493	8	20.8	0.17	3.458
494	7	65.1	0.48	10.850
494	10	80.3	0.39	13.383
498	7	13.2	0.13	2.200
501	8	19.9	0.12	3.308
504	6	6.1	0.18	1.017
508	8	28.4	0.08	4.725
510	8	72.8	0.11	12.142
512	8	25.0	0.14	4.175
520	9	62.5	0.63	10.408
522	1	27.4	0.00	4.567
522	10	110.3	0.16	18.375
524	5	13.8	0.07	2.292
527	10	53.0	0.17	8.842
530	4	9.1	0.12	1.508
531	8	20.9	0.16	3.483
533	7	8.0	0.10	1.333
535	8	14.9	0.14	2.492
536	8	22.4	0.13	3.725
538	8	13.4	0.22	2.225
545	8	34.3	0.17	5.725
556	10	63.0	0.44	10.500
559	8	11.4	0.12	1.908
563	8	21.5	0.11	3.575
565	8	46.5	0.08	7.742
570	1	44.4	0.00	7.400
570	1	46.6	0.00	7.767
571	8	105.3	0.12	17.558
577	8	59.5	0.21	9.925
585	7	147.6	0.37	24.592
585	9	146.3	0.68	24.383
590	8	32.0	0.10	5.333
592	8	15.3	0.18	2.542
597	8	15.9	0.11	2.642
599	6	36.1	0.19	6.017
599	8	39.3	0.18	6.542
601	8	91.9	0.32	15.325
603	8	201.7	0.21	33.617
603	8	316.9	0.11	52.808
612	8	64.8	0.11	10.800
617	10	107.3	0.14	17.883
631	5	7.8	0.04	1.300
633	8	408.2	0.13	68.033
633	8	161.1	0.14	26.858
634	8	392.2	0.28	65.367
634	8	184.9	0.21	30.825
634	8	146.9	0.20	24.492
634	8	247.4	0.29	41.233
634	8	264.8	0.35	44.133
635	2	49.3	0.24	8.225
635	8	2661.1	0.10	443.525
635	8	455.9	0.08	75.983
635	2	402.3	0.22	67.050

635	8	152.8	0.28	25.467
635	8	245.8	0.05	40.958
635	8	196.6	0.61	32.775
640	8	81.3	0.08	13.550
646	8	41.1	0.16	6.850
656	8	70.3	0.20	11.717
657	8	21.5	0.14	3.592
659	8	22.2	0.11	3.700
663	8	251.6	0.15	41.925
664	8	223.6	0.15	37.267
664	8	183.9	0.16	30.650
665	8	2976.4	0.27	496.058
666	8	1684.5	0.28	280.750
667	8	478.6	0.24	79.775
668	8	93.3	0.52	15.550
668	8	87.7	0.66	14.617
668	8	118.1	0.21	19.683
669	8	81.8	0.20	13.625
686	8	55.8	0.10	9.300
687	5	18.9	0.17	3.142
693	5	8.8	0.48	1.467
693	8	77.1	0.21	12.850
693	8	82.5	0.21	13.750
702	8	191.9	0.10	31.983
704	8	101.7	0.71	16.950
704	8	187.4	0.35	31.242
705	8	74.3	0.35	12.392
719	8	47.4	0.18	7.900
721	8	23.1	0.21	3.850
723	8	101.3	0.07	16.883
749	8	27.3	0.20	4.542
753	8	125.9	0.19	20.992
753	8	58.7	0.15	9.775
783	8	152.1	0.23	25.350
813	8	78.1	0.13	13.008



ANNEXE 6  
PARAMETRES DE MISE EN OEUVRE  
DU MODELE HYDRODYNAMIQUE  
DE LA NAPPE DES CALCAIRES DE BEAUCE

MODELE DE LA NAPPE DES CALCAIRES DE BEAUCE: FICHER DES PARAMETRES

1= NOMBRE DE COUCHES  
1069= NOMBRE DE MAILLES  
31= NOMBRE DE COLONNES DE GRANDES MAILLES  
3162.= COTE D UNE GRANDE MAILLE  
1= ICFS (INDEX DE CONTROLE ENVOYEMENT DES MAILLES si TOIT<H(=DEB)  
.1= EPAISSEUR MOUILLEE MINIMALE( pour suppression des instabilites)  
1= IVERI pour controle des liaisons  
15= NOMBRE D ITERATIONS sur un pas de calcul  
.05= ECART MAXIMUM (sur une maille) entre deux iterations= ERMAY en M.  
.1= ECART CUMULE SUR LES MAILLES (entre deux iterations)=ERMOY en M.  
0= ISAUT (CARTES PIEZOMETRIQUES INITIALES) \*0: IMPRESSION; 1: SAUTS  
0= IPRINT (IMPRESSIONS INITIALES) \*0: IMPRESSION; 1: SAUTS  
1= ITVSI (0=permanent 1=transitoire)  
1.578E7= DUREE D UN PAS DE MESURES EN SECONDES (ici =30.44 jours\*6=6mois)  
15= NOMBRE TOTAL DE PAS DANS LA SIMULATION  
2.630E5= PAS DE CALCUL MINIMUM (=3JOURS)  
2.630E6= PAS DE CALCUL MAXIMUM (=30 JOURS)  
1.4= FACT.DE PROGRESSION GEOM.DU PAS DE CALCUL DANS LE PAS DE SIMULATION  
20= NOMBRE DE PAS AVEC DES MODIFICATIONS  
5= NOMBRE DE PAS AVEC DES SORTIES

