

**Ministère de l'Agriculture et des Classes Moyennes
Centre de Recherches Agronomiques (CRAGx)
Département Productions Végétales**

Contrat de Recherche S.S.T.C. NP/42/023

**Plan d'appui scientifique à une politique de Développement durable
Appui scientifique à la recherche prénormative dans le secteur alimentaire
dans un contexte de développement durable**

Gestion intégrée de l'azote en cultures arables et normes nitriques

***Partim* UHAGx (FUSAG)**

Rapport final

Avril 2001

Prof. Mme S. Dautrebande

Ir. L. Vandendael

Ir. Ch. Casse

Faculté Universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux (FUSAGx)

Département Agronomie, Economie et Développement

Unité d'Hydraulique Agricole - GÉNIE RURAL (UHAGX)

Passage des Déportés, 2 ; 5030 Gembloux, Belgique

Tél : 081 / 62 21 87 Fax : 081 / 62 21 81

e-mail : dautrebande.s@fsagx.ac.be

Table des Matières

1. INTRODUCTION.....	2
2. LE MODÈLE EPIC : PRÉSENTATION DU FONCTIONNEMENT DU MODÈLE.....	3
2.1. LE CYCLE DE L'AZOTE DANS EPIC.....	4
2.2. FONCTIONNEMENT GÉNÉRAL DU CYCLE DE L'AZOTE REPRIS DANS LE MODÈLE	5
2.2.1. Percolation des nitrates	6
2.2.2. Volatilisation et nitrification.....	6
2.2.3. Minéralisation et Immobilisation.....	7
2.2.4. Dénitrification	7
2.2.5. Autres processus pris en compte.....	8
3. ROTATION BETTERAVE-FROMENT -ESCORGEON.....	8
3.1. DESCRIPTION DE L'EXPÉRIMENTATION.....	8
3.1.1. Description de l'essai « Petit Vet « 1 (Tableau 1)	10
3.1.2. Essai « Petit Vet 2 » (Tableau 2).....	11
3.1.3. Essai « Petit Vet 3 » (Tableau 3)	14
4. SIMULATIONS EPICMOD.....	17
4.1. CAS DE LA FIXATION DE L'AZOTE PAR LES LÉGUMINEUSES.....	17
4.2. MINÉRALISATION DE L'AZOTE.....	19
4.2.1. Vérification des températures simulées.....	20
4.2.2. Modification du programme	27
5. SIMULATIONS DE LA ROTATION BETTERAVE-FROMENT-ESCORGEON.....	28
5.1. SIMULATIONS RÉALISÉES	28
5.2. RÉSULTATS DES SIMULATIONS EPICMOD – VALIDATIONS.....	29
5.2.1. Les teneurs en nitrates du profil.....	29
5.2.2. La concentration en nitrates des eaux de lessivage.....	34
6. SIMULATIONS EPICMOD SUR BETTERAVE SUCRIÈRE.....	40
6.1. DONNÉES DISPONIBLES.....	40
6.1.1. Essai "Debilde"	40
6.1.2. Essai "Rigo"	41
6.1.3. Essai "Leroy"	41
6.1.4. Remarques concernant la mise en œuvre des simulations.....	42
6.2. SIMULATIONS RÉALISÉES	43
6.2.1. Le profil azoté	43
6.2.2. Simulations "Debilde"	43
6.2.3. Simulations "Rigo".....	45
6.2.4. Simulations "Leroy".....	47
7. ÉTABLISSEMENT D'UNE FICHE TECHNIQUE "EPICMOD"	48
7.1. ENTRÉES LIÉES AU SOL.....	48
7.2. DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES :	49
7.3. CALENDRIER CULTURAL	50
8. CONCLUSION GÉNÉRALE.....	51
9. BIBLIOGRAPHIE.....	52
10. ANNEXES	54

1. Introduction

Le but de l'étude menée par le Département Productions Végétales du Centre de Recherches Agronomiques de Gembloux (CRAGx) consiste à « vérifier qu'un conseil de fumure basé sur le bilan prévisionnel des besoins des plantes et des fournitures du sol optimise le rendement et minimise la quantité d'azote minéral présente dans le profil après récolte ». Au sein de ce projet, l'Unité d'Hydraulique Agricole (Génie Rural) de la Faculté Universitaire de Gembloux a eu la charge d'étudier les points suivants : "A partir de différents scénarios liés à l'occupation du sol (sol non couvert, résidus de récolte, engrais vert, culture déjà réimplantée), identifier les situations critiques en début d'hiver et valider, après calibration si nécessaire, le modèle de lessivage EPIC en suivant l'évolution et la répartition du stock d'azote minéral du sol pendant l'automne. Les données disponibles au CRAGx et celles issues d'une expérimentation de deux ans comportant la betterave, la pomme de terre, le maïs et deux céréales d'hiver (froment et orge d'hiver) seront exploitées à cet effet. (...) Calculer, à l'aide du modèle EPIC, les quantités perdues par lessivage dans les situations critiques ainsi identifiées et déterminer les profils nitriques susceptibles d'entraîner une concentration nitrique des eaux percolantes supérieure ou égale à 50 mg de nitrates par litre. (...)".

Le but est donc clairement, en résumé, de valider un modèle « eau - sols - plantes - pratiques agricoles - climat », en tant qu'outil d'aide à la prévision des risques de lessivage des nitrates d'origine agricole.

Les résultats de l'étude de l'UHAGx sont consignés dans le présent Rapport, qui comporte en outre une description du modèle EPIC utilisé et de la mise en forme de données à partir de mesures réalisées et fournies par le Département Productions Végétales du CRAGx.

2. Le modèle EPIC : présentation du fonctionnement du modèle

La détermination des risques de lessivage des nitrates dans le sol impose la prise en compte d'une somme de facteurs en relation avec la culture et le climat. L'outil de modélisation mathématique EPIC [SHARPLEY *et al.*, 1990] décrit les relations "Eau-Sol-Plantes" et permet de gérer l'impact des divers intervenants. L'organisation du modèle en modules spécifiques s'influencent mutuellement permet une analyse objective pour l'évolution d'un facteur. Le modèle permet de quantifier le lessivage des nitrates grâce à une description du cycle de l'azote et une description des mouvements de l'eau dans le sol, ainsi qu'une modélisation de la croissance végétale avec ses interactions sur le cycle des nutriments et le cycle de l'eau. Les données d'entrée et les paramètres concernent donc logiquement la description du milieu : caractéristiques physiques du sol, variables climatiques, conditionnant les processus modélisés mais aussi l'introduction du calendrier cultural (date et caractéristiques des semis, récolte, travail du sol, fertilisation, espèce végétale,...). Le modèle original ayant été développé aux USA, une version modifiée EPICmod a été mise au point et validée à l'UHAGx afin de mieux répondre à nos conditions de sols, climat et cultures [MASEREEL *et al.*, 1995ab ; Programme-Action Hesbaye, 1996; Cocu X. *et al.*, 1998;...].

EPICmod travaille à un pas de temps journalier; il nécessite donc l'introduction des paramètres climatiques journaliers, au minimum les températures minimale et maximale et les précipitations. Ces données sont complétées des vitesses de vent, de l'humidité relative et de la radiation solaire suivant la méthode de calcul d'évapotranspiration potentielle retenue (demande évaporatoire climatique).

Le calcul du ruissellement fait appel à la méthode du Service de Conservation des Sols des USA, incluant l'effet de l'humidité du sol, de la pente des terres, et de l'occupation du sol de la parcelle étudiée. Cette méthode détermine ainsi un "potentiel de ruissellement" fonction de la classe hydrologique de sol (sol plus ou moins « infiltrant ») et de son occupation (type et qualité du couvert sur le plan hydrologique).

Le milieu Sol est défini par sa texture et ses paramètres physiques et hydrodynamiques, tels que la conductivité hydraulique, la densité apparente sèche, les teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement. Les flux verticaux de percolation sont calculés sur base d'une approche capacitive dont les paramètres sont reliés aux caractéristiques physiques du sol (« modèle physiquement basé »); les nutriments sont directement influencés par la teneur en eau des différentes couches.

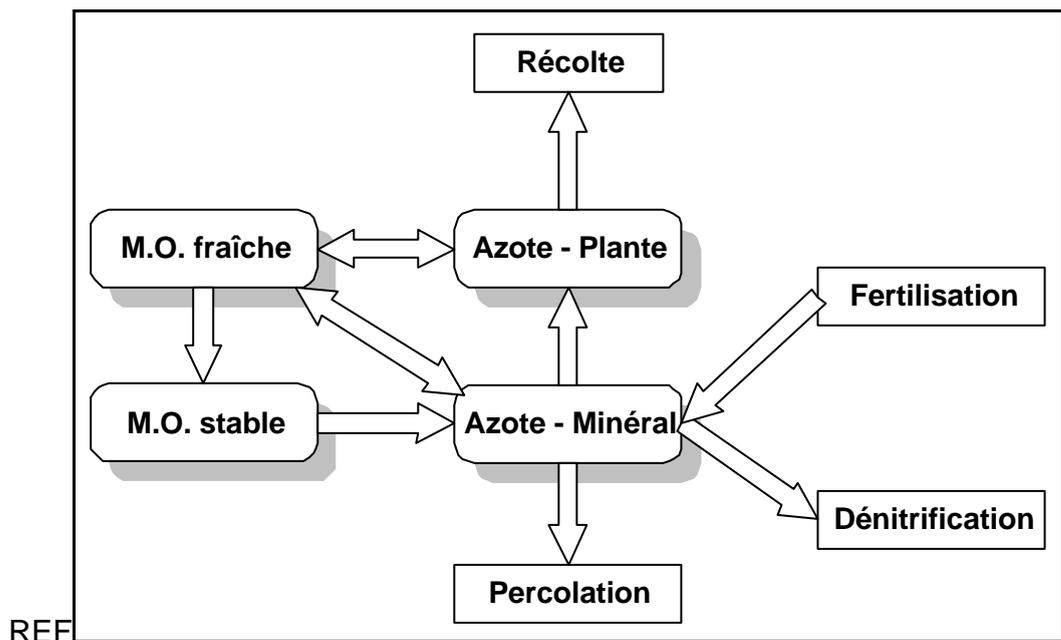
La partie du modèle relative aux plantes fait appel à une base de données « cultures », le modèle simulant la croissance de celles-ci par la méthode des degrés-jours.

2.1. Le cycle de l'azote dans EPIC

Les différents processus pris en compte par le modèle EPIC lors de la simulation du cycle de l'azote concernent les domaines suivants :

- la perte en nitrates par ruissellement ;
- la percolation des nitrates ;
- le flux de nitrates vers la surface par évaporation de l'eau du sol ;
- le transport d'azote par les sédiments ;
- la (dé)nitrification ;
- la minéralisation ;
- l'immobilisation.

La Figure 1 reprend l'agencement des différents "réservoirs" ("pools") d'azote pris en compte dans le modèle. Y sont distingués les fonctions d'exportation (lessivage, exportation à la récolte, extraction racinaire), de transformation et de production. Le lessivage des nitrates est fonction de la quantité d'eau appelée à percoler d'une couche à une autre et d'un facteur prenant en compte le concept classique d'eau mobile – eau immobile, ceci influençant activement les flux verticaux d'azote et la répartition entre azote stocké dans le sol et azote lessivé.



Pratiquement, le programme lui-même peut être considéré comme une suite de sous-routines décrivant chacune un processus particulier et qui sont appelées par le programme principal au moment opportun.

Dans la partie décrivant le cycle des nutriments, le programme fait appel à la sous-routine principale (NPCY) qui va faire appel elle-même aux sous-routines décrivant la percolation (NYNIT pour la couche superficielle et NLCH pour les couches suivantes), la nitrification et la volatilisation (NITVOL), la minéralisation et l'immobilisation à partir de la matière organique (NMNIM), la dénitrification (NDNIT).

D'autres processus sont pris en compte ; l'Annexe 1 reprend les différentes sous-routines ayant rapport au cycle de l'azote et du phosphore et leur fonction. Les organigrammes complets de ces sous-routines sont repris en Annexe 2.

SEQARABIC Fonctionnement général du cycle de l'azote repris dans le modèle

La routine NPCY (schématisée en Annexe 3REF et décrite en REFMERGEFORMATAnnexe 2) est appelée par le programme principal une fois par jour (routine BSIM : gère les processus journaliers tout le long de l'année). NPCY REFva faire appel successivement aux sous-routines NPMINREF, NYNIT, NLCH, REFNITVOLREF, NMNIM REFet NDNITREF, pour chaque couche de sol, de la première à la dernière selon le mode décrit ci-dessous (cfr. Annexe 1 pour la description et Annexe 2 pour la schématisation de chacune de ces sous-routines).

Le transfert de P entre les différents "pools" (NPMIN) est calculé inconditionnellement, de même que la percolation (NYNIT ou NLCH). La nitrification et la volatilisation (NITVOL) ne sont calculés que si la quantité de NH_3 dans la couche est supérieure à 0,01 kg/ha. Ensuite, si la température de la couche concernée est supérieure à 0°C la minéralisation et l'immobilisation (NMNIM) sont calculées ainsi que la dénitrification (NDNIT). La minéralisation - immobilisation n'est calculée que si la couche se trouve à une profondeur inférieure à la profondeur racinaire maximale. La dénitrification n'est, elle, calculée que si le rapport teneur en eau / porosité est supérieur à 90 %. La même séquence de calcul est appliquée pour les couches de sol successives.

2.2.1. SEQARABIC **Percolation des nitrates**

Deux sous-routines prennent en charge la percolation suivant que l'on se trouve dans la première couche de sol (fixée à 1 cm ; NYNIT) ou dans une des couches suivantes (NLCH).

La différence consiste à la non prise en compte de la percolation de P de la première couche et à la prise en compte des nitrates apportés par la précipitation.

REFMERGEFORMATDans la sous routine NLCH, les quantités de nitrates (QI) et de phosphore (VAP) percolant de la couche supérieure sont ajoutées à la concentration de la couche en nitrate (WNO3) et en phosphore (AP). Si la percolation de la couche est nulle, aucun calcul n'est effectué. Sinon, le volume d'eau V quittant la couche (percolation O et flux hypodermique SSF) sert à calculer la quantité de nitrate entraînée VNO3.

$$VNO3 = WNO3(K) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{V}{PO(K) \cdot PARM4} \right) \right)$$

- où :
- VNO3 = perte de nitrate par la couche de sol (kg/ha)
 - WNO3(K) = quantité de nitrate de la couche K (kg/ha)
 - V = volume d'eau (mm) quittant la couche par percolation (O(K)) et flux hypodermique (SSF(K))
 - PO(K) = porosité de la couche K
 - PARM4 = paramètre régulant la quantité de nitrate entraînée.

La concentration de l'eau en nitrates $VV = VNO3/V$ est identique pour le flux hypodermique et la percolation. La perte en nitrate est finalement égale à $SSO3(K) = VV \cdot O(K)$. Cette quantité est ajoutée à la couche suivante.

2.2.2. **Volatilisation et nitrification**

Les processus de volatilisation et de nitrification sont pris en compte par la sous-routine NITVOL. REF

Si la température de la couche de sol est inférieure à 5°C, le calcul n'est pas réalisé. La volatilisation fait intervenir la capacité d'échange cationique de la couche (CEC), un facteur de température ainsi que la quantité de nitrate passant du pool actif de l'humus aux nitrates. La nitrification est fonction du facteur de température, de la teneur en eau de la couche ainsi que du pH. Si la teneur en eau

est inférieure au point de fanaison (S15), la quantité nitrifiée est nulle. Une teneur minimale en eau est donc nécessaire.

La quantité de NH_3 nitrifiée (RNIT) et celle volatilisée (AVOL) sont soustraites du stock de NH_3 de la couche.

2.2.3. Minéralisation et Immobilisation

REFMERGEFORMATLa minéralisation est un processus très important. Elle fait intervenir plusieurs "pools" d'azote et plusieurs flux entre ces pools.

Dans la sous-routine NMNIM, le calcul du flux de nitrate (RWN) du pool actif d'humus (WMN) vers le pool stable (WN) est effectué. Le nombre d'années de cultures avant le début de simulation est pris en compte via le facteur RTN. La quantité d'humus totale (XX) est égale à la sommation du pool actif (WMN) et du pool stable d'humus (WN). Une estimation de la perte d'azote (HMN) du pool actif d'humus (WMN) vers WNO_3 (quantité de nitrate de la couche) est également effectuée.

Si la quantité de résidus végétaux (RSD) de la couche est inférieure à 1 t/ha, ni la minéralisation ni l'immobilisation ne sont calculés. Le calcul de ratios est basé sur les rapports C/N et C/P, choix du ratio minimum CA. Calcul de la perte en azote RMN de la matière organique FON dont 20% va au pool d'humus actif WMN et 80% au stock de NO_3 de la couche $\text{WNO}_3(\text{K})$.

Si on se trouve dans la première couche, appel de la sous-routine NFALL (Annexe 1) qui convertit les résidus végétaux sur pied en résidus du sol.

2.2.4. Dénitrification

Le processus de dénitrification (sous-routine NDNIT) prends en compte la quantité de nitrate (WNO_3), un facteur de température (CDG) et la quantité d'humus dans la couche (HUM) pour calculer la quantité dénitrifiée. Un REFMERGEFORMATajustement de la quantité de NO_3 de la couche est ensuite effectué.

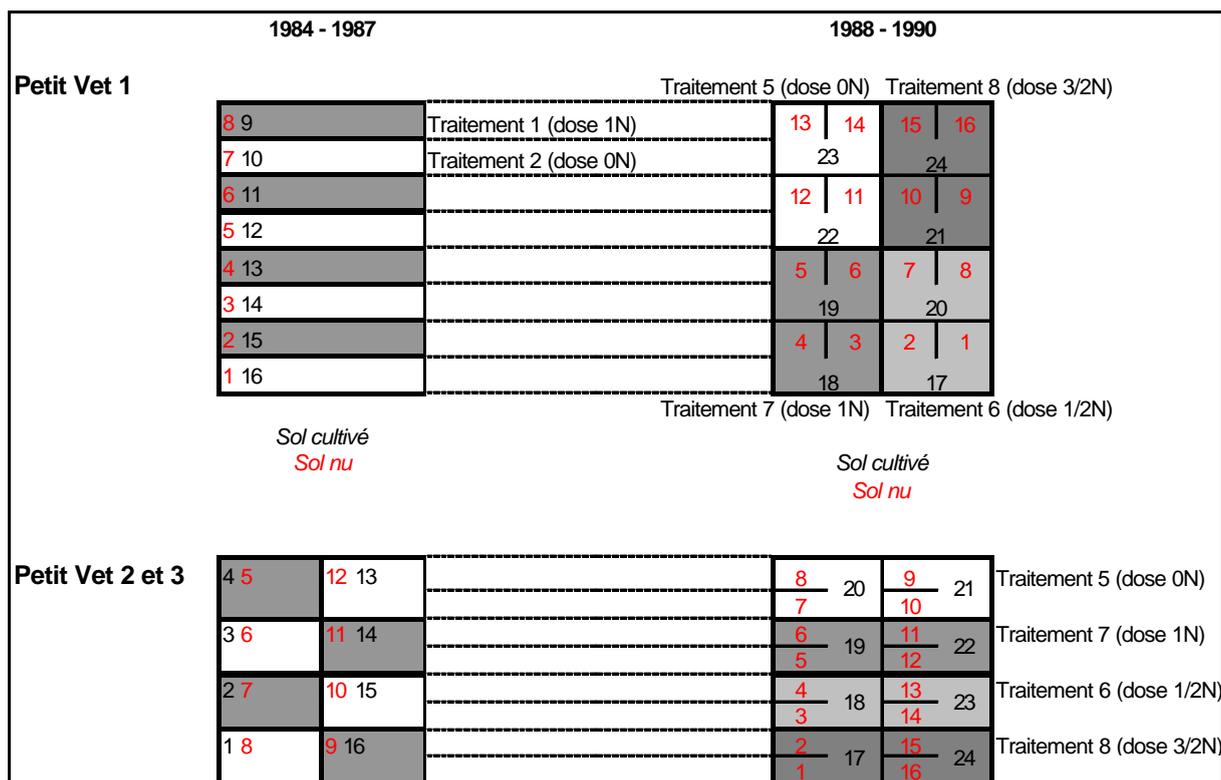


Figure 2 : Schéma des parcelles expérimentales du CRAGx

Note : Les tailles des parcelles ne sont pas respectées, notamment pour les parcelles "sol nu" qui sont plus petites et dont la position varie d'une année à l'autre.

Le modèle EPICmod étant un modèle qui fonctionne à l'échelle de la parcelle, les résultats des expérimentations doivent donc être mis en forme (et donc étudiés) en tenant compte de cet impératif. Ainsi, il y a une continuité à respecter par rapport aux deux périodes d'essai. Nous voyons dès lors que l'essai "Petit Vet 1" peut poser des problèmes par rapport aux simulations. En effet, les traitements 5 à 8 de la période postérieure à 1988 se situent dans des parcelles correspondant à la fois aux traitements 1 et 2 (dose X et 0) de la première période d'essai. La continuité spatiale n'est donc plus de mise pour cet essai : le traitement 5 est situé sur des parcelles ayant subi soit le traitement 0, soit le traitement 1, de même pour les traitements 6 à 8.

La nécessité d'une mise en forme des données d'expérimentation en correspondance avec le fonctionnement du modèle nous mène à ne prendre en considération que les essais "Petit Vet 2 et 3", la disposition des parcelles de ces deux essais étant le plus en adéquation avec l'objectif de validation d'un modèle « parcelle agricole ».

3.1.1. Description de l'essai « Petit Vet » 1 (Tableau 1)

A titre d'information, et pour être complet, nous présentons ci-dessous le calendrier cultural mis en œuvre lors de l'essai « Petit Vet 1 ». Cet essai n'a, rappelons-le, pas été pris en compte lors des simulations pour des raisons de changement d'allocation de parcelle des doses appliquées suite à une redéfinition des tailles de ce dites parcelles.

Durée de l'essai : 1984 – 1992

Début des prélèvements de sol : 29/10/84

Fin des prélèvements : 31/07/92

Tableau 1 : Calendrier cultural (semis-récolte-fertilisation)

date	Opération
23/04/85	Semis Betterave
22/05/85	Fumure 130 kg N/ha
03/10/85	Récolte betterave
08/10/85	Semis Froment
24/04/86	Fumure 47.5 kg N/ha
09/05/86	Fumure 50 kg N/ha
12/06/86	Fumure 50 kg N/ha
13/08/86	Récolte
23/09/86	Semis Escourgeon
01/12/86	Fumure 23 kg N/ha
07/04/87	Fumure 40 kg N/ha
24/04/87	Fumure 30 kg N/ha
22/05/87	Fumure 33 kg N/ha
08/08/87	Récolte
88	Betterave
14/10/88	Semis Froment
30/03/89	Fumure 0 30 60 90 kg N/ha
19/04/89	Idem
25/05/89	Idem
10/08/89	Récolte
28/09/89	Semis Escourgeon
14/03/90	Fumure 0 30 60 90 kg N/ha
11/04/90	Idem
14/05/90	idem
16/07/90	Récolte
Fin 90 et suivantes	Inconnues quant à l'allocation des parcelles expérimentales

3.1.2. Essai « Petit Vet 2 » (Tableau 2)

La continuité spatiale des parcelles est respectée dans cette expérimentation.

