

## **Simulation numérique de l'influence des pratiques culturelles dans un bassin versant sur la qualité des eaux à son exutoire**

B. CAUSSADE & M. PRAT

*Institut de Mécanique des Fluides, Laboratoire associé au CNRS, 2 rue Charles Camichel, F-31071 Toulouse Cedex, France*

**RESUME** Dans le but d'étudier l'impact des pratiques culturelles à l'échelle d'un bassin versant sur la qualité des eaux de surface, les auteurs proposent un modèle numérique, basé sur un modèle hydrologique pluie-débit de type conceptuel global, qui rend compte des transformations et du transfert de produits azotés à l'exutoire dans le cas des bassins versants à polyculture et exports diffus prépondérants. Après calage et validation sur des données expérimentales recueillies sur un petit bassin versant du sud-ouest de la France, le modèle est utilisé pour mettre en évidence l'importance de certains phénomènes vis-a-vis de la qualité des eaux, tels que: le lessivage, la température, le fractionnement des apports de fertilisants, le type de culture.

*Numerical simulation relating land uses within a drainage basin to the downstream river water quality*

**ABSTRACT** In order to study the impact of land uses within a drainage basin on the downstream river water quality, the authors propose a numerical model which is based on a conceptual hydrological model and simulates nitrogen transformations and transfers for polycrop basins and non-point source exports. After calibration and validation using experimental data from a small basin in southwest France, the model is used to show the influence of various phenomena on water quality, including leaching, temperature, fertilizer use and crop type.

### NOTATIONS

A	aire totale du bassin (ha)
$A^\alpha$	aire du bassin relative au paramètre $\alpha$ (avec $\alpha = i, H, G, \dots$ ) (ha)
C	concentration moyenne en N-NO <sub>3</sub> dans la solution du sol (kg m <sup>-3</sup> )
E	hauteur de pluie efficace (m)
f	fonction (généralement linéaire)
F	flux de N-NO <sub>3</sub> absorbé (kg m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> )
FP	flux dû à l'absorption par les plantes (kg m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> )
FTC	flux dû aux transformations biochimiques (kg m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> )
H	niveau d'un réservoir (m)
H1	niveau du réservoir 1 relatif à l'écoulement hypodermique (m)
H2	niveau du réservoir 2 relatif à l'écoulement hypodermique (m)
K	constante de Michaelis (kg m <sup>-3</sup> )

L	épaisseur du sol (m)
N	concentration en N-NO <sub>3</sub> dans le sol (kg m <sup>-3</sup> )
Q	débit (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
U	taux maximum d'absorption (kg m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> )
ΔH	lame d'eau participant aux transferts (m)
ΔG	lame d'eau alimentant la zone souterraine (m)
θ	teneur en eau moyenne de la zone non saturée (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )

*Indices supérieurs*

G	écoulement souterrain
H	écoulement hypodermique
H1	réservoir 1 de l'écoulement hypodermique
H2	réservoir 2 de l'écoulement hypodermique
i	culture i
p	pluie
R	exutoire
Ru	ruissellement
S	réserve en eau du sol

*Indices inférieurs*

j	jour j
j+1	jour j + 1

## INTRODUCTION

Le modèle bassin versant développé à l'IMF de Toulouse (Prat, 1982) rend compte, en s'appuyant sur un modèle hydrologique pluie-débit de type conceptuel global (Guilbot, 1975) du devenir de l'azote sur les versants et de son transfert à l'exutoire dans le cas d'un bassin versant à polyculture et exports diffus prépondérants. Ce modèle tient compte de la température qui exerce une influence très importante sur l'activité biologique, donc sur le cycle de l'azote et de l'absorption d'azote par le couvert végétal. La validité du modèle est testée, dans le cas du bassin versant du Vermeil situé dans le sud-ouest de la France à 45 km de Toulouse, par comparaison entre des résultats de campagnes de mesures *in situ* et la simulation numérique. Le modèle est ensuite utilisé pour simuler des situations permettant de dégager les idées d'une gestion rationnelle axée sur la maîtrise des "entrées" et "sorties" de l'azote sur les bassins versants. On montre ainsi la corrélation directe qui existe entre pratiques culturales et qualité des eaux.