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20												
16	17	18	19	20											

0= LECTURE DE TRANSMISSIVITES COUCHE 1  
0= CALCULS AVEC LES TRANSMISSIVITES COUCHE 1  
1.E-4= COEFFICIENT UNITE DE PERMEABILITES HORIZONTALES (M/S)  
1.E-4= COEFFICIENT UNITE DE TRANSMISSIVITES HORIZONTALES (M2/S)  
3.80E-4= COEFFICIENT UNITE DE DEBITS (M3/S) (debits entres en 1000M3/MOIS)  
1.E-1= COEFFICIENT UNITE DE CHARGES (M) (H entree en dcm)  
1.E-4= COEFFICIENT UNITE DE PERMEABILITES VERTICALES (M/S)  
1.E-2= COEFFICIENT UNITE DE EMMAGASINEMENTS LIBRES (entre en %)  
1.E-4= COEFFICIENT UNITE DE EMMAGASINEMENTS CAPTIFS  
3.80E-10= COEFFICIENT UNITE DE VIT. INFIL. PLUIE (entree en mm/mois)  
1.157E-11= COEFFICIENT UNITE DE VIT. INFIL. IRRIG (entree en m3/j/km2)  
HISTORIQUES CHARGES REG. TRANSITOIRE ( 6 premiers chiffres= numero de maille)

1	10500001	13900001	23100001	23400001	29100001	29300001
2	30270001	33100001	37990001	39000001	41300001	42600001
3	44900001	45300001	45900001	46200001	48100001	48300001
4	48500001	50200001	50700001	53100001	54000001	54300001
5	56200001	56500001	57200001	57700001	59100001	59220001
6	59500001	59800001	60500001	63100001	63200001	65700001
7	66000001	66370001	66950001	69250001	72000001	72100001
8						
9						

HISTORIQUES DE DEBITS REGIME TRANSITOIRE

1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						

\* 123456789  
SORTIES BILANS ET CARTES REGIME PERMANENT

1CNUM=	01CMIN=	800.	CMAX=	1350.	CINC=	25.	1X1Z=	11X2Z=	311Y1Z=	11Y2Z=	28	IOZ=	1
2CNUM=	CMIN=	0.	CMAX=	0.	CINC=	0.	1X1Z=	01X2Z=	01Y1Z=	01Y2Z=	0	IOZ=	0
3CNUM=	CMIN=	0.	CMAX=	0.	CINC=	0.	1X1Z=	01X2Z=	01Y1Z=	01Y2Z=	0	IOZ=	0
4CNUM=	CMIN=	0.	CMAX=	0.	CINC=	0.	1X1Z=	01X2Z=	01Y1Z=	01Y2Z=	0	IOZ=	0
5CNUM=	CMIN=	0.	CMAX=	0.	CINC=	0.	1X1Z=	01X2Z=	01Y1Z=	01Y2Z=	0	IOZ=	0
6CNUM=	CMIN=	0.	CMAX=	0.	CINC=	0.	1X1Z=	01X2Z=	01Y1Z=	01Y2Z=	0	IOZ=	0
7CNUM=	CMIN=	0.	CMAX=	0.	CINC=	0.	1X1Z=	01X2Z=	01Y1Z=	01Y2Z=	0	IOZ=	0
8CNUM=	CMIN=	0.	CMAX=	0.	CINC=	0.	1X1Z=	01X2Z=	01Y1Z=	01Y2Z=	0	IOZ=	0
9CNUM=	CMIN=	0.	CMAX=	0.	CINC=	0.	1X1Z=	01X2Z=	01Y1Z=	01Y2Z=	0	IOZ=	0
0CNUM=	CMIN=	0.	CMAX=	0.	CINC=	0.	1X1Z=	01X2Z=	01Y1Z=	01Y2Z=	0	IOZ=	0

0= COEFFICIENT DE SOUS-RELAXATION  
0= LECTURE DES CHARGES HYDRAULIQUES INITIALES SUR FICHER EXTERNE  
0= ECRITURE SUR LISTING DES DONNEES INITIALES  
1= ECRITURE DES CHARGES CALCULEES FINALES SUR FICHER EXTERNE  
5= NOMBRE ET NUMEROS DES PAS DE SORTIE DE LA PIEZOMETRIE

16	17	18	19	20
----	----	----	----	----

ANNEXE 7  
TENEURS EN NITRATES EN 1981 ET 1984  
SUR 236 POINTS D'EAU

NOTE: La premiere partie de ce fichier (de 1 a 94) est constituee a l'aide des donnees du fichier de l'Agence de Bassin LOIRE-BRETAGNE. (valeurs moyennes par point d'eau des quelques analyses annuelles)

La seconde partie a ete constituee en utilisant les donnees de la D.D.A.S.S. d'EURE-et -LOIR ; elle a ete completee par des resultats resultats obtenus dans le cadre des etudes menees par le Service Geologique Regional CENTRE

Au total 236 points parmi lesquels les 232 qui ont servi a construire la carte des differences de teneurs (+ 4 points aux teneurs superieures a 100 mg/l).