Durée de l'essai : 1984 – 1992

Début des prélèvements de sol : 14/09/84

Fin des prélèvements : 27/07/94

Tableau 2 : Calendrier cultural (semis – récolte – fertilisation)

date	Opération
21/09/84	Semis Escourgeon
02/04/85	Fumure 50 kg N/ha
07/05/85	Fumure 50 kg N/ha
24/05/85	Fumure 50 kg N/ha
25/07/85	Récolte
02/05/86	Semis Betterave
09/06/86	Fumure 130 kg N/ha
15/10/86	Récolte betterave
17/10/86	Semis Froment
01/04/87	Fumure 62 kg N/ha
24/04/87	Fumure 40 kg N/ha
05/06/87	Fumure 46 kg N/ha
21/08/87	Récolte
22/09/87	Semis Escourgeon
07/04/88	Fumure 0 30 60 90 kg N/ha
19/04/88	idem
16/05/88	idem
28/07/88	Récolte
31/03/89	Semis Betterave
17/05/89	Fumure 0 90 180 270 kg N/ha
22/09/89	Récolte
18/10/89	Semis Froment
15/03/90	Fumure 0 30 60 90 kg N/ha
12/04/90	idem
17/05/90	idem
30/07/90	Récolte
27/09/90	Semis Escourgeon
12/03/91	Fumure 0 30 60 90 kg N/ha
11/04/91	idem
15/05/91	idem
23/07/91	Récolte
Fin 90 et suivantes	Inconnues quant à l'allocation des parcelles expérimentales

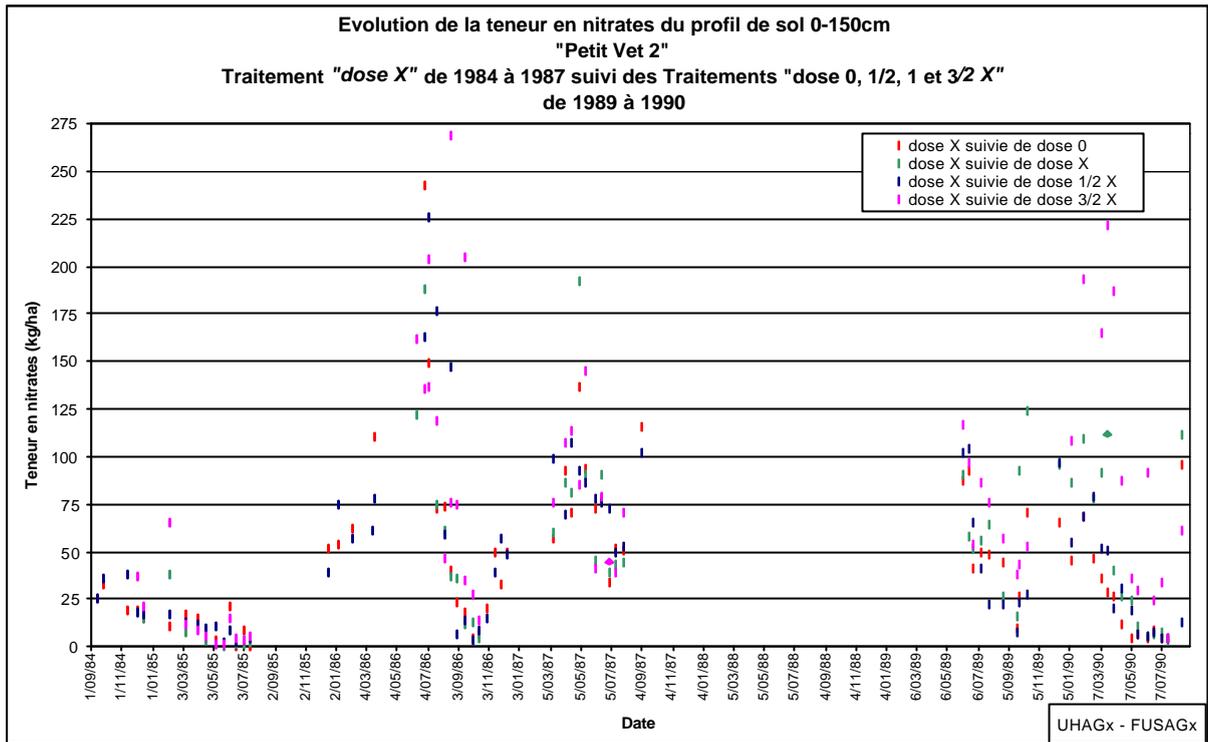
Si nous nous référons à la REFFigure 2, nous pouvons en extraire plusieurs scénarios. Les cas suivants seront examinés :

- traitement 1 (dose X jusque 1988) suivi du traitement 5 (dose 0 à partir de 1988), c'est-à-dire les parcelles 4 puis 20
- traitement 1 (dose X jusque 1988) suivi du traitement 6 (dose 1/2 X à partir de 1988), c'est-à-dire les parcelles 14 puis 22
- traitement 1 (dose X jusque 1988) suivi du traitement 7 (dose x à partir de 1988), c'est-à-dire les parcelles 2 puis 18
- traitement 1 (dose X jusque 1988) suivi du traitement 8 (dose 3/2 X à partir de 1988), c'est-à-dire les parcelles 16 puis 24.

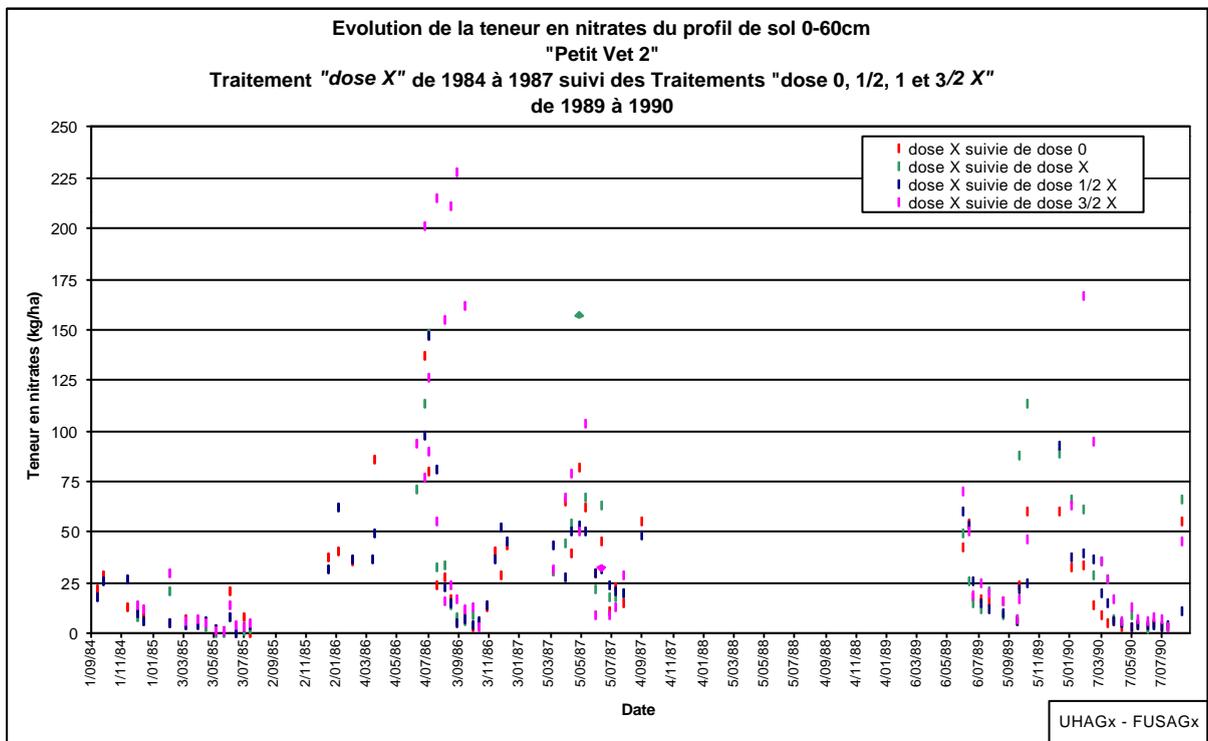
Suite à l'examen des "cahiers des champs", nous constatons que certains aménagements sont nécessaires dans cette succession, les parcelles étant parfois sujettes à un changement d'allocation (sol nu – sol cultivé).

La mise en forme des données aboutit à quatre scénarios; la Figure 3 reprend l'évolution de la teneur en nitrates de l'ensemble du profil (150 cm) pour l'ensemble de quatre scénarios retenus. Des graphiques de ce type peuvent être réalisés sur base des différents horizons analysés (10 horizons de 15 cm). Normalement, les premières années doivent concorder, quel que soit le scénario retenu vu la dose unique (X). On note toutefois une variabilité non négligeable des mesures même si la tendance générale est respectée. Cette constatation est importante pour la suite des simulations. Un graphique similaire mais reprenant les teneurs en nitrates pour les 60 premiers centimètres de sol est aussi fourni (Figure 4). Dans la suite des simulations, nous nous baserons sur ces 60 centimètres pour les différents cas étudiés.

EMBED



SEQARABIC Figure 3 : Teneurs en nitrates du sol, profondeur 0 à 150 cm, essai "Petit Vet 2" (Source des données de mesures : CRAGx)



EMBED

SEQARABIC Figure 4 : Teneur en nitrates du sol, profondeur 0 à 60 cm, 'essai "Petit Vet 2" (Source des données de mesures : CRAGx)

3.1.3. Essai « Petit Vet 3 » (Tableau 3)

L'essai « Petit Vet 3 » est similaire à l'essai « Petit Vet 2 » quand à l'organisation des parcelles (Figure 2) et aux traitements y appliqués. Ci-dessous est présenté le calendrier cultural de l'essai « Petit Vet 3 ».

Durée de l'essai : 1984 – 1994

Début des prélèvements de sol : 17/10/84

Fin des prélèvements : 25/09/90

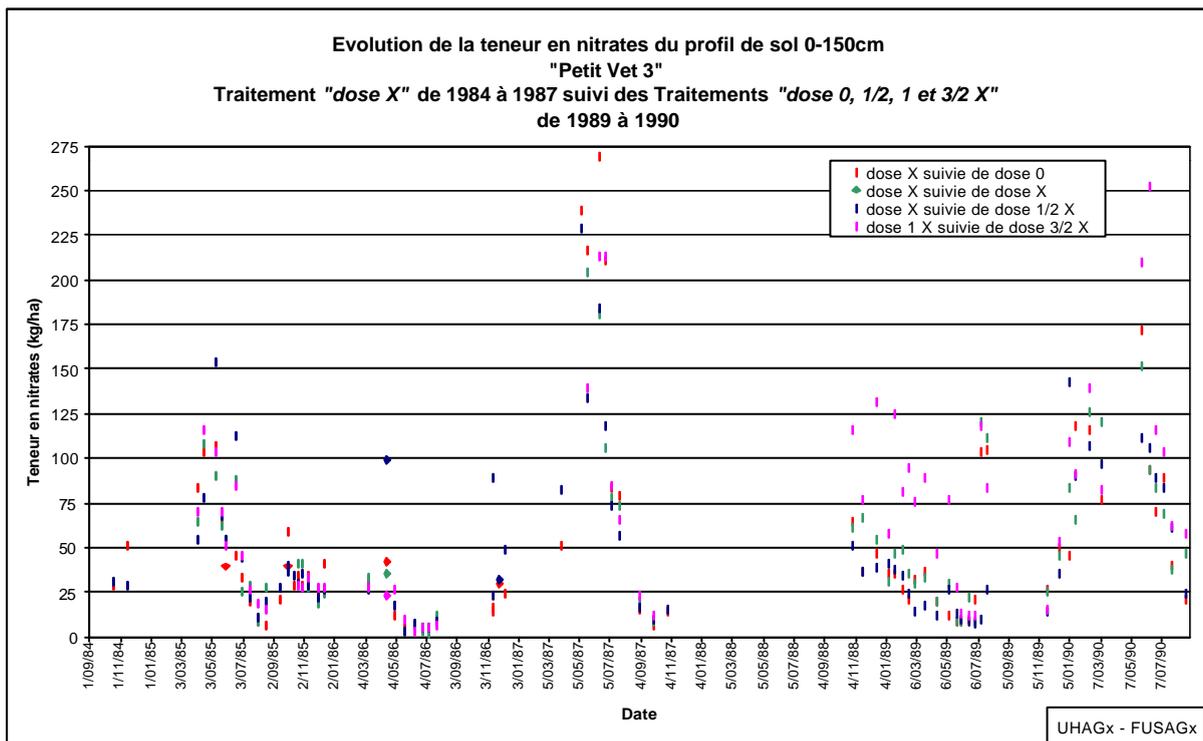
Tableau 3 : Calendrier cultural (semis – récolte – fertilisation)

date	Opération
14/11/84	Semis froment
05/04/85	Fumure 60 kg N/ha
07/05/85	Fumure 50 kg N/ha
06/06/85	Fumure 50 kg N/ha
27/08/85	Récolte
19/09/85	Semis Escourgeon
24/10/85	Fumure 25 kg N/ha
02/04/86	Fumure 55 kg N/ha
07/05/86	Fumure 47.5 kg N/ha
24/05/86	Fumure 45 kg N/ha
25/07/86	Récolte
09/04/87	Semis Betterave
06/05/87	Fumure 107 kg N/ha
03/11/87	Récolte betterave
10/11/87	Semis Froment
07/04/88	Fumure 0 30 60 90 kg N/ha
25/04/88	Idem
24/05/88	Idem
21/08/88	Récolte
27/09/88	Semis Escourgeon
14/03/89	Fumure 0 30 60 90 kg N/ha
17/04/89	Idem
18/05/89	idem
06/07/89	Récolte
20/03/90	Semis Betterave
09/05/90	Fumure 0 90 180 270 kg N/ha
19/09/90	Récolte
16/10/90	Semis Froment
20/03/91	Fumure 0 30 60 90 kg N/ha
15/04/91	idem

24/05/91	idem
14/08/91	Récolte
Fin 91 et suivantes	Inconnues quant à l'allocation des parcelles expérimentales

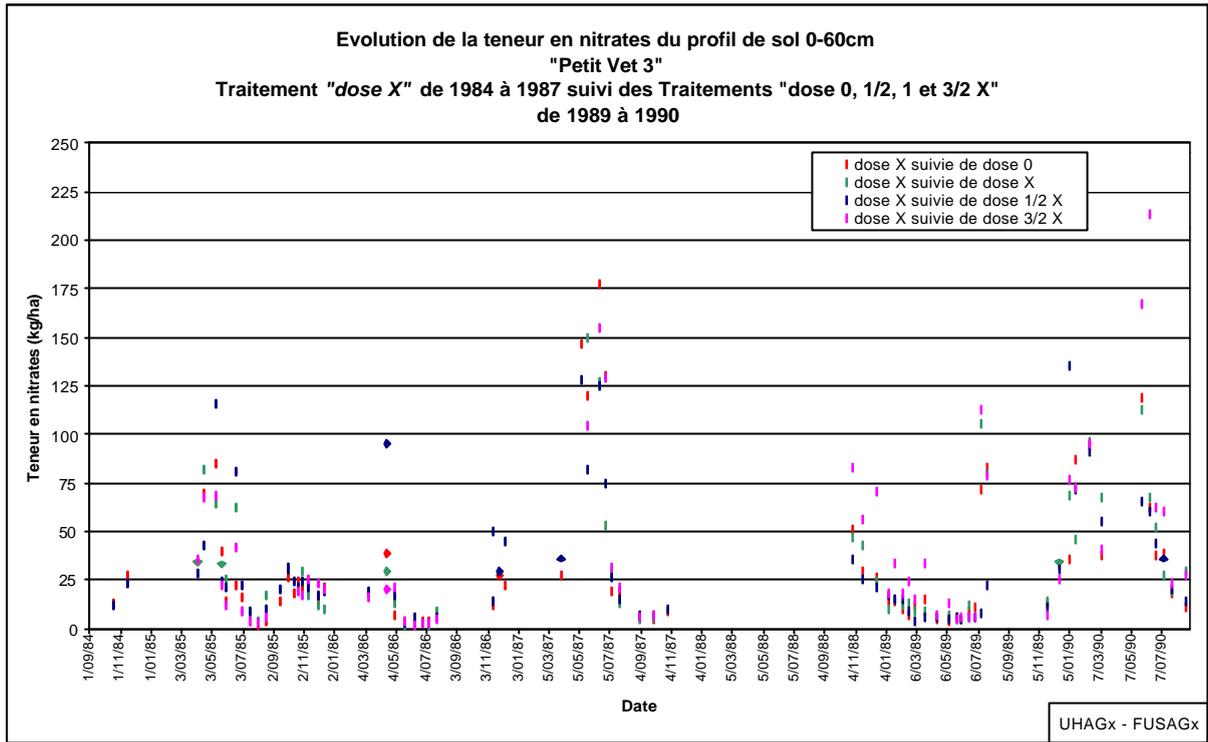
Nous présentons ci-après le graphique récapitulatif (Figure 5) reprenant les teneurs en nitrates des quatre scénarios retenus. A l'instar de l'essai "Petit Vet 2", un examen des schémas expérimentaux s'est révélé nécessaire vu la différence d'allocation des parcelles (sol nu ou non) en début d'expérience (le numéro des parcelles lors de la première saison culturale diffère par la suite). Nous pouvons tirer la même constatation que pour l'essai "PV2" en ce qui concerne la variabilité des résultats de mesures lors de la première phase de l'expérimentation, avec ici encore une même tendance générale; il importe donc d'être attentif à cette notion de variabilité pour une représentativité à l'échelle de la parcelle agricole. La Figure 6 reprend les teneurs en nitrates pour les 60 premiers centimètres.

EMBED



SEQARABIC Figure 5 : Teneur en nitrates du sol, profondeur 0 à 150 cm, essai "Petit Vet 3" (Source des données de mesures : CRAGx)

EMBED



SEQARABIC Figure 6 : Teneur en nitrates du sol, profondeur 0 à 60 cm, essai "Petit Vet 3" (Source des données de mesures CRAGx)

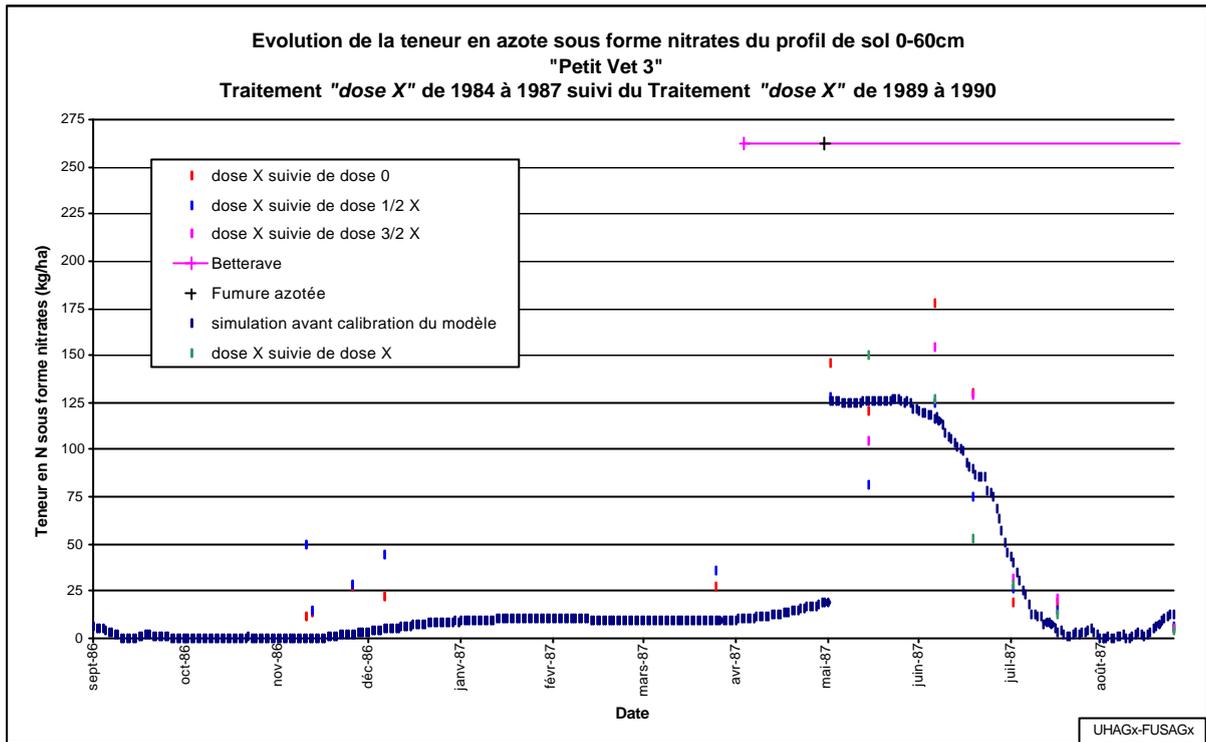
4. Simulations EPICmod

4.1. Cas de la fixation de l'azote par les légumineuses

Lors des essais réalisés, une interculture était systématiquement implantée après récolte de l'escourgeon. Une vesce occupe alors le sol jusque décembre, période à laquelle celle-ci est enfouie dans le sol par un labour. Cette interculture a pour rôle de fixer une partie de l'azote et éviter ainsi une percolation trop rapide après récolte des reliquats. Cette vesce joue aussi un rôle d'engrais par apport de matière organique et libération de l'azote fixé.

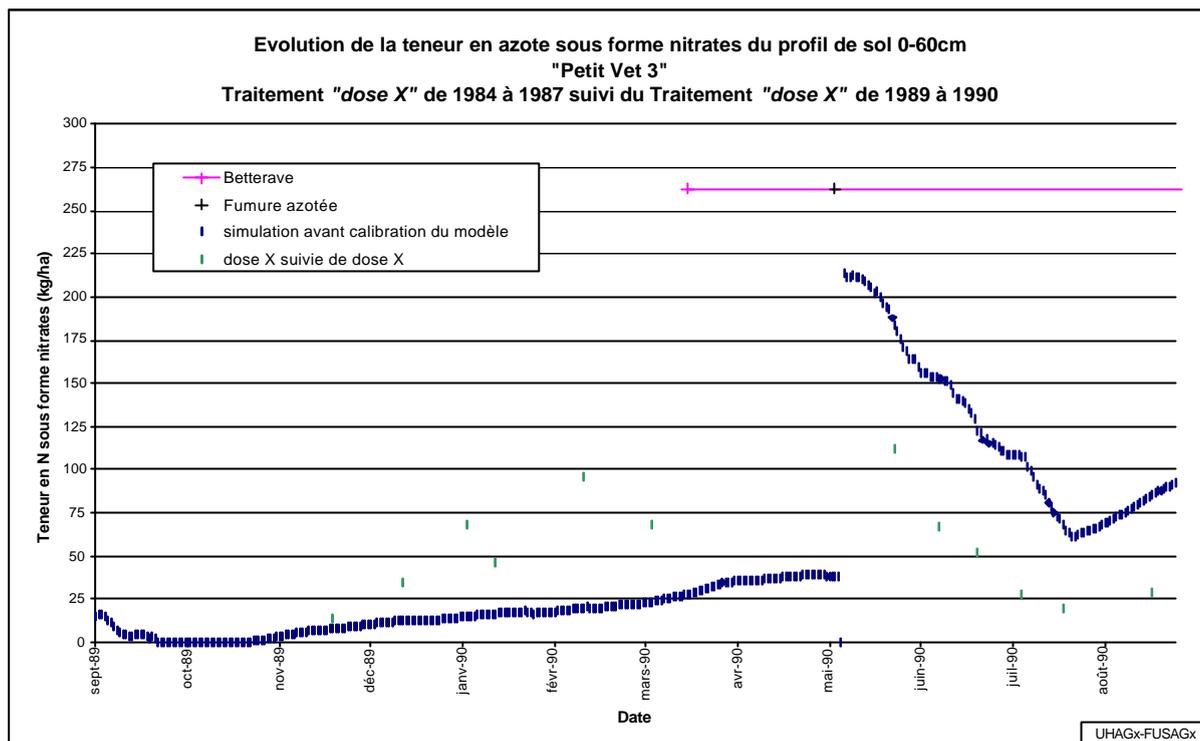
On constate en Figure 7 et 8 que la teneur simulée en azote du profil est plus faible que les valeurs observées, bien que l'allure générale soit relativement bien représentée, l'écart pouvant être dû notamment à une simulation peu satisfaisante de la fixation d'azote par la légumineuse.

La fixation de l'azote atmosphérique par les légumineuses est décrite dans le modèle (sous-routine NFIX ; § 2.2.5, p 8 & Annexe 2). Un paramètre du modèle permet la prise en compte des stress dus notamment au manque d'eau, à la température du sol.



EMBED

SEQARABIC Figure 7 : Exemple de fonctionnement du modèle EPICmod (sans calibration) durant l'interculture de Vesce avant betterave (Données de mesures : CRAGx; simulation EPICmod : UHAGx)



EMBED

SEARABIC Figure 8 : Exemple de fonctionnement du modèle (sans calibration) durant l'interculture de Vesce avant betterave (Données de mesures : CRAGx; simulation EPICmod UHAGx)

En raison de ces résultats, nous avons décidé de modifier ce paramètre de stress pour la fixation d'azote. Suite à quelques essais, il apparaît que sa suppression donne les meilleurs résultats; ceux-ci, conjugués à une réflexion sur les températures de minéralisation, sont reportés ultérieurement.

