Évaluation des pertes en composés azotés vers les eaux souterraines Rapport d'étape No 3 Banton, Larocque, Surateau, Villeneuve INRS-Eau, Mars 1993

Projet PARDE-Fumier-89-2 Dossier No 3333.13.90.04 Ministère de l'Environnement du Québec Direction de la recherche et des technologies environnementales 2360, chemin Ste-Foy, Sainte-Foy, Québec, G1V 4H2

Evaluation des pertes de composés azotés dans les eaux souterraines lors de l'épandage des fumiers et lisiers Développement d'un outil d'évaluation

Rapport scientifique d'étape No 3

Développement de l'outil

par

Olivier Banton
Marie Larocque
Fabienne Surateau
Jean-Pierre Villeneuve

mars 1993

Institut National de la Recherche Scientifique, INRS-Eau 2800, Einstein, CP 7500, Sainte-Foy, Québec, G1V 4C7

Rapport Scientifique INRS-Eau No R-379

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION	1
1.1 PROBLEMATIQUE 1.2 CONTRAINTES DE DEVELOPPEMENT	1 1
2. CARACTERISTIQUES GENERALES D'AGRIFLUX	4
2.1 CONCEPT D'APPROCHE STOCHASTIQUE 2.2 FICHIERS D'ENTREE 2.3 FICHIERS DE RESULTATS 2.4 STRATEGIE DE SIMULATION	4 5 5 6
3. DESCRIPTION TECHNIQUE	7
3.1 LOIS STATISTIQUES (DISTRIBUTIONS) 3.2 PROFIL DE SOL 3.3 TEMPERATURE 3.4 CROISSANCE DES RACINES 3.5 BILAN HYDRIQUE 3.6 CYCLE DE L'AZOTE	7 7 11 16 18 35
4. CONCLUSION	47
5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	49
A. ANNEXE	A.1

1. INTRODUCTION

1.1 PROBLEMATIQUE

L'objectif du projet était de développer un outil d'évaluation des risques de contamination des eaux souterraines reliés à l'épandage au champ des fumiers et lisiers. Nous avons identifié dans un premier temps (Banton et al., 1991) l'ensemble des phénomènes pouvant intervenir dans ce contexte, et principalement les processus gérant le devenir des formes azotées dans le sol. Dans un deuxième temps (Banton et al., 1992), nous avons vérifié l'applicabilité de la modélisation mathématique à l'évaluation des risques de contamination par les nitrates. Ceci a consisté en l'application d'un modèle très complexe sur un site de suivi des nitrates au Québec. Par ailleurs nous avons étudié l'importance de la variabilité des concentrations observables au champ, reflétant celle des facteurs qui conditionnent le devenir de l'azote dans le sol. Finalement, nous avons identifié parmi ces processus, ceux qui sont les principaux responsables du devenir de l'azote, et ceux qui conditionnent la qualité des évaluations réalisées par modélisation.

Suite à ces travaux, nous avons établi que l'évaluation des risques de contamination des eaux souterraines par les nitrates résultant de l'épandage au champ de fumiers et lisiers était réalisable par le biais de l'utilisation de la modélisation mathématique. Pour ce faire, il était cependant nécessaire de disposer d'un outil de modélisation qui soit tout à la fois fiable et pratique. Cet outil devait donc rencontrer deux exigences principales: prendre en compte l'ensemble des processus dominant le devenir de l'azote, et être basé sur un ensemble de paramètres faciles à quantifier. Il a donc été décidé que le modèle prendrait en compte les phénomènes hydrologiques de ruissellement, infiltration, percolation et drainage artificiel. Les principaux processus du cycle de l'azote serait aussi intégrés dans l'outil. L'outil serait donc basé sur la représentation mathématique des processus intégrant les paramètres physiques, chimiques et biologiques qui s'y rapportent. Ces représentations mathématiques devraient cependant répondre au double critère de la fiabilité de représentation et d'évaluation, et sur l'accessibilité et la fiabilité des paramètres requis.