	COORDONNEES		NITRATES(mg/l)	
	X	Y	1981	1984
1 ARTENAY	564.80	2342.50	32.2	39.6
2 ASCHERES LE MARCH	576.15	2340.31	39.0	33.3
3 DADONVILLE	593.75	2351.00	19.0	24.0
4 AULNAY-LA-RIVIERE	601.12	2357.12	28.5	34.1
5 AUTRUY-SUR-JUINE	581.79	2363.70	43.3	43.4
6 AUXY	610.15	2346.60	18.0	25.9
7 BACCON	546.78	2321.70	30.5	32.0
8 BAZOCHES LES GALL	577.68	2352.57	30.5	33.0
9 BEAUNE-LA-ROLANDE	606.52	2341.10	41.0	20.5
10 BEAUNE-LA-ROLANDE	607.50	2341.47	21.0	21.0
11 BELLEGARDE	607.65	2331.22	0.5	2.0
12 BELLEGARDE	607.18	2331.61	0.5	0.1
13 BOISCOMMUN	603.72	2337.31	0.3	0.1
14 BONNEE	604.12	2311.75	46.3	51.5
15 LES BORDES	605.35	2313.45	21.0	28.0
16 BOYNES	601.92	2347.10	41.0	46.0
17 BRICY-BOULAY	559.55	2332.54	41.5	45.7
18 BUCY-LE-ROI	569.11	2340.08	26.0	27.0
19 BUCY ST LIPHARD	567.22	2326.41	36.0	48.0
20 CHAINGY	557.93	2320.50	0.1	0.1
21 CHAMBON-LA-FORET	596.50	2340.20	0.1	0.1
22 LA CHAPELLE ONZER	545.62	2337.17	39.5	41.5
23 CHARMONT EN BEAUC	582.61	2358.80	41.5	46.6
24 CHARSONVILLE	543.00	2325.95	31.5	36.5
25 CHATEAUNEUF / LOI	591.28	2318.04	0.1	0.1
26 CHATEAUNEUF/LOIRE	591.85	2318.28	0.1	0.1
27 CHATILLON-LE-ROI	582.38	2351.26	67.8	55.6
28 BOIGNY CHECY COMB	576.85	2322.15	0.3	0.1
29 BOIGNY CHECY COMB	574.97	2322.75	0.1	2.0
30 ST MAURICE / FESS	621.32	2329.42	9.0	10.0
31 CHEVILLY	565.83	2337.13	23.5	27.6
32 CHILLEURS-AUX-BOI	584.95	2341.85	25.0	27.4
33 COINCES	555.70	2334.90	48.5	56.4
34 CORBEILLES	614.83	2341.88	16.0	18.4
35 BRIARRES/ESSONNE	606.82	2359.46	15.0	17.8
36 DONNERY	582.89	2323.90	0.1	0.1
37 ECHILLEUSES	607.62	2351.37	6.5	8.0
38 ENGENVILLE	593.30	2360.00	22.5	25.1
39 EPIEDS EN BEAUCE	543.98	2330.97	61.5	78.8
40 EPIEDS EN BEAUCE	546.25	2328.79	58.5	66.0
41 ESCRENNES	588.35	2348.62	3.0	0.1
42 FAY-AUX-LOGES	585.75	2325.77	0.1	0.2
43 FLEURY LES AUBRAI	568.20	2326.17	6.8	8.5
44 FLEURY LES AUBRAI	569.40	2325.80	0.5	0.5
45 GEMIGNY	553.18	2328.95	60.0	69.0
46 GIDY CERCOTTES HU	562.69	2332.79	34.0	38.9
47 GRENEVILLE	583.16	2353.85	37.5	41.6
48 GUIGNEVILLE	588.73	2356.22	46.0	48.7
49 GEMIGNY	552.24	2322.02	0.1	17.5