## MODELE DE TRANSFERT DE L'AZOTE

*Fonctionnement d'un bassin versant agricole*

Très schématiquement, un bassin versant à caractère agricole prépondérant est un site répondant à la définition hydrologique du bassin versant dont la qualité des eaux va dépendre: du climat, du système économique qui induit les activités humaines et par là les techniques et pratiques agricoles, et de la végétation. En termes de flux, le bilan des entrées et des sorties concernant l'azote

s'écrit:

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \underbrace{\phi_{\text{pluie}}}_{\text{I}} + \underbrace{\phi_{\text{fertilisants}} + \phi_{\text{divers}} + \phi_{\text{atmosphérique}}}_{\text{II}} - \underbrace{\phi_{\text{transformations biochimiques}}}_{\text{II}} - \underbrace{\phi_{\text{exutoire}}}_{\text{III}} - \underbrace{\phi_{\text{plantes}}}_{\text{IV}} \quad (1)$$

I: modèle du cycle de l'eau; II: modèle de transformations biochimiques; III: modèle de transfert; IV: modèle d'absorption par les plantes. Cette équation fait clairement apparaître les différents sous-modèles qui vont entrer dans l'organisation du modèle de transfert.

Modèle du cycle de l'eau

Le souci d'élaborer un modèle facilement utilisable et le caractère relativement homogène des bassins versants sur lesquels nous comptons l'appliquer nous ont conduit à choisir un modèle de type conceptuel global. Nous avons adopté le modèle CREC, schématisé sur la Fig.1, basé sur la connaissance présumée du cycle de l'eau sur le bassin versant. Il s'agit de déterminer, en fonction de l'état d'humidité du sol, la fraction d'eau qui participe à l'écoulement (fonction production) puis de transférer cette eau (fonction transfert) à l'exutoire par le jeu de remplissages et de vidanges de réservoirs représentant les différentes fonctions du cycle; les lois de vidange

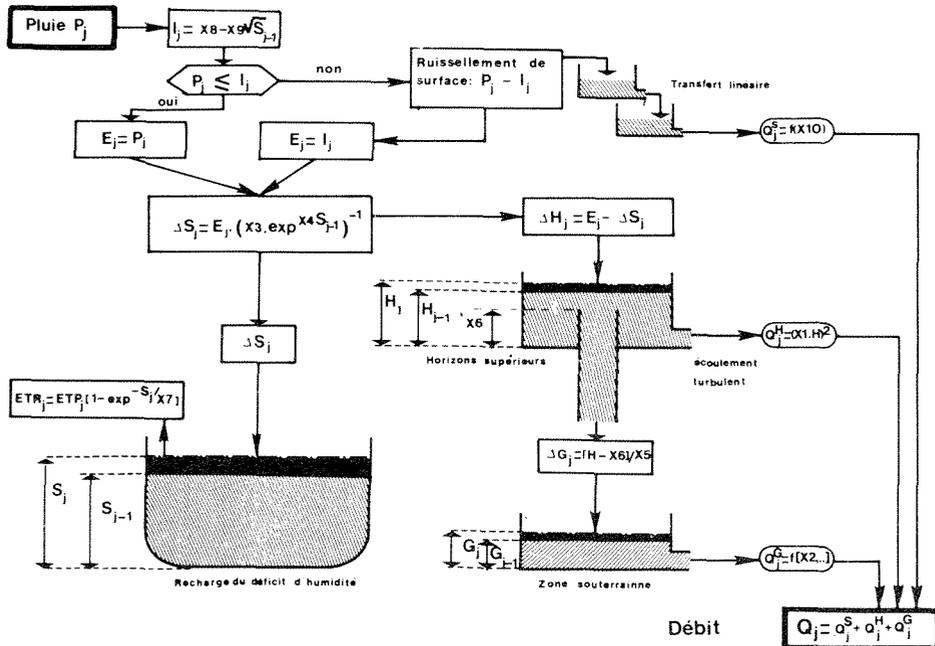


FIG.1 Représentation schématique du fonctionnement du modèle CREC.

dépendant d'une série de paramètres dont on assure le calage en comparant débits calculés et débits observés.

