

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE
DES MINES DE PARIS

CENTRE D'INFORMATIQUE GEOLOGIQUE

Journées Hydrologiques
de l'ORSTOM
14-15 Septembre 1988
à Montpellier

MODELISATION CONJOINTE
DU CYCLE DE L'EAU
ET DU TRANSFERT DES NITRATES
SUR UN SYSTEME HYDROLOGIQUE

Résumé de la communication faite par

G. GIRARD

LHM/RD/88/90

INTRODUCTION

Depuis ces dernières décennies, le problème de la pollution des eaux par les nitrates employés comme engrais chimiques en agriculture est devenu très préoccupant.

L'évolution croissante des teneurs en nitrates dans les eaux de source, à un rythme de 2 mg/litre/an (source de la petite Traconne, Calcaire de Brie) et l'extension en superficie des zones en France pour lesquelles la concentration de nitrates dans les eaux souterraines ne cesse de croître (fig.1), nous ont conduit tout particulièrement à la modélisation conjointe du cycle de l'eau et du transfert de nitrates sur un système hydrologique.

Ayant conçu deux modèles assurant :

- l'un, la simulation conjointe des écoulements superficiels [1] et souterrains ainsi que leur interaction sur les bassins versants,
- l'autre, les transferts d'éléments dissous conservatifs [3],

il nous a été possible de réaliser un nouvel outil permettant de modéliser la représentation des effets de dilution des nitrates dans les nappes souterraines et d'apporter ainsi un élément constructif à la lutte contre la pollution des eaux de nappe [9].

L'évolution parallèle de la consommation d'engrais minéraux en France et de la concentration de nitrates dans les eaux de puits du Bassin Parisien, à Port-Franc, depuis 1958 (fig.2) montre l'existence d'un décalage temporel de 8 à 12 ans pouvant être attribué aux effets de transfert des nitrates dans l'épaisse zone non saturée associés aux effets de dilution de ces eaux nitratées dans les eaux de la nappe.

La prise en compte d'une partie du cycle de l'azote s'imposait pour appréhender la production des nitrates dans les zones superficielles du sol.

Les développements concernant l'approche de la modélisation conjointe du cycle de l'eau et du transfert des nitrates sur un système hydrologique, la réalisation d'un module de production de nitrates applicable aussi bien pour une case lysimétrique que pour des portions de bassins homogènes, et les applications commentées de ce modèle sur des cas précis de trois régions françaises vous seront présentés d'une manière condensée. La plus grande partie des résultats obtenus est extraite des travaux de thèse de M. Q.Z. Geng [12] qu'il a effectués au Centre d'Informatique Géologique, sous ma direction.

1. APPROCHE CONCEPTUELLE DE MODELISATION

Rappelons rapidement que la modélisation du cycle de l'eau sur un système hydrologique est actuellement réalisée à partir d'un modèle hydrologique distribué de manière à prendre en compte les variations spatiales et occasionnellement temporelles des caractéristiques physiographiques du système (relief, réseaux de drainage, type de sol, couverture végétale et occupation des sols, épaisseur de la zone non saturée située hors de la zone d'extraction racinaire et la nappe, extension, épaisseur et caractéristiques des aquifères).

Ce même modèle prend en compte les variations spatio-temporelles des éléments climatiques (précipitation, évapotranspiration potentielle), et également l'ensemble des diverses utilisations de l'eau (prélèvement en rivière et pompage dans les aquifères pour l'alimentation en eau potable et en eau industrielle ou pour l'irrigation), ainsi que les rejets et les divers transferts d'eau superficielle internes ou inter-bassins versants.

Comme une grande partie des facteurs et des variables que nous venons de présenter ont une influence directe ou indirecte sur les processus liés à la production des nitrates, la modélisation conjointe du cycle de l'eau et du transfert de nitrates demandait la réalisation d'un module de production des nitrates ou modèle de lessivage des nitrates dans le sol associé au module de production de l'eau.

Le modèle de migration des nitrates dans les aquifères assurerait ainsi le transfert conservatif des matières dissoutes calculées.

En effet, les divers types de végétation et, plus particulièrement, les divers types de cultures (associés aux méthodes culturales) réalisent des prélèvements d'eau et d'azote ammoniacal au niveau racinaire pour

assurer leur développement. Des conditions d'humidité, de température des sols interviennent dans les processus de transformation des composés azotés nous obligeant à préciser une petite partie du cycle complexe de l'azote et à prendre en compte les différents engrais minéraux et organiques apportés aux cultures.

2. CYCLE DE L'AZOTE

Le cycle de l'azote (fig.3) montre le rôle primordial de la végétation, de la fixation biologique et de la fixation industrielle et électrochimique. Nous remarquerons l'importance de la nitrification, de la dénitrification, du lessivage et du drainage des nitrates. Mais l'essentiel des transformations concerne l'azote organique du sol et l'azote facilement minéralisable.

Le cycle simplifié de l'azote (fig.4) montre plus en détail l'ensemble des facteurs et des intervenants au niveau des transformations de l'azote ainsi que le rôle de la végétation et des actions des micro-organismes.

Nous nous contenterons d'extraire du livre de F. Ramade [2] certains éléments essentiels pour montrer la complexité du cycle de l'azote:

- une faible partie seulement des produits de dégradation des composés azotés dans le sol s'élimine sous forme gazeuse;
- l'intervention des êtres vivants dans le cycle de l'azote présente un haut degré de hiérarchisation; certaines catégories d'organismes, et elles seules, sont aptes à intervenir à chaque phase du cycle de l'azote;
- les micro-organismes nitrifiants, tels que les bactéries comme les azotobacter (aérobies) et les clostridium (anaérobies), se rencontrent aussi bien dans les sols que dans les eaux;
- les plus puissants fixateurs de l'azote sont incontestablement les bactéries symbiotiques des légumineuses, du genre rhizobium. En effet, les quantités d'azote organique atteignent:
 - 150 à 450 kg N/ha/an pour le trèfle,
 - 150 à 200 kg N/ha/an pour les légumineuses;
- le cycle de l'azote se poursuit au niveau des décomposeurs, car une partie des éléments contenus dans la biomasse est sans cesse restituée au milieu sous forme de détritiques organiques, d'excreta de cadavres.

au stade de développement de celle-ci, à l'eau disponible dans le sol et à la disponibilité de l'azote nitrique influencée par la température du sol et l'action des micro-organismes;

- 4 - transformations internes suivantes:
 - . l'ammonification (minéralisation: transformation de l'azote organique en azote minéral assimilable par les plantes (taux de minéralisation de 2 à 3%);
 - . la nitrification: oxydation de l'azote ammoniacal en azote nitrique en présence de bactéries (nitrobacter)
 - . la réorganisation (immobilisation): passage de l'azote minéral (ammoniacal et nitrique) à l'azote organique grâce aux micro-organismes;
 - . l'adsorption-désorption de l'ammonium définissant les échanges entre phases liquide et solide;
- 5 - lessivages: le phénomène de lessivage des nitrates, influencé par le drainage, reste lié aux conditions climatiques, aux transformations internes et aux prélèvements effectués par la végétation;
- 6 - migration dans la nappe: le modèle hydrodynamique de transfert conservatif de masse dissoute sera utilisé;
- 7 - transfert en surface: cette partie n'est pas abordée ici, car plus complexe étant donné les phénomènes de dénitrification en cours d'eau mal connus. Seul le flux produit en surface sera déterminé;
- 8 - échanges nappe-rivière: seuls les flux de nitrates nappe-rivière seront traités;
- 9 - retour à l'atmosphère: les phénomènes de volatilisation de l'azote ammoniacal du sol en azote atmosphérique ne seront pas pris en compte puisque cette volatilisation est compensée par les apports issus des précipitations;
- 10 - prélèvements par pompages: les flux de nitrates, aussi bien lors des pompages que lors des injections à partir des eaux des canaux, seront pris en compte.

Fonctionnement du module production nitrates

Le schéma de fonctionnement du modèle de production des nitrates (fig.6) ne sera expliqué que très succinctement. Nous renvoyons le lecteur à la thèse citée en référence.

Trois réservoirs sont censés représenter:

- le stock d'azote organique (EORG)
- le stock d'azote ammoniacal (EAMM)
- le stock d'azote minéral (nitrate) (ENIT)

contenu dans le sol correspondant à la zone racinaire.

Les flux d'eau qui traversent cette portion de sol entraînent un flux de nitrates. Ces deux flux sont modulés dans un second réservoir-sol, caractérisé par un coefficient de vidange et une capacité maximale de réserve dans lesquels les nitrates sont considérés comme chimiquement conservatifs.

Les phénomènes d'absorption-désorption d'ammonium sont représentés par une relation d'équilibre linéaire entre les contenus des deux réservoirs, NH_{4e}^+ et NH_{4s}^+ , dont la somme équivaut à l'ammonium total. Les autres transformations biochimiques internes sont régies par des réactions du premier ordre dont les paramètres sont la température et l'humidité du sol.

Le phénomène d'absorption des nitrates par les plantes est basé sur l'évolution du stade végétatif lié aux conditions agronomiques et aux facteurs pédoclimatiques. Les notions de consommation potentielle en condition optimale, de consommation pseudo-potentielle en condition pseudo-optimale, c'est-à-dire en conditions agroclimatiques réelles, mais telles que la teneur en nitrates soit toujours suffisante pour la plante, et de consommation réelle sous conditions naturelles, nous ont permis d'établir, pour chaque plante, une valeur B de consommation totale pseudo-potentielle.

Calquée sur la fonction réduite de la consommation potentielle cumulée, présentée par Watt et Hanks [5] sous une forme intégrée pour le maïs, la fonction de prélèvement de nitrates (Fab) par les plantes prendra ainsi en compte le type d'espèce végétale, la pratique culturale et la disponibilité des nitrates dans le sol.

Le processus d'absorption chimique de nitrates par les racines des plantes s'effectue en deux étapes: une étape de fixation physico-chimique de nitrates à la surface des membranes des racines et une étape

d'assimilation biologique par les plantes de ces nitrates fixés. Cette approche utilisée est du type Michaelis-Menten.

Utilisation du module de production des nitrates

Les données d'entrée de ce module se résument ainsi:

- les données d'entrée directes ou obtenues par modélisation:
 - . précipitation,
 - . ruissellement,
 - . infiltration,
 - . réserve en eau du sol.
- les données du type agricole et pédologique:
 - . les apports en éléments azotés selon les trois formes chimiques retenues,
 - . la pratique culturale, date semis-date récolte,
 - . l'épaisseur, la densité, la capacité au champ du sol racinaire,
 - . la température du sol à 10 cm.

Les paramètres sont de trois catégories:

- la consommation potentielle en azote par type de culture et le coefficient d'absorption K_{ab} . Ce dernier est à caler;
- les coefficients de vitesse à l'optimum des quatre transformations biochimiques internes;
- les coefficients de correction des précédents coefficients, en fonction de la température du sol [6].

Les résultats de sortie du modèle sont:

- le flux de lessivage des nitrates;
- la consommation en azote nitrique par la culture;
- la variation du stock de chacun des quatre éléments azotés et la réserve finale de chacun d'eux pourront être éventuellement confrontées aux observations de terrain.

Ce module de production des nitrates constitue une base pour les applications que nous présentons ci-après. Dans le cas le plus simple, ce module s'applique immédiatement à la modélisation des drainages des nitrates sur des cases lysimétriques et il s'intègre très facilement dans les modèles distribués moyennant des hypothèses contrôlables, comme nous le verrons. Il permet également d'appréhender le comportement d'un bassin versant de taille réduite n'ayant pas d'aquifère développé assimilable à une mosaïque d'éléments indépendants.

4. PREMIERE APPLICATION SUR CASE LYSIMETRIQUE ET VALIDATION DU MODELE

Cette application constitue une étape préliminaire très importante. Elle est réalisée à partir des données expérimentales de la case lysimétrique n°11 de l'INRA recueillies, à Versailles, par Mme Boniface (Station des Sciences du Sol).

Cette case est constituée de sol limoneux à texture très fine dont l'humidité, à sa capacité au champ, atteint 26%. Sur 45 cm, le sol contenait 4.560 kg d'azote à l'hectare (fig.7).

La rotation de cultures sur cette case est blé-maïs. La période d'occupation du blé s'étend de Novembre à Août (date semis-date récolte), et celle du maïs de fin Avril à Octobre. La case reçoit des engrais en une ou deux fois au printemps, 130 à 160 kg N/ha. En automne, un apport d'engrais sous forme ammoniacale est associé à l'apport d'azote introduit par incorporation des résidus après récolte.

La modélisation au pas de temps journalier est réalisée sur 10 années, du 1er Septembre 1973 au 31 Août 1983.

Les notions de consommation potentielle et pseudo-potentielle pour le blé et le maïs présentées sont basées sur le contrôle de la production (fig.8).

Les résultats de comparaison entre les consommations et les flux de lessivages mesurés et calculés font ressortir les années 1976-77 et 1977-78, pour lesquelles les valeurs calculées sont très nettement sous-estimées (fig.9). Ces années font suite à l'année exceptionnellement sèche 1975-76, et elles peuvent s'expliquer par une minéralisation accrue de l'azote organique liée à la destruction de la biomasse du sol, entraînée par la dessiccation sévère de 1976 (fig.11).

L'anomalie constatée au cours de l'année 1980 pour le lessivage et l'importance du niveau du drainage restent inexplicables (fig.10).

En général, le modèle simule, d'une manière acceptable, les flux d'eau et de nitrates au travers de cette case lysimétrique n°11 et le comportement du drainage et du lessivage est sensible à l'occupation du sol (rotation des cultures), la mobilisation de l'eau étant différente.

D'autres cases lysimétriques de Versailles mériteraient d'être traitées. La figure 12 présente les résultats du calage obtenu sur la case n°17 en ce qui concerne le drainage, case qui n'a jamais reçu d'engrais et a toujours été maintenue nue.

Par contre, nous avons voulu tester l'effet d'un gros apport d'engrais en 1974 sur le lessivage. La comparaison entre lessivage ainsi calculé et lessivage observé (sans apport) montre la libération de nitrates en 1975 et 1977, peut-être même en 1978, et toute l'importance de l'année sèche 1976. De 1978 à 1984, les fluctuations du lessivage sont assez bien reproduites.

Le module de production nitrates, ainsi développé et testé sur deux cases lysimétriques, sera utilisé pour traiter un bassin versant et un système hydrologique, ses réponses étant satisfaisantes.

5. SECONDE APPLICATION AU BASSIN VERSANT DE LA NOE-SECHE

Le bassin versant de la Noé-Sèche, d'une superficie de 600 hectares, situé en zone de granite altéré, est soumis à une importante activité agricole et à l'élevage (fig.13).

Etudié sur la période Mars 1983-Février 1984 par le SRAE de Bretagne en liaison avec la Chambre d'Agriculture de St Brieux, le CREBS, et la DDA des Côtes du Nord, ce bassin a fait l'objet d'études concernant la pédologie, l'occupation des sols, les activités agricoles (productions animales et végétales), l'apport de fertilisants sous forme organique et minérale, la pluviométrie, l'hydrométrie et la qualité des eaux à l'exutoire du bassin.