4.2. Minéralisation de l'azote

La minéralisation de la matière organique est calculée dans le modèle par la sous-routine NMNIM. L'intensité de la minéralisation est une fonction de la température et de la teneur en eau de la couche de sol. L'évolution de la teneur en eau du profil a été étudiée pour des conditions de travail similaires et est largement validée (Masereel *et al.*, 1995). Le taux de minéralisation (kg/ha/jour) est fonction, entre autres, d'un facteur de température de la couche sous la forme :

$$FT = \sqrt{\frac{T}{T + \exp(9.93 - 0.312 \cdot T)}}$$

avec :

- FT = facteur de température

- T = température de la couche de sol

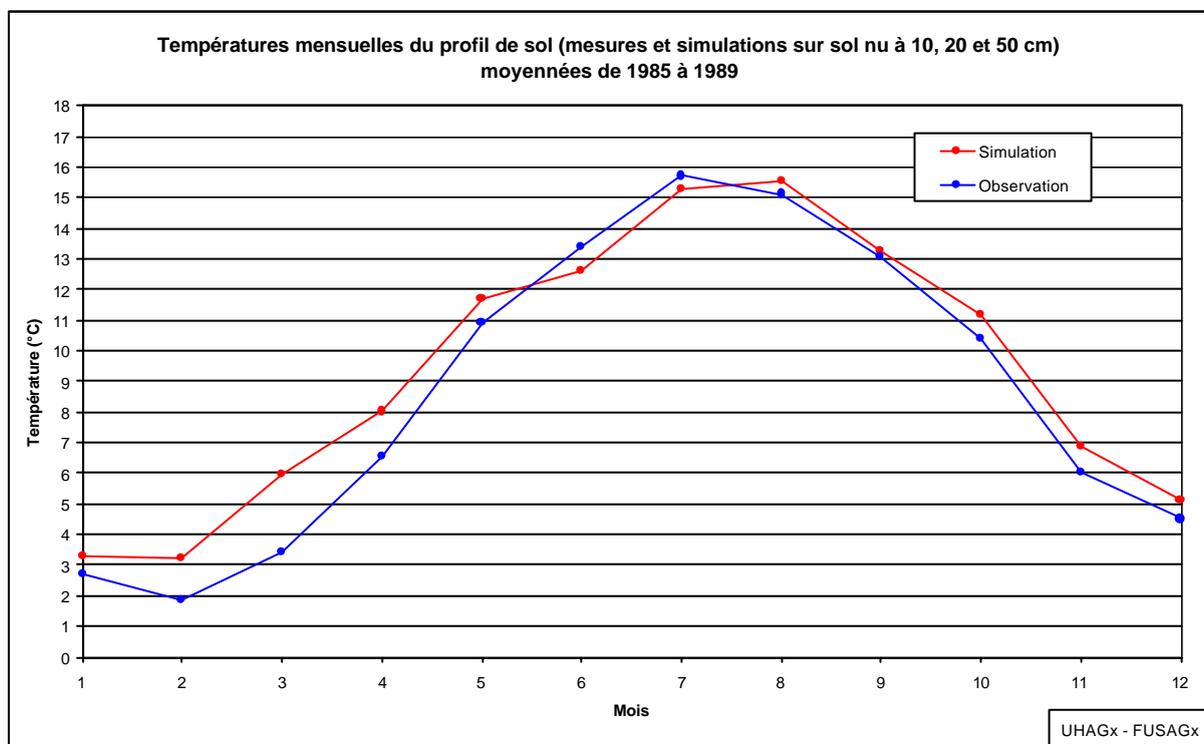
La minéralisation est simulée dès que la température de la couche de sol concernée est supérieure à 0°C. Ce seuil de température est trop faible; dans les conditions belges, on observe généralement une minéralisation débutant vers 4-5°C. Il reste en outre à vérifier la simulation des températures de sol, car même si la minéralisation est faible pour de faibles températures, une minéralisation continue en hiver soustraira du profil une partie de l'azote qui aurait du rester jointe à la matière organique.

4.2.1. Vérification des températures simulées

Des données de températures collectées sur sol nu par le CRAGx sur la même période de simulation que les essais ont été analysées. Trois profondeurs sont disponibles : 10 cm, 20 cm et 50 cm. Des simulations ont été réalisées pour vérifier les températures de sol calculées par EPICmod dans les mêmes conditions. Un scénario "sol nu" a ainsi été mis sur pied.

Cependant, il est à remarquer que les conditions de mesures de température en sol nu utilisées pour la comparaison mesures/simulations ne sont pas celles du site d'expérimentation; en effet les données proviennent de la station météorologique d'Ernage, sise à une dizaine de km de l'expérimentation, dont les caractéristiques physiques du sol ne sont pas connues (bien que probablement assez proches de celles des sols sous expérimentation).

La comparaison des observations et simulations est effectuée aux Figures 9 à 16. En général pour le profil de sol (mesures à 10, 20 et 50 cm de profondeur), les températures mensuelles observées et simulées, moyennées de 1985 à 1989, sont équivalentes (Figure 9) si ce n'est lors des mois de février à avril où l'écart de température entre valeur observée et simulée est de l'ordre de 1,5 à 2,5°C.



EMBED

SEQARABIC Figure 9 : Évolution des températures moyennes mensuelles du profil de sol, observées à la station IRM d'Ernage et simulées sur sol nu par Epicmod, profondeur de sol de 10 à 50 cm. (mesures : Station météorologique d'Ernage (IRM) ; simulation EPICmod : UHAGx-FUSAG)

Les figures 10 à 15 ci-dessous reprennent en détail la présentation des résultats de simulation, en comparaison avec les températures observées en station (IRM-Ernage), pour chaque profondeur étudiée (10, 20 et 50 cm).

A la profondeur de 0,1 mètre, les valeurs obtenues par simulation sont systématiquement supérieures aux valeurs observées (de 0,5 à près de 3°C ; Figure 10). La Figure 11 montre que l'écart entre les valeurs simulées et observées augmente avec la température (pente de 1,08 pour la droite de régression des valeurs observées et simulées).

Les résultats de la simulation à 0,2 mètre de profondeur sont proches des valeurs mesurées en la station météorologique. Cependant, dans ce cas également, lors des premiers mois (février – mars), les résultats des simulations sont relativement distincts des mesures effectuées en station avec des différences de températures atteignant 2,5°C (Figure 12). La Figure 13 permet de constater que la concordance entre simulations et mesures augmente avec la température, en tous cas dans la gamme de températures caractéristiques du climat de la région.

A 0,5 mètre de profondeur, les valeurs obtenues par simulation s'écartent assez fortement des valeurs observées (Figure 14). La faible valeur de la pente de la droite de régression des valeurs observées et simulées (0,7 ; Figure 15) indique également une divergence nette entre celles-ci. Une distinction doit cependant être faite entre les « faibles » températures (inférieures à 8 – 11°C), pour lesquelles les valeurs EPICmod sont plus élevées que celles mesurées, et les températures « élevées » (supérieures à 8 – 11°C), pour lesquelles l'effet inverse est obtenu. Entre ces deux gammes, c'est-à-dire pour des températures de l'ordre de 8 à 11°C, les valeurs observées et simulées sont similaires.

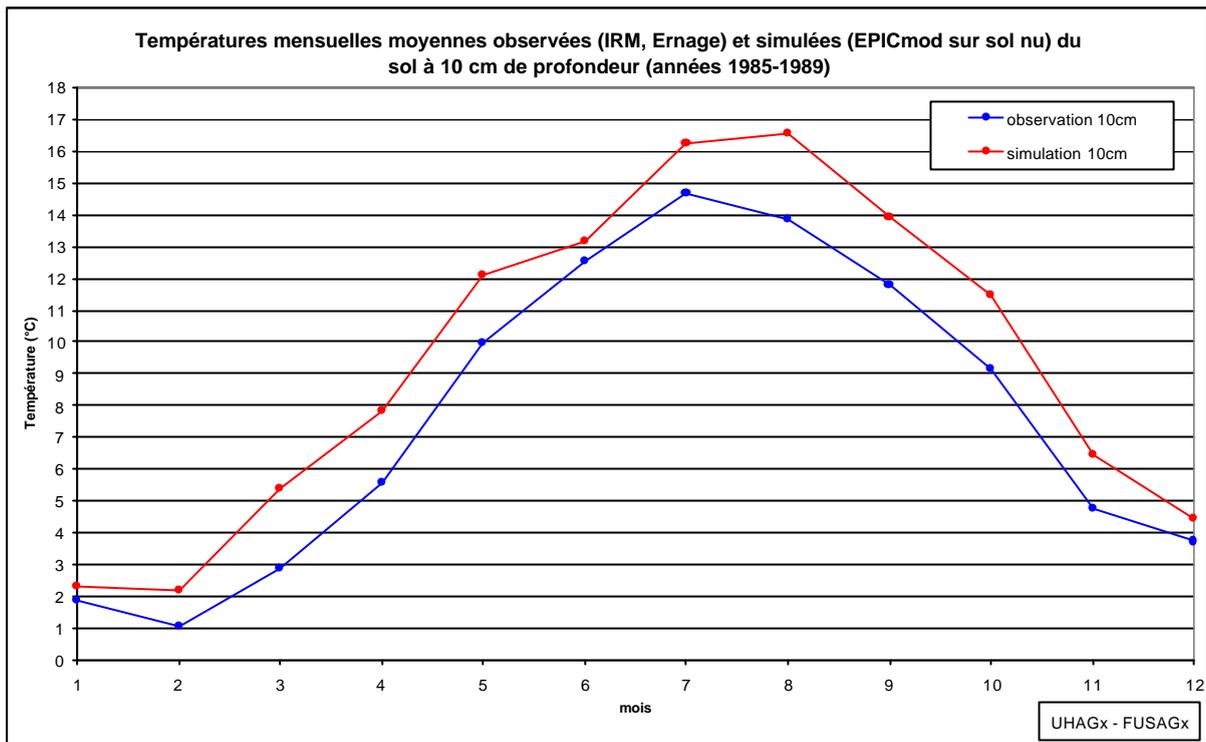


Figure 10 : Évolution des températures moyennes mensuelles du sol à 10 cm de profondeur, (mesures : Station météorologique d'Ernage (IRM) ; simulation EPICmod : UHAGx-FUSAG)

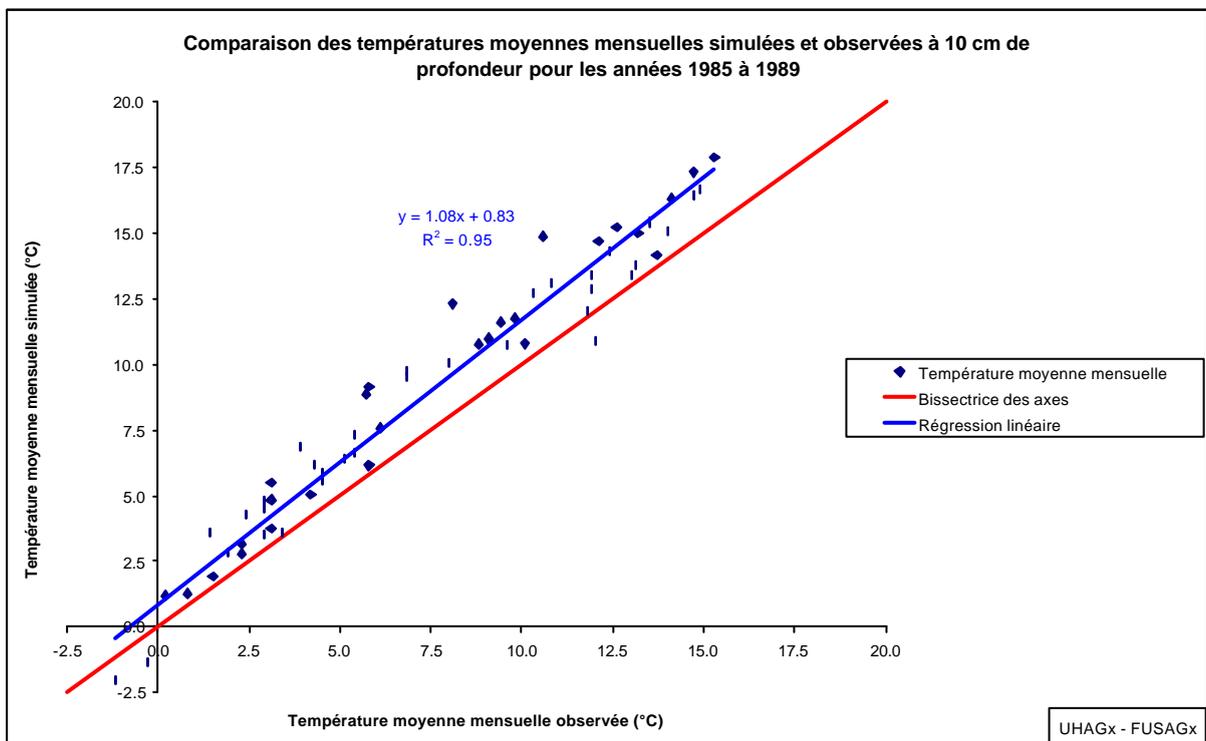


Figure 11 : Comparaison, par régression statistique, des températures moyennes mensuelles du sol de 1985 à 1989 à la profondeur de 10 cm (mesures : Station météorologique d'Ernage (IRM) ; simulation EPICmod : UHAGx-FUSAG).

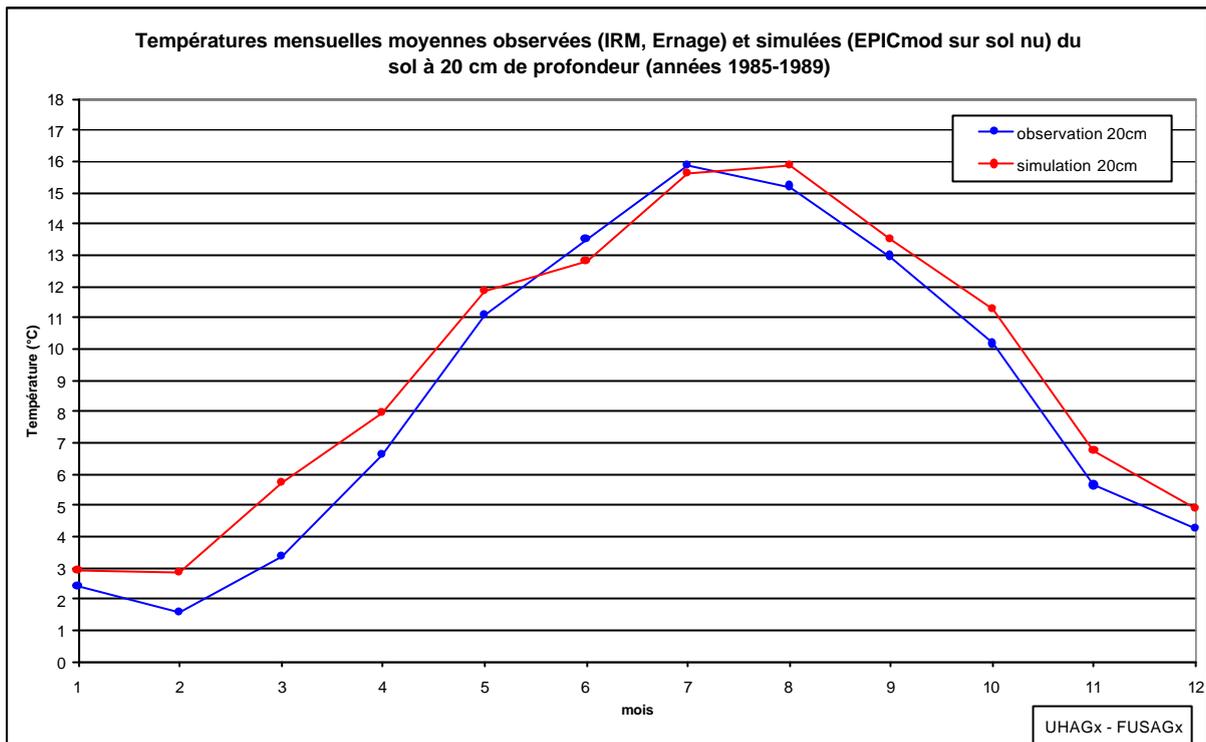


Figure 12 : Évolution des températures moyennes mensuelles du sol nu à 20 cm de profondeur (mesures : Station météorologique d'Ernage (IRM) ; simulation EPICmod : UHAGx-FUSAG)

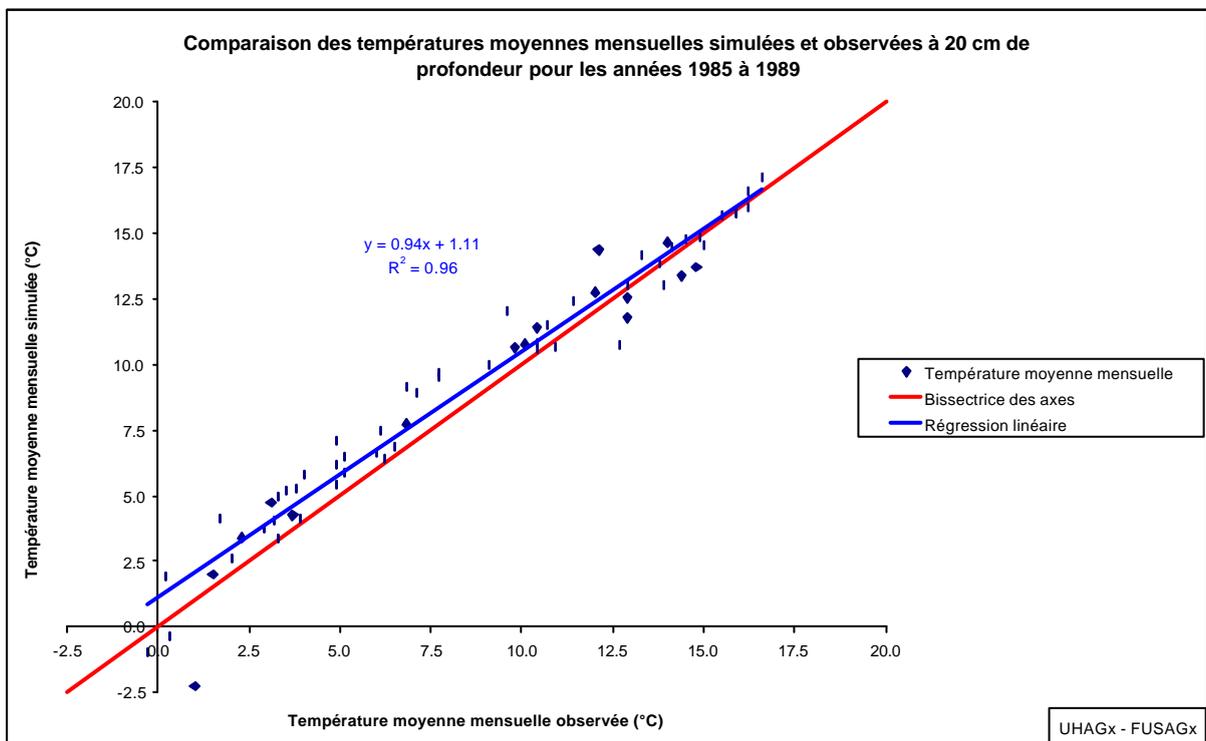


Figure 13 SEQARABIC: Comparaison, par régression statistique, des températures moyennes mensuelles du sol nu de 1985 à 1989 à la profondeur de 20 cm (mesures : Station météorologique d'Ernage (IRM) ; simulation EPICmod : UHAGx-FUSAG)

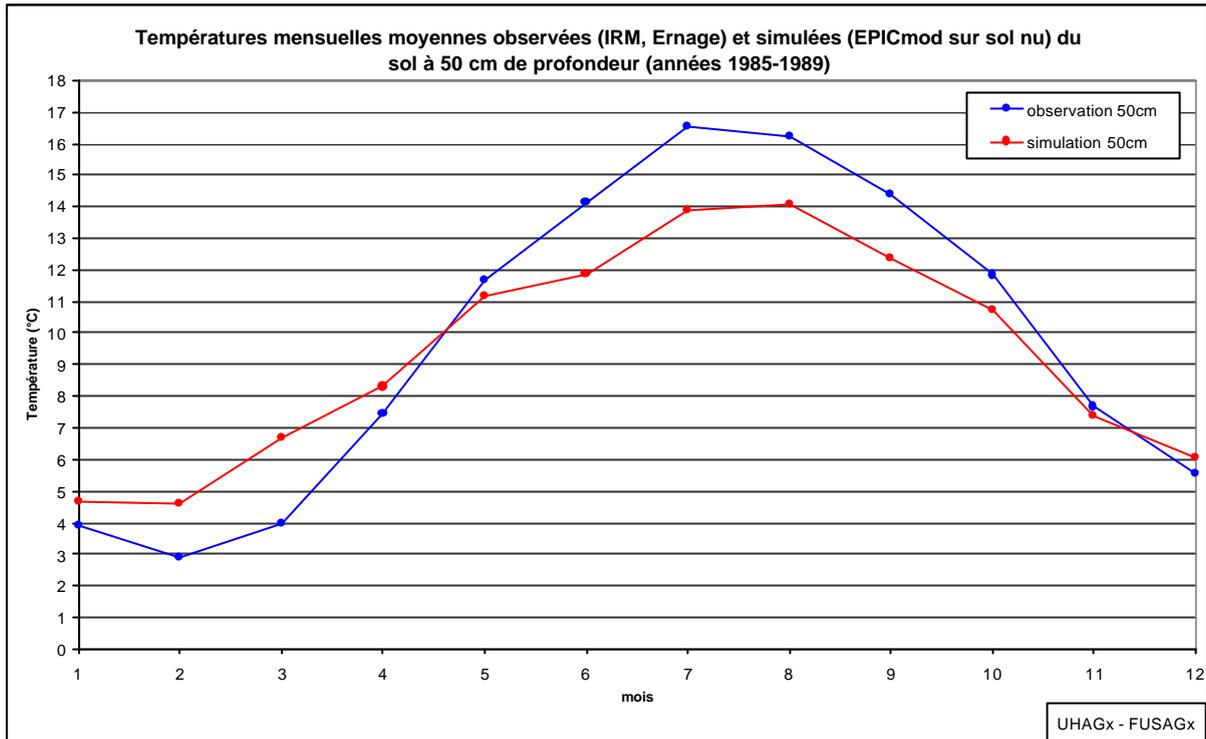
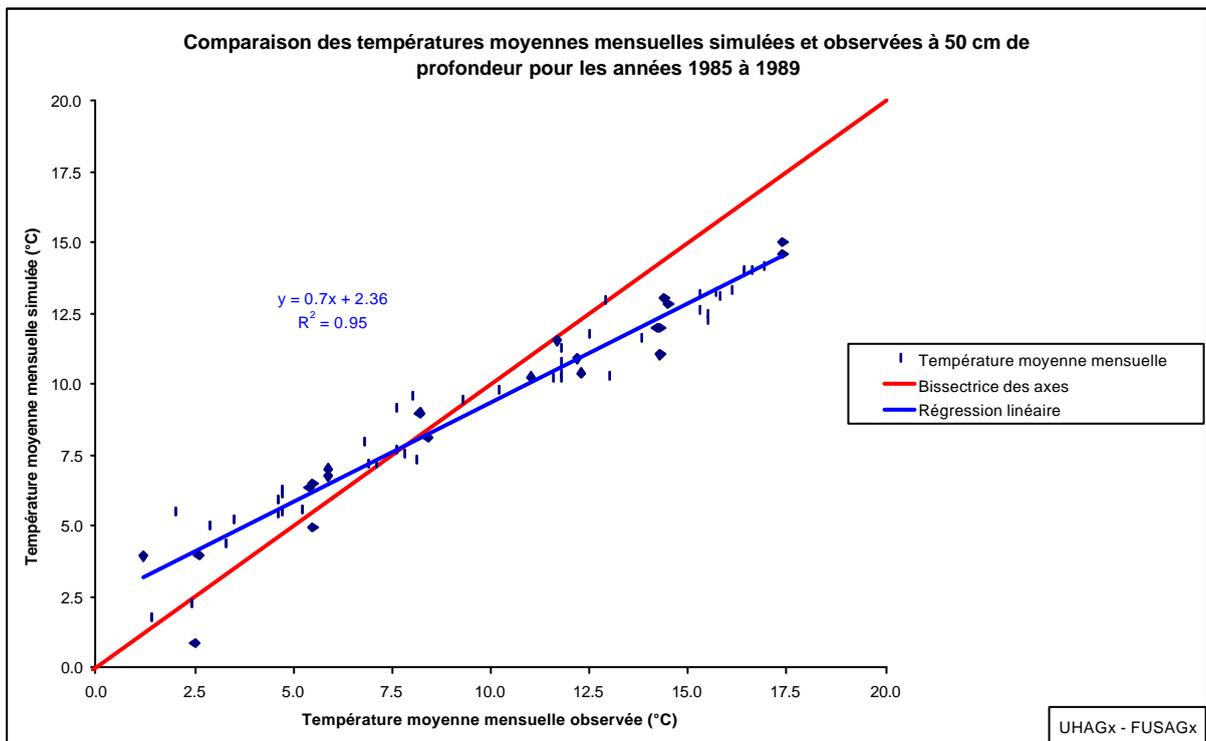


Figure 14 : Évolution des températures moyennes mensuelles du sol nu à 50 cm de profondeur, (mesures : Station météorologique d'Ernage (IRM) ; simulation EPICmod : UHAGx-FUSAG)



SEQARABIC Figure 15 : Comparaison, par régression statistique, des températures moyennes mensuelles du sol nu de 1985 à 1989 à la profondeur de 50 cm (mesures : Station météorologique d'Ernage (IRM), simulations sol nu Epicmod. (UHAGx-FUSAG))

En règle générale, les différences obtenues entre températures observées et simulées (ici en sol nu) ne dépassent pas 3°C, la meilleure correspondance étant pour la profondeur de 0,2 mètre. Cependant, les différences constatées mériteraient ultérieurement une étude approfondie accompagnée éventuellement de campagnes de mesures appropriées (pour rappel, les conditions de sol nu mesuré ne sont pas déterminées); en effet, les processus de transformation de l'azote et en particulier la minéralisation peuvent être sensibles à des différences de températures de l'ordre du degré centigrade dans certaines conditions et gammes de valeurs (Cfr. § 4.2.2 ci-dessous).