#### *Prise en compte de la température*

Nous avons adopté la solution qui consiste à retenir la température mesurée dans le sol dans une station régionale proche du site considéré. Dans tous les cas, on ne tient pas compte des différences locales de températures.

#### *Modèle des transformations biochimiques*

De manière classique (Iskandar & Selim, 1981) les formes d'azote considérées sont:  $N-NO_2$ ,  $N-NO_3$ ,  $N-NH_4$  échangeable et en solution et l'azote organique (N-ORG). Les processus de transformation modélisés sont la nitrification, la dénitrification, l'immobilisation et l'échange ionique d'ammoniaque; les cinétiques de ces transformations sont approchées par des lois du premier ordre dont les taux de réactions dépendent des conditions du milieu, de la température et de l'humidité. On suppose de plus que (a) un seul stock d'azote organique est minéralisable, (b) les nitrites s'oxydent très rapidement en nitrates, (c) il n'y a pas de lessivage de  $N-NH_4$ , (d) la seule forme d'azote considérée pour la nutrition des plantes est  $N-NO_3$ .

#### *Modèle d'absorption par les plantes*

Dans le cas général d'une polyculture, nous représentons le bassin comme un ensemble de  $p$  parcelles où  $p$  est le nombre de cultures. A chaque culture correspond un cycle végétatif qu'il faut caractériser. On fait l'hypothèse que les plantes absorbent exclusivement des nitrates. L'absorption est modélisée par une cinétique du type Michaelis-Menton (Claassen & Barber, 1978). Pour un couvert végétal, on écrit:

$$F = UC/(K + C) \quad (2)$$

Ce terme puits est pris en compte au niveau de l'équation de conservation de  $N-NO_3$  dans le cycle biochimique associé à la culture considérée. On obtient ainsi une concentration moyenne de  $N-NO_3$  dans chaque parcelle fictive.

#### *Modèle de transfert*

Ce modèle est établi sur la base de deux hypothèses: (a) le bassin versant est "bien drainé" c'est-à-dire qu'en moyenne les contributions de l'eau du sol de chaque type de culture mettent le même temps pour atteindre l'exutoire, (b) la teneur en eau est uniforme sur l'ensemble du bassin. Cette teneur en eau est asservie au niveau du réservoir représentant la zone non saturée (voir Fig.1), on peut ainsi écrire:

$$\theta_j = f(H_j^S) \quad (3)$$

On en déduit la concentration moyenne,  $C$ , en  $N-NO_3$  dans l'eau du sol

occupé par la culture  $i$ , soit:

$$C_j^i = N_j^i / f(H_j^S) \quad (4)$$

L'équation de bilan au niveau de la zone non saturée, pour le pas de temps choisi (dans notre cas un jour), s'écrit donc pour la culture  $i$ , en se référant aux notations de la Fig.2:

$$C_{j+1}^i = C_j^i \frac{f(H_j^S)}{f(H_{j+1}^S)} - \underbrace{\frac{\Delta H_j C_j^i}{L f(H_{j+1}^S)}}_I + \underbrace{\frac{E_j C_j^P}{L f(H_{j+1}^S)}}_{II} \pm \underbrace{\frac{FTC}{f(H_{j+1}^S)}}_{III} - \underbrace{\frac{FP}{f(H_{j+1}^S)}}_{IV} \quad (5)$$

I: pertes par ruissellement hypodermique et percolation; II: apports par la pluie; III: production consommation par le cycle biochimique; IV: consommation par les plantes.