Des études de bilan ont été réalisées et, à la demande du SRAE, nous avons effectué deux tentatives de modélisation [8].

Pour la première, nous avons cherché à établir une discrétisation du bassin de manière à prendre en compte les hétérogénéités spatiales (cultures-prairies-forêts) et les apports journaliers d'engrais minéraux et organiques. Elle a été abandonnée, la redistribution sur les mailles des apports journaliers d'engrais connus globalement ne pouvant se réaliser. Une tentative de redistribution de ceux-ci par propriétaire n'a pas non plus abouti.

La seconde a consisté à traiter le bassin en un système à polyculture dont le comportement moyen serait déduit des comportements de chaque culture individuelle pondérés par leur superficie. Cette méthode a été appliquée pour l'évaluation de la consommation moyenne en azote. L'estimation de la consommation potentielle des prairies permanentes et de celle des prairies temporaires soumises à des fauches successives ont été

abordées en prenant en compte le résultat d'un essai présenté par R. Blondel et G. Lemaire [11].

Les résultats de la simulation des débits à l'exutoire du bassin versant et des flux de nitrates (fig.14), bien que satisfaisants, appellent les commentaires suivants;

- la période de fonctionnement du modèle est trop courte et les effets d'initialisations deviennent trop importants;
- le module de production eau n'est pas assez fin pour assurer la reproductibilité des faibles crues d'été, mais il n'est pas source d'erreurs trop importantes;
- la concentration en nitrates présente des fluctuations journalières irrégulières alors que des variations saisonnières régulières pourraient être considérées comme un indicateur de l'état général de la pollution sur le bassin où les facteurs hydrogéologiques jouent un rôle très important;
- le déficit du bilan azoté de 70 kg N/ha pour un an mériterait d'être confirmé, car il pourrait représenter une première estimation de la fixation biologique dont nous n'avons pas tenu compte.

Enfin, et cela est très encourageant, les consommations calculées d'engrais par les plantes sont très proches des consommations observées.

6. TROISIEME APPLICATION: LA MODELISATION DU TRANSFERT DES NITRATES DANS LE SYSTEME HYDROLOGIQUE DE LA PLAINE DE VALENCE

L'objectif final de notre étude est d'appliquer la méthodologie présentée pour modéliser le transfert des nitrates dans la nappe en tenant compte des effets de dilution.

La figure 15 présente l'organigramme de la modélisation du transfert des nitrates, mais nous ne détaillerons pas ici chacun des modules dont MORELN est le module de lessivage de nitrates que nous venons d'exposer.

L'application du modèle à la plaine de Valence, sur la période 1976-1986, s'est réalisée grâce à l'appui du SRAE de Valence qui nous a fourni l'ensemble des données et la documentation nécessaire.

Toute la partie mise en oeuvre du modèle, calage et résultats obtenus est détaillée dans la thèse de Q.Z. Geng, et nous demandons au lecteur de la consulter pour de plus amples informations.

La zone étudiée est limitée à l'est par le domaine du Massif du Vercors, essentiellement constitué de formations marno-calcaires, au nord par le cours de l'Isère, à l'ouest par la plaine du Rhône, et au sud par le cours de la Drome. Couvrant une superficie modélisée de 751 km², cette zone est drainée par deux cours d'eau, la Véore et la Barberolle, dans la partie nord. La partie centrale est irriguée à partir des eaux du canal de la Bourne six mois par année, et les excès d'eau du canal s'y infiltrent (fig.16).

Sur la plaine de Valence, la formation géologique est généralement constituée par les alluvions et dépôts quaternaires (alluvions de l'ancienne Isère, cailloutis calcaires d'Alixan et alluvions modernes de l'Isère, du Rhône et de la Drome) et les formations sablo-gréseuses tertiaires ou marneuses du Pliocène et du Miocène (fig.17 et 18).

Une partie de cette plaine a fait l'objet de nombreuses études hydrogéologiques caractérisant les nappes aquifères (BURGEAP, 1969; Jeannolin, 1985; SRAE, 1986) et d'une modélisation quantitative des possibilités de la nappe centrale.

De plus, les études de qualité réalisées par CPGF en 1982, puis en 1984, montrent que sur 46% des points de mesure, la concentration en nitrates dépasse la norme de 50 mg.L⁻¹ ainsi que la moyenne.

Grâce aux études de l'INRA (1968) sur les sols et l'occupation des sols généralement admise, la discrétisation en mailles de 1 km de côté et de 500 m a été définie et nous avons retenu six fonctions de production du modèle définissant des mailles homogènes vis-à-vis des propriétés du sol et de la végétation:

- 1 - sols de montagne couverts de bois et forêts,
- 2 - plans d'eau libre (non présents dans la zone centrale),
- 3 - sols caillouteux sur les formations molassiques couverts par des arbres fruitiers,
- 4 - sols sableux sur les alluvions quaternaires, couverts par des arbres fruitiers et de grandes cultures,
- 5 - sols limono-sableux sur les cailloutis d'Alixan, couverts par de grandes cultures,
- 6 - zone dépressionnaire dans le nord-ouest (Chateaufort-sur-Isère).

Les données de précipitations journalières aux 10 stations régionales montrent une fluctuation annuelle de 820 à 920 mm dans la plaine à plus de 1000 mm sur les hauts bassins de la Véore et de la Barberolle

(fig.19). Utilisées avec les données d'ETP Penman mensuelles de Montélimar, elles ont permis, selon les zones affectées à chaque production, d'évaluer le bilan hydrique local (ETP min et max: 928-7058 mm). La modélisation superficielle et souterraine des écoulements a nécessité la connaissance des données de pompage dans la nappe pour les différents usages AEP-AEI et irrigations (par commune et par maille) et la connaissance des caractéristiques hydrodynamiques des différentes nappes ainsi que les réinfiltrations locales des débordements du canal de la Bourne.

Elle a permis d'assurer le calage des paramètres du modèle hydrodynamique de manière à restituer les débits dans certains cours d'eau et les fluctuations du niveau de la nappe.

7. LA MISE EN OEUVRE DU MODELE MORELN

Etant donné la grande dépendance des propriétés biochimiques du sol vis-à-vis des caractéristiques physiques de celui-ci, nous avons gardé le même classement que celui des fonctions production de l'eau pour assurer la production des nitrates (fig.20) excepté celui de la catégorie 2.

L'établissement des zones d'apport et d'export de l'azote ("ZONES AZOTE") est lié à la manière dont sont connues les activités agricoles, les types de cultures, les surfaces cultivées, la densité d'élevage et les apports d'engrais.

Disposant des données des Recensements Généraux Agricoles de 1970 et de 1980, nous avons une partie des informations ci-dessus au niveau communal. L'approche proposée consiste à considérer chaque commune comme occupée par une culture "fictive et équivalente", c'est-à-dire une zone homogène, et à pondérer les grandeurs concernées par les superficies afin de leur trouver une valeur moyenne attribuable à toutes les mailles de chaque commune.

Activités agricoles et bilan de l'azote

Le domaine modélisé couvre 52 communes dont 17 ne sont que partiellement contenues (fig.21).

L'affectation des mailles du modèle à chaque commune prise en compte permet une liaison entre données physiographiques élémentaires et données agricoles communales (fig.22).

Soit SJ = la superficie totale en ha de la commune J,
 SiJ = la superficie en ha de la culture i sur la commune J,
 SMJ = la superficie totale en ha du modèle pour la commune J,
 $SmiJ$ = la superficie en ha de la culture i du modèle pour la commune J,

la relation $SmiJ = Si * (SMJ/SJ)$ permet, après vérification des concordances entre superficies modèle et commune, d'évaluer les superficies des différentes cultures et densité animale.

Le passage des données d'activités agricoles au bilan de l'azote nous oblige à connaître:

- les doses d'épandages d'engrais minéraux azotés (fournies par la Chambre d'Agriculture), l'approche par l'inventaire des ventes d'engrais ayant échoué;
- les données concernant les quantités d'azote organique et ammoniacal des déjections animales très variables selon les sources.

MINÉRAUX AZOTES

	en kg N/ha/an		
	Ha	Apport	Export
Surface totale	73.326		
S.A.U.	48.541		
Blé	10.436	130	130
Orge d'hiver	8.010	115	100
Maïs	11.217	185	150
Fourrages	781	20	100
Prairie permanente	3.993	0	160
Prairie temporaire	4.267	0	200
Vignes	544	110	50
Vergers	5.121	110	50

MINÉRAUX ORGANIQUES

	Densité tête/ha	Déjections kg/tête/j	Teneur en N g/kg	N produit tonne/an/ 75.100 ha
Bovins	16,1	26,0	5,0	717
Equidés	1,0	50,0	4,0	67
Chèvres	7,6	6,0	6,7	116
Ovins	30,6	6,0	6,7	409
Porcins	53,0	8,5	5,8	889
Volailles	7042,0	0,045	20,0	2506

Les tableaux ci-dessus résument les données qui ont permis de dresser le bilan agronomique de l'azote et de constater un bilan annuel excédentaire de plus de 83 kg N/an et par ha de S.A.U.

Bilan agronomique de l'azote	kg N/ha/an sur la S.A.U. (48.541 ha)	kg N/ha/an sur la superficie totale (75.000 ha)
N apporté par les engrais minéraux	103	67
N apporté par les déjections animales	97	63
Total des apports	200	130
Exportation par les cultures	117	76
Bilan (apports-exports)	83	54

Pour la modélisation, nous tenons compte d'une dose moyenne d'apport en azote minéral selon les superficies de chaque culture *i* pour la commune *J*, et d'une dose moyenne d'apport en azote organique provenant des déjections animales pour chaque commune *J*.

	Azote nitrique	Azote ammoniacal	Azote organique
Engrais minéraux	50%	50%	
Engrais organiques		25%	75%

Décomposés sous les trois formes chimiques selon le tableau précédent, ces apports sont répartis dans le courant de l'année d'une manière réaliste mois par mois. De plus, nous prenons en compte un accroissement de superficie en maïs de 3%/an et de 1,5% pour les autres cultures.

Les déterminations des exportations par les cultures demandent la connaissance des dates des semis et de récolte ainsi que les valeurs de la consommation potentielle et du coefficient K_{ab} de chaque type de culture. Les deux précédentes applications du module MORELN fournissent déjà certaines de ces données.

L'utilisation du module MORELN sur la période 1976-1986 consiste à obtenir, pour chaque maille du modèle, un flux d'eau et un flux de nitrate au pas de temps mensuel destinés à l'alimentation de la nappe et à établir des bilans intermédiaires avec des résultats concernant les lessivages (fig. 23, 24 et 25).

Sur une période de onze années, la réserve du sol en azote a augmenté de 426 kg N/ha au bénéfice du réservoir de l'azote organique, 291 kg N/ha, et de l'azote ammoniacal, 122 kg N/ha.

La consommation calculée de l'azote par les cultures est de 66 kg N/ha/an, soit 13% d'écart avec l'évaluation faite avant modélisation. Le flux de nitrates lessivés calculé de 41 kg N/ha/an est assez proche de l'estimation initiale de 54 kg N/ha/an.

Remarquons aussi que le lessivage prend sa valeur maximale dans le sol sableux.

Enfin, la simulation de la concentration en nitrates dans la nappe, à l'aide du modèle de migration de nitrates en aquifère dont les paramètres hydrodynamiques avaient été calés antérieurement, s'est réalisée à partir des résultats fournis par le module MORELN, et avec l'estimation des épaisseurs mouillées de la nappe et de la porosité efficace.

L'interprétation des résultats ne peut se faire dans le détail pour de multiples raisons.

Les cartes de variation des concentrations mesurées et calculées au puits 45 (maille 453) et au puits 266 (maille 171) montrent une tendance à l'accroissement dans le temps des concentrations et des fluctuations naturelles avec une amplitude plus ou moins importante (fig. 27 et 28).

La carte d'isovaleurs des concentrations calculées est beaucoup plus régulière que celle des concentrations observées (fig. 29 et 30). Les petites aires à fortes concentrations observées ne sont pas reproduites. Ce résultat s'explique par l'utilisation de données agricoles moyennées sur l'ensemble des mailles d'une même commune qui ont engendré une homogénéisation spatiale.

L'analyse par krigeage appliquée aux mesures de concentrations observées sur les 207 points a montré que celles-ci n'avaient pas de structure et qu'il n'existe pas de corrélation spatiale entre elles à cette échelle. Aussi faudrait-il appréhender la variabilité spatiale des données relatives aux apports en azote, de facteurs locaux ou accidentels pour simuler de manière satisfaisante, les zones localisées à forte concentration. Cependant, les grandes tendances d'évolution de ces teneurs sont reproduites globalement, et l'on est en mesure d'assurer que cet outil assure une synthèse de l'ensemble des données actuellement disponibles et fait ressortir des points particuliers.

CONCLUSION

Le problème central, dans l'étude de la modélisation du transfert des nitrates dans un système hydrologique, est celui de la détermination du flux de nitrates percolant la zone non saturée hors de la zone racinaire vers la nappe souterraine.

Le module MORELN, développé par M. Geng, assure la modélisation d'une partie du cycle de l'azote selon les différents milieux, les diverses activités agricoles et compte tenu des fluctuations climatiques. Il permet non seulement la détermination du flux de nitrates lessivés, mais également des éléments concernant la consommation en nitrates par des plantes.

Les cases lysimétriques de l'INRA de Versailles, qui ont été à l'origine du développement de ce modèle, observées sur une longue période, nous semblent être propices à la mesure des données concernant l'entrée et la sortie permettant de développer, tester et valider le modèle de lessivage des nitrates et d'appréhender les différents mécanismes régissant le cycle de l'azote en milieu naturel. L'exploitation des autres données de cases lysimétriques s'avère être une nouvelle étape indispensable.

Par les deux autres applications du modèle MORELN au bassin de la Noe-Sèche et de la plaine de Valence, le fait que les valeurs des paramètres biochimiques soient cohérentes avec celles de la case lysimétrique souligne la robustesse de ce modèle.

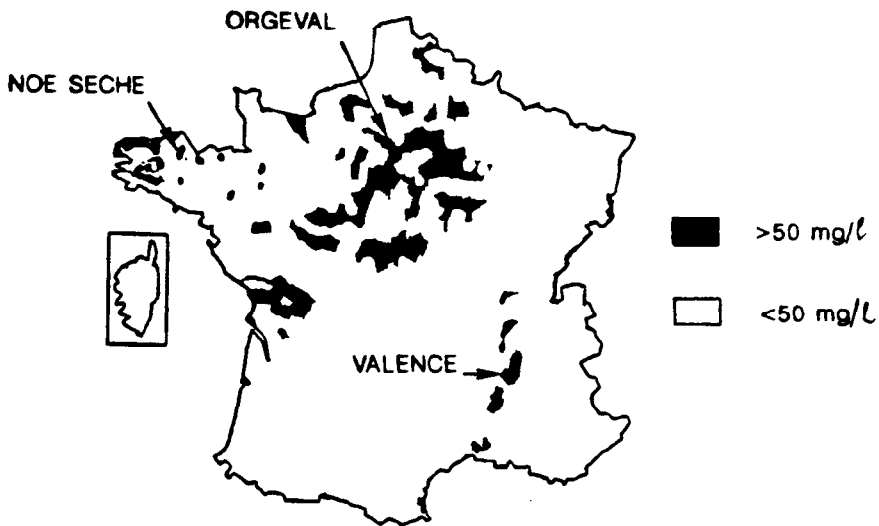
Ce modèle utilisant directement des paramètres agronomiques tels que le type de culture, la dose d'épandage et la forme chimique de l'engrais, en un mot l'activité agricole, il est possible, avec l'aide du modèle de migration en aquifère, de simuler l'effet de certaines mesures préventives pour la réduction du niveau de nitrates dans l'eau ou de mesures curatives basées sur la dilution d'une nappe polluée par injection d'eau propre.