En résumé, et ne prenant en compte que les profils des températures mensuelles de 1985 à 1989, pour le sol nu à la Station d'Ernage (Station IRM) et simulé sur parcelle par EPICmod pour chaque mois de l'année (Figure 16), deux cas peuvent être distingués selon que les profils de température concordent (parallélisme des courbes de température, cas des « faibles » températures) ou non (non parallélisme des courbes de températures, cas des températures « élevées »). De plus, il est à remarquer que les profils de températures issus de simulations (traits continus) ont tendance à converger en profondeur alors que les profils de températures provenant de l'observation en station (traits discontinus) semblent parallèles ou tout au plus ne converger que vers des hautes températures.

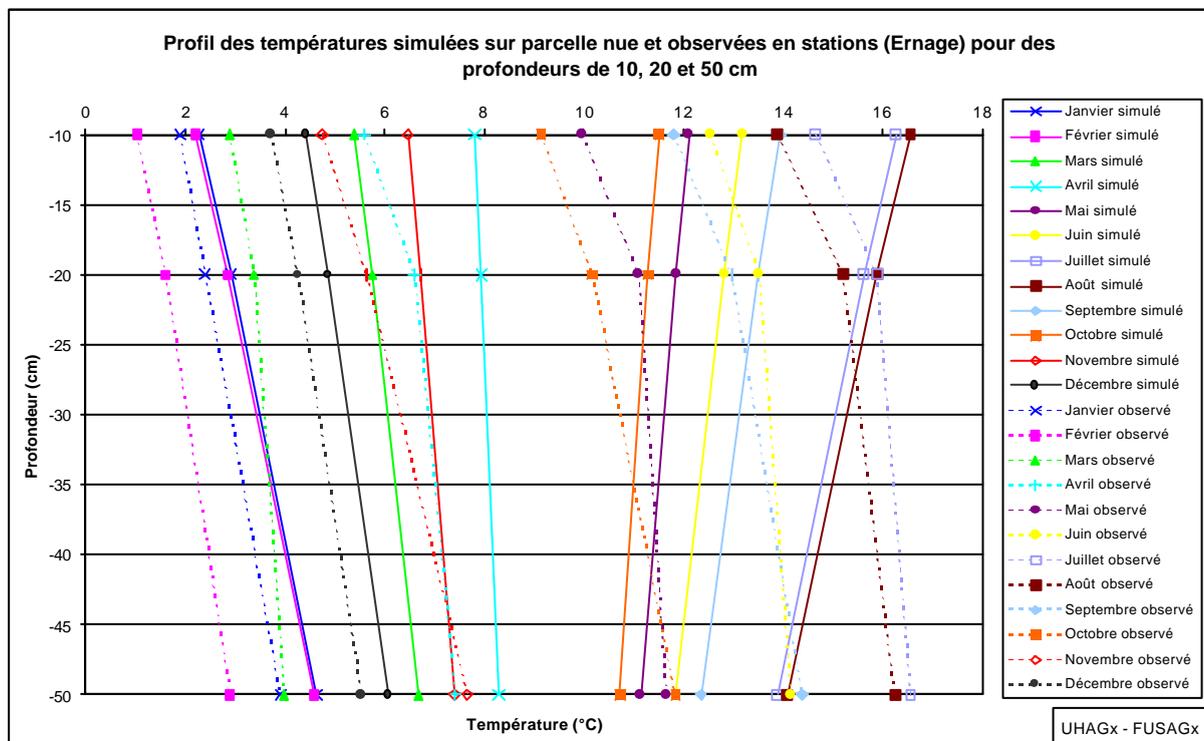
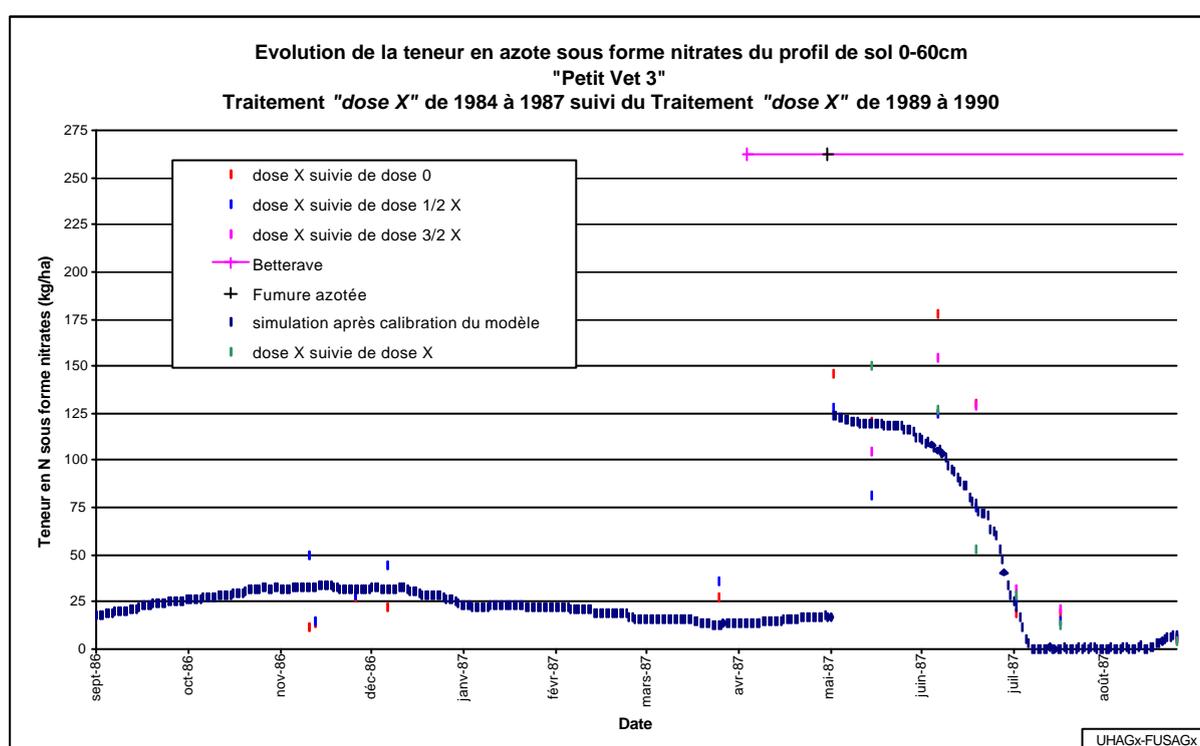


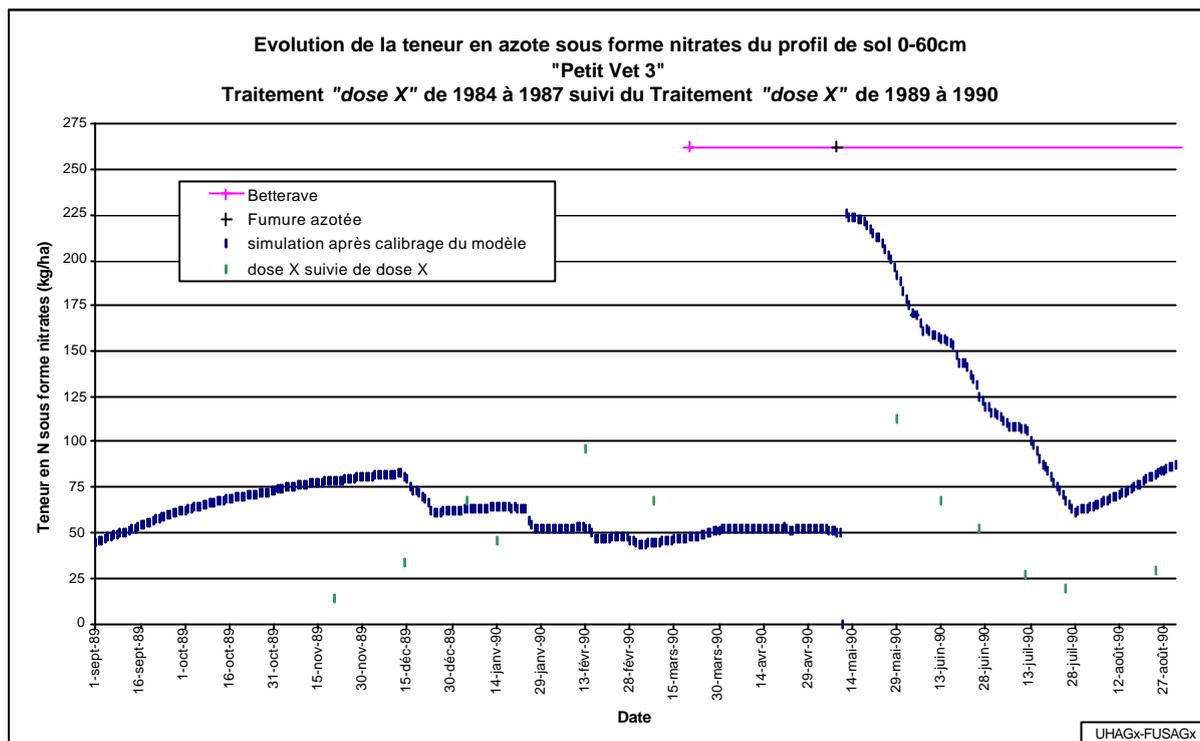
Figure 16 : Représentation des profils de températures mensuelles de 1985 à 1989, mesurées en la station météorologique d'Ernage (IRM) et simulées (FUSAGx, EPICmod), sur sol nu, pour des profondeurs de 10, 20 et 50 cm.

4.2.2. Modification du programme

Compte tenu de la remarque émise en 4.2, le code du programme a été modifié afin de simuler une minéralisation nulle en deçà de 5°C (et non plus en deçà de 0°C). Les résultats, significativement améliorés par rapport aux Figures 7 et 8, sont présentés aux Figures 17 et 18 ; ces graphiques prennent aussi en compte la modification relative aux légumineuses. La simulation reportée en Figure 18 peut paraître moins précise que celle de la Figure 17, cependant cette impression est due notamment à l'absence de répétition des mesures qui sont, comme on en déjà effectué le constat, relativement variables sur une même parcelle.



SEARABIC Figure 17 : Simulations EPICmod (UHAGx) avec modifications des codes du programme (confer texte, point 4.2.2.) ; à comparer avec la Figure 7, simulations sans modification de codes du programme)



SEQARABIC Figure 18 : Simulations EPICmod (UHAGx) avec modifications de codes du programme (Confer texte, point 4.2.2); à comparer avec la Figure 8, sans modification de codes (remarque : dans ce cas, l'absence de répétitions de mesures invalide quelque peu la comparaison, confer texte).

5. Simulations de la rotation Betterave-Froment-Escourgeon

5.1. Simulations réalisées

Nous avons considéré les essais "PV2" et "PV3" décrits précédemment. Les expérimentations débutent en 1984 par un froment pour la sole 3 et par un escourgeon pour la sole 2. Pour des raisons techniques, nous prenons en compte les cultures réalisées avant le démarrage de l'essai, afin de représenter au mieux les conditions initiales. Nous commençons donc les simulations :

- en 1982 pour la sole 3 (semis d'escourgeon en 1982 et récolte en 1983 suivi de semis et récolte de la betterave en 1983)
- en 1983 pour la sole 2 (semis du froment en 1983 et récolte en 1984)

Les données reprises pour ces années d'initialisation sont reprises, extrapolées, des conditions de l'essai pour les mêmes cultures au cours de la première phase (avant 1988).

Le découpage du profil de sol modélisé est repris au Tableau 4.

Tableau 4 : Découpage du sol en sept couches

Numéro	Profondeur de la couche	Remarque
1	De 0 à 1 cm	Couche de calcul
2	De 1 à 30 cm	Regroupe les horizons A et B des essais
3	De 30 à 60 cm	Regroupe les horizons C et D des essais
4	De 60 à 90 cm	Regroupe les horizons E et F des essais
5	De 90 à 120 cm	Regroupe les horizons G et H des essais
6	De 120 à 150 cm	Regroupe les horizons I et J des essais
7	De 150 à 250 cm	Couche finale

Caractéristiques physiques moyennes retenues pour le sol, en première approche :

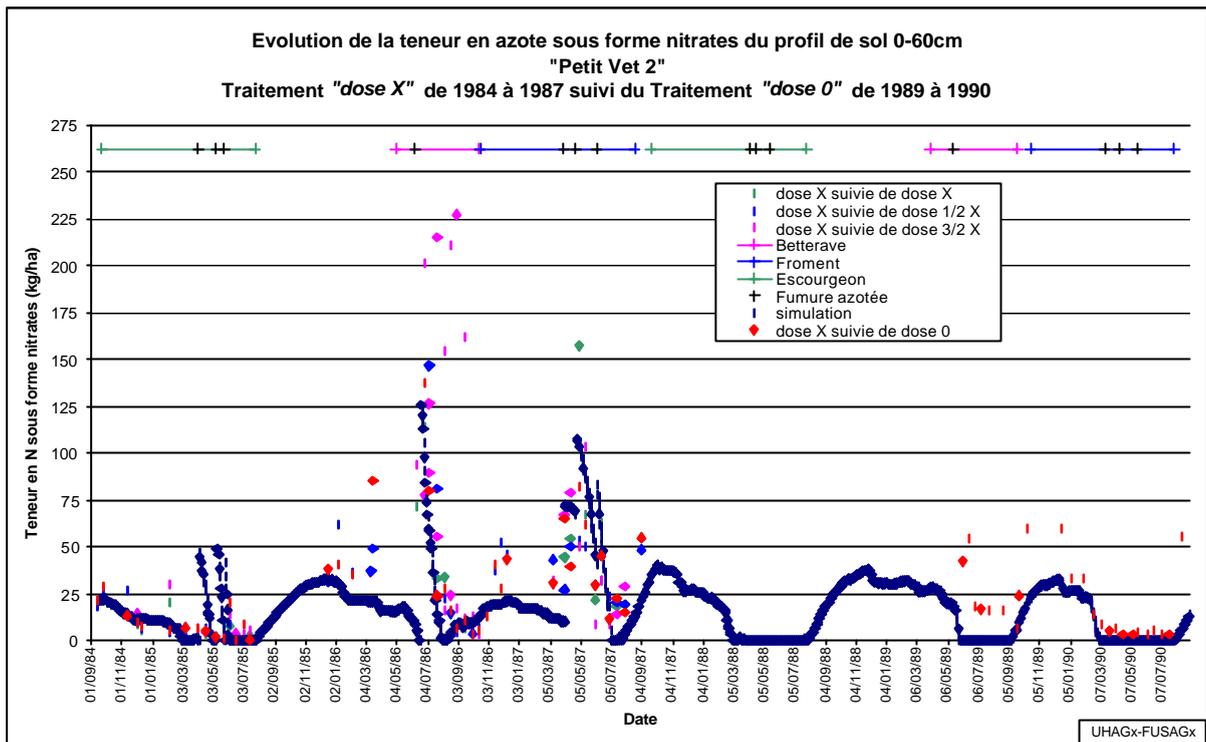
- Densité apparente sèche: 1,39 gr /cm³
- Point de flétrissement : 0,125 m/m
- Capacité au champ : 0,280 m/m
- Conductivité hydraulique: 5,5 mm /h

5.2. Résultats des simulations EPICmod – Validations

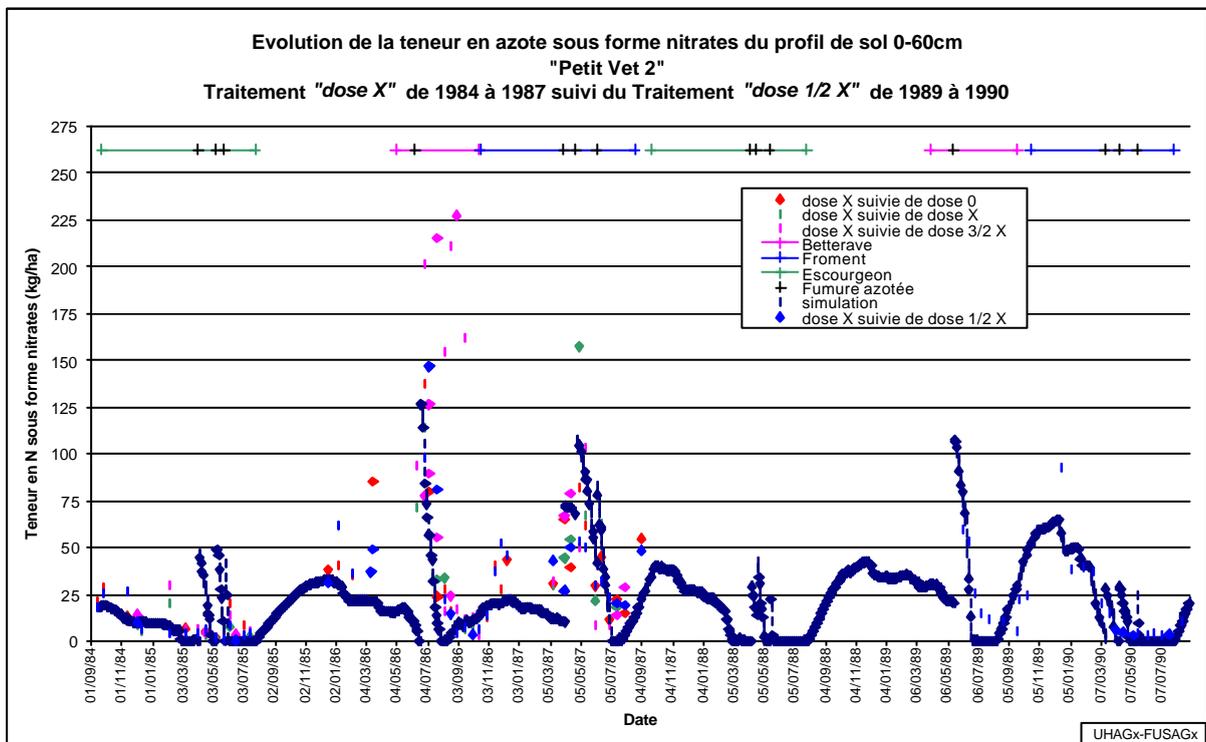
5.2.1. Les teneurs en nitrates du profil

Les résultats des diverses simulations réalisées sont présentés en termes de teneurs en nitrates du profil de sol (0-60 cm) dans les Figures 19SEQARABIC à 26 ; les valeurs de simulation ainsi que les valeurs observées pour différentes cultures sur les parcelles d'essais du CRAGx sont indiquées en fonction du temps, ainsi que les dates de fumures azotées. Ces apports de fumures sont bien visibles également sur les simulations, par l'augmentation soudaine de la teneur en nitrates du profil.

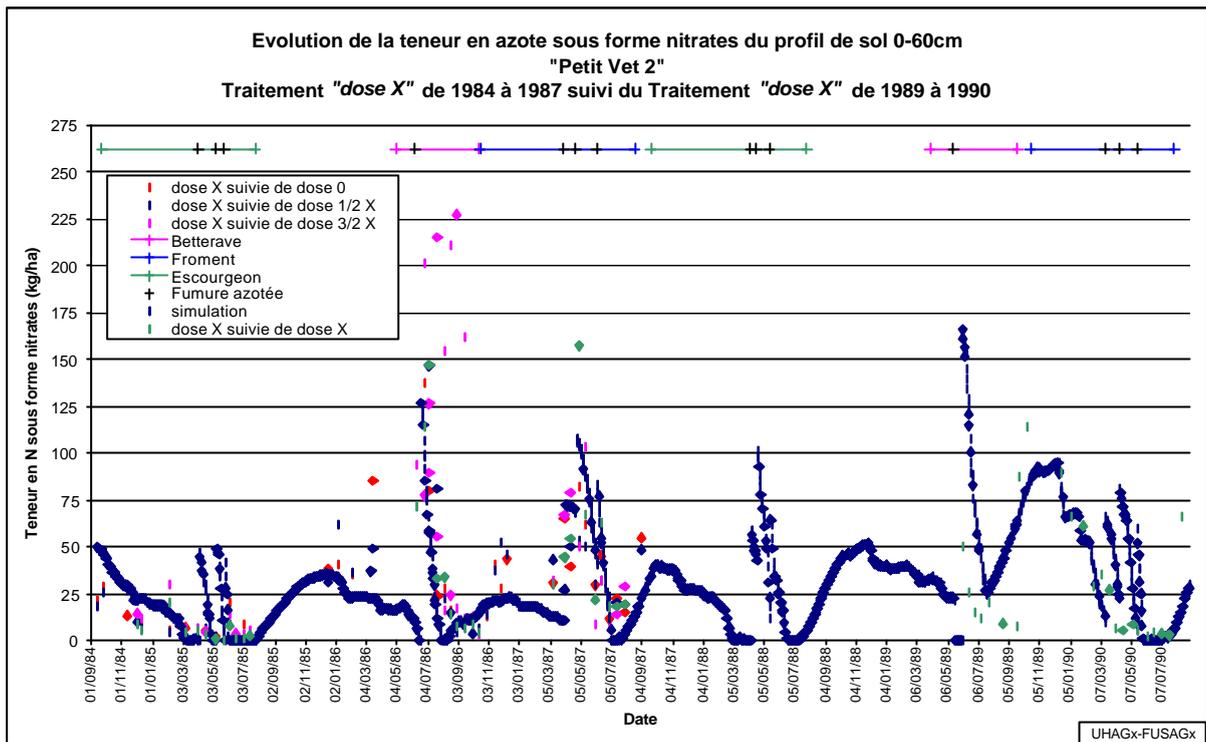
D'une manière générale, on observe que les simulations des teneurs en nitrates du profil sont en adéquation avec les observations. La dispersion des mesures dans la première phase met une fois de plus en évidence la variabilité des profils de nitrates au sein d'une même expérimentation. Ce constat est important car après une interruption dans l'acquisition de profils durant une année (1988), l'essai a repris avec seulement un seul profil mesuré par essai - dose azotée. L'absence de répétitions de mesures pour la deuxième phase de l'expérimentation ne permet donc pas de donner une idée de la variabilité des profils et de déterminer l'écart moyen représentatif entre observations et simulations; néanmoins, on constate que les simulations restent relativement pertinentes.