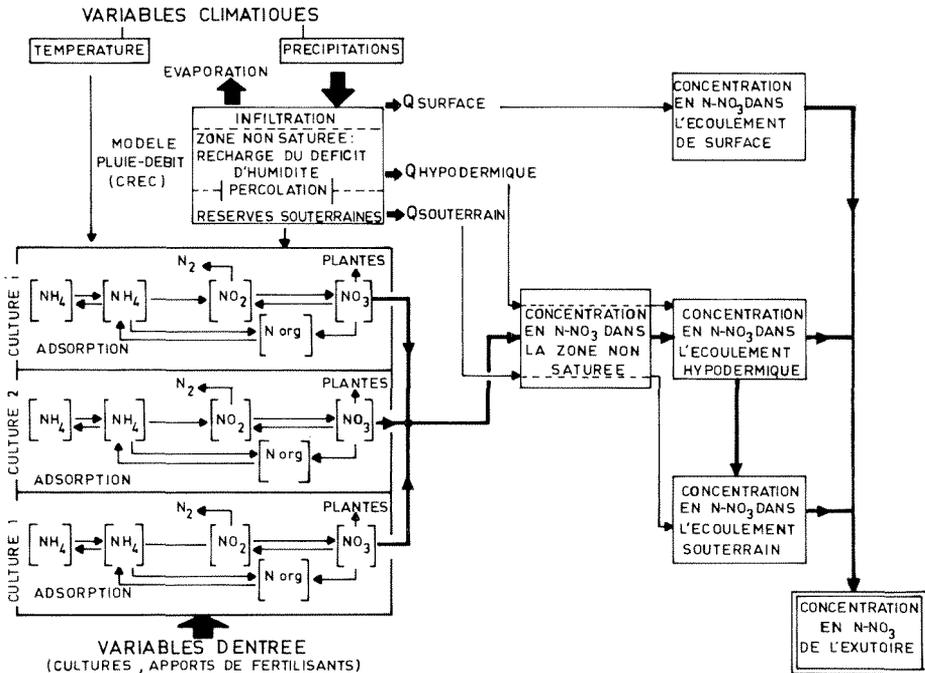


FIG.2 Schéma d'organisation du modèle.

La concentration moyenne de la zone saturée,  $C^S$ , est alors:

$$C_{j+1}^S = \sum_{i=1}^p C_{j+1}^i (A^i/A) \quad (6)$$

avec  $p$ : nombre de cultures.

En ce qui concerne, le transfert par le ruissellement hypodermique, on suppose qu'il se fait en deux étapes. Deux paramètres de transfert  $Y1$  et  $Y2$  sont introduits; ils traduisent la diminution de concentration progressive observée entre l'eau sous culture et l'exutoire, il vient:

$$C_{j+1}^{H1} = C_j^{H1} \frac{H_j^{H1}}{H_{j+1}^{H1}} + \underbrace{\frac{\Delta H_{j+1} C_j^S Y1}{(AH/A) H_{j+1}^{H1}}}_I - \underbrace{\frac{\Delta H_j C_j^{H1}}{(AH/A) H_{j+1}^{H1}}}_{II} \quad (7)$$

I: apports depuis la zone saturée; II: pertes vers le deuxième réservoir de transfert.

$$C_{j+1}^{H2} = C_j^{H2} \frac{H_j^{H2}}{H_{j+1}^{H2}} + \underbrace{\frac{\Delta H_j C_j^H Y2}{(AH/A) H_{j+1}^{H2}}}_I - \underbrace{\frac{\Delta G_j C_j^{H2}}{(AH/A) H_{j+1}^{H2}}}_{II} - \underbrace{\frac{Q_j^H C_j^{H2}}{(AH/A) H_{j+1}^{H2}}}_{III} \quad (8)$$

I: apports du 1<sup>er</sup> réservoir hypodermique; II: percolation; III; pertes dans la rivière.

Pour le réservoir représentant l'écoulement souterrain, on écrit:

$$C_{j+1}^G = C_j^G \frac{H_j^G}{H_{j+1}^G} - \underbrace{\frac{Q_j^G C_j^G}{(AG/A) H_{j+1}^G}}_I + \underbrace{\frac{\Delta G_j C_j^{H2}}{(AG/A) H_{j+1}^G}}_{II} \quad (9)$$

I: pertes dans la rivière; II: apports du 2<sup>ème</sup> réservoir hypodermique. La concentration en N-NO<sub>3</sub> de l'eau atteignant l'exutoire est donc donnée par la relation suivante:

$$C_{j+1}^R = \frac{Q_{j+1}^S C_{j+1}^{Ru} + Q_{j+1}^H C_{j+1}^H + Q_{j+1}^G C_{j+1}^G}{Q_{j+1}^S + Q_{j+1}^H + Q_{j+1}^G} \quad (10)$$