D'autres problèmes restent à résoudre pour aller de l'avant, notamment: - la fixation biologique et la dénitrification, processus biochimiques que nous n'avons pas traités initialement; - le transfert en surface; outre son intérêt dans l'étude de la pollution des eaux de surface, il est nécessaire pour assurer une modélisation complète du transfert souterrain dans les zones où l'échange entre le domaine de surface et le souterrain est important.

A l'avenir, nous souhaitons que soient parfaitement connus la disponibilité des données agricoles, la localisation dans l'espace et l'enregistrement de l'évolution dans le temps des apports en azote par l'épandage d'engrais et les exportations d'azote par les cultures. La mise à disposition d'une carte annuelle des cultures est nécessaire.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] GIRARD, G., LEDOUX, E., VILLENEUVE, J.P. (1984). Proposition d'un modèle couplé pour la simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. La Houille Blanche, n° 1/2, 1984.
- [2] RAMADE, François. Eléments d'Ecologie Appliquée.
- [3] LEDOUX, E. (1986). Modèles mathématiques en hydrogéologie. ENSMP, Centre d'Informatique Géologique, rapport LHM/RD/86/12.
- [4] PRAT, M. (1982). Simulation numérique du transport de produits réactifs dans les sols. Cas de l'azote dans les relation bassin versant-rivière. Thèse de Docteur-Ingénieur, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [5] WATTS, D.G., HANKS, R.J. (1978). A soil water nitrogen model for irrigated corn on sandy soils. Soil Sci. Soc. Amer. J., vol.42, pp. 492-499.
- [6] STANFORD, G., EPSTEIN, E. (1974). Nitrogen mineralization water relations in soil. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 38, p. 103-107.
- [7] MARIOTTI, A. (1982). Apports de la géochimie isotopique à la connaissance du cycle de l'azote. Thèse de Doctorat ès Sciences Naturelles, Université Paris VI, 476 p.
- [8] SRAE-Bretagne (1984). Qualité des eaux en domaine rural. Bilan des études sur la Noé-Sèche (22).
- [9] HENIN, S. (1980). Rapport du sous-groupe "Systèmes de Cultures" dans le cadre de la Commission Interministérielle, Ministère de l'Agriculture et Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie.
- [10] GENG, Q.Z., GIRARD, G., BONIFACE, R. (1986). Modélisation du lessivage de nitrates dans une case lysimétrique, case n°11 de l'INRA Versailles. Rapport interne ENSMP-CIG n° LHM/RD/86/61.
- [11] SALETTE, J., LEMAIRE, G., LAISSUS, R. (1982). Analyse de la croissance d'une prairie naturelle normande au printemps. Fourrager, n° 91-92, Sept-Déc 1982.
- [12] GENG, Q.Z (1988). Modélisation conjointe du cycle de l'eau et des transferts de nitrates sur un système hydrologique. Thèse de Doctorat en hydrologie et hydrogéologie quantitative, Ecole des Mines de Paris, 6 Juillet 1988.



LE NITRATE DANS L'EAU SOUTERRAINE

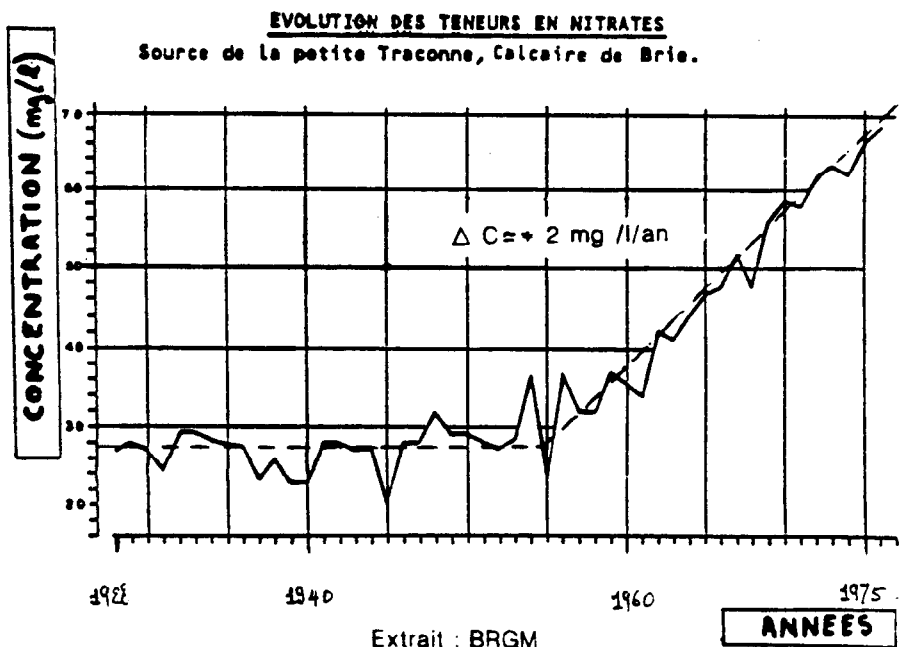
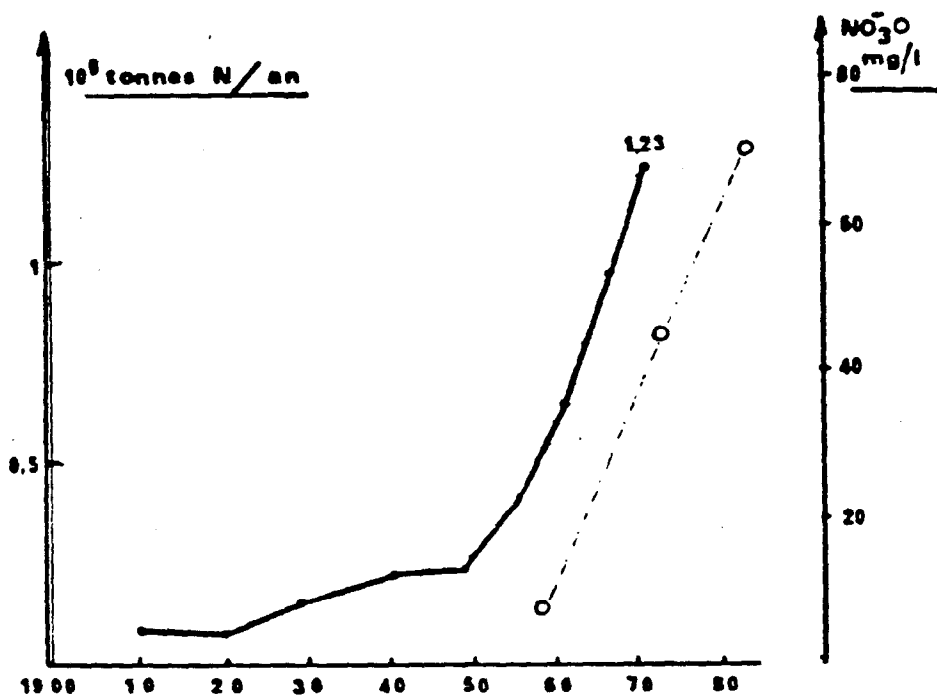


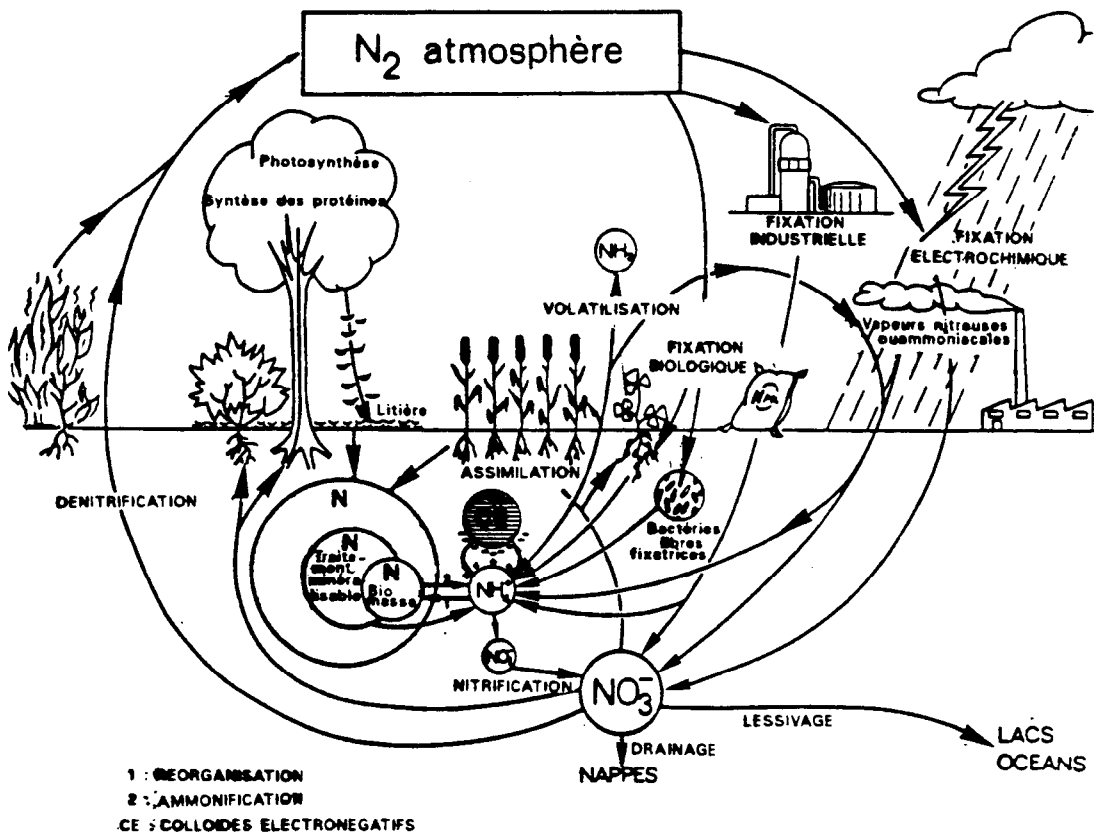
Fig. 1



Evolution parallèle de la consommation d'engrais en France et de la concentration de nitrates à Pont-Franc depuis 1958. (Puits Bassin Parisien)