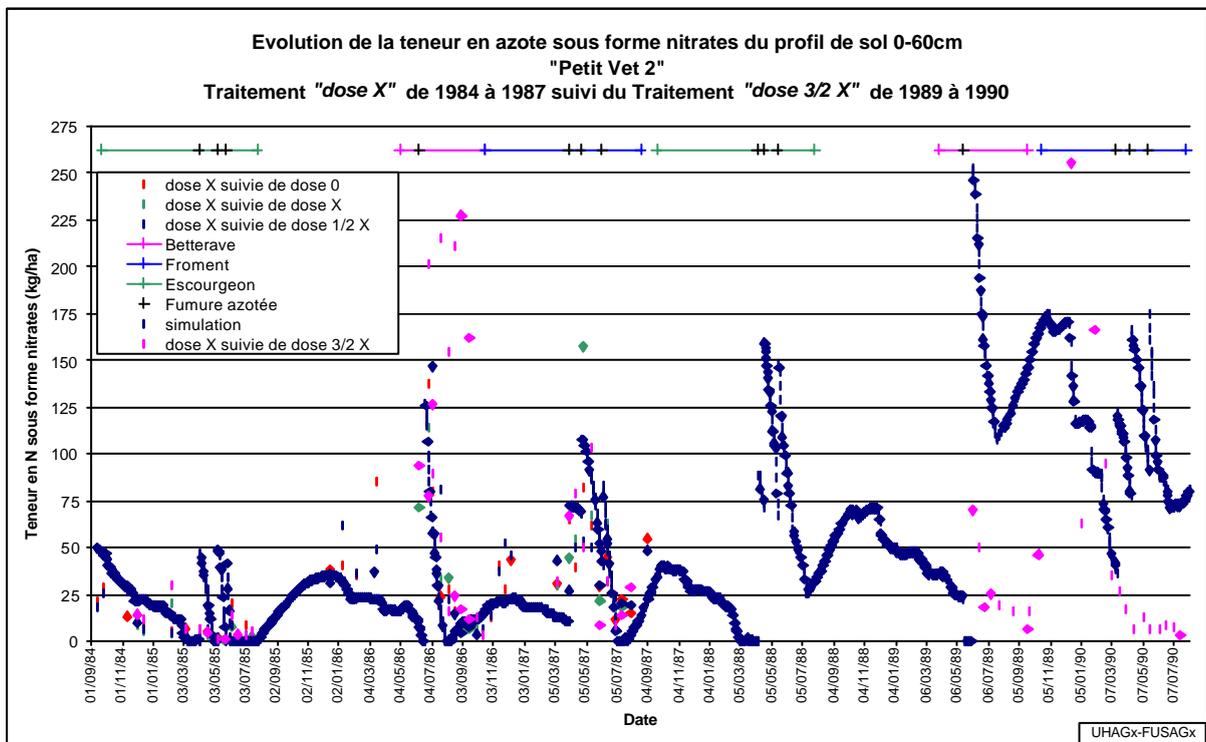
SEQARABIC Figure 19 : Évolution des teneurs en nitrates simulées et observées sur les 60 premiers cm de sol lors de l'essai « Petit Vet 2 ». Traitement « dose X » (1984-1987) suivi du traitement « dose 0 » (1989-1990) (mesures : CRAGx, simulations EPICmod sans calibration : UHAGx-FUSAG)



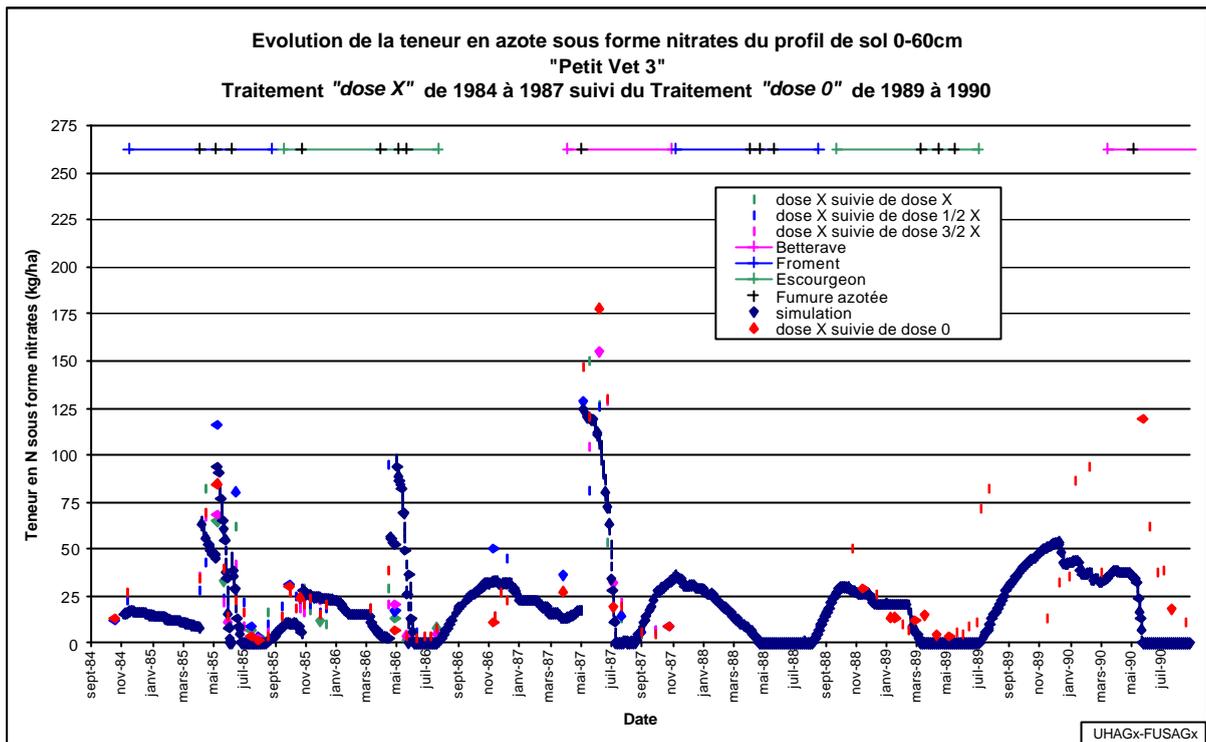
SEQARABIC Figure 20 : Évolution des teneurs en nitrates simulées et observées sur les 60 premiers cm de sol lors de l'essai « Petit Vet 2 ». Traitement « dose X » (1984-1987) suivi du traitement « dose 1/2 X » (1989-1990) (mesures : CRAGx, simulations EPICmod sans calibration : UHAGx-FUSAG)



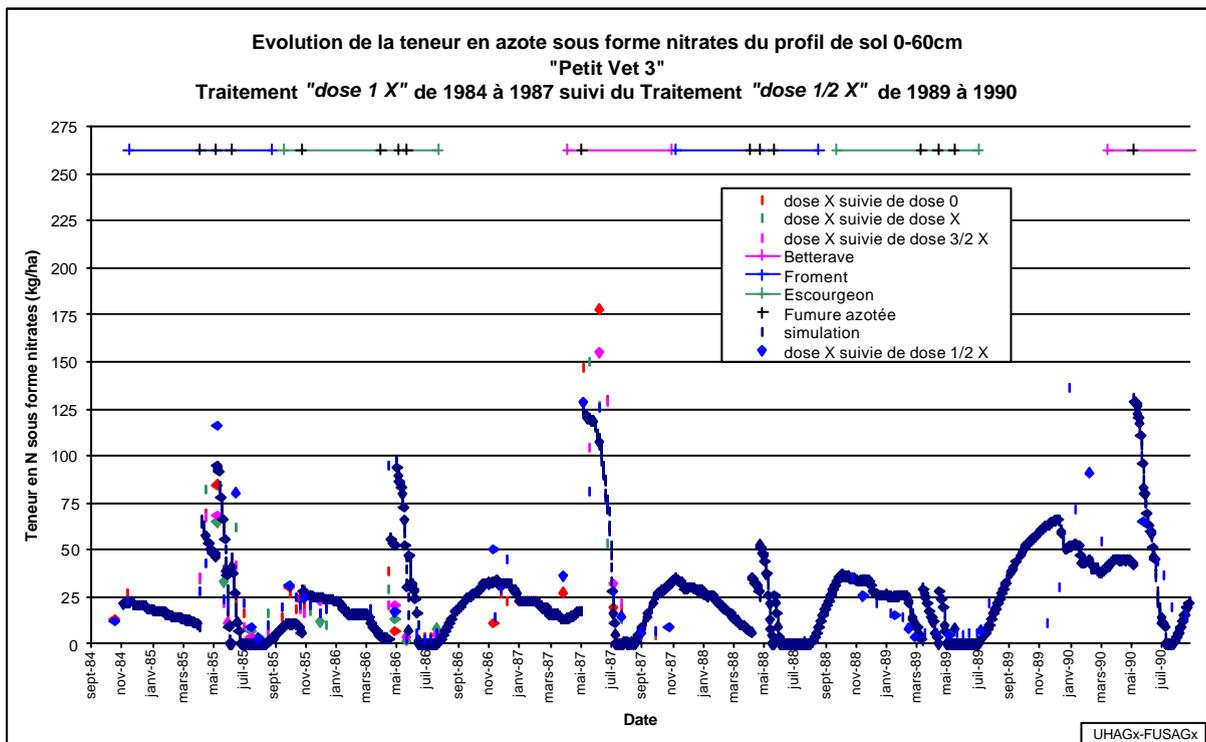
SEQARABIC Figure 21 : Évolution des teneurs en nitrates simulées et observées sur les 60 premiers cm de sol lors de l'essai « Petit Vet 2 ». Traitement « dose X » (1984-1990). (mesures : CRAGx, simulations EPICmod sans calibration : UHAGx-FUSAG)



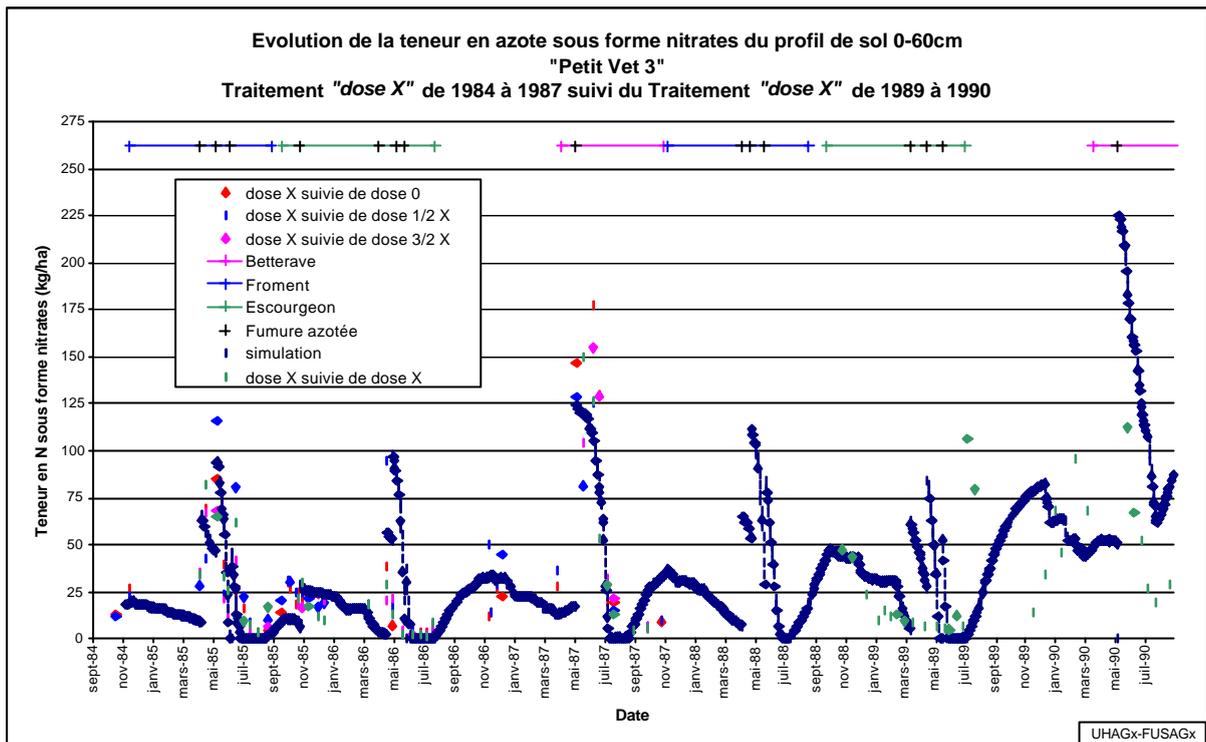
SEQARABIC Figure 22 : Évolution des teneurs en nitrates simulées et observées sur les 60 premiers cm de sol lors de l'essai « Petit Vet 2 ». Traitement « dose X » (1984-1987) suivi du traitement « dose 3/2 X » (1989-1990) (mesures : CRAGx, simulations EPICmod sans calibration: UHAGx-FUSAG)



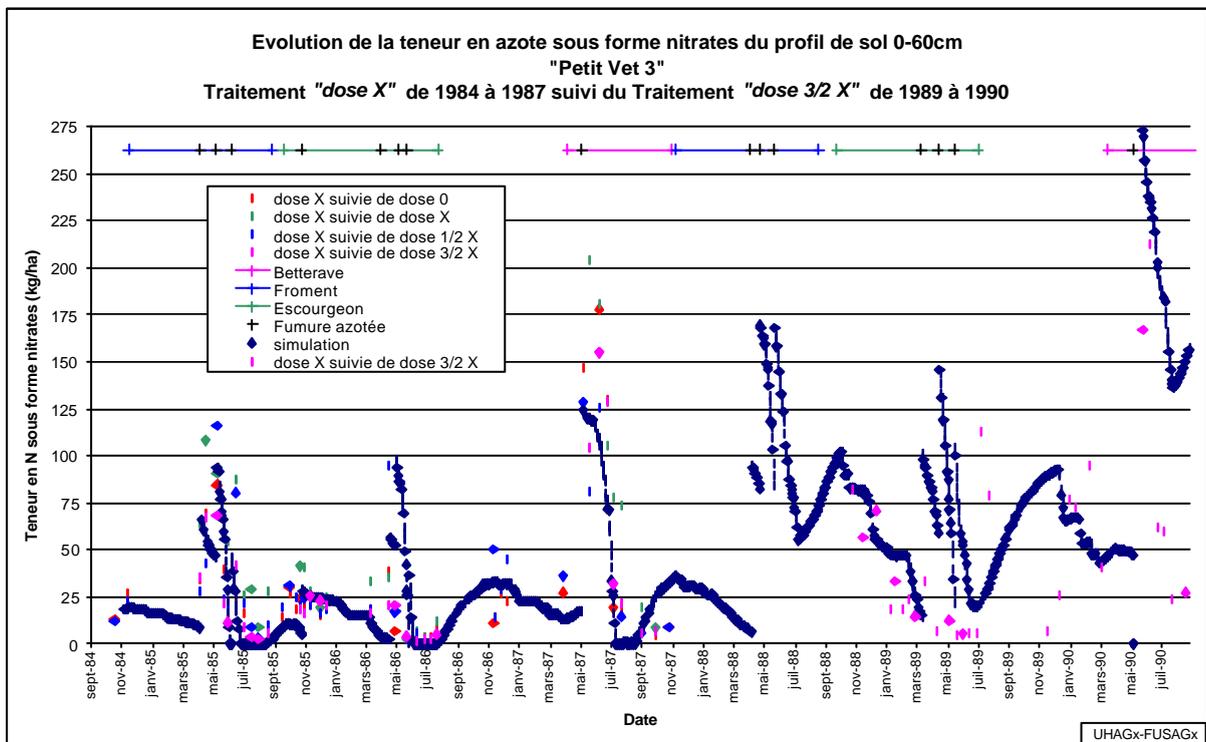
SEQARABIC Figure 23 : Évolution des teneurs en nitrates simulées et observées sur les 60 premiers cm de sol lors de l'essai « Petit Vet 3 ». Traitement « dose X » (1984-1987) suivi du traitement « dose 0 » (1989-1990) (mesures : CRAGx, simulations EPICmod sans calibration: UHAGx-FUSAG)



SEQARABIC Figure 24 : Évolution des teneurs en nitrates simulées et observées sur les 60 premiers cm de sol lors de l'essai « Petit Vet 3 ». Traitement « dose X » (1984-1987) suivi du traitement « dose 1/2 X » (1989-1990) (mesures : CRAGx, simulations EPICmod sans calibration: UHAGx-FUSAG)



SEQARABIC Figure 25 : Évolution des teneurs en nitrates simulées et observées sur les 60 premiers cm de sol lors de l'essai « Petit Vet 3 ». Traitement « dose X » (1984-1990). (mesures : CRAGx, simulations EPICmod sans calibration : UHAGx-FUSAG)



SEQARABIC Figure 26 : Évolution des teneurs en nitrates simulées et observées sur les 60 premiers cm de sol lors de l'essai « Petit Vet 3 ». Traitement « dose X » (1984-1987) suivi du traitement « dose 3/2 X » (1989-1990) (mesures : CRAGx, simulations EPICmod sans calibration: UHAGx-FUSAG)

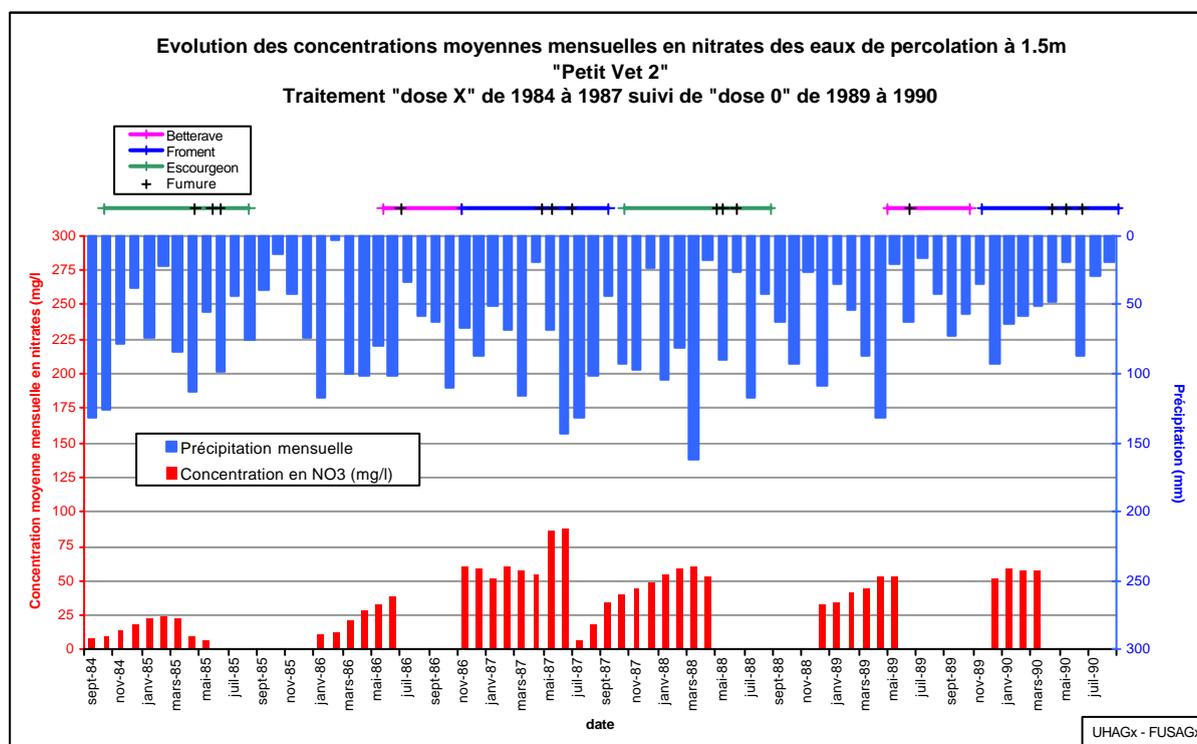
5.2.2. La concentration en nitrates des eaux de lessivage

Le modèle EPICmod fournit la perte en azote (kg/ha) notamment à la base du profil racinaire (150cm) ainsi que la hauteur d'eau percolée (mm) journalière. La concentration en nitrates des eaux de percolation (mg/l) peut dès lors être calculée. Rappelons que la concentration de la solution du sol et celle de l'eau de percolation (non mesurable directement) sont en général différentes (effet d'eau mobile - immobile, efficacité du mélange des eaux d'apport avec la solution du sol en place).

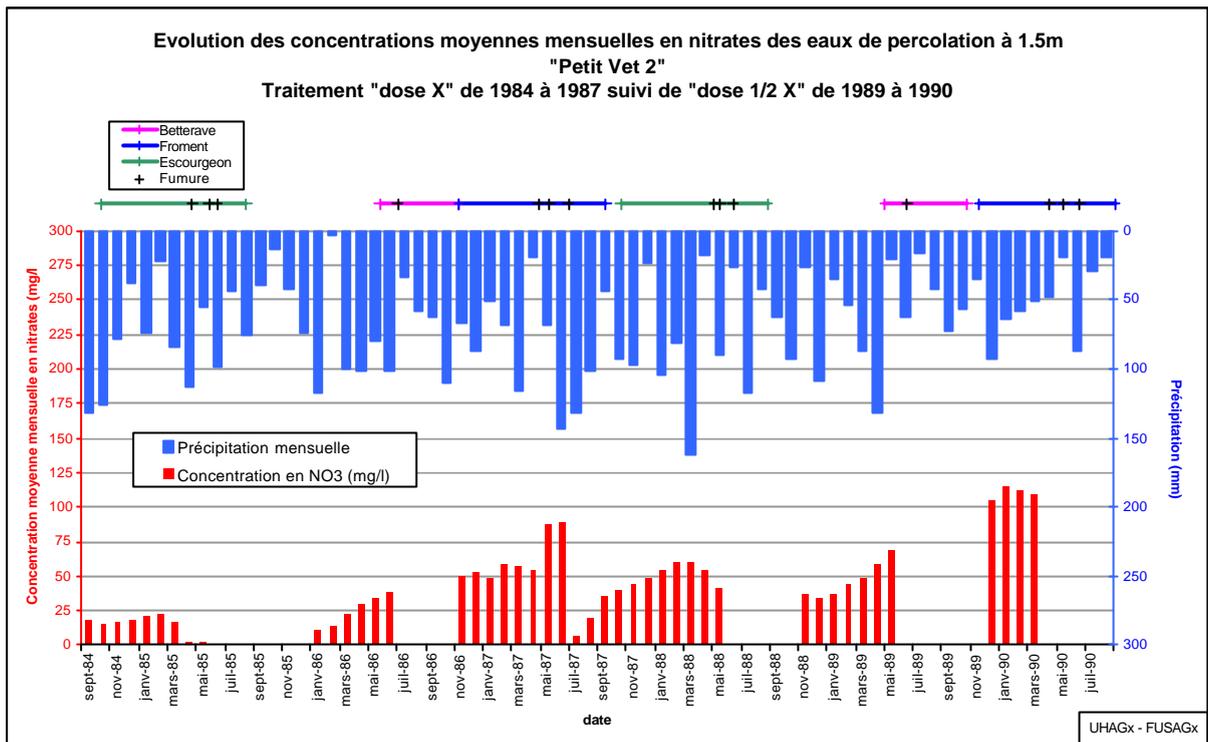
L'évolution des concentrations en nitrates des eaux de percolation sont reportées sur les Figures 27 à 34, pour les deux essais réalisés (PV2 et PV3); les valeurs sont les concentrations moyennes mensuelles en nitrates à 1.5m calculées ici de la manière suivante :

$$Conc. \text{ moy. mens.} = \sum_{\text{mois}} \text{pertes azote} / \sum_{\text{mois}} \text{percolation eau 1.5m}$$

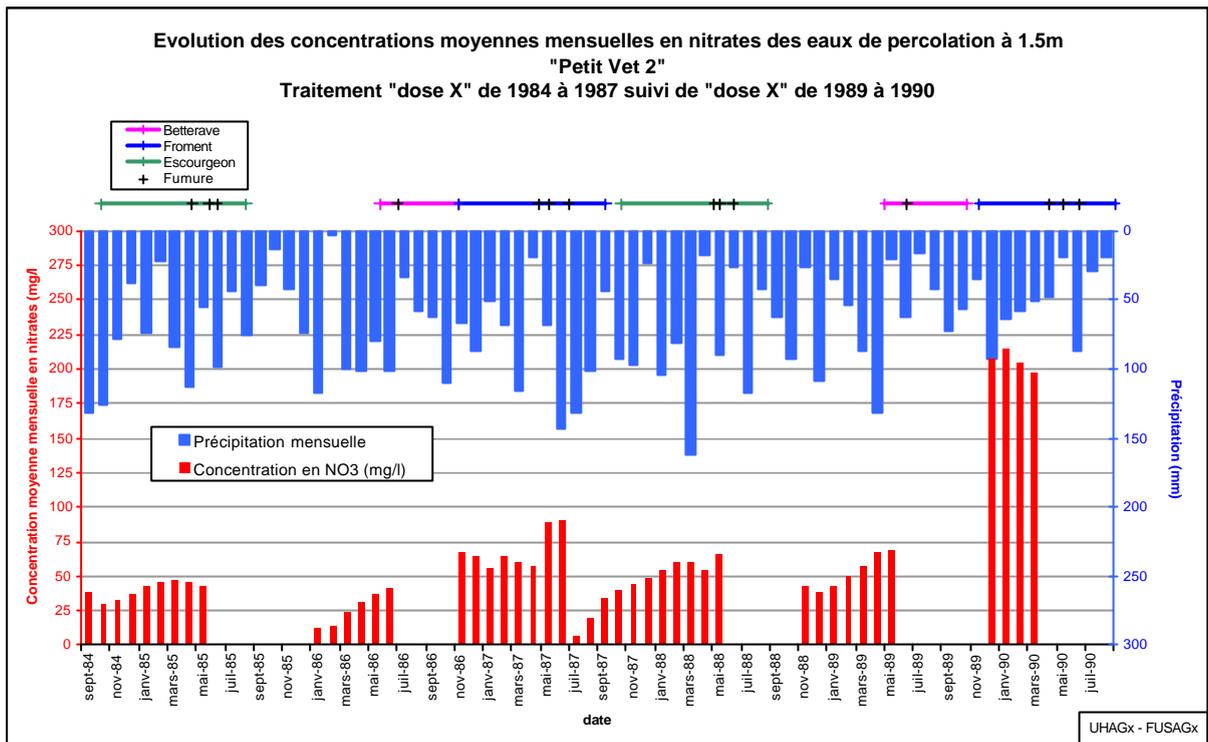
On constate que si les pics de concentration pour la dose 0X atteignent temporairement l'ordre de 50 mg/l., ceux-ci vont croissants avec les doses, la dose 3/2 X donnant des valeurs de pics de concentration élevées; il est à remarquer que les flux sont hivernaux à printaniers, en correspondance avec les pluies efficaces.