La concentration en N-NO<sub>3</sub> de l'eau de ruissellement est supposée égale à celle de la pluie dans le cas des crues d'été. Lorsque la crue implique une participation de l'eau du sol (c'est le cas des crues d'hiver) et un transport de matières en suspension, on admet que la concentration dans l'écoulement superficiel est proportionnelle à la concentration dans la zone non saturée. Dans la rivière, on fait l'hypothèse que les nitrates sont conservatifs jusqu'à l'exutoire du bassin versant (transfert rapide).

#### Organisation du modèle complet

La Fig.2 représente de manière synthétique l'organisation du modèle complet. On constate que l'existence d'une polyculture conduit finalement à une certaine spatialisation.

## VALIDATION DU MODELE

### Site expérimental

Le modèle a été appliqué sur des données relatives au bassin expérimental du Vermeil, bassin d'une superficie de 700 ha à polyculture sur sol argilo-calcaire. Les données recueillies concernent la température et l'humidité de l'air, les débits et concentrations en N à l'exutoire et dans l'eau de pluie, la carte des cultures et

la fertilisation. La pluviométrie, l'évapotranspiration relative et les températures décadaires correspondant à la période d'observation sont données sur les Figs 3 et 4.

*Calibration du modèle*

En ce qui concerne le modèle pluie-débit, le calage des paramètres est obtenu par minimisation d'une fonctionnelle exprimant l'écart entre séries de débits observés et calculés. En ce qui concerne la partie "azote" du modèle, une première étape consiste au réglage de l'évolution de la concentration dans la zone non saturée, fonction production du modèle (au sens de l'azote). Il convient pour cela de fixer les valeurs initiales, les valeurs des cinétiques, le taux d'absorption des plantes et leur fertilisation. L'effet rhizosphérique est obtenu par augmentation de la cinétique d'immobilisation de  $N-NO_3^-$  en liaison avec le développement racinaire. On procède ensuite à la calibration proprement dite, au niveau de la fonction de transfert, à l'aide des deux coefficients  $Y_1$  et  $Y_2$  du transfert lié à l'écoulement hypodermique.

*Résultats*

L'utilisation du modèle CREC sur le bassin a donné de bons résultats: voir Fig.5. Les caractéristiques du bassin et de l'année simulée ont mis en évidence certaines faiblesses du modèle, elles portent

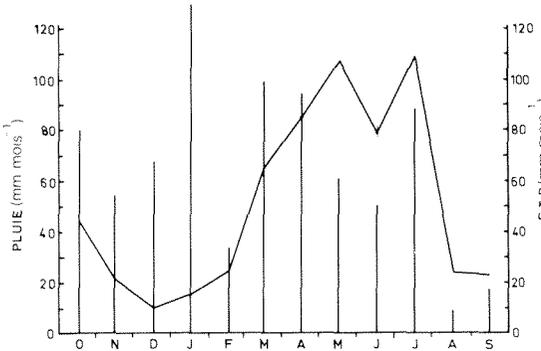


FIG.3 Pluviométrie et ETR.



FIG.4 Températures décadaires.

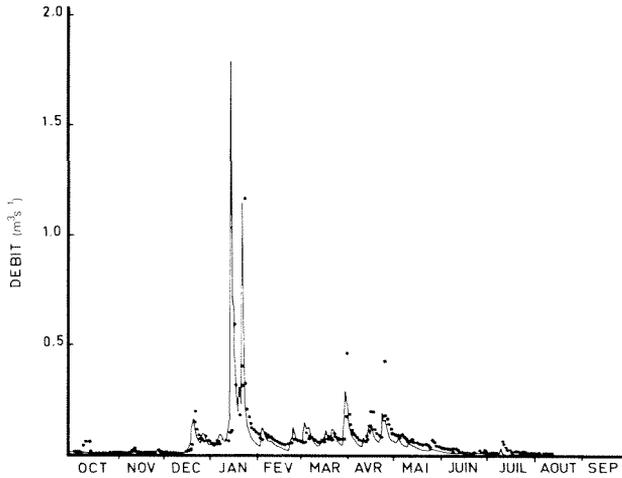


FIG.5 Débits journaliers, (•) mesurés, (—) simulés.