Extrait : Nadine BLAISON

Fig. 2



CYCLE DE L'AZOTE

Extrait : GODIN

Fig. 3

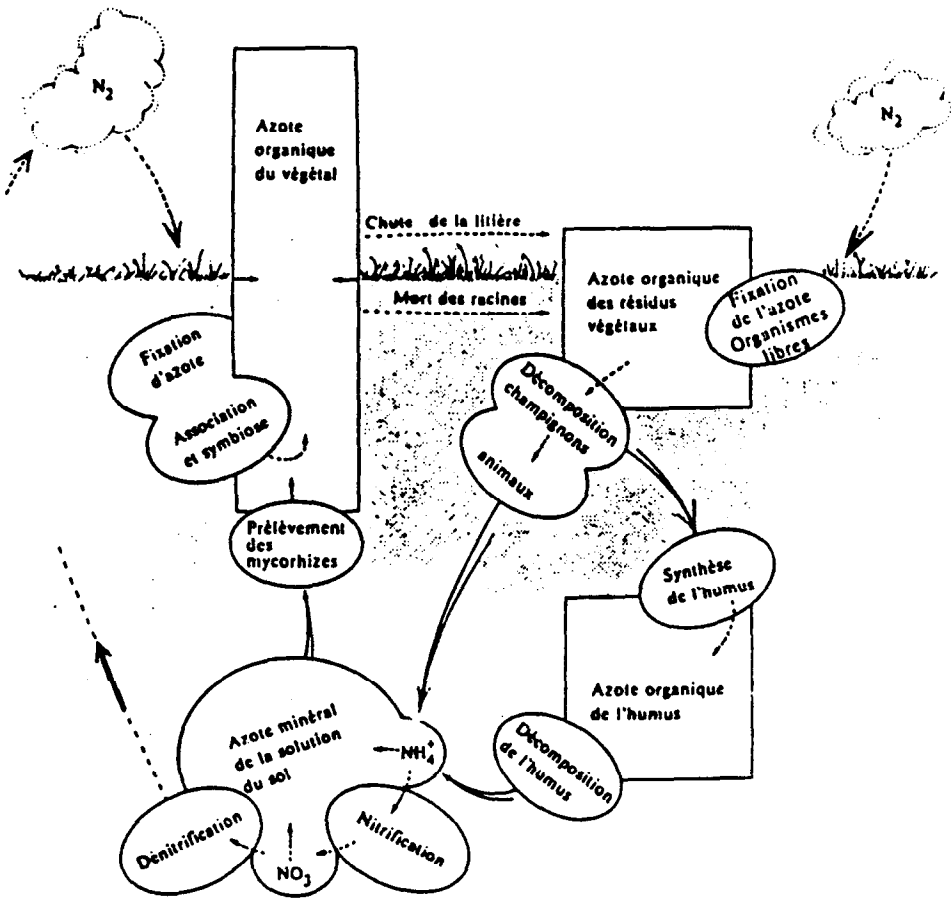


Fig. 4

CYCLE SIMPLIFIÉ DE L'AZOTE

Extrait : P. SANCHEZ

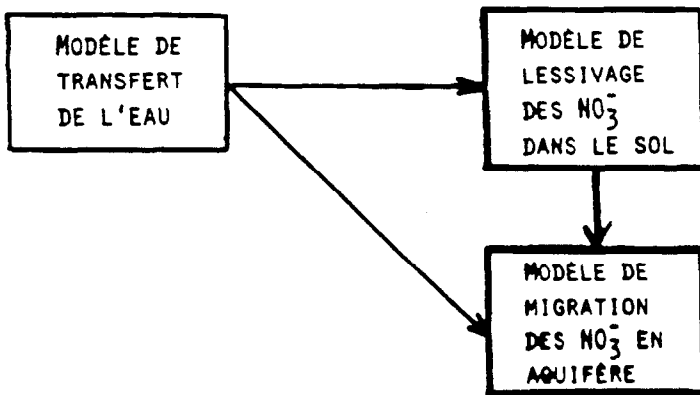
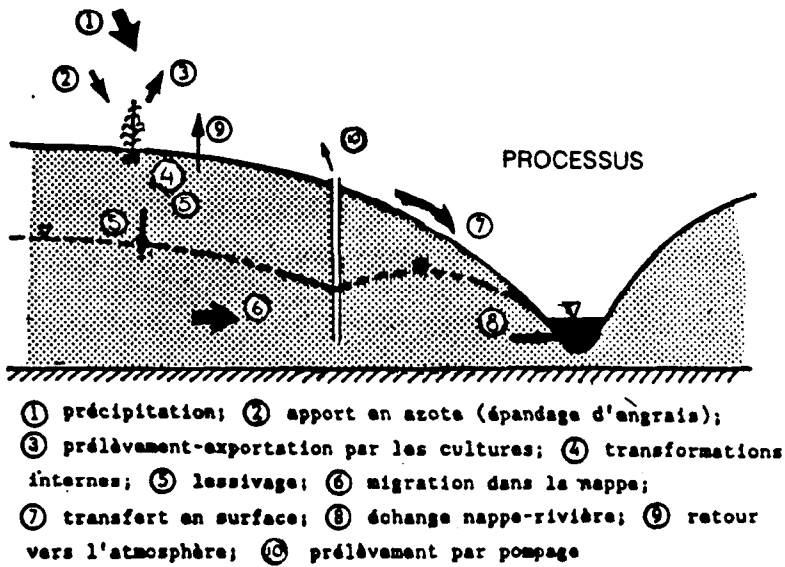
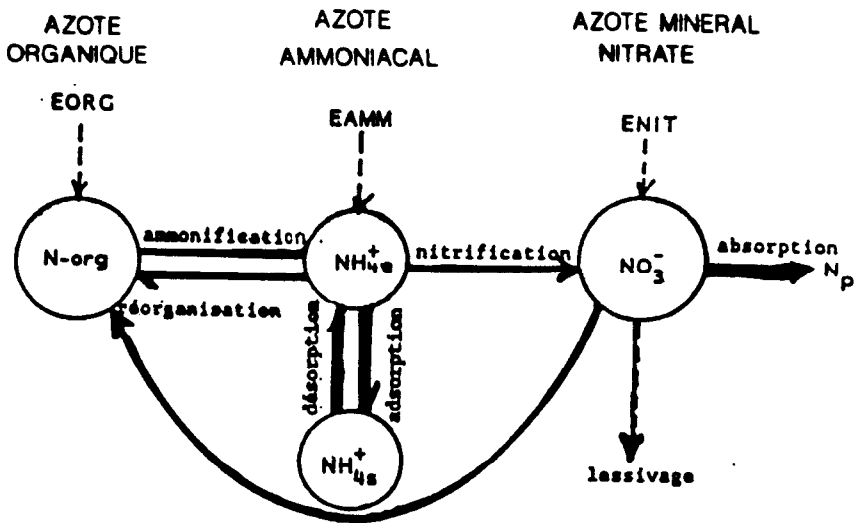


Fig. 5



$$(NH_{4s}^+) = K_d (NH_{4e}^+)$$

$$F_{ab} = B \cdot f'_{pp}(t') \cdot \frac{(NO_3^-)}{(NO_3^-) + K_{ab}}$$

$$\frac{dm}{dt} = -k \cdot m$$

$$k = k_0 \cdot Q_0^{(T-35)} \ln(\theta/CC, CC/\theta)$$

$$Q_0^{10} = 2$$

T : données d'entrée (température Sol)

$$\theta = (R \cdot d_{eau}) / (h_{sol} \cdot d_{sol})$$

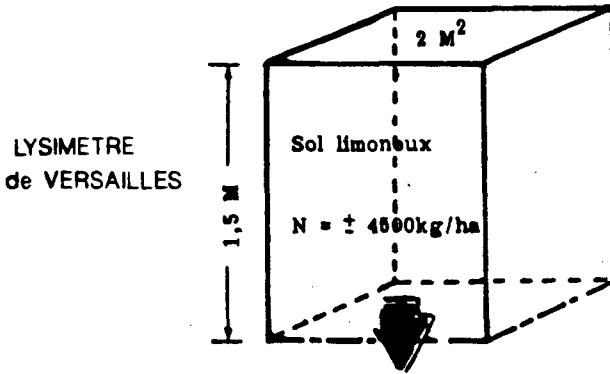
$$FI = (Q/R) \cdot (NO_3^-)$$

Fig. 6

NITRATES

PRODUCTION → VALIDATION

Blé - Maïs



01/08/73 - 31/08/83

$\Delta T = 1 \text{ jour}$

Liste des Données :

- Précipitations et Evapotranspiration Potentielle
- Température du sol à 10 cm de profondeur
- Apports en azote
- Dates de semis et de récolte des cultures

VALIDATION

- Mesures du drainage et de concentration en NO_3^-
- Consommation d'azote par les cultures

Données I.N.R.A. Mme BONIFACE

Fig. 7

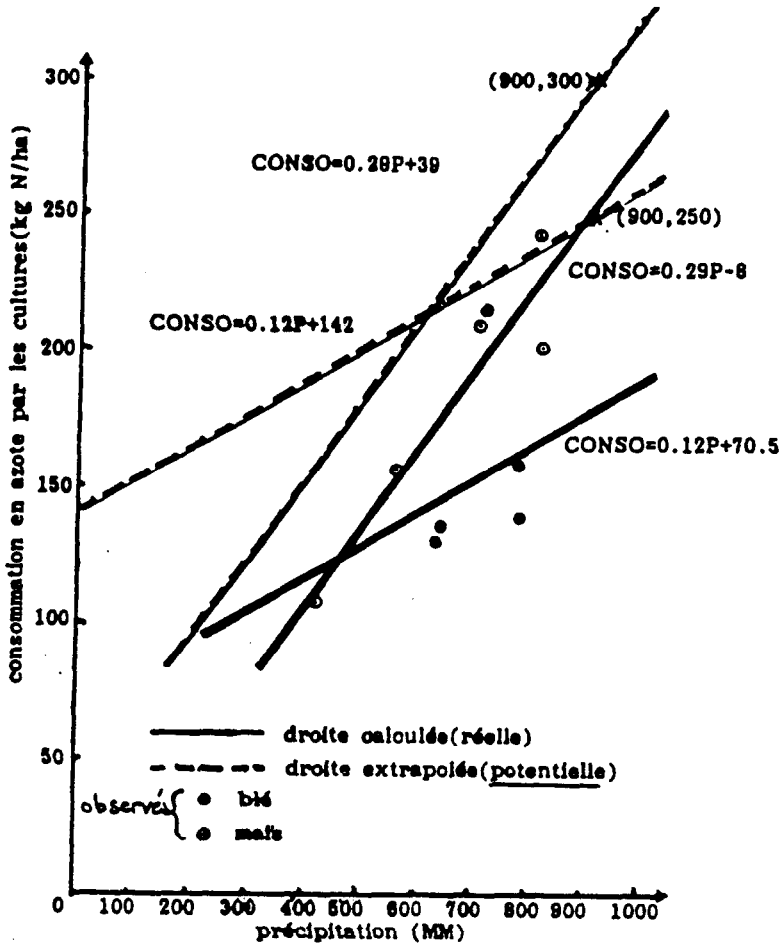
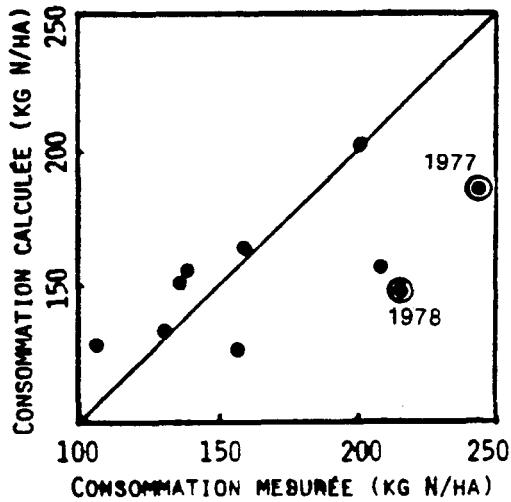
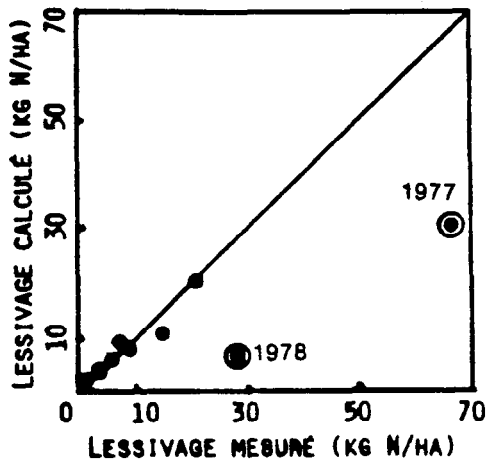


Fig. 8



K_{eb} (1/j)	K_{es} (1/j)	K_{ra} (1/j)	K_{rn} (1/j)
0.002	0.2	0.1	0.1

K_{eb}
{

 = 0.4 (kg/ha) pour le maïs
 = 3.0 (kg/ha) pour le blé

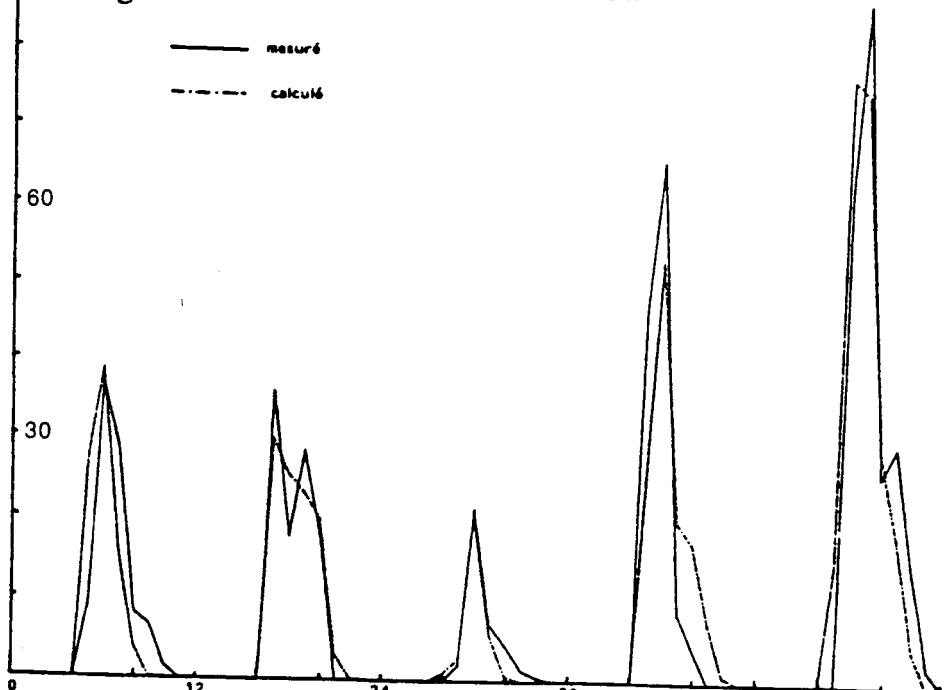
Fig. 9

D (MM)

Fig. 10

Comparaison entre le drainage mesuré et calculé avec RMAX et DCRT
Années 73-77

— mesuré
- - - - - calculé

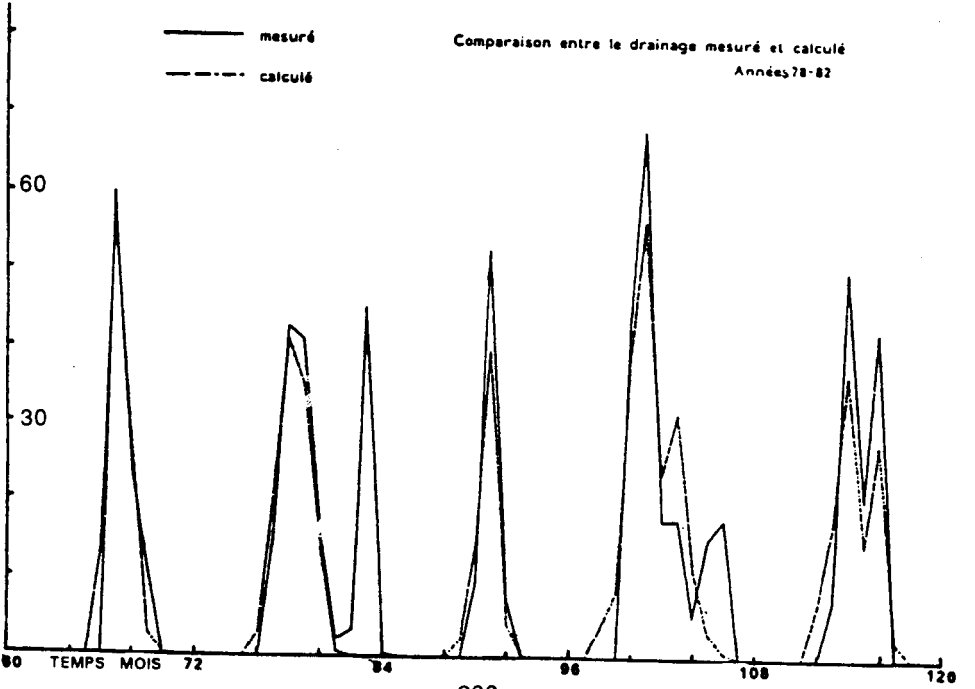


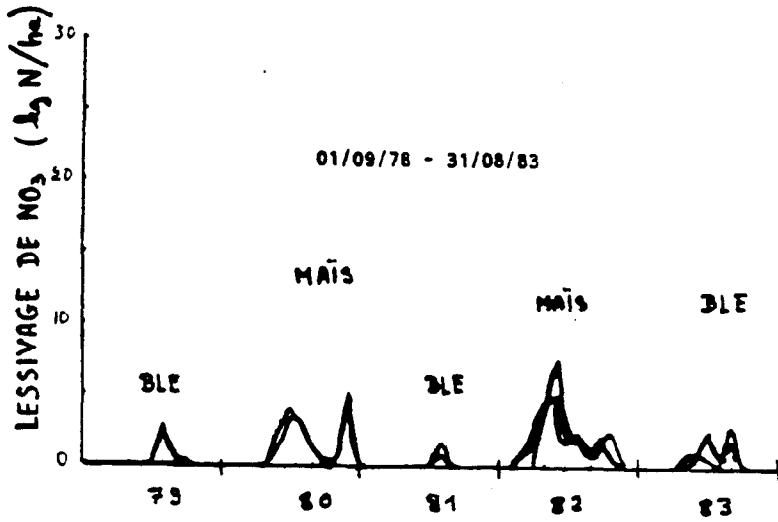
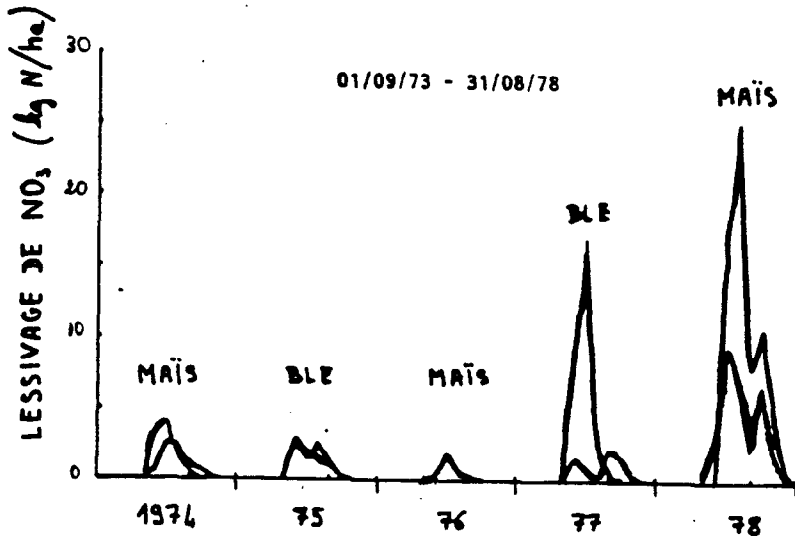
D (MM)