SEQARABIC Figure 27 : Évolution des concentrations moyennes mensuelles simulées en nitrates des eaux de percolation à 1,50m (essai : CRAGx, simulations EPICmod sans calibration: UHAGx-FUSAG)



SEQARABIC Figure 28 : Évolution des concentrations moyennes mensuelles simulées en nitrates des eaux de percolation à 1,50m (essai : CRAGx, simulations EPICmod sans calibration: UHAGx-FUSAG)



SEQARABIC Figure 29 : Évolution des concentrations moyennes mensuelles simulées en nitrates des eaux de percolation à 1,50m (essai : CRAGx, simulations EPICmod sans calibration : UHAGx-FUSAG)

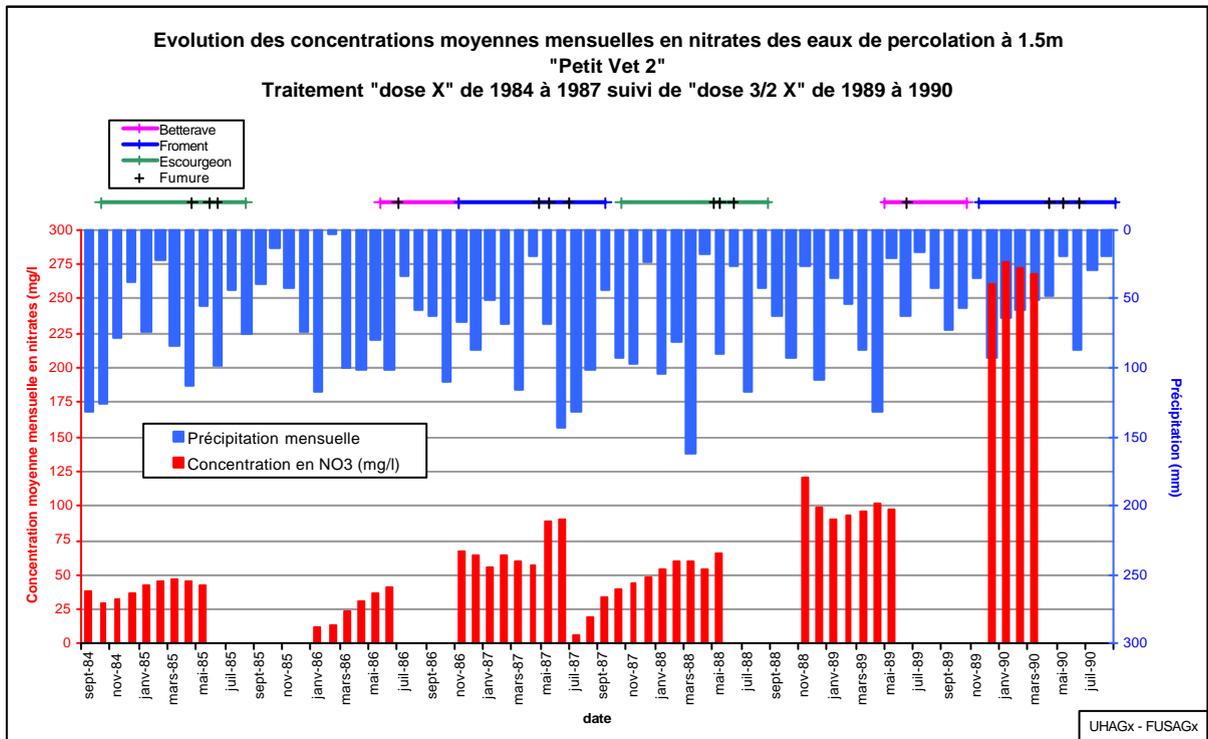


Figure 30 SEQARABIC: Évolution des concentrations moyennes mensuelles simulées en nitrates des eaux de percolation à 1,50m (essai : CRAGx, simulations EPICmod sans calibration : UHAGx-FUSAG)

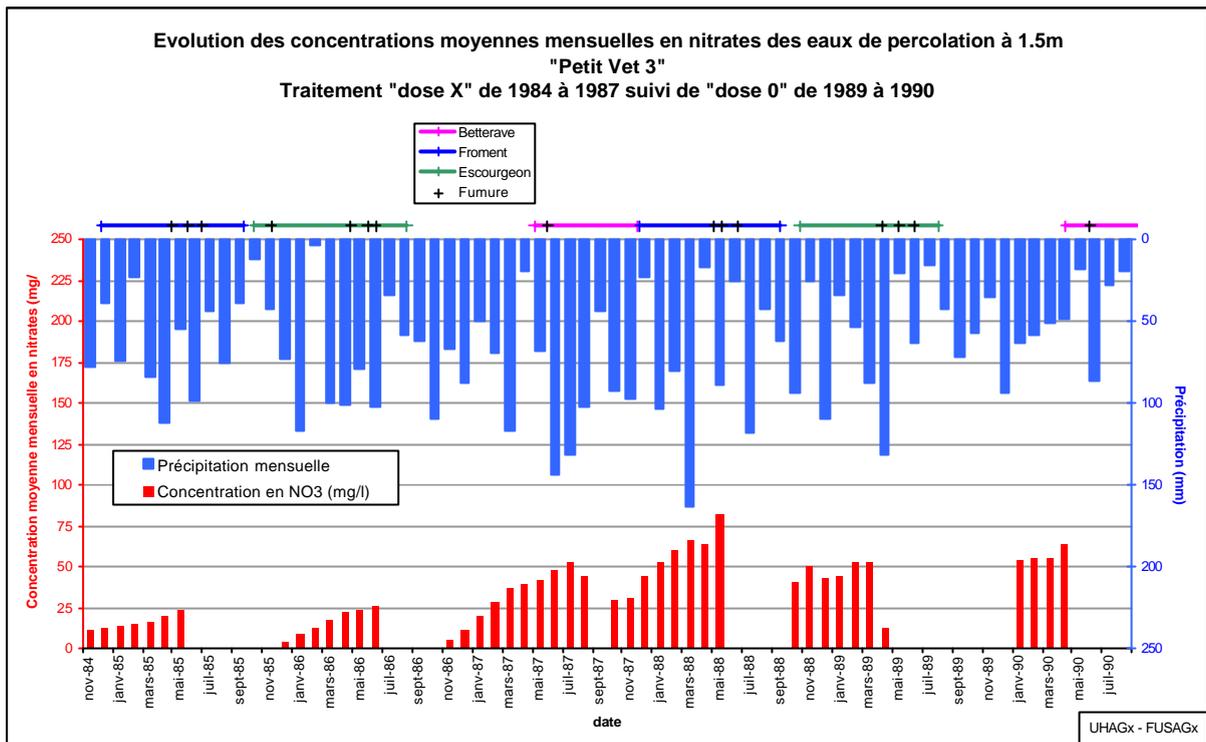


Figure 31 :SEQARABIC Évolution des concentrations moyennes mensuelles simulées en nitrates des eaux de percolation à 1,50m (essai : CRAGx, simulations EPICmod sans calibration: UHAGx-FUSAG)

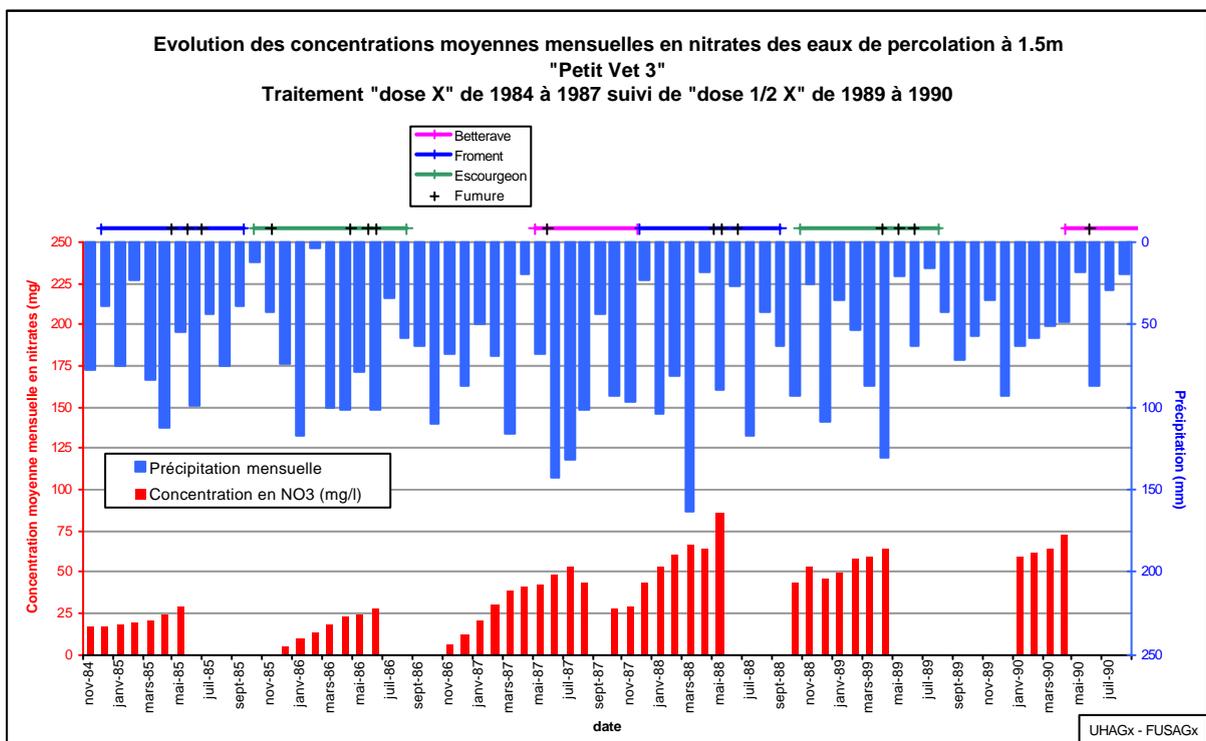


Figure 32 SEQARABIC: Évolution des concentrations moyennes mensuelles simulées en nitrates des eaux de percolation à 1,50m (essai : CRAGx, simulations EPICmod sans calibration: UHAGx-FUSAG)

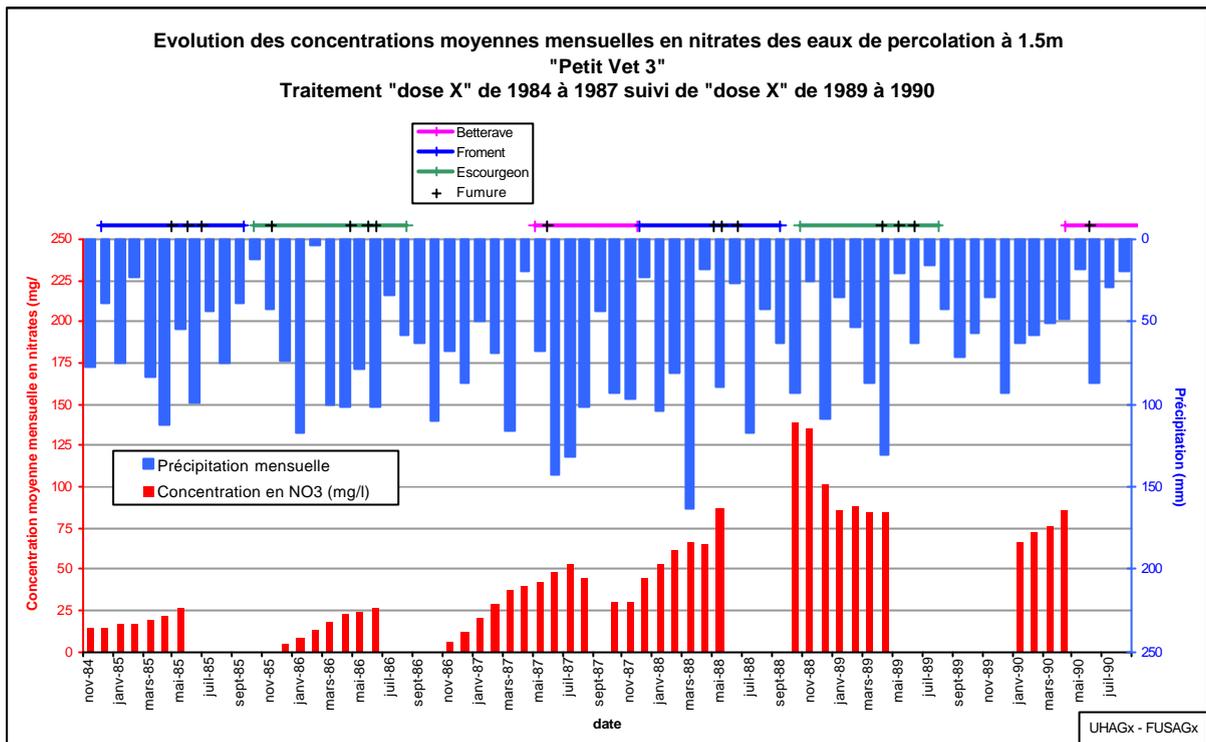


Figure 33 :SEQARABIC Évolution des concentrations moyennes mensuelles simulées en nitrates des eaux de percolation à 1,50m (essai : CRAGx, simulations EPICmod sans calibration: UHAGx-FUSAG)

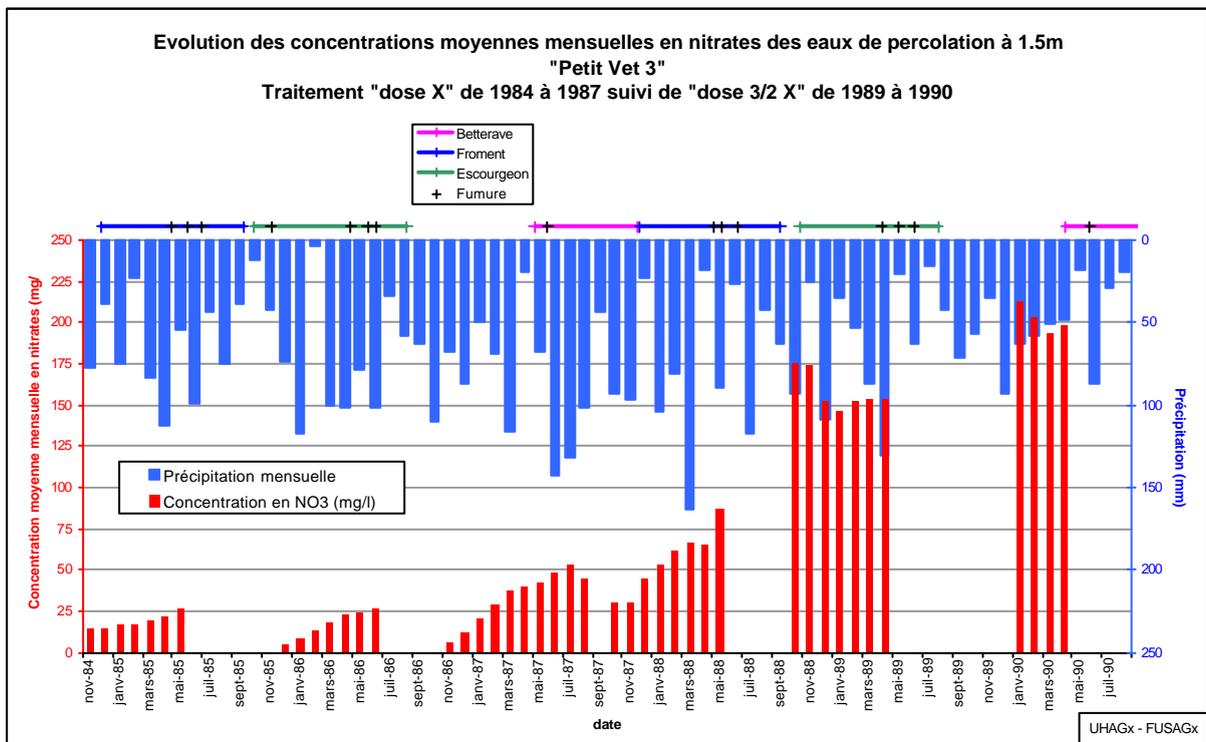


Figure 34 SEQARABIC: Évolution des concentrations moyennes mensuelles simulées en nitrates des eaux de percolation à 1,50m (essai : CRAGx, simulations EPICmod sans calibration: UHAGx-FUSAG)

6. Simulations EPICmod sur Betterave sucrière

6.1. Données disponibles

Des données d'expérimentations menés par le CRAGx sur des parcelles situées chez des cultivateurs ont été utilisées. Trois expérimentations chez des cultivateurs ont été retenues, chaque essai comprenant une dose "classique" et une dose "conseil Azobil" (Meynard *et al.*, 1996) calculée par le CRAGx sur base d'enquête chez le cultivateur. Rappelons que le conseil Azobil ne permet pas, en soi, de déterminer le risque de lessivage, d'où l'intérêt du modèle conjoint EPICmod.

Les renseignements suivants ont été repris des fiches "Azobil" ayant servi au calcul de la fumure "optimisée". Seuls les renseignements nécessaires à l'établissement de la fiche d'entrée des paramètres nécessaires et susceptibles de donner une information relative à ces paramètres sont repris ci-dessous.

6.1.1. Essai "Debilde"

Date du premier prélèvement : 23/02/98

Lieu : B-5150 Floriffoux

Propriétaire : Leroy Albert

Caractérisation du sol :

teneur en argile faible,
teneur en sable faible,
teneur en matière organique faible,
charge en cailloux nulle,
profondeur de labour de 27 cm

Histoire culturale :

Pas de prairie précédant la mise en culture de la parcelle,
Résidus de récolte enfouis une fois sur deux
Apport de fumure organique tous les trois à cinq ans

Précédent cultural :

Céréales, pailles enlevées ou brûlées
Apport de 180 kilos d'azote par hectare

Culture actuelle (Betterave) :

Pas d'apport minéral déjà réalisé
Pas d'apport de fumure organique
Pas de culture intermédiaire

Dose "fermier" : 140 kg N/ha

Dose "Azobil" : 100 kg N/ha

6.1.2. Essai "Rigo"

Date du premier prélèvement : 23/02/98

Lieu : B-5380 Forville

Propriétaire : Rigo Philippe

Caractérisation du sol :

Texture : 5 % de sable, 10 %d'argile et 85 % de limon

Capacité au champ : 0,29 m/m

Point de flétrissement : 0,10 m/m

Conductivité hydraulique : 3 mm/h

Porosité : 0,48

teneur en matière organique élevée,

charge en cailloux nulle,

profondeur de labour de 27 cm

Histoire culturale :

Prairie précédant la mise en culture de la parcelle de plus de dix ans,

Résidus de récolte enfouis une fois sur deux

Apport de fumure organique tous les trois à cinq ans

Précédent cultural :

Céréales, pailles enlevées ou brûlées

Apport de 170 kilos d'azote par hectare

Culture actuelle (Betterave) :

Pas d'apport minéral déjà réalisé

Apport de fientes de volaille en automne : 7 t/ha

Pas de culture intermédiaire

Dose "fermier" : 90 kg N/ha

Dose "Azobil" : 0 kg N/ha

6.1.3. Essai "Leroy"

Date du premier prélèvement : 23/02/98

Lieu : B-5380 Forville

Propriétaire : Leroy Albert

Caractérisation du sol :

Texture : 5 % de sable, 10 %d'argile et 85 % de limon

Capacité au champ : 0,29 m/m

Point de flétrissement : 0,10 m/m

Conductivité hydraulique : 3 mm/h

Porosité : 0,48

teneur en matière organique élevée,

charge en cailloux nulle,
profondeur de labour de 27 cm

Histoire culturale :

Pas de prairie précédant la mise en culture de la parcelle,
Résidus de récolte enfouis une fois sur deux
Apport de fumure organique tous les trois à cinq ans

Précédent cultural :

Céréales, pailles enlevées ou brûlées
Apport de 160 unités d'azote par hectare

Culture actuelle (Betterave) :

Pas d'apport minéral déjà réalisé
Apport de fientes de volaille en automne : 15 t/ha
Pas de culture intermédiaire

Dose "fermier" : 80 kg N/ha

Dose "Azobil" : 0 kg N/ha

6.1.4. Remarques concernant la mise en œuvre des simulations

a. Calendrier cultural :

La mise au point des fichiers d'entrée EPICmod fait appel au calendrier cultural. Les dates précises des opérations culturales telles que semis, fumure et récolte doivent être fournies. En l'absence de données, nous avons choisi de prendre des dates communément admises pour la culture de la betterave :

Semis : 20 mars

Fumure : 15 avril

Récolte : 20 septembre

b. Période simulée

Le comportement d'une culture est dépendant du précédent cultural. Une culture n'aura pas nécessairement le même comportement selon que celle-ci prend place dans une rotation ou dans une autre ou encore en monoculture [Dautrebande et al, 1999]. Un modèle événementiel tel qu'EPIC permet de prendre en compte cette "polymorphie" mais nécessite la connaissance exacte de l'historique d'une parcelle. Généralement, la prise en compte d'un cycle de rotation avant de commencer la simulation proprement dite permet d'initialiser correctement les divers stocks du cycle de l'azote et autres cycles simulés.

Cependant, dans ce type d'essai de courte durée, nous disposons d'une indication précise du profil azoté du sol, profil permettant au logiciel Azobil d'effectuer

une estimation de fumure. Ce profil est, dans notre cas, mesuré en février. Compte tenu de l'absence de données précises concernant les précédents culturaux, nous avons choisi de commencer la simulation à cette date, en fixant le profil initial au profil mesuré.

6.2. Simulations réalisées

6.2.1. Le profil azoté

Le profil azoté nécessaire pour le conseil Azobil reprend les couches 0-30 cm, 30-60 cm et 60-90 cm.

Les profils en cours de culture sont données par tranche de 15 cm de 0 à 150 cm de profondeur.

Pour rappel, les simulations sont menées sur 7 couches : 0-1cm, 1-30cm, 30-60 cm, 60-90 cm, 90-120 cm, 120-150 cm, 150-250 cm.

Nous pouvons donc comparer les diverses informations, en divisant le profil par couches de 30 cm d'épaisseur (nécessités de la précision numérique).

6.2.2. Simulations "Debilde"

Cet essai comporte une différence majeure par rapport aux cas "Rigo" et "Leroy" : il n'y a pas d'apport de fientes de volailles l'automne précédant la betterave. La teneur en azote minéral du profil 0-90 cm en février est de 64 kg N/ha. La dose recommandée par Azobil est de 100 kg N/ha, à opposer à la dose de 140 kg N/ha choisie par le fermier.

Les tableaux suivants (Tableau5 pour la version "Azobil", Tableau6 pour la version "fermier") reprennent les concentrations moyennes en nitrates du sol pour les simulations et observations aux dates ayant fait l'objet d'un échantillonnage. Les mesures de la version « Azobil » en cours de culture sont issus de deux échantillons dans la parcelle, la version « fermier » faisant intervenir 4 échantillons. Par contre, après récolte, 4 échantillons sont récoltés pour chacun des cas. La profondeur d'échantillonnage a été réduite pour cause de présence de drains dans la parcelle.

Tableau 5 : Site Debilde , version "Azobil" (apport de 100 kg N/ha)

			Teneurs en N-NO3 (kg/ha) du sol,				
			0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	90-120 cm	120-150 cm
18/02/98	observation		15	26	23		
4/06/98	observation	min	62	23	17		
		max	82	26	23		
		moy	72	24	20		
	simulation		52	26	22	16	9
19/10/98	observation	min	6	1			
		max	19	3			
		moy	11	2			
	simulation		5	5	4	2	2

Tableau 6 : Site Debilde, version "Fermier" (apport de 140 kg N/ha)

			Teneur en N-NO3 (kg/ha)				
			0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	90-120 cm	120-150 cm
18/02/98	observation		15	26	23		
19/05/98	obs	min	62	21	18		
		max	127	34	26		
		moy	99	28	23		
	sim		99	35	23	16	9
17/11/98	obs	min	5	1			
		max	10	4			
		moy	7	2			
	sim		7	6	4	3	2

Les résultats obtenus avec EPICmod sont tout à fait comparables aux résultats observés dans les couches 0-30 cm et 30-60 cm; rappelons que les observations possèdent un degré de variabilité assez élevé.

Pour la couche 0-30, on remarque une sous-estimation en regard du cas « Azobil » mais les ordres de grandeur sont respectés. Par contre les résultats pour la simulation "fermier" sont identiques à la moyenne obtenue pour les observations.

On note une raisonnable discordance entre simulations et observations lors de l'après culture pour la couche 30-60, où il y a surestimation du reliquat (5 kg/ha contre 3 au maximum pour « Azobil » et 6 contre 4 pour la situation « fermier », soit une surestimation générale de 2kg/ha pour la couche 30-60).

La simulation de la couche 60-90 est correcte au vu des moyennes obtenues pour les observations.

Suite à cette analyse et validation du comportement du modèle, nous pouvons valablement l'évolution des concentration en nitrates des eaux de percolation à 1.5 m, mois par mois. (Tableau 7).

Tableau 7 : Essai « Debilde », évolution des concentrations en nitrates des eaux de percolation à 1,5 mètres de profondeur.

mois	Essai <i>Azobil</i>		Essai <i>Fermier</i>		Précipitations Mensuelles (mm)
	Perte Azote (kg/ha) à 1,5 m de prof.	Conc. moy. Nitrates (mg/l) à 1,5 m de prof.	Perte Azote (kg/ha) à 1,5 m de prof.	Conc. moy. Nitrates (mg/l) à 1,5 m de prof.	
février	0.3	15	0.3	15	31
mars	1.8	18	1.8	18	78
avril	4.1	33	4.1	33	118
mai	0.2	40	0.2	40	51
juin	2.7	39	3.3	47	137
juillet	0	0	0	0	79
août	0	0	0	0	95
septembre	0.2	1	0.2	1	219
octobre	0.8	4	0.9	4	147
novembre	1.5	7	1.8	9	120
décembre	1.9	12	2.3	14	82
Février à Décembre 1998	14	12	15	13	1156

Nous constatons, logiquement, que l'évolution des concentrations jusqu'à la date de fertilisation (15 avril) est identique. La concentration croît ensuite un peu plus pour la version "fermier" mais les valeurs restent quasi identiques dans les deux cas. Rappelons que les doses d'apport azotés ne diffèrent que de 40 UN. En termes de pertes en azote, celles-ci sont de 4.5 et 5 kg N/ha respectivement pour les versions « Azobil » et « fermier ».