50	INGRANNES	589.92	2332.33	0.8	0.1
51	INGRE	562.29	2325.20	29.0	30.6
52	LION-EN-BEAUCE	569.96	2348.13	37.0	43.3
53	LOURY	581.07	2333.89	7.3	8.3
54	MAINVILLIERS	596.36	2366.39	35.5	38.1
55	MALESHERBES	605.64	2364.49	31.8	36.3
56	MANCHECOURT	600.46	2360.86	34.5	42.3
57	MARSAINVILLIERS	595.45	2357.40	26.8	35.4
58	MEUNG / LOIRE	551.60	2314.05	17.0	17.0
59	MEUNG SUR LOIRE	553.26	2315.86	19.5	21.0
60	MONTIGNY	583.08	2346.15	31.3	36.7
61	NANCRAY / RIMARDE	598.95	2340.26	46.5	43.4
62	NIBELLE	601.42	2333.52	0.5	0.1
63	NEUVILLE AUX BOIS	579.17	2340.65	92.0	10.4
64	NEUVILLE AUX BOIS	578.77	2342.17	0.1	0.4
65	ORMES	561.03	2327.22	15.0	17.9
66	OUTARVILLE	577.17	2356.78	51.5	55.7
67	PATAY	551.75	2339.65	46.0	44.8
68	PITHIVIERS LE VIE	589.77	2351.72	26.0	26.6
69	ROUVRAY STE CROIX	554.73	2340.27	119.0	121.3
70	RUAN	570.33	2345.63	44.5	44.0
71	ST AY	557.15	2318.36	0.1	0.1
72	ST DENIS DE L HOT	584.05	2319.40	8.5	11.0
73	ST JEAN DE BRAYE	572.15	2323.42	0.5	0.5
74	ST JEAN DE BRAYE	572.35	2323.37	0.5	0.5
75	ST JEAN DE LA RUE	564.49	2324.22	33.5	35.4
76	ST JEAN DE LA RUE	565.23	2322.35	31.0	33.5
77	ST JEAN DE LA RUE	565.60	2324.72	28.0	30.1
78	ST LYE LA FORET	572.72	2338.48	1.0	2.1
79	ST MARTIN D'ABBAT	595.30	2317.52	0.1	0.1
80	ST PERAVY-LA-COLO	552.05	2333.72	12.5	12.6
81	SARAN	565.75	2328.63	28.8	31.0
82	SARAN	566.11	2325.63	28.5	30.0
83	SARAN	567.07	2327.75	22.8	4.0
84	SCEAUX DU GATINAI	619.72	2344.65	20.5	22.4
85	SERMAISES	590.30	2366.07	40.0	45.6
86	SOUGY	559.33	2339.97	34.0	39.3
87	SURY-AUX-BOIS	601.81	2326.50	0.1	0.3
88	TOURNOISIS	547.47	2333.28	65.5	76.8
89	TRAINOU	582.40	2330.92	1.8	4.4
90	TRINAY	572.45	2342.57	37.0	38.4
91	VILLAMBLAIN	541.75	2335.45	42.5	50.8
92	VILLENEUVE / CONI	548.95	2338.07	32.5	33.6
93	VITRY AUX LOGES	594.60	2327.72	0.1	0.1
94	VRIGNY COURCY	592.10	2342.20	0.5	0.1
=====					
95	ALLAINVILLE	579.21	2359.81	44.0	46.0
96	ASCOUX	593.71	2347.48	19.0	26.0
97	AUDEVILLE	592.75	2364.36	44.0	51.0
98	AULNAY	603.25	2355.10	29.0	33.0
99	AUVILLIERS	612.34	2329.24	0.1	0.1
100	BACCON	546.91	2321.44	31.0	36.0
101	BATILLY	603.42	2341.48	36.0	37.0
102	BAULE	550.17	2312.48	0.1	0.5
103	BONDAROY	595.37	2352.91	31.0	36.0
104	BOUZONVILLE	592.01	2356.05	144.0	44.0
105	BROMEILLES	612.05	2353.85	34.0	53.0
106	CERCOTTES	566.14	2331.80	31.0	35.0
107	CESARVILLE	595.42	2362.40	33.0	39.0
108	CHAUSSY	573.57	2352.18	32.0	38.0
109	CHEVILLON/HUIL.	621.42	2329.00	9.0	9.5
110	CHEVILLY	565.61	2336.43	24.0	44.0
111	COUDRAY	602.42	2363.79	27.0	33.0
112	COURCY	590.98	2340.38	0.5	0.5

113	CRAVANT	542.75	2314.59	23.0	28.0
114	CROTTES	579.97	2347.20	44.0	47.0
115	DIMANCHEVILLE	607.15	2359.51	15.0	18.0
116	EGRY	607.41	2344.63	24.0	26.0
117	EPIEDS	546.14	2328.07	59.0	80.0
118	ERCEVILLE	577.67	2360.02	37.0	40.0
119	ESCRENNES	589.03	2348.14	3.0	1.0
120	ESTOUY	599.31	2354.13	34.0	40.0
121	FARONVILLE	578.65	2357.01	66.0	67.0
122	GIDY	562.71	2332.20	34.0	36.0
123	GIVRAINES	602.41	2349.86	47.0	50.0
124	GRENEVILLE	583.26	2353.55	38.0	42.0
125	HUISSEAU	552.72	2321.21	0.1	0.1
126	INTVILLE	590.80	2362.43	35.0	40.0
127	JOUY	583.43	2346.19	29.0	36.0
128	JURANVILLE	611.90	2339.24	16.0	17.0
129	LAAS	591.15	2346.56	75.0	79.0
130	LABROSSE	604.22	2360.47	23.0	31.0
131	LORRIS	613.05	2321.02	0.5	0.1
132	MAREAU	588.95	2344.77	0.1	0.1
133	MARSAINVILLIERS	596.08	2357.90	26.0	39.0
134	MEZIERES EN GAT	611.45	2337.05	0.1	0.1
135	MIGNERES	621.24	2338.61	25.0	27.0
136	MONTIGNY	583.21	2345.80	32.0	39.0
137	MORVILLE	587.73	2361.21	39.0	41.0
138	NANGEVILLE	599.01	2367.81	21.0	24.0
139	NESPLOY	601.99	2332.81	0.5	0.5
140	NEUVILLE/ESSONE	602.93	2354.04	40.0	44.0
141	OISON	572.86	2348.63	37.0	40.0
142	ORVEAU	599.43	2364.87	35.0	45.0
143	PANNECIERES	585.83	2365.97	47.0	48.0
144	ROUVRES	590.72	2369.31	29.0	33.0
145	ST LOUP	606.39	2337.84	1.0	0.5
146	ST MAURICE/FESS	620.92	2332.25	9.0	9.0
147	TEILLAY GAUDIN	573.37	2353.98	49.0	57.0
148	THIGNONVILLE	587.88	2364.51	47.0	49.0
149	TREILLES EN GAT.	623.98	2341.87	113.0	56.0
150	VILLEREAU	574.32	2341.05	60.0	54.0
151	YEVRE LA VILLE	599.22	2349.57	44.0	50.0
152	ALLAINES MERVIL.	561.96	2356.22	41.0	35.0
153	ALLONES	549.48	2370.33	54.0	56.0
154	ARDELU	568.38	2372.71	46.0	42.0
155	AUNAY	561.01	2382.44	17.0	20.0
156	AUNEAU	558.35	2384.73	22.0	24.0
157	BAIGNEAUX	561.37	2347.64	48.0	58.0
158	BAIGNOLET	546.77	2352.72	81.0	90.0
159	BARMAINVILLE	572.45	2362.87	45.0	47.0
160	BAUDREVILLE	568.06	2370.34	46.0	46.0
161	BEAUVILLIERS	549.34	2366.53	106.0	31.0
162	BAZOCHE HAUTES	560.13	2350.34	32.0	34.0
163	BAZOCHE EN DUN.	542.57	2344.87	52.0	52.0
164	BEVILLE	553.82	2381.99	62.0	59.0
165	BOISVILLE	552.26	2370.07	30.0	36.0
166	BULLAINVILLE	539.78	2351.84	39.0	42.0
167	CHAPELLE AUNAINV	561.32	2380.69	25.0	24.0
168	CHATENAY	566.57	2373.16	47.0	46.0
169	CONIE MOLITARD	533.32	2346.08	36.0	32.0
170	CORMAINVILLE	545.82	2348.81	44.0	42.0
171	COURBEHAYE	545.84	2351.18	49.0	45.0
172	DAMBRON	565.60	2346.11	47.0	61.0
173	DANCY	535.02	2350.35	33.0	43.0
174	DENONVILLE	561.04	2377.01	36.0	43.0
175	FAINS LA FOLIE	548.06	2358.44	38.0	44.0
176	FERTE VILLE.	525.87	2331.83	37.0	37.0