TEMPS MOIS

Comparaison entre le drainage mesuré et calculé
Années 78-82

— mesuré
- - - - - calculé





— observée
 — calculée

Simulation de flux de nitrate
 $\Delta T = 30$ jours

Fig. 11

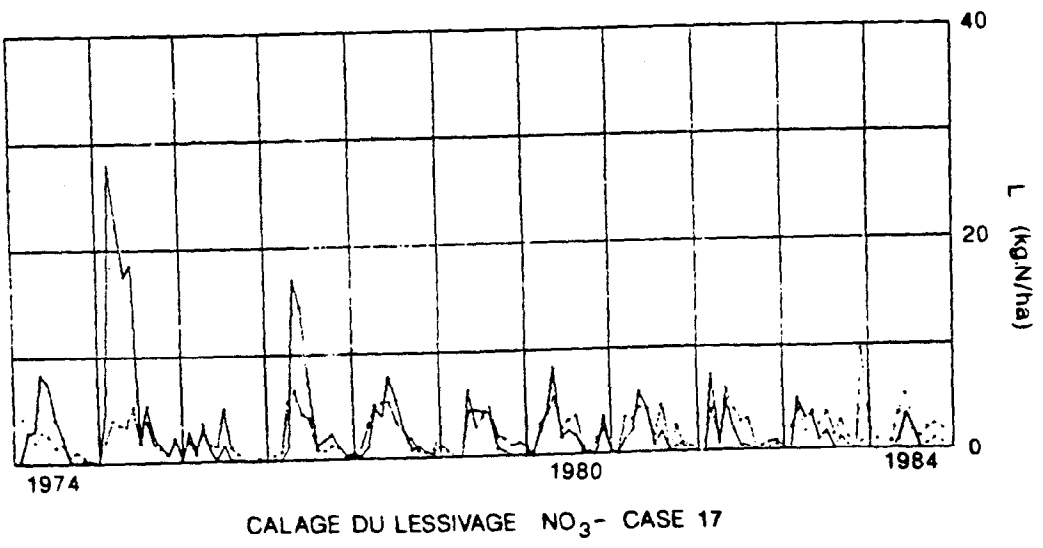
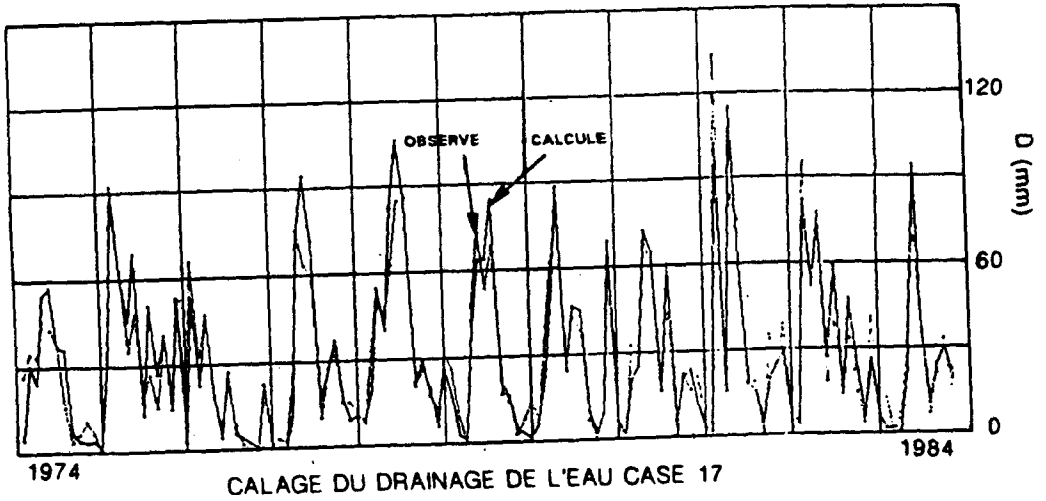


Fig. 12

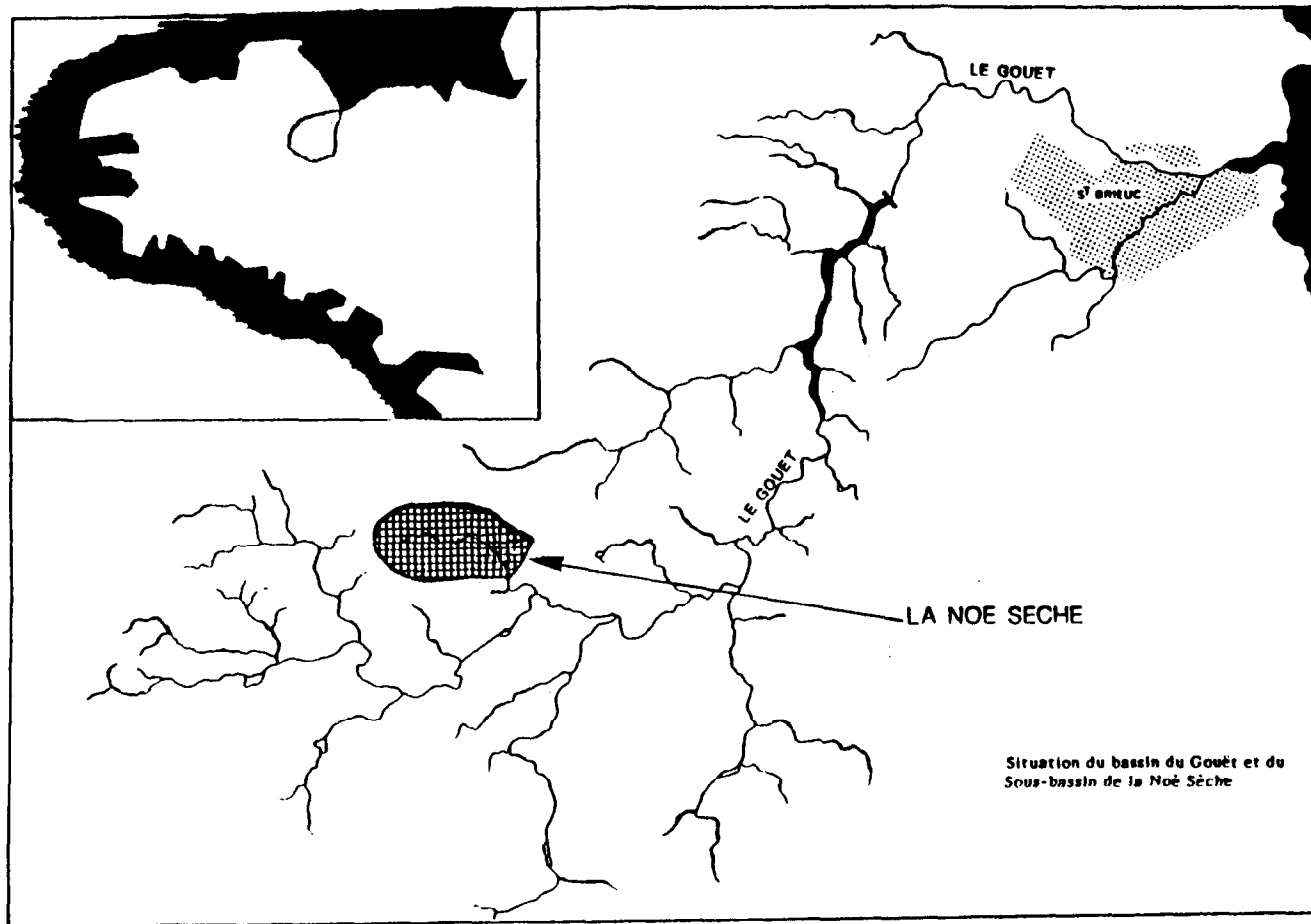


Fig.13

calage du flux de NO₃⁻ à l'exutoire de la NOE-SECHE (3/3/83 - 29/2/84)