essentiellement sur la simulation des crues et des rivières non perennes. En ce qui concerne le modèle "azote", on constate une assez bonne adéquation entre résultats de simulation et les concentrations observées (voir Fig.6). Deux périodes sont moins bien représentées. Il s'agit de la période de la végétation active des céréales d'hiver (mars, avril) et de la période des étiages. Rappelons à ce sujet qu'on fait l'hypothèse de conservation des nitrates dans la rivière au cours de leur transfert à l'exutoire. On constate en revanche une bonne représentation de la période de minéralisation automnale et des crues de janvier, période durant laquelle s'effectue l'essentiel du lessivage.

APPLICATION PRATIQUE DU MODELE

Nous considérons ici que le modèle mis au point rend compte

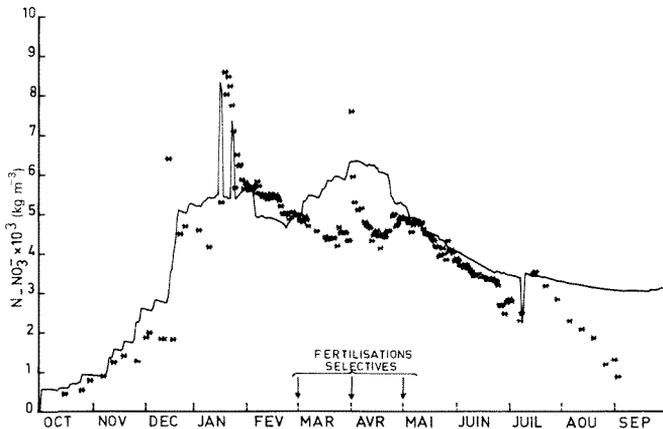


FIG.6 Concentrations journalières en nitrates, (\*) mesurées, (—) simulées.

de manière satisfaisante des transferts de nitrates à l'échelle du bassin considéré. Les résultats du calage sont donc une base de comparaison à laquelle nous allons nous référer pour étudier, à partir de la simulation de situations fictives, le rôle que peuvent jouer le climat, l'agriculture et ses pratiques dans la dégradation des eaux de surface. Les situations simulées concernent (a) une fertilisation nulle sur l'ensemble des cultures (Fig.7), (b) différentes monocultures (Fig.8), (c) une situation climatique telle que la température moyenne décadaire est augmentée (Fig.9).

On constate que l'emploi des engrais a une grande influence sur la qualité des eaux; la monoculture de maïs qui laisse les sols nus longtemps (pas d'absorption par les plantes, ni d'effet rhizosphérique pendant la période des pluies de printemps), est la plus

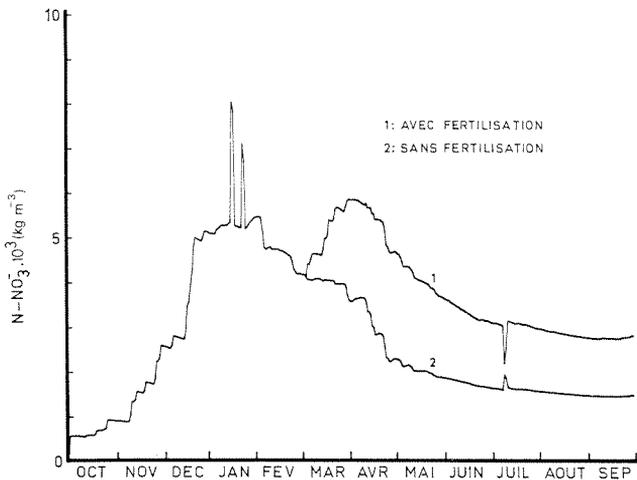


FIG.7 Evolution des concentrations en nitrates à l'exutoire. Comparaison entre situation réelle et simulation sans utilisation d'engrais.