114	CROTTE	579.97	2347.20	44.0	47.0
115	DIMANCHEVILLE	607.15	2359.51	15.0	18.0
116	EGRY	607.41	2344.63	24.0	26.0
117	EPIEDS	546.14	2328.07	59.0	80.0
118	ERCEVILLE	577.67	2360.02	37.0	40.0
119	ESCRENNES	589.03	2348.14	3.0	1.0
120	ESTOUY	599.31	2354.13	34.0	40.0
121	FARONVILLE	578.65	2357.01	66.0	67.0
122	GIDY	562.71	2332.20	34.0	36.0
123	GIVRAINES	602.41	2349.86	47.0	50.0
124	GRENEVILLE	583.26	2353.55	38.0	42.0
125	HUISSEAU	552.72	2321.21	0.1	0.1
126	INTVILLE	590.80	2362.43	35.0	40.0
127	JOUY	583.43	2346.19	29.0	36.0
128	JURANVILLE	611.90	2339.24	16.0	17.0
129	LAAS	591.15	2346.56	75.0	79.0
130	LABROSSE	604.22	2360.47	23.0	31.0
131	LORRIS	613.05	2321.02	0.5	0.1
132	MAREAU	588.95	2344.77	0.1	0.1
133	MARSAINVILLIERS	596.08	2357.90	26.0	39.0
134	MEZIERES EN GAT	611.45	2337.05	0.1	0.1
135	MIGNERES	621.24	2338.61	25.0	27.0
136	MONTIGNY	583.21	2345.80	32.0	39.0
137	MORVILLE	587.73	2361.21	39.0	41.0
138	NANGEVILLE	599.01	2367.81	21.0	24.0
139	NESPLOY	601.99	2332.81	0.5	0.5
140	NEUVILLE/ESSONE	602.93	2354.04	40.0	44.0
141	OISON	572.86	2348.63	37.0	40.0
142	ORVEAU	599.43	2364.87	35.0	45.0
143	PANNECIERES	585.83	2365.97	47.0	48.0
144	ROUVRES	590.72	2369.31	29.0	33.0
145	ST LOUP	606.39	2337.84	1.0	0.5
146	ST MAURICE/FESS	620.92	2332.25	9.0	9.0
147	TEILLAY GAUDIN	573.37	2353.98	49.0	57.0
148	THIGNONVILLE	587.88	2364.51	47.0	49.0
149	TREILLES EN GAT.	623.98	2341.87	113.0	56.0
150	VILLEREAU	574.32	2341.05	60.0	54.0
151	YEVRE LA VILLE	599.22	2349.57	44.0	50.0
152	ALLAINES MERVIL.	561.96	2356.22	41.0	35.0
153	ALLONES	549.48	2370.33	54.0	56.0
154	ARDELU	568.38	2372.71	46.0	42.0
155	AUNAY	561.01	2382.44	17.0	20.0
156	AUNEAU	558.35	2384.73	22.0	24.0
157	BAIGNEAUX	561.37	2347.64	48.0	58.0
158	BAIGNOLET	546.77	2352.72	81.0	90.0
159	BARMANVILLE	572.45	2362.87	45.0	47.0
160	BAUDREVILLE	568.06	2370.34	46.0	46.0
161	BEAUVILLIERS	549.34	2366.53	106.0	31.0
162	BAZOCES HAUTES	560.13	2350.34	32.0	34.0
163	BAZOCES EN DUN.	542.57	2344.87	52.0	52.0
164	BEVILLE	553.82	2381.99	62.0	59.0
165	BOISVILLE	552.26	2370.07	30.0	36.0
166	BULLAINVILLE	539.78	2351.84	39.0	42.0
167	CHAPELLE AUNAINV	561.32	2380.69	25.0	24.0
168	CHATENAY	566.57	2373.16	47.0	46.0
169	CONIE MOLITARD	533.32	2346.08	36.0	32.0
170	CORMAINVILLE	545.82	2348.81	44.0	42.0
171	COURBEHAYE	545.84	2351.18	49.0	45.0
172	DAMBRON	565.60	2346.11	47.0	61.0
173	DANCY	535.02	2350.35	33.0	43.0
174	DENONVILLE	561.04	2377.01	36.0	43.0
175	FAINS LA FOLIE	548.06	2358.44	38.0	44.0
176	FERTE VILLE.	525.87	2331.83	37.0	37.0
177	FONTENAY/CONIE	550.17	2351.86	34.0	36.0