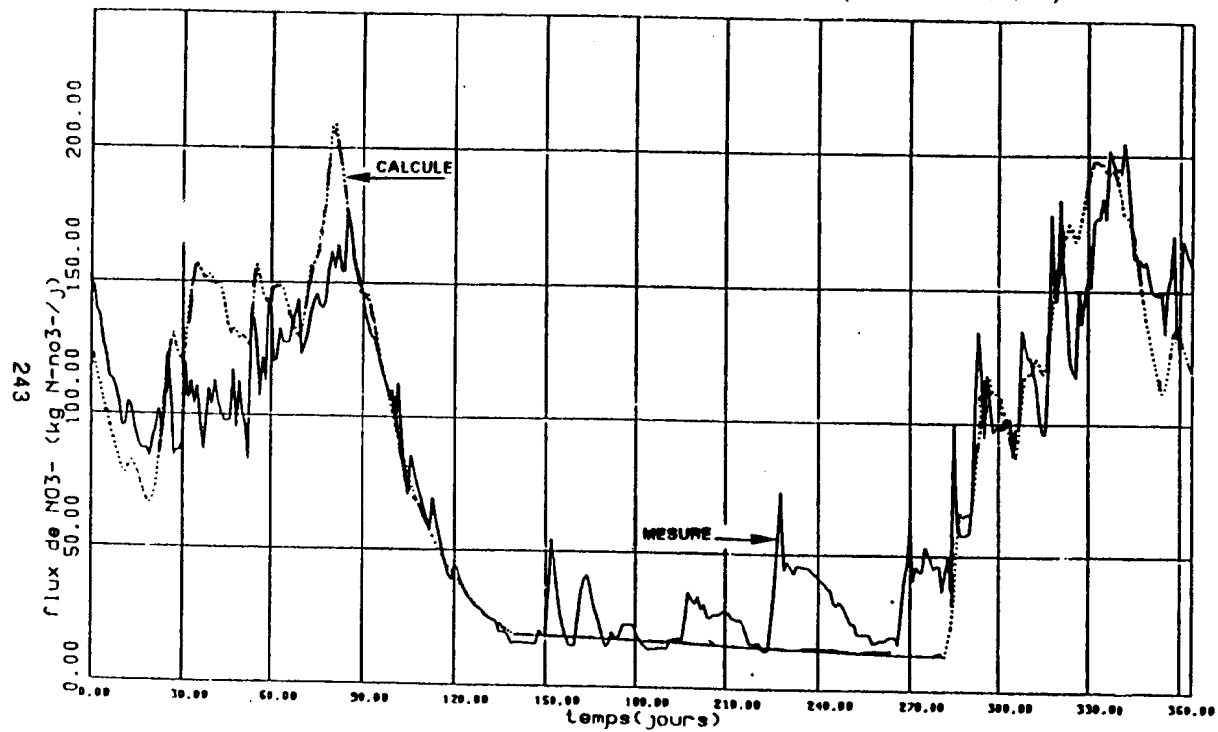


Fig. 14

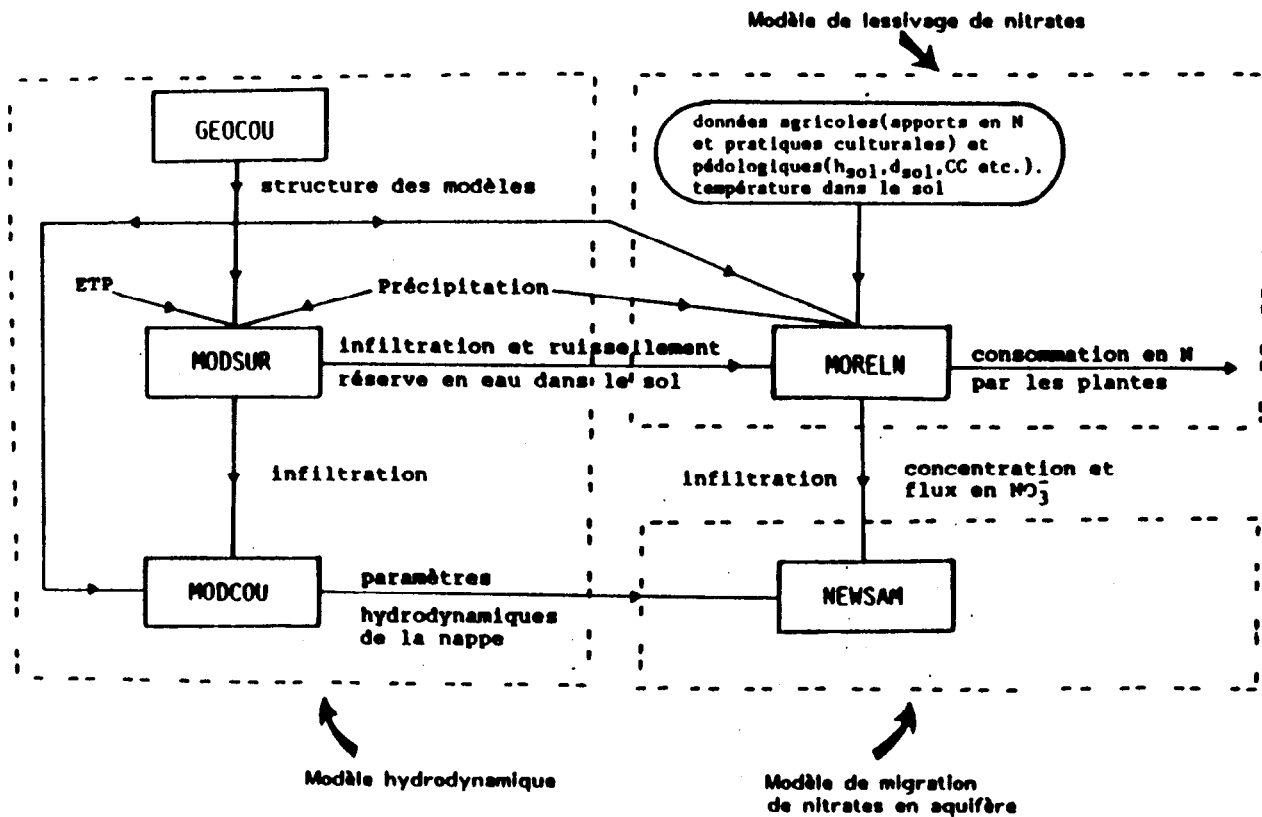


Fig. 15 : Organigramme de la modélisation du transfert de nitrates

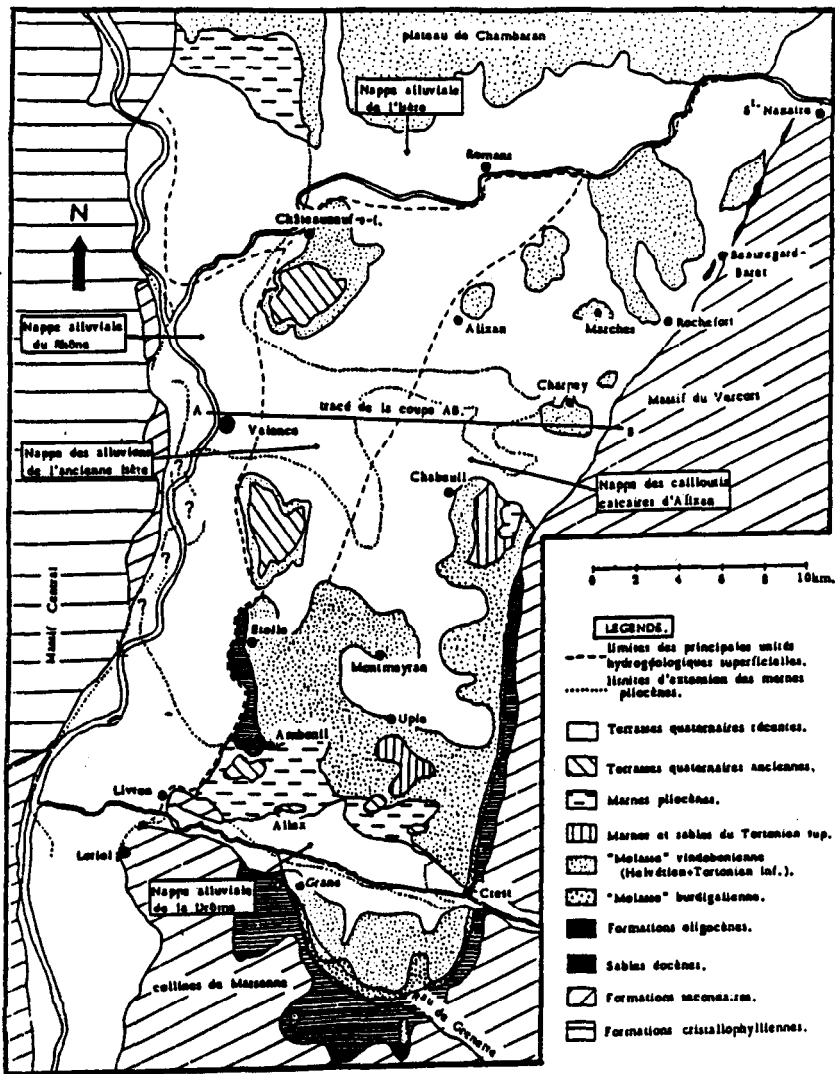


Fig. 17 : Situation hydrogéologique

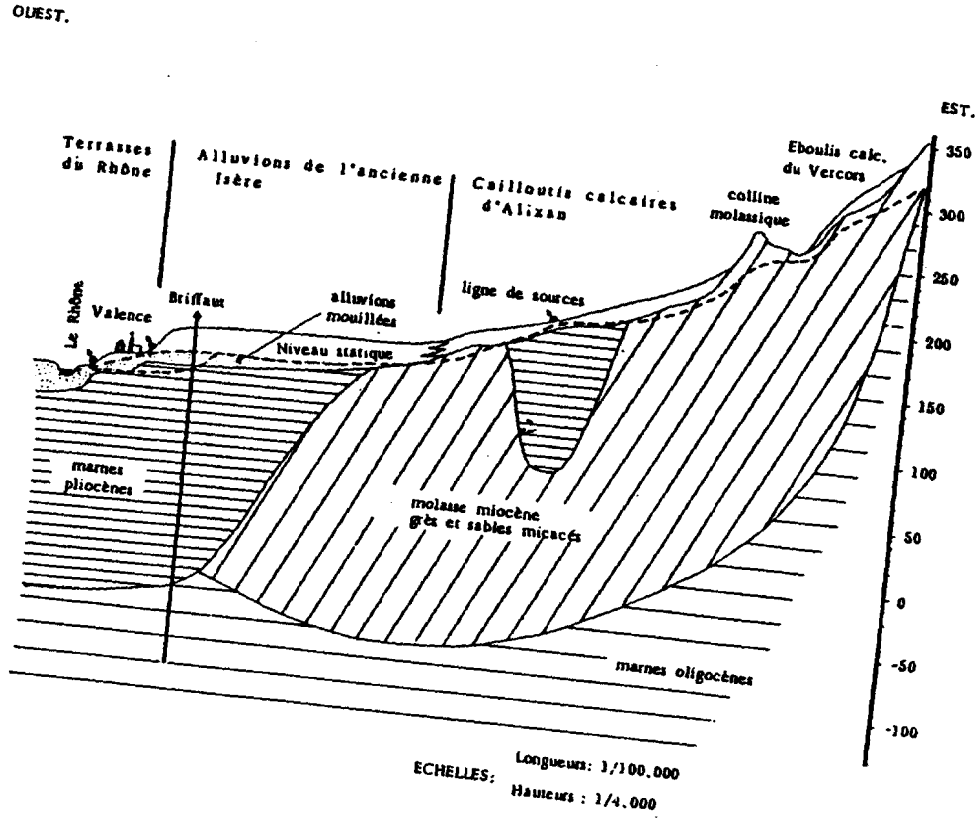


Fig. 18 : Profil géologique représentatif

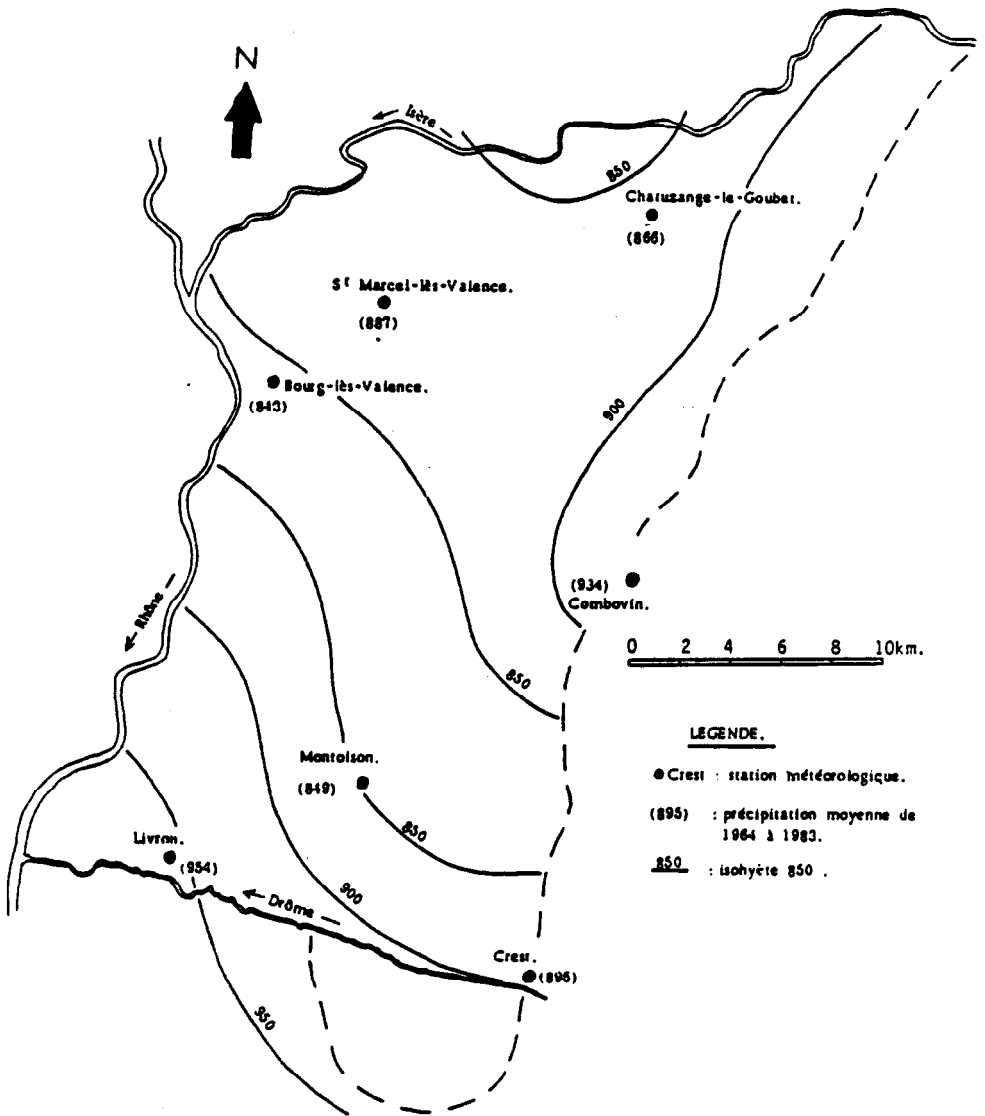
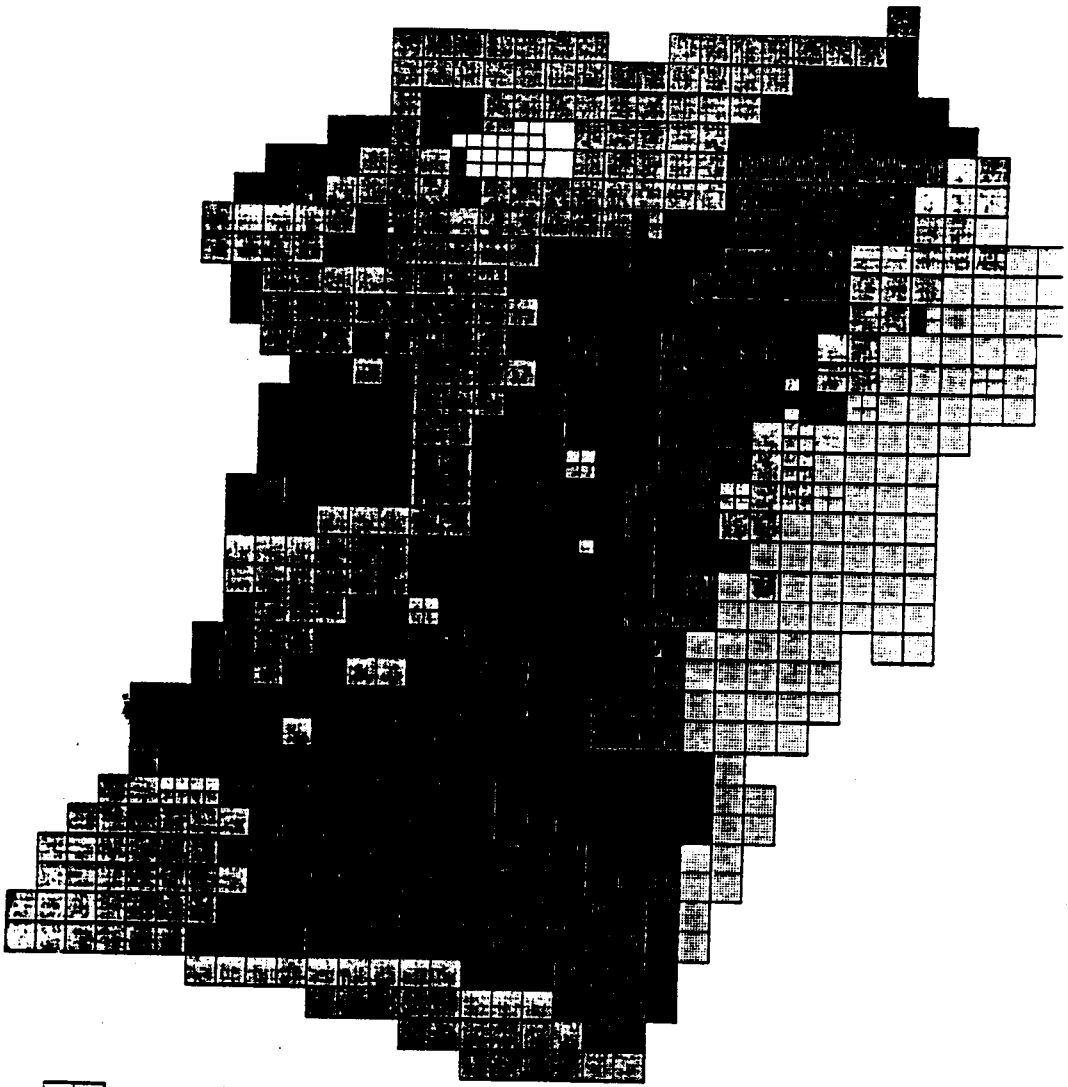


Fig.19 : Isohyètes des précipitations annuelles








- | | | | |
|--|--------------------|---|----------------------|
|  | zone de dépression |  | sols sableux |
|  | sols de montagne |  | sols limono-argileux |
|  | sols caillouteux | | |