6.2.3. Simulations "Rigo"

Par rapport à la situation "Debilde", 7 tonne de fientes de volailles ont été apportées en automne. Ces tonnes de fumure ont une incidence directe sur la situation initiale de février, le profil 0-90cm correspondant à une teneur en azote de 223 kg/ha. La différence entre les doses Azobil (0 kg N/ha) et fermier (90 kg N/ha) est de 90 kg N/ha.

Les mesures réalisées comprennent quatre profils (de 0 à 150 cm) pour la dose Azobil en cours de culture et six pour la dose fermier; cependant le précédent cultural n'est pas connu avec précision et donc un précédent « standard » de céréales a été introduit.

Pour la situation après récolte, quatre profils pour chaque dose ont été prélevés. La variabilité est assez élevée. Nous présentons aux Tableau 8 et 9 les résultats des simulations comparés aux observations.

Tableau 8 : Site Rigo, version "Azobil" (apport nul)

			Teneur en N-NO3 (kg/ha)				
			0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	90-120 cm	120-150 cm
23/02/98	observation		32	93	98		
19/05/98	observation	min	30	20	20	10	4
		max	35	31	74	45	13
		moy	32	24	42	26	10
	simulation		0	11	72	57	30
17/11/98	observation	min	4	1	1	1	1
		max	8	3	2	1	3
		moy	6	2	1	1	2
	simulation		6	6	5	3	2

Tableau 9 : Site Rigo, Situation "fermier" (apport 90 kg N/ha)

			Teneur en N-NO3 (kg/ha)				
			0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	90-120 cm	120-150 cm
23/02/98	observation		32	93	98		
19/05/98	observation	min	71	27	29	14	5
		max	111	42	47	30	23
		moy	85	35	37	22	12
	simulation		41	54	73	57	30
17/11/98	observation	min	5	2	1	0	2
		max	14	4	6	5	3
		moy	9	3	3	2	3
	simulation		6	6	5	7	14

Par rapport aux résultats obtenus pour la situation "Debilde" (ces dernières sans apports de fiente de poule, rappelons-le), nous constatons ici que les simulations sont cohérents quant aux totaux mais divergent fortement des observations en ce qui concerne la répartition des nitrates au sein du profil. Rappelons cependant l'introduction d'un précédent cultural « fictif » à défaut de connaître le réel.

Les totaux, tout en restant comparables et du même ordre de grandeur, paraissent surestimés par la simulation pour les profondeurs 0-150 cm, bien qu'équivalents si on se limite à l'épaisseur 0-90 cm :

1. profondeur jusqu'à 150 cm :

- pour la version « Azobil »,
 - en mai 98 : 154 kg/ha mesurés contre 170 simulés,
 - en novembre 98 : 12 kg/ha mesurés contre 22 simulés;
- pour la version « fermier »,
 - en mai 98 : 191 kg/ha mesurés contre 255 simulés
 - en novembre 98 : 32 kg/ha mesurés contre 38 simulés

2. profondeur jusqu'à 90 cm :

- version « Azobil »
- en mai 98, 98 mesurés contre 83 simulés
- en novembre 98, 9 mesurés contre 17 simulés;
 - version « fermier » :
- en mai 98, 157 mesurés contre 168 simulés,
- en novembre 98, 15 mesurés contre 17 simulés.

6.2.4. Simulations "Leroy"

Dans cette parcelle, comme dans le cas précédent, des apports de fientes de volaille ont été effectués en automne à raison de 15 tonnes/ha, ce qui donne un profil 0-90cm contenant 206 kg N/ha; ici également, comme dans le cas « Rigo », le précédent cultural est non connu. La différence de dose entre la version « Azobil » (0 kg N/ha) et la version « fermier » (80 kg N/ha) est de 80 kg N/ha. Nous ne disposons pas des résultats observés pour la dose Azobil, le fermier ayant choisi d'associer une dose 80 kg N/ha pour les deux essais.

Six profils 0-150 cm ont été récoltés; les résultats des simulations et observations figurent au Tableau 10.

Tableau 10 : Site Leroy, version "fermier" (apport 80 kg N/ha)

			Teneur en N-NO3 (kg/ha)				
			0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	90-120 cm	120-150 cm
23/02/98	observation		43	104	59		
26/06/98	observation	min	57	49	37		
		max	157	118	81		
		moy	112	65	40		
	simulation		0	42	60	52	33
23/11/98	observation	min	9	3	2	2	2
		max	21	6	6	5	4
		moy	16	5	4	3	3
	simulation		5	4	3	6	13

Comme dans le cas précédent avec apport de fientes de poule (pour rappel : le précédent cultural est non connu, d'où utilisation pour la simulation d'un précédent « standard » de céréales), les résultats de simulation ne concordent pas

avec les observations; les totaux sur le profil 0-90 cm sont, ici, en outre, nettement sous-estimés dans la simulation : 217 kg/ha mesurés contre 102 kg/ha simulés en mai, et 25 mesurés contre 12 kg/ha simulés en novembre, le total du profil 0-150 cm de novembre 98 (seul mesuré) étant, quant à lui, identique en mesuré (31 kg/ha) et en simulé (31 kg/ha).

Il faut en conclure, tant pour les essais «Leroy» que pour les essais « Rigo », que les résultats de simulation incluant les apports de fiente de poule, bien qu'étant intéressants et relativement corrects quant aux bilans, demandent à être améliorés. Si l'on peut, en toute éventualité, mettre en question soit les processus tels qu'intégrés dans le modèle pour ce type d'apport, soit la connaissance des processus réels de transformation de ce type d'apport dans les sols, on peut cependant mettre en cause en premier lieu la non-connaissance du précédent cultural.

7. Établissement d'une fiche technique "EPICmod"

L'élaboration d'une telle fiche (Annexe 4) est un souhait du CRAGx afin de mieux cerner les divers éléments à prendre en compte pour réaliser des essais compatibles avec une utilisation du modèle EPICmod. Cette fiche n'est pas un inventaire mais plutôt une aide afin de mieux valoriser les résultats d'expérimentations en champs.

7.1. Entrées liées au sol

Le profil de sol est divisé en couches homogènes. L'épaisseur de la première couche doit, pour des raisons de calcul numérique, être de 1cm. Ensuite, nous pouvons ajouter 9 autres couches au maximum (pour des raisons de précision de calcul numérique, il est recommandé de diviser le sol en 5 couches minimum (même si le sol est homogène). A titre d'exemple, dans cette étude, nous avons utilisé des couches de 30 cm d'épaisseur jusqu'à 1,5m de profondeur, ensuite nous avons ajouté une dernière couche de 1m d'épaisseur afin d'éviter le drainage libre de la dernière couche.

Deux types de données sont nécessaires : des données relatives à la parcelle dans son ensemble (topographie, localisation, albédo) et des données relatives à la description physiques de chacune des couches de sol.

Paramètres relatifs à la parcelle :

- Topographie : pente, longueur de pente et altitude ;
- Localisation : latitude ;

- Albédo du sol.

Paramètres physiques pour la description de chaque couche :

Certaines données sont indispensables au bon fonctionnement du modèle alors que d'autres ne sont que facultatives, le modèle générant lui même ces données lorsqu'elles ont manquant. Cependant, des données mesurées seront préférentiellement introduites afin de correspondre le plus possible avec la réalité terrain.

Les différents paramètres à introduire dans EPIC pour chaque couche de sol sont :

- Épaisseur des différentes couches ;
- Texture (pourcentage d'argile, sable et limon) ;
- Densité apparente sèche (t/m^3) ;
- Présence ou non de cailloux (%) ;
- Teneur en eau au point de flétrissement (wilting point) (correspondant au pF 4.2, soit 15 atm.) ;
- Teneur en eau à la capacité au champ (field capacity) ;
- Teneur en azote sous forme nitrate (g/T) en début de simulation ;
- pH
- Teneur en carbone organique (%)

Si d'autres éléments sont connus, il est utile de les introduire dans le modèle :

- Conductivité hydraulique (mm/h)
- Teneur en azote organique(g/t) ;
- Teneur en P mobile (g/t) ;
- Teneur en P organique (g/t) ;
- Teneur en eau au point de flétrissement (wilting point) (correspondant au pF 4.2, soit 15 atm.) ;
- Teneur en eau à la capacité au champ (field capacity) ;
- Présence de résidus de culture (t/ha) ;
- Capacité d'échange cationique (CEC ; cmol/kg).

7.2. Données météorologiques :

Les données météorologiques journalières doivent être fournies pour toute la période de simulation. La création d'un fichier texte reprenant les six variables suivantes doit être réalisée suivant une mise en forme particulière (taille des colonnes et nombre de décimales). *Par facilité, nous travaillons avec des fichiers annuels, la première ligne de chaque fichier doit nécessairement correspondre au*

premier janvier. La fourniture des données en colonnes au format Excel permet à un opérateur EPIC de créer ces fichiers météo assez aisément..

- Précipitation (mm)
- Vitesse du vent à 10 m (m/s)
- Rayonnement global (Cal/cm²)
- Humidité relative
- Températures minimale et maximale (°C)
- Moyennes mensuelles de ces variables climatiques

7.3. Calendrier cultural

Afin de mieux cerner le passé de la parcelle à modéliser, il est utile de connaître le type de rotation dans laquelle s'inscrit la culture considérée. Cette rotation devra être décrite comme la culture étudiée. En vue de modéliser l'année de l'essai, il est nécessaire de modéliser une rotation précédente au moins (3 à 4 ans), d'autant plus si un épandage de fumure organique ou minérale a lieu avant le commencement de l'essai ou si, par exemple, une interculture est installée ou un enfouissement de résidus est pratiqué.

- Description des diverses opérations se succédant sur la parcelle :
- Semis (date, densité de semis)
- Récolte (date)
- Enlèvement des pailles (date)
- Fumure (date, type d'engrais)
- Type d'engrais (concentration en N-P minéral, en N-P organique, proportion NO₃/NH₄)
- Travail du sol (date, type, profondeur de travail)

8. Conclusion Générale

La description détaillée du fonctionnement du modèle EPICmod met en évidence la complexité des divers processus en cause et qui sont pris en compte dans le modèle afin de gérer les relations entre les trois milieux que sont l'eau, le sol et la plante au sein d'une parcelle agricole ; l'ensemble des organigrammes des sous-routines est fourni ainsi que l'imbrication des divers processus.

Les données de mesures d'expérimentations menées par le CRAGx entre 1984 et 1990 sur betterave-froment-escourgeon ont été analysées, mises en forme et utilisées, afin de valider le modèle EPICmod, spécifiquement en ce qui concerne l'évolution des teneurs en nitrates au sein de la zone racinaire. Une mise au point du modèle concernant d'une part la fixation de l'azote par les légumineuses et d'autre part la température "seuil" de minéralisation a été réalisée, permettant d'améliorer les capacités prédictives du modèle dans les conditions régionales.

Tant les essais sur les parcelles du CRAGx que les essais analogues menés chez l'agriculteur (essais « Debilde ») autorisent ainsi, de par la validation des simulations par rapport aux résultats de mesure, une exploitation fiable du modèle EPICmod en termes de prévision des flux de percolation des nitrates (qui sont, rappelons-le, non mesurables) , confirmant ainsi ses potentialités en vue de contribuer à la détermination et à la prévision du risque de pollution des nappes, en « *temps réel* ». Rappelons également que cette information n'est en effet pas disponible par un modèle de type « AZOBIL », qu'elle vient donc utilement compléter.

L'étude attire également l'attention sur deux aspects importants liés aux mesures :

- la nécessité d'une connaissance des précédents culturaux,
- la nécessité de répétitions suffisantes de mesures à l'échelle de la parcelle, afin d'assurer une bonne représentativité de celles-ci.

Enfin, en vue de mener à l'avenir des expérimentations au meilleur profit de l'utilisation du modèle et de ses développements (nouvelles cultures ou pratiques culturales par exemple), de même que pour en faciliter son utilisation opérationnelle, une fiche technique est élaborée, quant aux exigences de données d'entrée du modèle EPIC.

9. Bibliographie

COCU X. & FRANKINET M. & MOEREMANS B. & DAUTREBANDE S. 1999. Radar interferometry and water-soil-crop simulation model on field in Belgium (International conference and workshops, proceedings 1, 18-22 january 1999, Méribel, France, CNES).

DAUTREBANDE S, DEWEZ A., CASSE C., HENNEBERT P, 1999. Nitrate leaching at regional scale with EPIC : an implicit example of a hydrotope model concept. In Modelling of Transport process in soils, ed. J. Feyen et K. Wiyo, pp725-773,

DAUTREBANDE S. et CASSE C., 1999, Modélisation régionalisée du secteur agricole pour l'analyse de politiques agricoles durables, Rapport final, partim UHAGx (FUSAG).

MASEREEL P. et DAUTREBANDE S., 1995b. Étude des interactions entre matière organique et propriétés hydriques des sols. Impact sur le ruissellement. Tribune de l'eau No.2/95, p.9-17.

MASEREEL P. et DAUTREBANDE S., 1995a. Modélisation de l'évolution des profils hydriques sous froment en région limoneuse. Bull. Rech. Agron. Gembloux 30(4), p.353-372.

MEYNARD J.-M., JUSTES E., MACHET J.-M., 1996, Fertilisation azotée des cultures annuelles de plein champ – Dans : Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes, Colloques de l'I.N.R.A., Reims, France, 333 p.

Programme-Action Hesbaye, Rapport de Synthèse, 1996. Étude réalisée par les équipes scientifiques : la Station de Phytotechnie du Centre de Recherches Agronomiques de Gembloux; l'Unité d'Hydraulique Agricole de la Faculté universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux; les Laboratoires de Géologie de l'Ingénieur, d'Hydrogéologie et de Prospection Géophysique de l'Université de Liège. Financé par : la Commission des Communautés Européennes ; le Ministère de l'Environnement, des Ressources Naturelles et de l'Agriculture de la Région Wallonne ; le Groupement d'Intérêt Économique réunissant la Société Wallonne des Distributions d'Eau et la Compagnie Intercommunale Liégeoise des Eaux. 167p.

SHARPLEY A.N. et WILLIAMS J.R., eds., 1990. EPIC - Erosion/Productivity Impact Calculator : 1. Model documentation. US Department of Agriculture Technical Bulletin No. 1768, 235p.

10. ANNEXES

Annexe 1 : Description des sous-routines comprises dans le modèle Azote d'EPIC	55
Annexe 2 : Organigrammes des diverses routines « Azote »	57
Annexe 3 : Schématisation de l'organisation des routines « Azote »	67
Annexe 4 : Fiche technique EPICmod	68

Annexe 1 : Description des sous-routines comprises dans le modèle Azote d'EPIC

<u>Sous-routine</u>	<u>Description de la fonction</u>
<u>NAFT</u>	: application automatique de fertilisant sur base d'un degré de stress pour la plante spécifié par l'utilisateur, une limite annuelle et des tests de sols
<u>NAJN</u>	: calcule la prise d'azote réelle annuelle par les plantes pour chaque couche (prise = minimum entre la demande de la plante et la fourniture du sol)
<u>NBL</u>	: calcule le bilan en azote et phosphore à la fin de chaque simulation
<u>NCONC</u>	: calcule les paramètres de l'équation décrivant les relations de N et P avec l'accumulation de biomasse
<u>NDNIT</u>	: calcule la perte journalière de NO ₃ par dénitrification
<u>NEVN</u>	: calcule le flux ascendant de NO ₃ causé par l'évaporation du sol
<u>NFALL</u>	: simule la chute du résidu mort sur pied, qui devient part des résidus de la couche de surface
<u>NFERT</u>	: application de fertilisant aux doses, dates et profondeurs spécifiées
<u>NFIX</u>	: calcul de la fixation d'azote par les légumineuses
<u>NITVOL</u>	: calcul de la nitrification et de la volatilisation
<u>NLCH</u>	: calcul de la perte en NO ₃ par percolation, flux hypodermique pour toutes les couches excepté la première
<u>NLIMA</u>	: calcule la saturation en Al en utilisant la saturation en bases, le carbone organique et le pH
<u>NLIME</u>	: application d'amendement pour neutraliser un niveau toxique en Al ou pour élever le pH
<u>NMNIM</u>	: calcule la minéralisation et immobilisation journalière de N et P, considérant la matière organique fraîche (résidus) et les pools actif et stable de l'humus
<u>NPCY</u>	: sous-routine maîtresse du cycle des nutriments, appelle NPMIN – NYNIT – NLCH – NMNIM
<u>NPMIN</u>	: calcule le flux de P entre les pools labile, minéral actif et minéral stable
<u>NPUP</u>	: calcule la demande journalière en P pour la croissance optimale de la plante
<u>NRSNT</u>	: contrôle que les concentrations en N et P des résidus de culture sont dans les limites établies
<u>NUP</u>	: calcule la demande journalière des plantes en N pour une croissance optimale

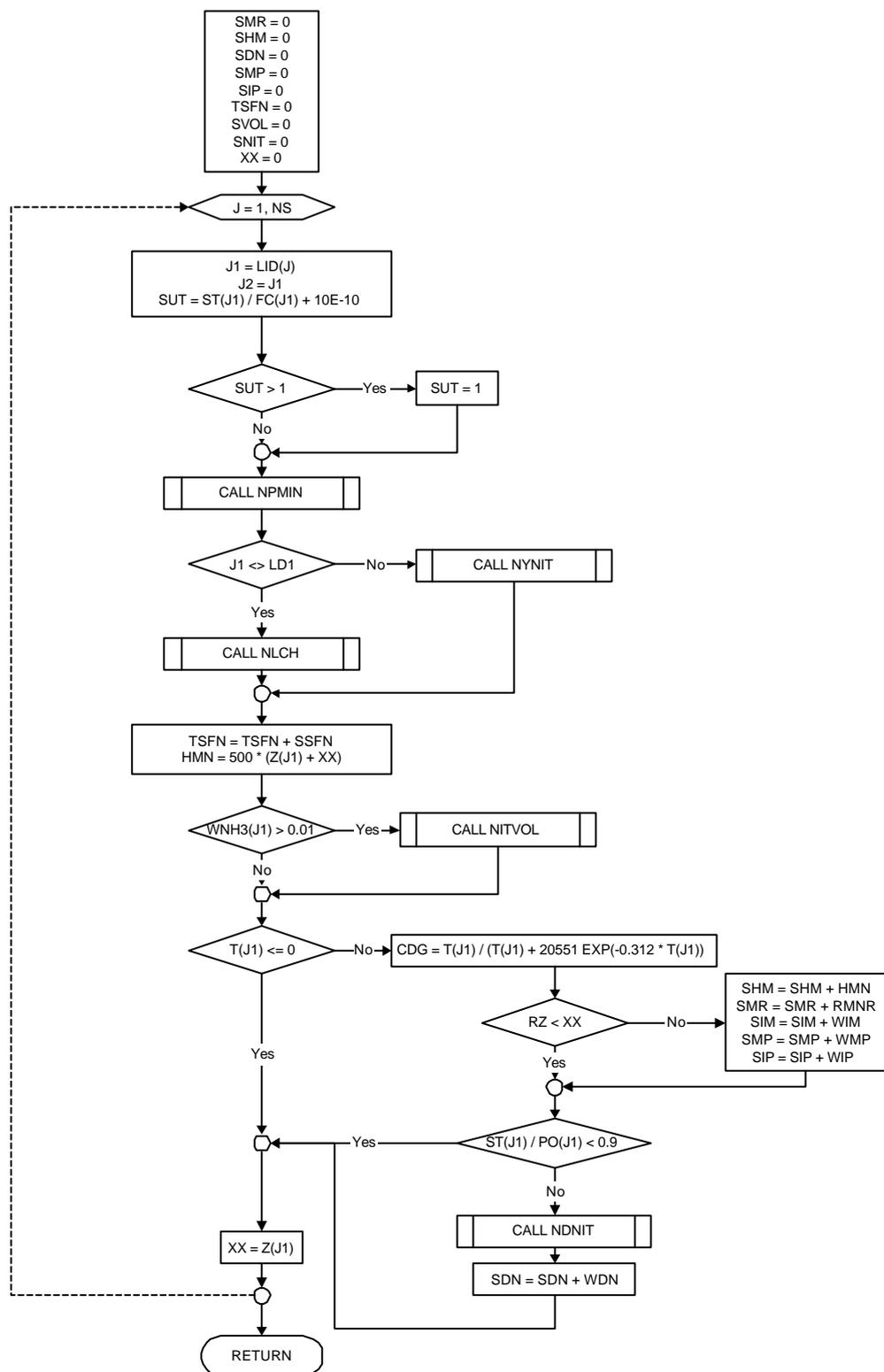
**Sous-
routine**

Description de la fonction

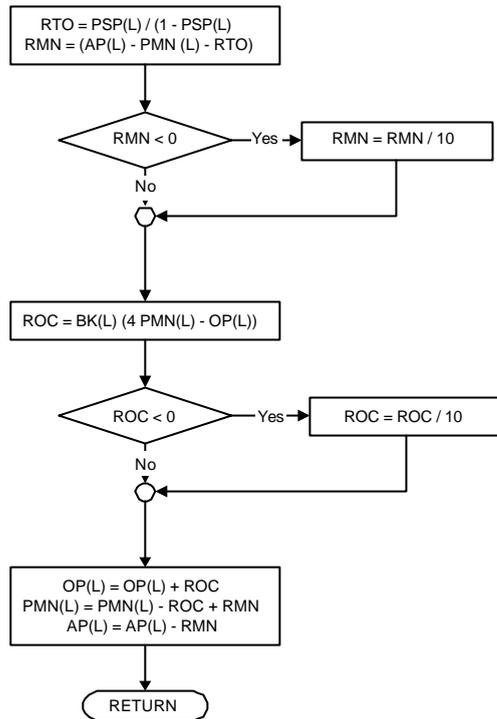
- NUTS : calcule le facteur de stress pour la plante causé par une carence en N et P
- NUSE : calcule la fourniture potentielle journalière en P pour chaque couche de sol
- NYNIT : calcule la perte journalière en NO₃ par percolation, flux hypodermique et ruissellement pour la couche de surface uniquement
- NYON : calcule les pertes journalières en N organique et humus en fonction des pertes de sol
- NYPA : calcule les pertes journalières en P en fonction des pertes de sol

Annexe 2 : Organigrammes des diverses routines « Azote »

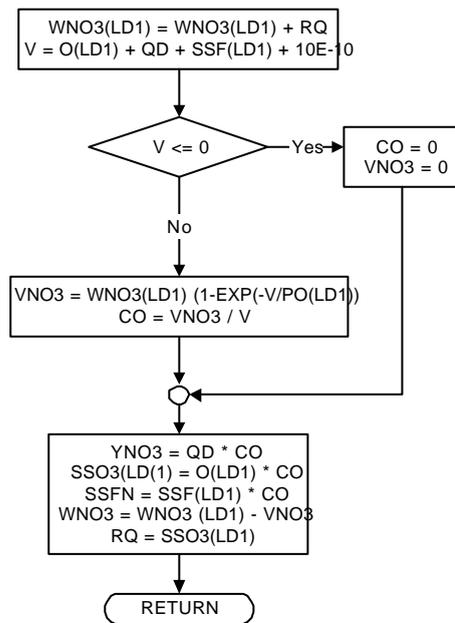
Sous-routine NPCY : sous-routine principale



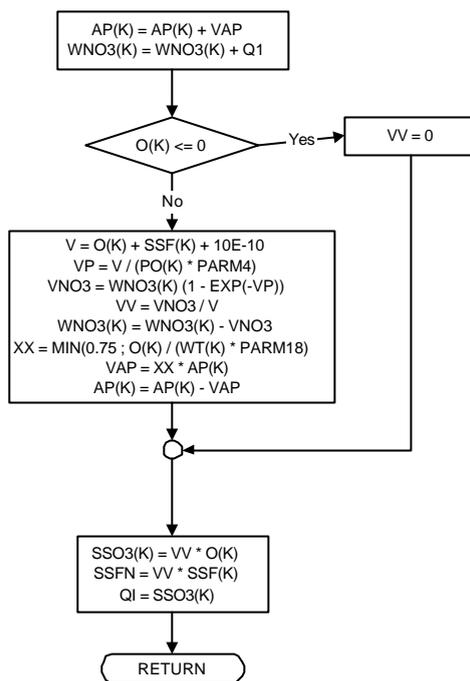
Sous-routine NPMIN : flux de P entre les pools labile, min. stable et min. actif