178	FRANCOURVILLE	549.81	2378.46	60.0	60.0
179	FRESNAY	561.96	2363.07	46.0	43.0
180	GARANCIERES	569.18	2381.70	32.0	36.0
181	GERMIGNONVILLE	555.48	2354.93	49.0	52.0
182	GOMMERVILLE	571.04	2371.92	32.0	39.0
183	GOUILLONS	563.01	2371.62	26.0	26.0
184	GUILLEVILLE	561.12	2358.39	42.0	43.0
185	GUILLONVILLE	549.91	2343.47	44.0	45.0
186	HOUVILLE	549.19	2384.25	19.0	19.0
187	INTREVILLE	570.41	2366.38	38.0	50.0
188	JANVILLE	566.47	2355.54	40.0	48.0
189	LE MEE	531.24	2332.32	41.0	47.0
190	LETHUIN	565.18	2370.94	28.0	28.0
191	LEVESVILLE	562.17	2367.06	32.0	33.0
192	LOIGNY	555.18	2343.19	12.0	27.0
193	LOUVILLE	559.42	2369.55	33.0	36.0
194	LUMEAU	558.98	2346.34	47.0	64.0
195	LUTZ	530.97	2340.35	41.0	47.0
196	MAISONS	563.65	2378.78	52.0	56.0
197	MEROUVILLE	567.41	2366.34	39.0	52.0
198	MERVILLIERS	561.97	2353.35	40.0	49.0
199	MOINVILLE	552.85	2375.75	13.0	18.0
200	MONDONVILLE	562.21	2373.88	42.0	44.0
201	MORAINVILLE	562.28	2375.69	36.0	36.0
202	MOUTIERS	558.48	2366.40	40.0	41.0
203	NEUVY	565.89	2363.17	50.0	58.0
204	NOTTONVILLE	538.31	2346.05	37.0	36.0
205	OINVILLE ST LY	568.80	2359.46	51.0	48.0
206	OINVILLE /AUN.	554.94	2385.34	18.0	20.0
207	ORGERES EN B.	551.56	2349.59	57.0	68.0
208	ORLU	569.10	2374.57	49.0	48.0
209	OUARVILLE	558.33	2372.90	43.0	47.0
210	OYSONVILLE	571.84	2377.31	48.0	53.0
211	OZDIR	536.03	2335.24	60.0	72.0
212	PERONVILLE	543.85	2340.67	45.0	48.0
213	POINVILLE	567.71	2353.10	47.0	46.0
214	POUPRY	563.10	2344.54	42.0	48.0
215	PRASVILLE	553.59	2364.25	49.0	70.0
216	PRUNAY	547.88	2374.29	72.0	63.0
217	PUISET	565.43	2352.94	43.0	54.0
218	RECLAINVILLE	556.32	2371.17	33.0	36.0
219	ROINVILLE	556.43	2379.44	19.0	21.0
220	ROUVRAY ST DEN.	570.89	2364.44	47.0	46.0
221	SAINVILLE	566.05	2379.72	40.0	42.0
222	SANCHEVILLE	543.30	2354.95	33.0	38.0
223	SANTEUIL	555.35	2376.48	66.0	42.0
224	SANTILLY	565.44	2349.74	34.0	38.0
225	TERMIERS	555.47	2342.60	27.0	29.0
226	THIVILLE	528.22	2336.61	33.0	35.0
227	TILLAY	558.19	2351.29	59.0	68.0
228	TOURY	570.40	2355.14	44.0	48.0
229	TRANCRAINVILLE	564.69	2360.05	47.0	53.0
230	UMPEAU	550.79	2386.66	22.0	29.0
231	VARIZE	539.18	2340.69	34.0	36.0
232	VIABON	552.93	2357.63	45.0	39.0
233	VILLAMPUY	538.39	2337.80	83.0	91.0
234	VILLIERS ST OR.	537.03	2348.39	33.0	40.0
235	VOVES	547.23	2363.76	29.0	33.0
236	YMONVILLE	556.39	2362.36	37.0	41.0

ANNEXE 8  
NOTE SUR LES PARAMETRES  
D'UNE INTERPOLATION PAR KRIGEAGE

### 1) PARAMETRES D'UNE INTERPOLATION PAR KRIGEAGE

En général, l'utilisateur d'un programme d'interpolation a la maîtrise des deux paramètres suivants :

- la dimension de la maille de calcul, de côtés  $D_x$  et  $D_y$ ,
- un rayon d'interpolation maximum  $R_{MAX}$ , définissant un disque centré sur le point en lequel une valeur est à calculer.