Fig. 20 Cartographie des fonctions production

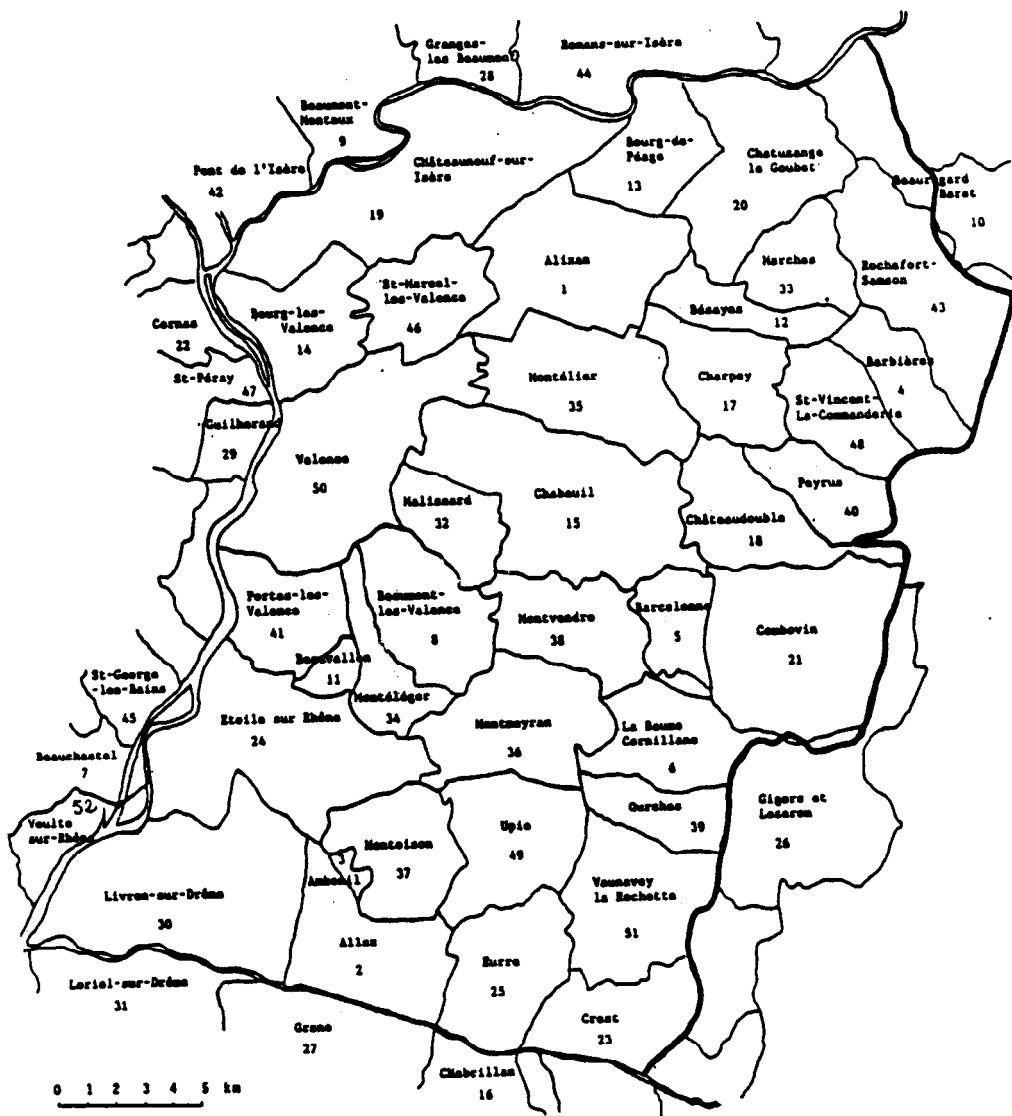


Fig. 21 : Carte des communes

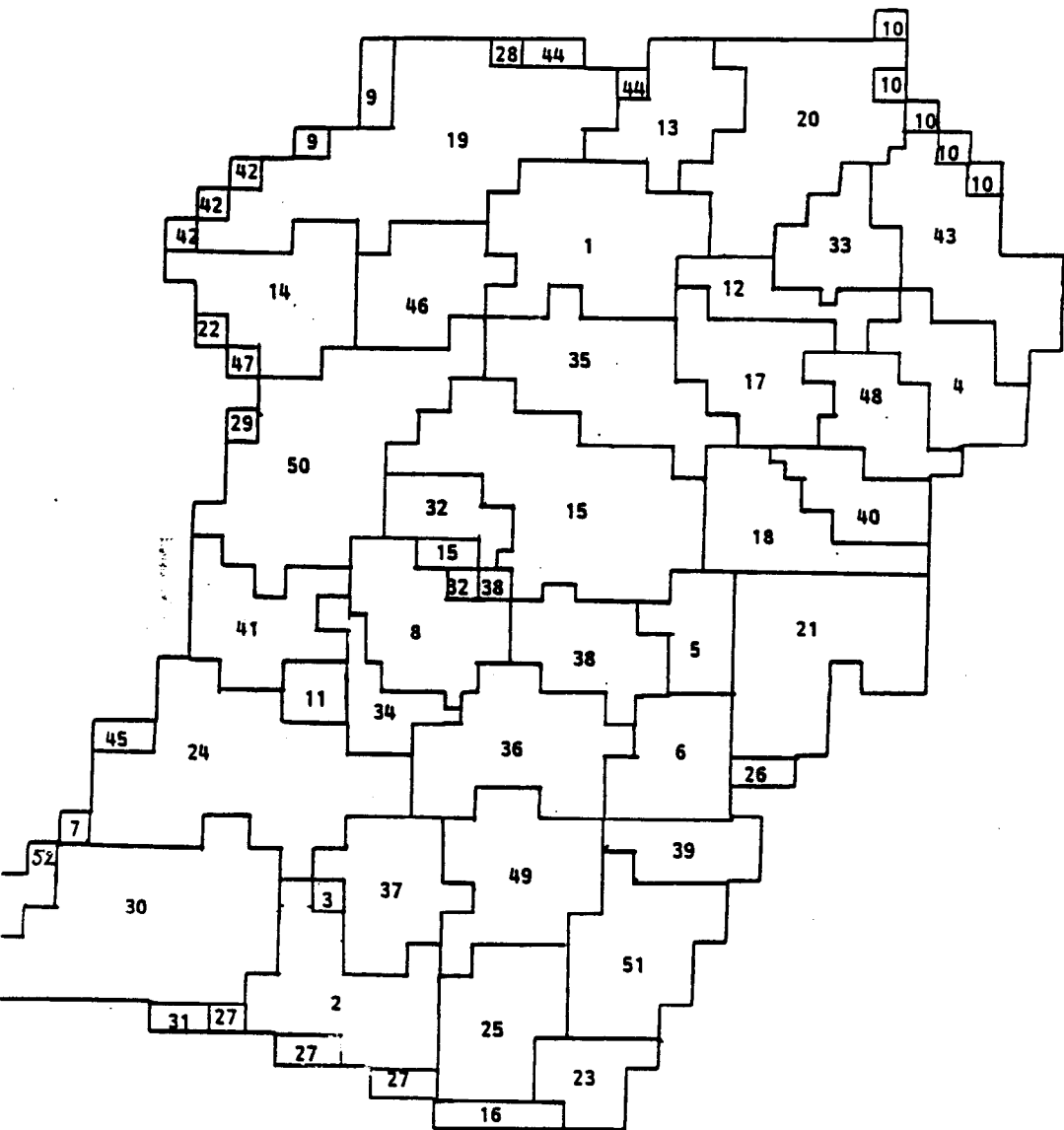


Fig. 22

Discretisation des "zones azote" selon les limites des communes

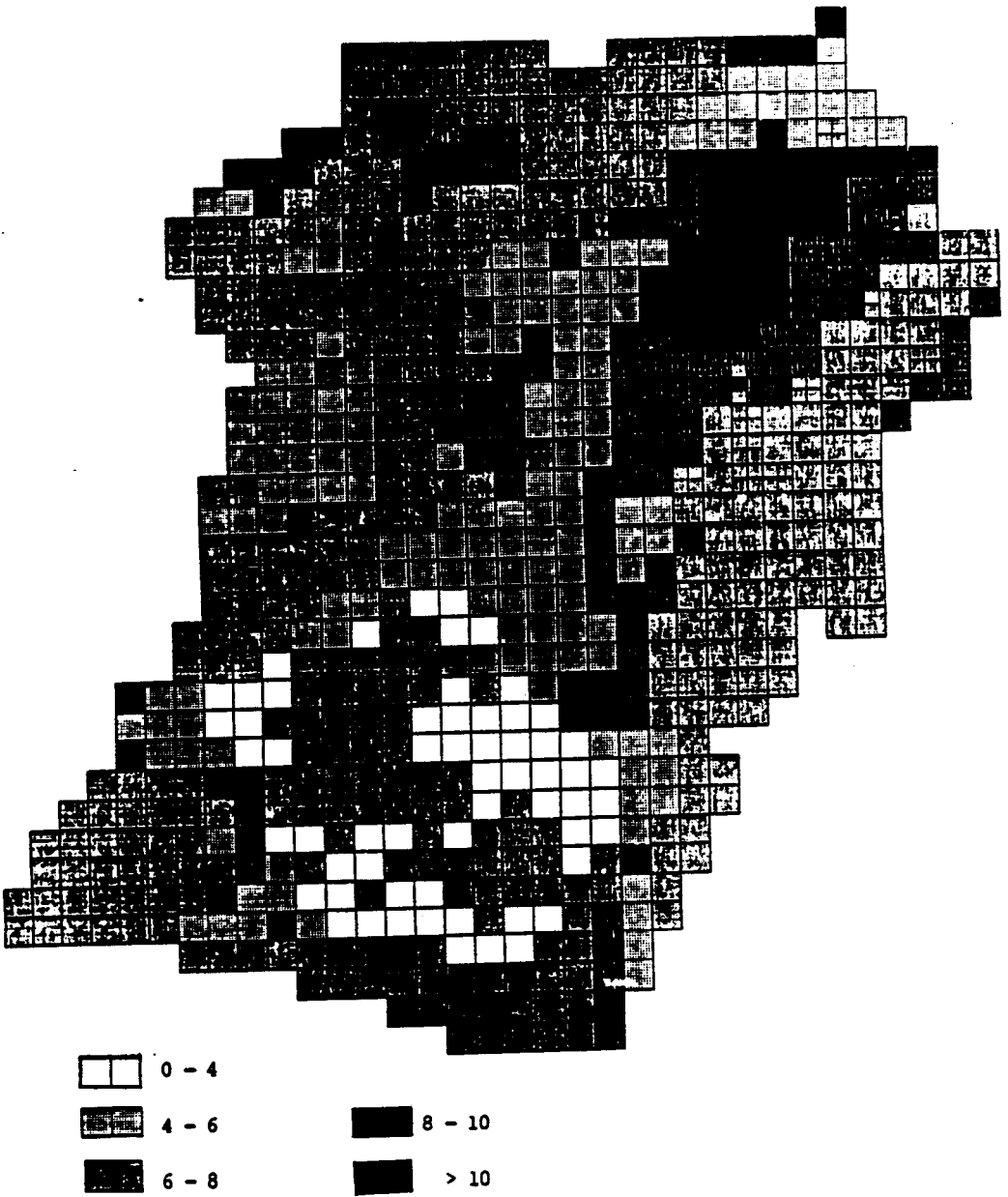


Fig. 23 Cartographie du flux d'eau infiltré ($l/s/km^2$)

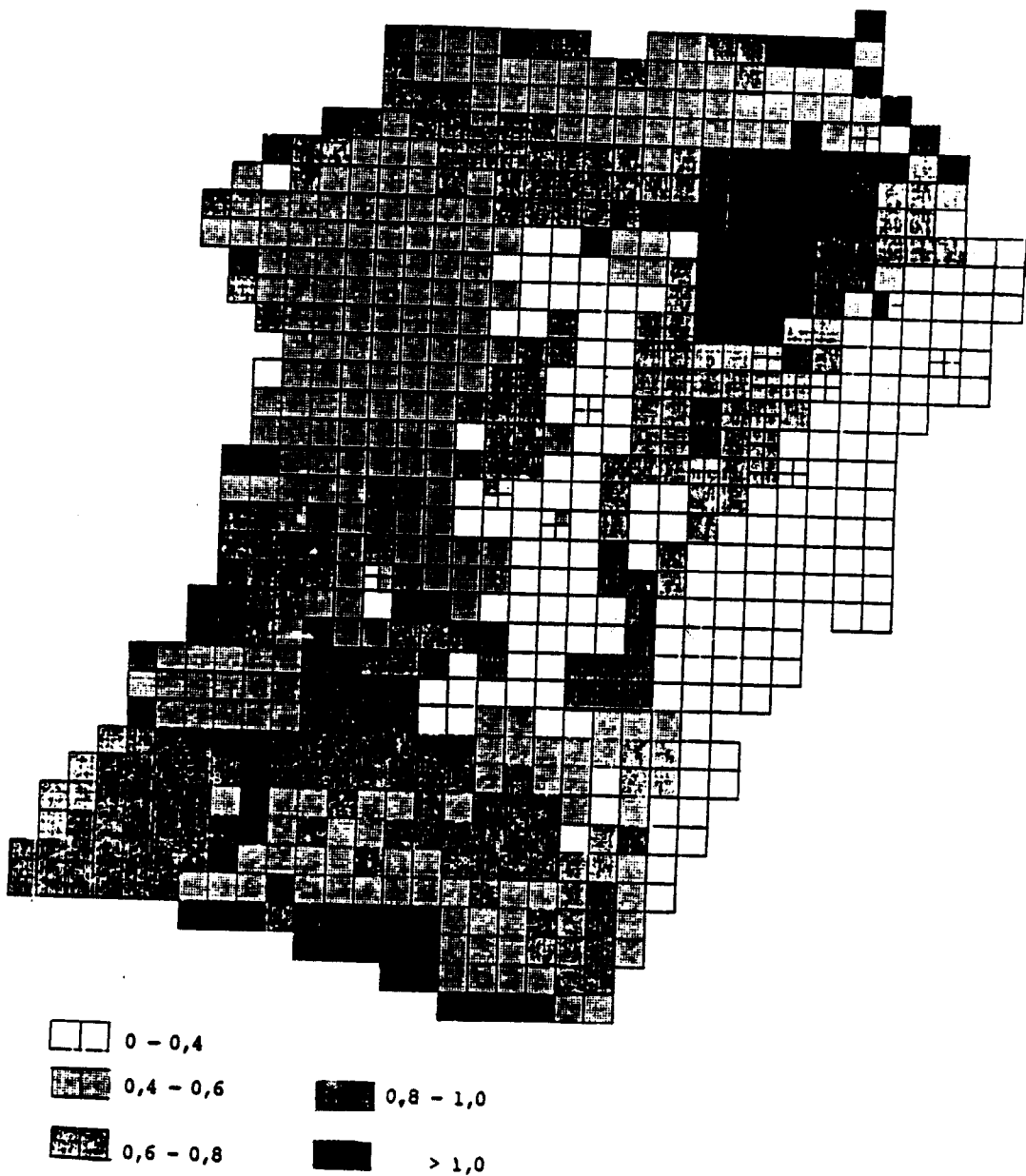


Fig. 24 Cartographie du flux de NO_3^- infiltré (g/s/km^2)