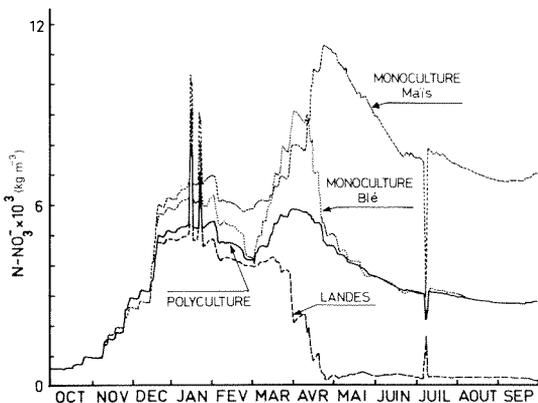


FIG.8 Evolution des concentrations en nitrates à l'exutoire. Comparaison entre situation réelle (poly-culture) et simulation de monocultures (maïs, blé, Landes).

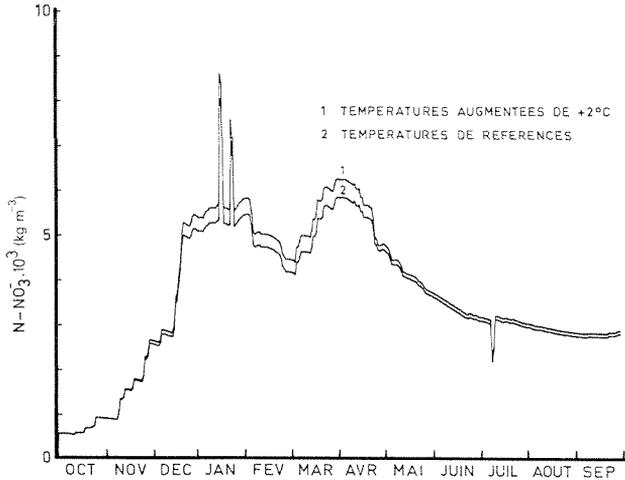


FIG.9 Evolution des concentrations en nitrates à l'exutoire. Comparaison entre situation réelle et simulation dans le cas de températures augmentées de 2°C.

polluante; l'élévation de la température est un phénomène qui favorise la dégradation de la qualité des eaux.

## CONCLUSION

Le modèle de transfert d'azote à l'exutoire des bassins versants à polyculture et exports diffus prépondérants que nous venons de proposer, donne de bons résultats. Il permet une approche globale des phénomènes mis en jeu au niveau du bassin et ainsi de mieux comprendre le fonctionnement de l'écosystème. Son utilisation en tant qu'outil de prédiction met en évidence, au travers des situations simulées, le lien direct entre les pratiques agricoles sur ce type de bassin et la qualité des eaux à son exutoire. En restant volontairement sur le plan strictement qualitatif, on voit qu'un tel modèle peut rendre de grands services dans une tentative de maîtrise des bilans "entrées-sorties" de l'azote sur ce type de bassin; tentative axée sur une gestion rationnelle de notre environnement tenant compte d'une part des intérêts des agriculteurs et d'autre part de l'intérêt général.

REMERCIEMENTS Les auteurs remercient le Service Agronomique de l'APC de Toulouse et le SRAE Midi-Pyrénées pour leur collaboration dans la collecte de données, le LHM de Montpellier pour ses conseils dans la mise en oeuvre du modèle pluie-débit, ainsi que le CNRS et le Ministère de l'Environnement qui ont financé en partie cette étude dans le cadre d'une ASP PIREN "eau".

REFERENCES

- Claassen, N. & Barber, S.A. (1976) Simulation model for nutrient uptake from soil by a growing plant root system. *Agron. J.* 68, 961-966.
- Guilbot, A. (1975) Modélisation des écoulements d'un aquifère karstique. Thèse d'Université Montpellier, France.
- Iskandar, I.K. & Selim, H.M. (1981) Modeling nitrogen transport and transformations in soils: 1 - theoretical considerations. *J. Soil Sci.* 131, 223-240.
- Prat, M. (1982) Simulation numérique du transport de produits réactifs dans les sols. Cas de l'azote dans les relations bassin versant-rivière. Thèse de Docteur-Ingénieur, INP de Toulouse, France.