En l'absence de points de mesures à l'intérieur de ce disque, il n'y aura pas interpolation. Ce paramètre, que l'on peut borner en fonction d'une connaissance préalable de la répartition spatiale des points de mesures, permet d'éviter l'affectation de valeurs dans des secteurs démunis de points, valeurs qui seraient sinon calculées à partir de points éloignés et donc peu crédibles.

A ces deux paramètres, le krigeage en ajoute un troisième qui est le nombre minimum de points du voisinage de recherche jugés nécessaires pour que les calculs propres à cette méthode puissent être correctement menés, en particulier les calculs d'estimation de la dérive. Si l'on convient de représenter la dérive par un polynôme de degré  $k$  ( $k = 0, 1$  ou  $2$  dans la plupart des cas) le nombre de points requis est fonction du nombre de monômes de base ( $1, X, Y, XY, X^2, Y^2$ ) entrant dans la composition de dérive (tabl.A1).

Ordre de la dérive	Monômes de base	Nombre de points préconisés dans le voisinage de krigeage
$k = 0$	1	5
$k = 1$ (dérive linéaire)	1, X, Y	12
$k = 2$ (dérive quadratique)	1, X, Y, XY, $X^2$ , $Y^2$	16

tableauA1 - Nombre de points préconisés à l'intérieur du voisinage de recherche pour déterminer, dans le krigeage, l'ordre de la dérive.

Si, pour un modèle de dérivé testé, le nombre de points recommandé ne peut être trouvé, les calculs s'effectuent néanmoins sauf si le nombre de points rencontrés devient inférieur au nombre de monômes de base (1, 3 ou 6 selon l'ordre  $k$ ) auquel cas l'estimation aux points de calcul n'est pas faite.

Enfin, le krigeage accorde un degré de liberté supplémentaire en laissant à l'utilisateur la possibilité de recourir à un modèle de variogramme ou de covariance autre que celui qui aura été déterminé automatiquement.

2) PARAMETRES DES VARIOGRAMMES ASSORTIS AUX CARTES DES FIGURES 17 ET 18

Ces variogrammes ainsi que leurs caractéristiques modélisées sont présentés en figures A1 et A2.

Dans les deux cas, en 1981 et 1984, il y a effet de pépite et variogramme linéaire.

. Vérification de la qualité de l'ajustement :

Pour tester la pertinence des modèles retenus, il est possible d'estimer les valeurs de la variable aux points où elles sont déjà connues à partir des données du voisinage : pour cela, on supprime l'un après l'autre les points expérimentaux  $x_i$  ; en chacun des points, on obtient la valeur estimée  $z^*(x_i)$  et par conséquent, connaissant la valeur réelle ( $z(x_i)$ ); on peut calculer l'erreur  $e_i = z^*(x_i) - z(x_i)$ ; les erreurs  $e_i$  sont ensuite comparées aux écarts-types d'estimation théoriques  $\sigma_i^2$ . Un ajustement correct doit se traduire par :

- une erreur moyenne voisine de 0 :
- une erreur quadratique réduite proche de 1 :

	Moyenne des erreurs	Erreur quadratique réduite
1981	0.427	1.098
1984	0.209	1.319

tableau A2 - Qualité des ajustements opérés.

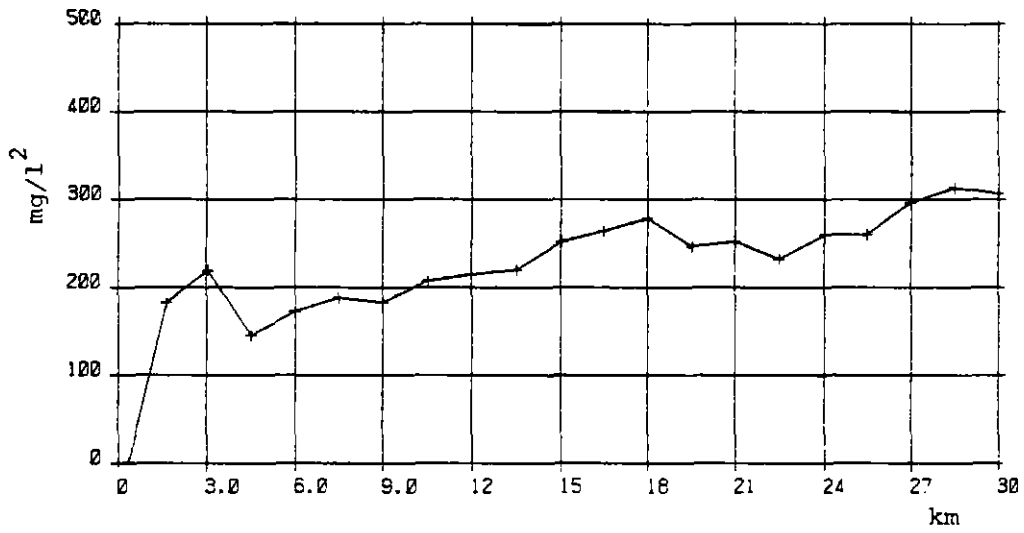


Figure A1 : variogramme moyen du champ de teneurs en nitrates de 1981 modélisé par un effet de pépité de 139 et une droite de pente 2.8