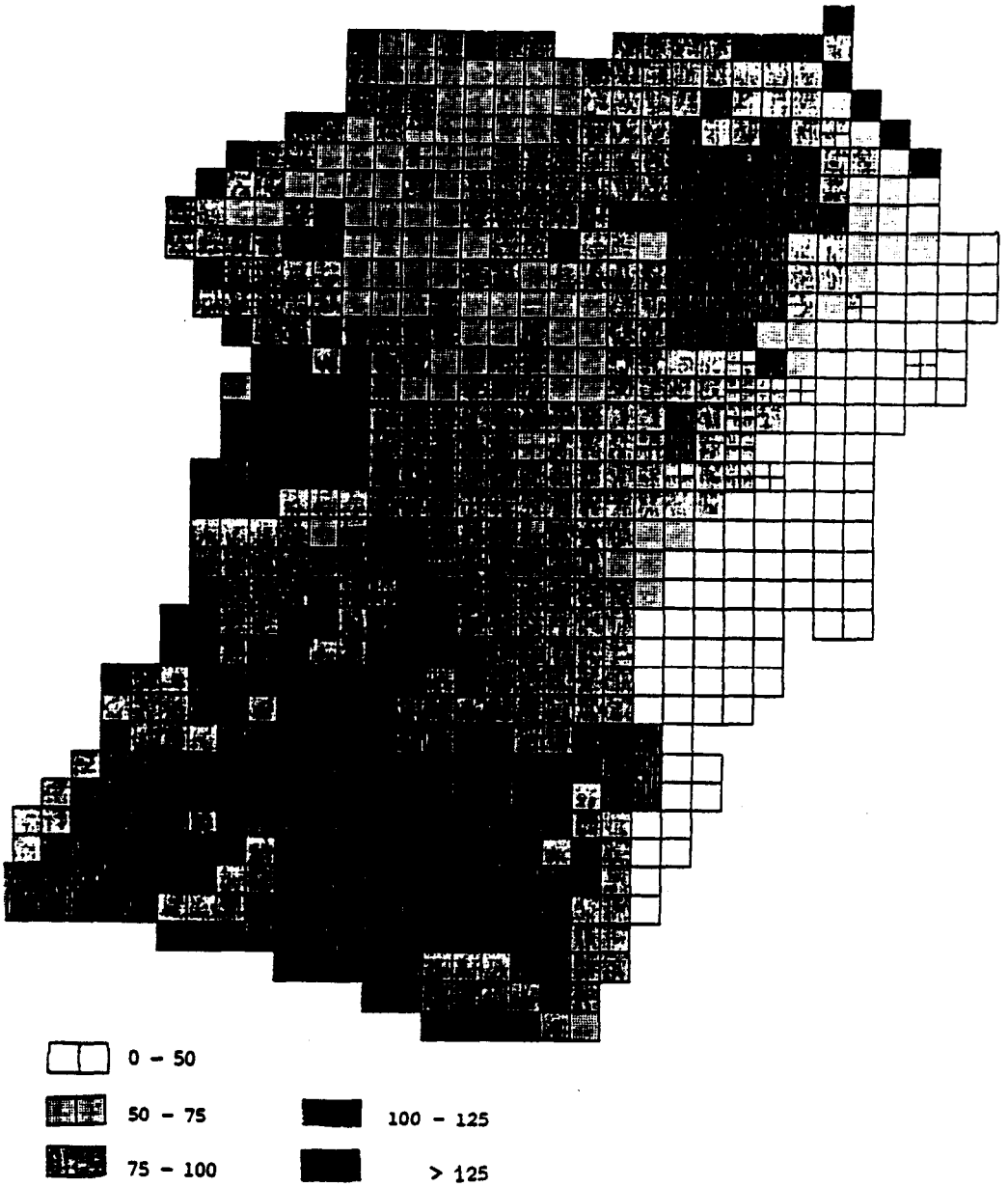


Fig. 25 Cartographie des concentrations en NO_3^- de l'eau infiltrée (mg/l)

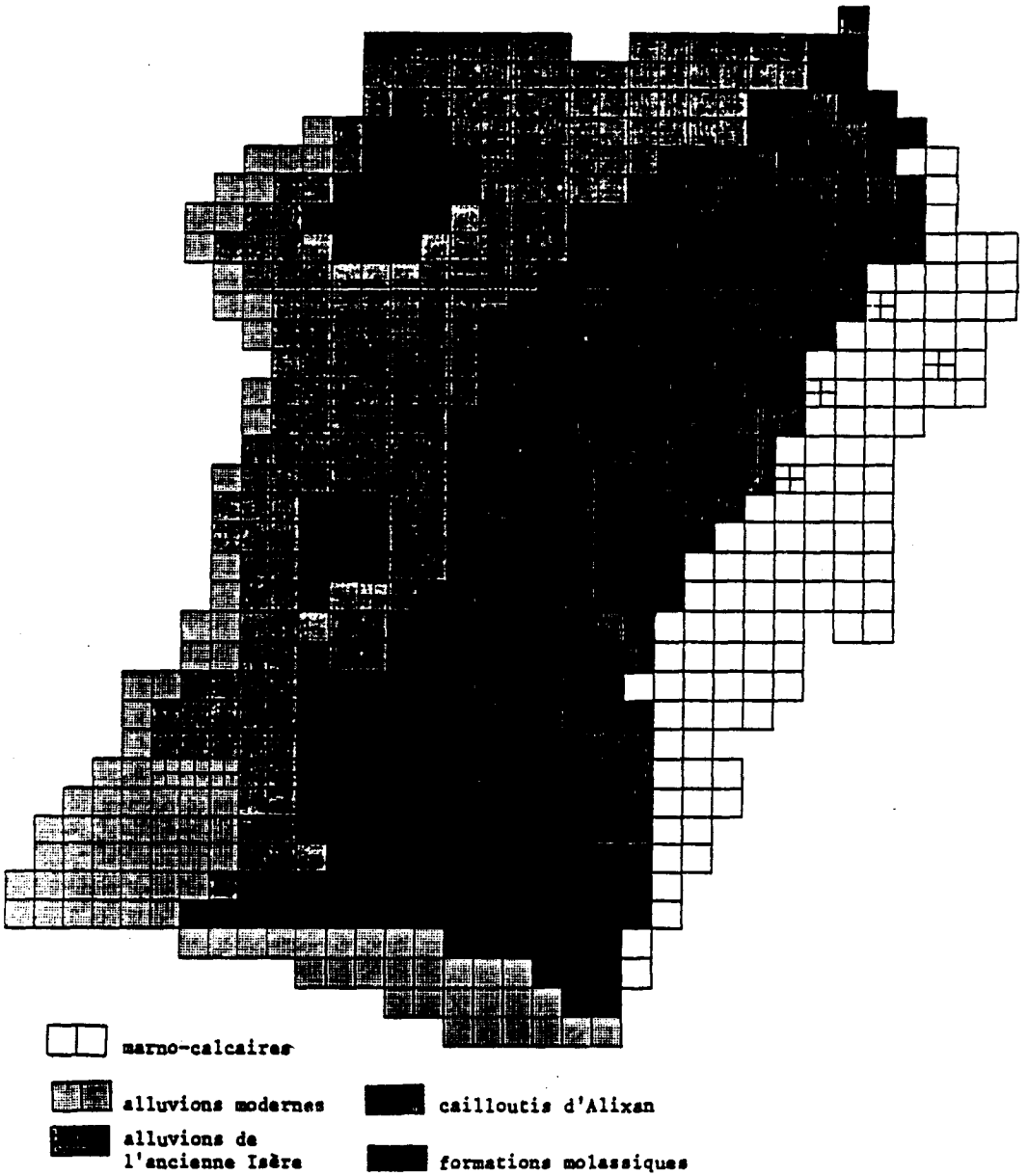


Fig. 26 Cartographie des unités aquifères

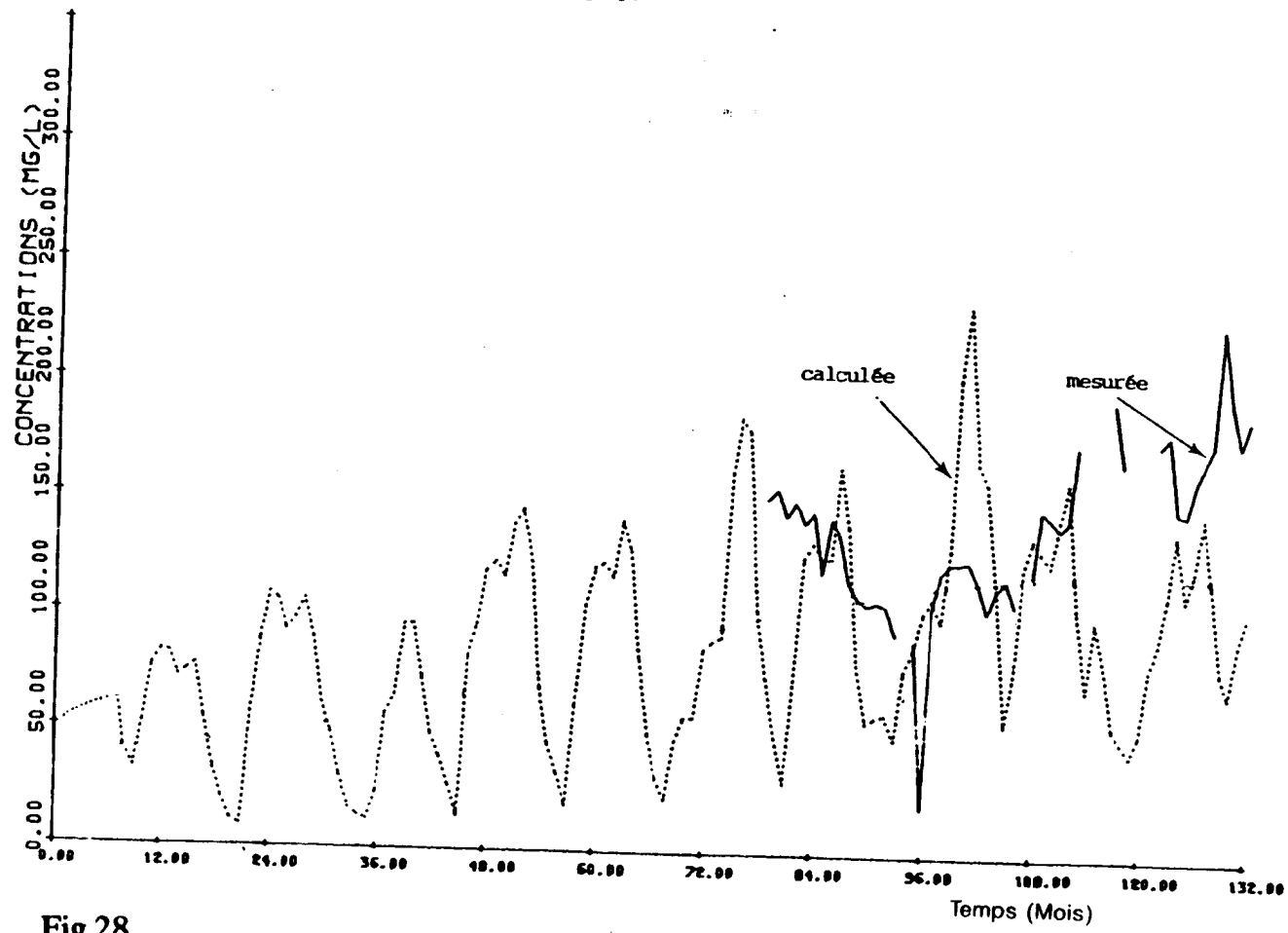


Fig.28

CONCENTRATIONS A P45 (MAILLE 453)

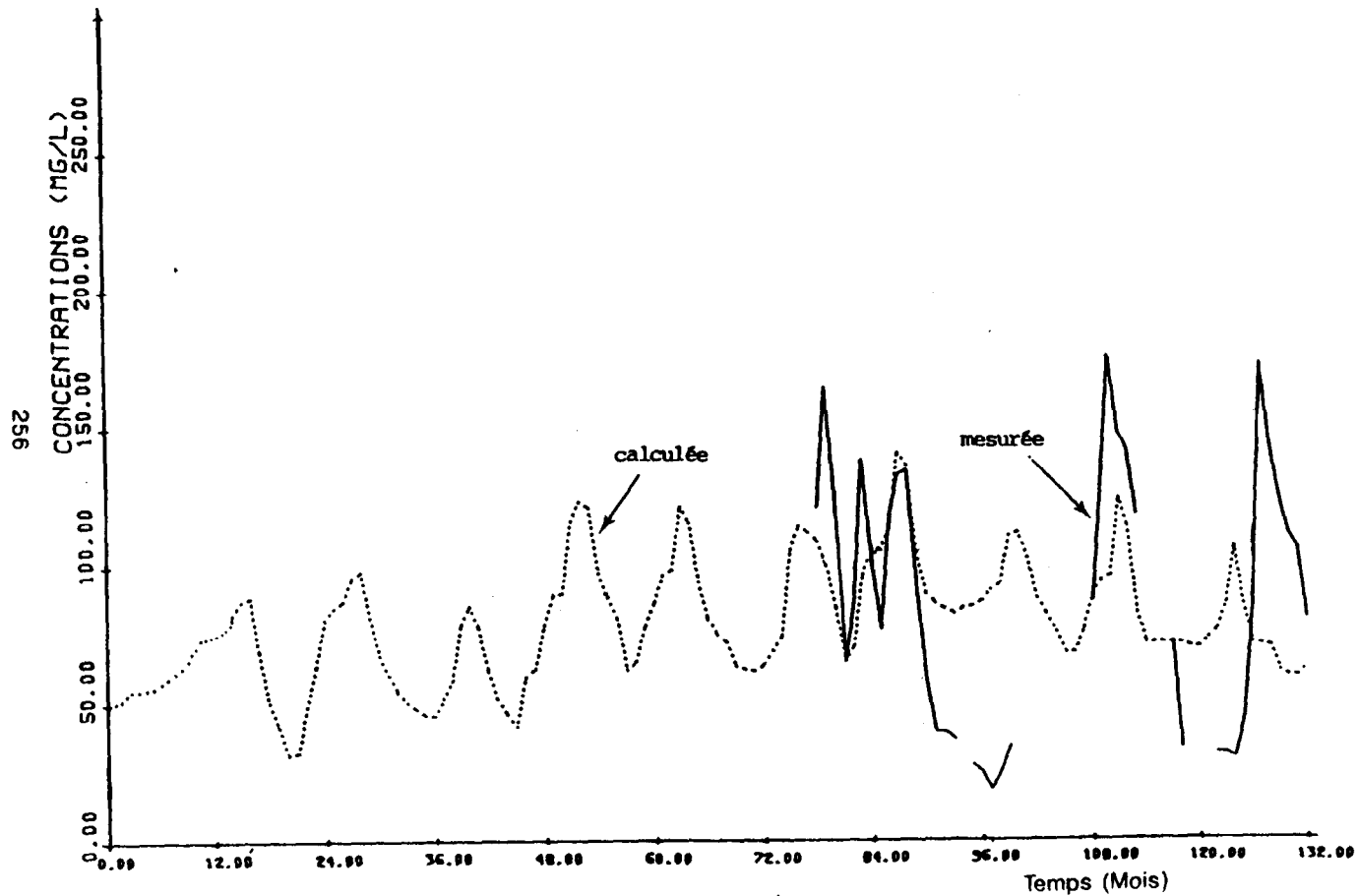


Fig. 27

Fig. 30 CARTE DE
CONCENTRATION OBSERVEE (MG/L) FEURIER 1982



DISCUSSION

Un auditeur a suivi avec intérêt la partie sur la modélisation des apports en nitrates à l'aquifère. La question qu'il pose est la suivante : est-ce que le modèle tient compte des circulations au sein de l'aquifère (vitesse,.....) ?

G. GIRARD répond par la négative. Il s'agit d'un flux de nitrates entrant dans l'aquifère et il y a instantanément mélange. Il y a ensuite transfert de cette partie mélangée aux mailles qui sont à l'aval. Donc au niveau des mailles, il y a une certaine homogénéisation et les pics de nitrates sont tous écrêtés.

M. ROCHE demande si les fonctions de production du modèle comme les apports de nitrates sont considérées comme constantes tout au long de l'année.

G. GIRARD affirme que ces fonctions sont variables, au pas de temps journalier, sur les cases lysimétriques et sur la Noé-sèche et, au pas de temps de 10 jours, pour la plaine de Valence. Pour l'entrée "Pluie", le pas de temps du modèle est la journée, aussi aurait-il été possible de modéliser à ce pas de temps la plaine de Valence à condition que les autres entrées soient également à ce pas de temps.