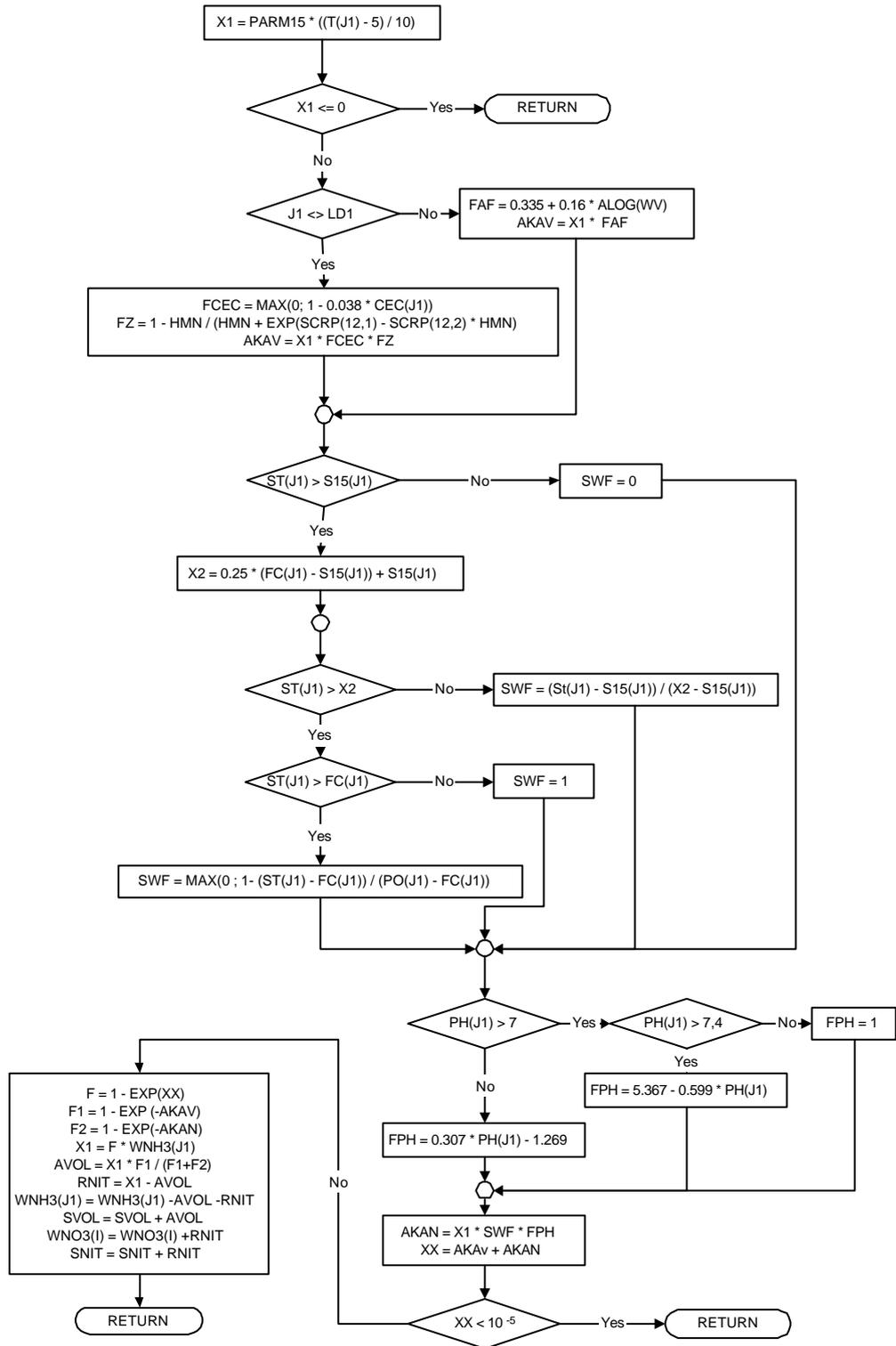
Sous-routine NYNIT : perte en NO3 pour la couche de surface



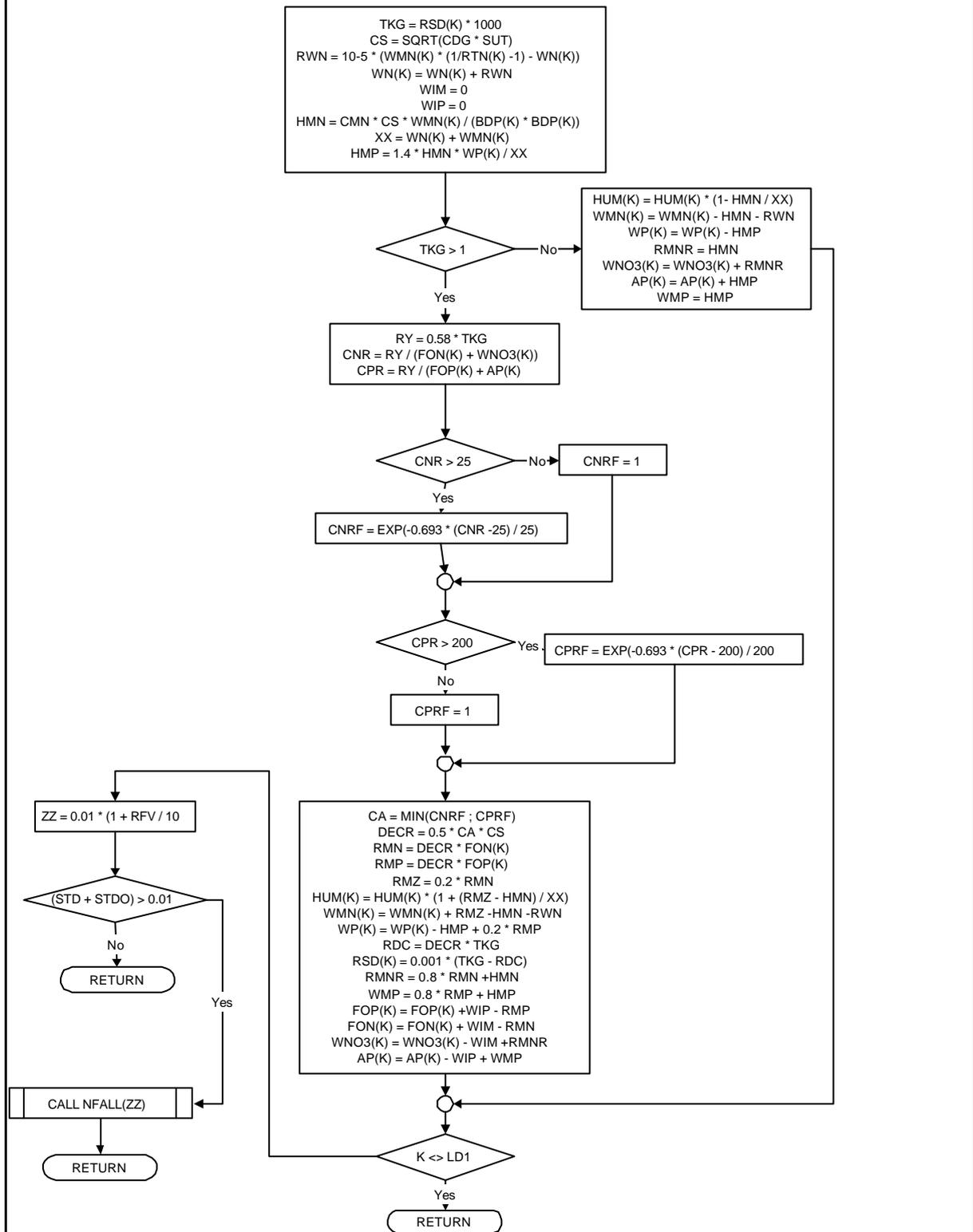
Sous-routine NLCH : perte en NO3 pour les couches situées sous la première couche



Sous-routine NITVOL : transformation de NO3 en NH3 et volatilisation



Sous-routine NMNIM : minéralisation et immobilisation de N et P à partir de la M.O.



Sous-routine NDNIT perte en NO3 par dénitrification

```
WDN = WNO3(J1) * (1 - EXP(CDN * CDG * HUM(J1) / WT(J1)))  
WNO3(J1) = WNO3(J1) - WDN
```

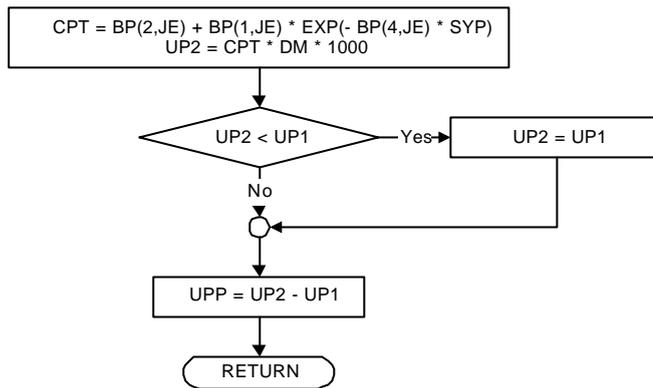
RETURN

Sous-routine NFAII conversion de Standing Crop Residue en Flat Residue

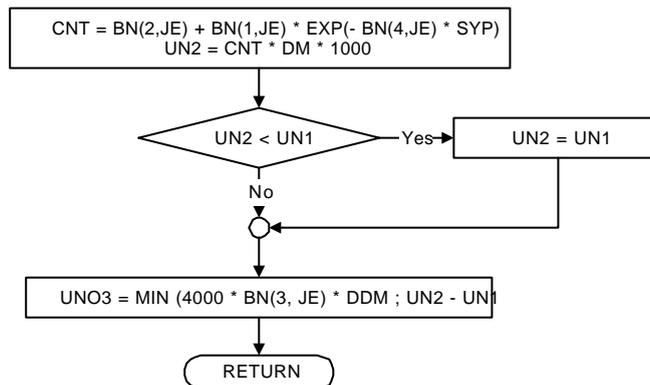
```
ZS = ZZ + STD  
STD = STD - ZS  
RSD(LD1) = RSD(LD1) + ZS  
  
ZS = ZZ * STDN  
FON(LD1) = FON(LD1) + ZS  
STDN = STDN - ZS  
  
ZS = ZZ * STDP  
FOP(LD1) = FOP(LD1) + ZS  
STDP = STDP - ZS  
  
ZZ = MIN(1; ZZ * 10)  
ZS = ZZ * STDO  
STDO = STDO - ZS  
RSD(LD1) = RSD(LD1) + ZS  
  
ZS = ZZ * STDON  
FON(LD1) = FON(LD1) + ZS  
STDON = STDON - ZS  
  
ZS = ZZ * STDOP  
FOP(LD1) = FOP(LD1) + ZS  
STDOP = STDOP - ZS
```

RETURN

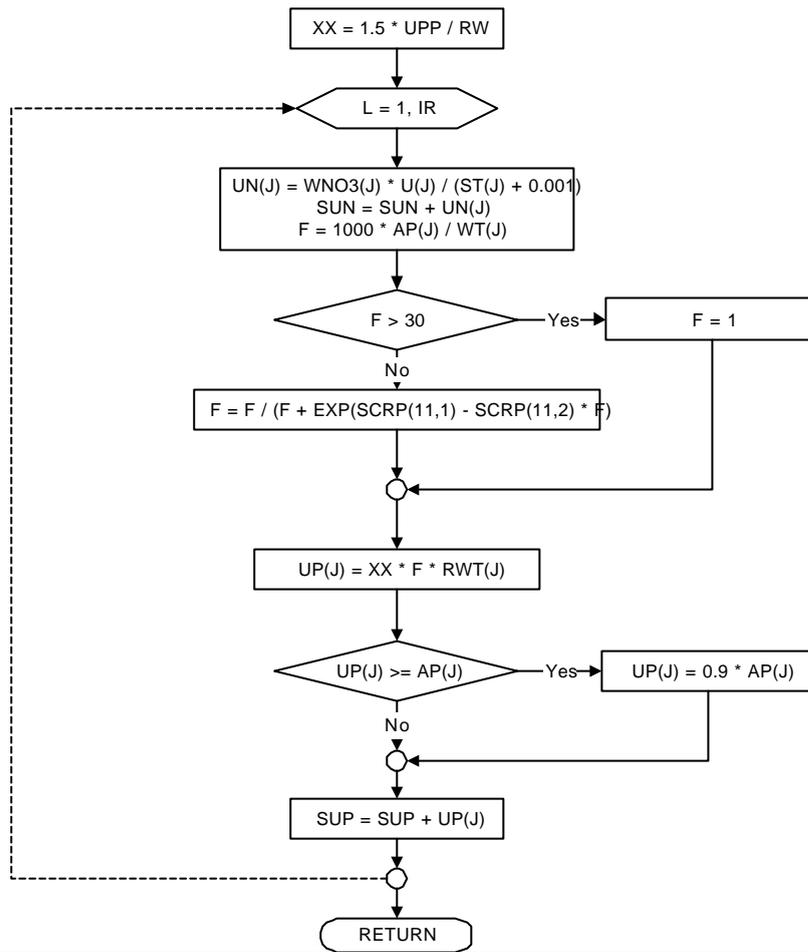
Sous-routine NPUP : demande journalière de P pour croissance optimale



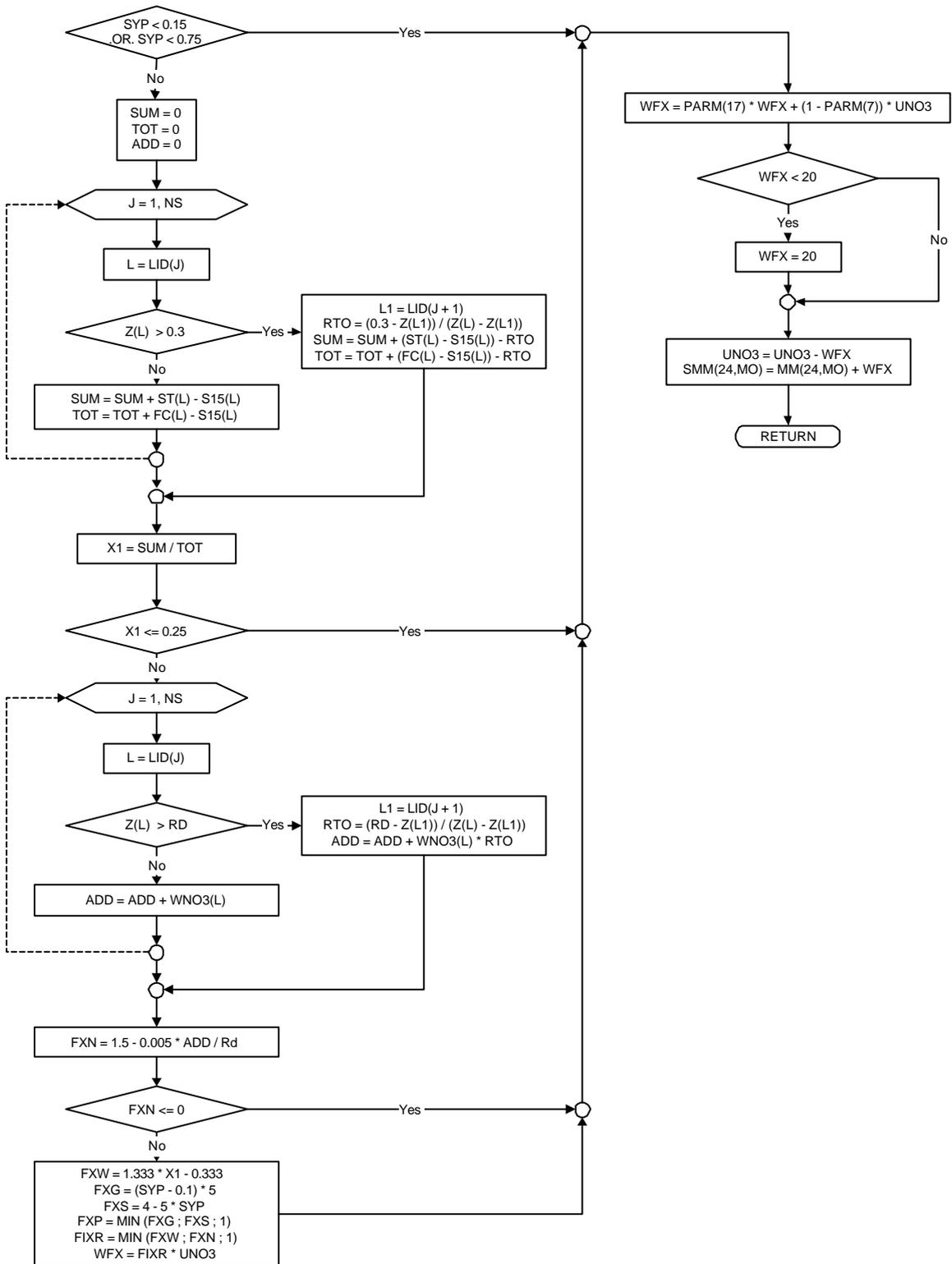
Sous-routine NUP : demande journalière de N pour croissance optimale



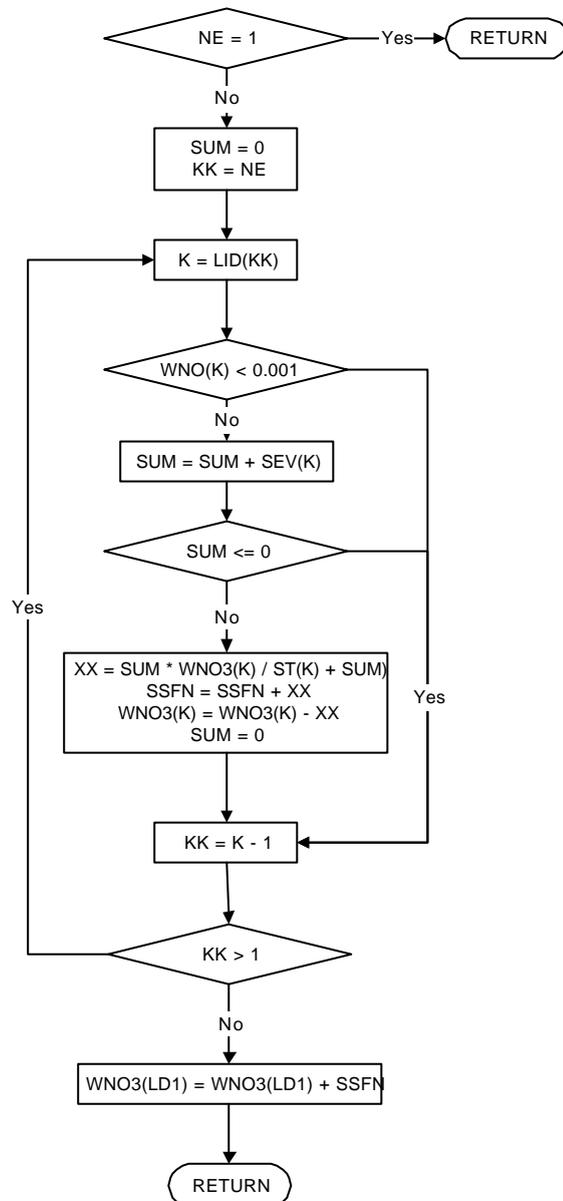
Sous-routine NUSE : production journalière de P du sol



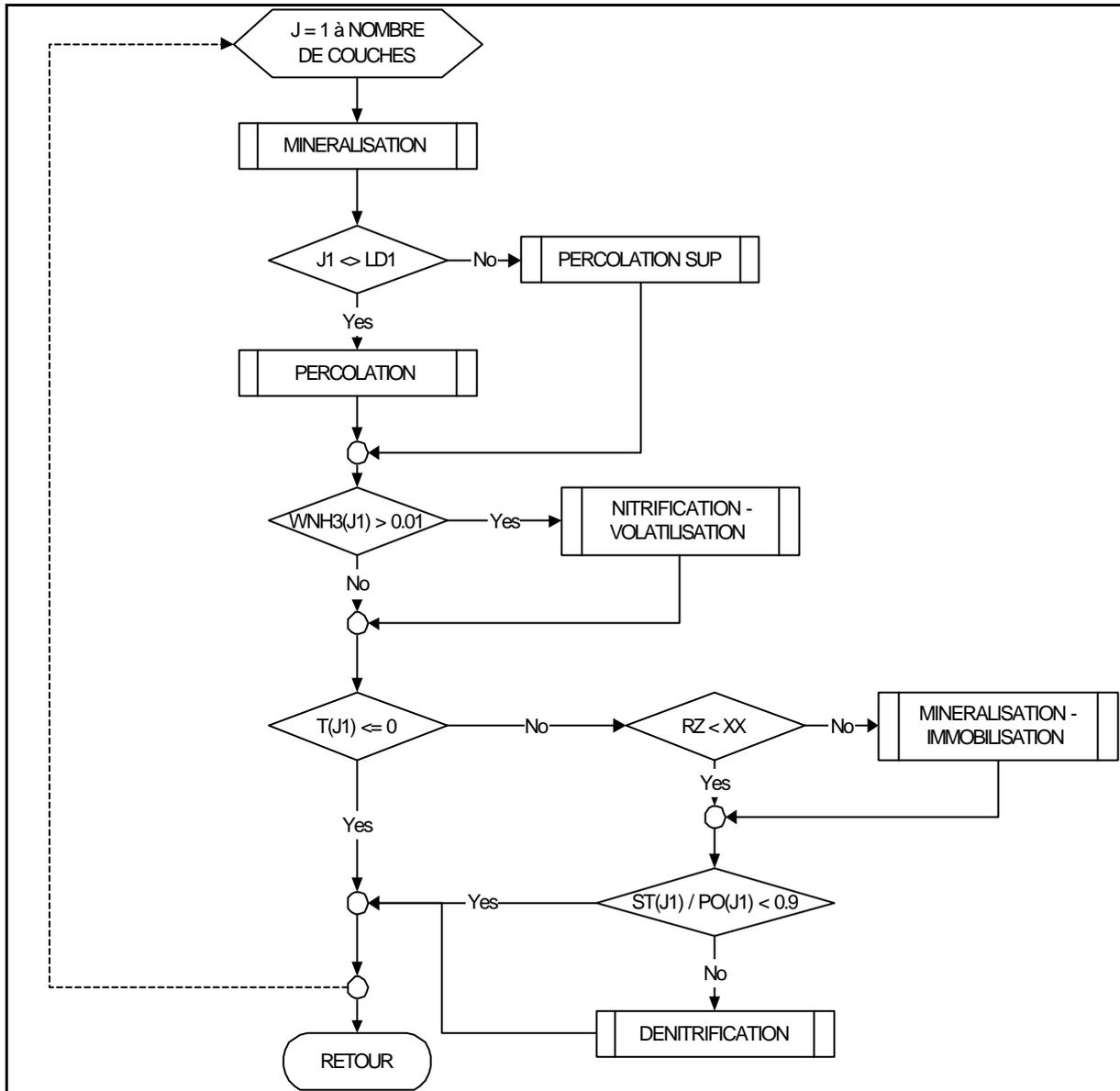
Sous-routine NFIX : fixation de l'azote par les légumineuses



Sous-routine NEVN : Transfert de NO3 vers les couches supérieures par évaporation



Annexe 3 : Schématisation de l'organisation des routines « Azote »



Annexe 4 : Fiche technique EPICmod

CARACTERISATION DE LA PARCELLE (1)

Description de la parcelle

Pente (%) :
Longueur de pente (m)

Altitude (m)
Latitude (°)
Albédo

Paramètres physiques indispensables relatifs à chaque couche de sol

Couche	Epaisseur (m)	Texture (%)			Densité apparente sèche (t/m ³)	Teneur en azote sous forme nitrate (g/t)	pH	Carbone organique (%)
		Argile	Sable	Limon				
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

CARACTERISATION DE LA PARCELLE (2)

Paramètres physiques facultatifs relatifs à chaque couche de sol

Couche	Teneur en azote organique (g/t)	Fragements grossiers (% vol)	Point de flétrissement (m/m)	Capacité au champ (m/m)	Conductivité Hydraulique (mm/h)	Teneur en P mobile (g/t)	Teneur en P organique (g/t)	Résidus de culture (t/ha)	CEC (cmol/kg)
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									

Calendrier cultural

Année	Culture	Semis		Fertilisation				Récolte	Travail du sol		
		Date	Densité	Date	Profondeur de travail	Dose (kg/ha)	Type d'engrais*	Date	Date	Type	Profondeur

Type et Composition (%Nminéral, %Pminéral, %Norganique, %Porganique, %N sous forme NH4)

Données Météorologiques

DONNEES JOURNALIERES

(format des données)

Date	Rayonnement Global (Cal/Cm ²)	Température Maximale (°C)	Température Minimale (°C)	Précipitations (mm)	Humidité relative	Vitesse du vent à 10 m (m/s)

DONNEES MENSUELLES MOYENNES

Mois	Rayonnement Global (Cal/Cm ²)	Température Maximale (°C)	Température Minimale (°C)	Précipitations (mm)	Humidité relative	Vitesse du vent à 10 m (m/s)
Janvier						
Février						
Mars						
Avril						
Mai						
Juin						
Juillet						
Août						
Septembre						
Octobre						
Novembre						
Décembre						