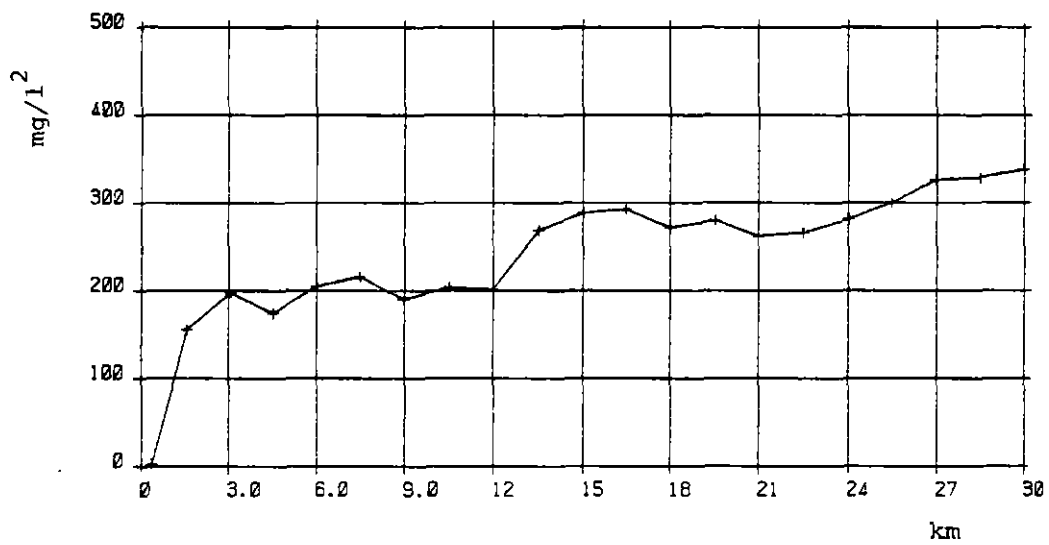


Figure A2 : variogramme moyen du champ de teneur en nitrates de 1984 modélisé par un effet de pépité de 104 et une droite de pente 7.5

ANNEXE 9

EQUATIONS DU TRANSPORT D'UN ELEMENT  
EN MILIEU SATURE

NOTE SUR LES PROBLEMES NUMERIQUES  
LIES A UNE RESOLUTION  
SUIVANT UN SCHEMA AUX DIFFERENCES FINIES

## EQUATIONS DU TRANSPORT D'UN ELEMENT EN SOLUTION DANS UN MILIEU SATURE

Dans le cas général où l'on considère une fraction d'eau mobile et une fraction immobile, l'équation de diffusion convection peut s'écrire :

$$\text{div} (\omega \bar{\bar{D}} \text{grad } C - C \bar{V}) = \omega_c \partial C / \partial t + (\omega - \omega_c) \partial C_{im} / \partial t + \Sigma$$

avec  $\bar{\bar{D}} = \bar{\bar{D}}_m + \bar{\alpha} \cdot u$

où  $\omega_c$  porosité cinématique

$\omega$  porosité totale

$\bar{\bar{D}}$  tenseur de dispersion ( $m^2 s^{-1}$ )

$\bar{\bar{D}}_m$  tenseur de diffusion moléculaire (isotrope) ( $m^2 s^{-1}$ )

$\bar{\alpha}$  tenseur de dispersivité (m)

$C$  concentration dans la phase mobile ( $kg m^{-3}$ )

$C_{im}$  concentration dans la fraction eau immobile ( $kg/m^3$ )

$V$  vitesse de Darcy ( $m s^{-1}$ )

$u = V/\omega_c$  vitesse effective ou moyenne de pore ( $m s^{-1}$ )

$\Sigma$  terme englobant les mécanismes susceptibles d'intervenir en cours de transport (adsorption, décroissance radioactive, ...)

### Prise en compte de l'adsorption

$$\Sigma = (1 - \omega) \rho_s \partial S / \partial t$$

où  $S$  concentration dans la phase solide ( $kg/kg$ )

$\rho_s$  masse volumique de la phase solide ( $kg/m^3$ )

Il faut alors faire intervenir :

- une cinétique d'échange, par exemple :

$$\partial S / \partial t = k (S_{eq} - S)$$

avec  $S_{eq}$  concentration de l'élément dans la phase solide à l'équilibre (en  $kg/kg$ ),  
 $k$  constante de la cinétique

- une relation d'équilibre (= isotherme d'équilibre)  $S_{eq} = f(C)$ , par exemple :

$$S_{eq} = K_D C$$

avec  $K_D$  coefficient de distribution ( $m^3/kg$ ).

La résolution de l'équation de diffusion-convection à l'aide d'un schéma aux différences finies peut s'accompagner de perturbations numériques qu'il convient de contrôler au mieux pour éviter l'obtention d'un champ de concentrations qui pourrait être fort éloigné de la solution exacte. Ces perturbations peuvent être induites :

- par la diffusion numérique,
- par des oscillations dans les concentrations calculées ("overshoot").

Ces deux sources d'erreurs sont liées.

La diffusion numérique résulte de l'erreur de troncature faite en approximant le terme de convection à l'aide de différences finies d'ordre 1. Cette approximation entraîne un "étalement" des concentrations analogue à celui que provoquerait un terme de diffusion (d'où le nom de diffusion numérique).

Si l'on peut, par divers artifices, s'affranchir de cette diffusion numérique dans le cas d'un écoulement monodimensionnel, cela est beaucoup plus difficile dans le cas d'un écoulement bidimensionnel. En particulier le schéma de discrétisation à retenir sera fonction de l'orientation du maillage par rapport aux directions d'écoulement.

réalisation  
service  
reprographie  
du BRGM