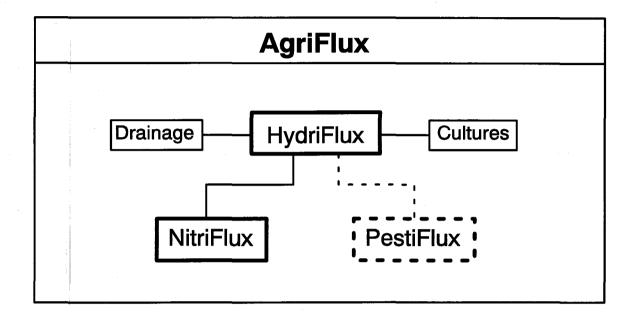
1.2 CONTRAINTES DE DEVELOPPEMENT

Les contraintes établies pour le développement du modèle d'évaluation sont résumées dans le tableau ci-après:

Caractéristique	Qualités ou contraintes visées
Modèle de gestion	facilité d'utilisation, accessibilité des para- mètres
Modèle à approche stochasti- que	variabilité spatiale et temporelle des para- mètres
Modèle vertical unidimensionnel compartimenté	bilan vertical jusqu'à la nappe, zonation du sol
Modèle hydrologique et biochi- mique	bilan des écoulements d'eau, cycle de l'azote
Pas de temps journalier	précision et reproductibilité des résultats, base journalière de l'information, temps de calcul raisonable
Modèle à structure modulaire	besoins spécifiques variables, adaptabilité future, souplesse d'utilisation

L'outil développé (AgriFlux) permet de simuler différentes situations de sol, de climat, de cultures et de fertilisation. Il appartient à l'utilisateur de définir adéquatement le scénario qu'il désire évaluer mathématiquement et d'établir les paramètres de simulation en conséquence. La structure modulaire du modèle AgriFlux est conçue pour présenter une grande flexibilité d'utilisation. Le module HydriFlux simule le transport d'eau dans le sol et peut être complété par les options drainage et cultures. Le module NitriFlux permet de représenter tout ce qui a trait aux transformations de l'azote dans le sol et peut être utilisé avec ou sans l'option culture. Cette structure modulaire permettra plus tard d'ajouter d'autres modules comme par exemple un module PestiFlux, simulant le devenir et les transformations des pesticides dans le sol. La Figure 1 illustre les liens entre les modules.

Figure 1 Modèle AgriFlux



Le présent rapport se divise en deux parties. La première traite des caractéristiques générales de l'outil développé alors que la seconde décrit en détail les processus utilisés pour représenter le transport de l'eau et des nitrates dans le sol. L'utilisateur du modèle peut consulter le manuel d'AgriFlux pour des informations complémentaires concernant le logiciel (installation, environnement, fonctionnement, gestion des fichiers, ...).

2. CARACTERISTIQUES GENERALES D'AGRIFLUX

2.1 CONCEPT D'APPROCHE STOCHASTIQUE DE SIMULATION

Considérant la grande variabilité spatiale et temporelle des paramètres et facteurs conditionant les processus hydrologiques et ceux du cycle de l'azote, une approche de modélisation stochastique doit être utilisée. Dans cette approche, les paramètres ne sont pas représentés par une valeur moyenne comme il en est le cas dans les modèles déterministes purs, mais par les caractéristiques de leur distribution spatiale ou temporelle. Ainsi, un paramètre suivant une distribution lognormale est caractérisé par la moyenne et l'écart type de la distribution de ses valeurs naturelles.

Parmi les différentes approches stochastiques de modélisation, la technique de Monte Carlo est la plus fréquemment utilisée. Elle consiste à réaliser un ensemble de simulations déterministes pures pour chacune desquelles les valeurs de paramètres sont tirées aléatoirement (tirage Monte Carlo) sur les distributions statistiques déclarées des valeurs naturelles de chaque paramètre. Cet ensemble de simulations est considéré être représentatif de l'ensemble des conditions locales statistiquement susceptibles d'être rencontrées dans l'espace étudié (ici le champ agricole). L'utilisation de cette technique repose sur deux hypothèses de travail.

Premièrement, la distribution de chaque paramètre est assumée aléatoire dans l'espace. Ceci nécessite donc que les paramètres ne soient pas autocorrélés à l'échelle du champ, c'est-à-dire que la valeur de l'un d'eux en un point du champ soit indépendante de sa valeur ailleurs dans le champ. L'application de la géostatistique sur plusieurs paramètres a montré qu'à l'échelle du champ, cette hypothèse est acceptable, puisque le champ et donc la distribution des différents paramètres sont considérés homogènes. Dans le cas d'hétérogénéïtés marquées, cette hypothèse n'est plus valable. Il est alors nécessaire de réaliser deux ou plusieurs ensembles indépendants de simulations.

La deuxième hypothèse porte sur l'indépendance des paramètres entre eux, c'est-à-dire sur leur non corrélation. Des travaux précédents de l'équipe (Banton et al. 1990) ont montré que cette corrélation à l'échelle d'un champ homogène est très faible, et que l'influence de sa non prise en compte dans un modèle stochastique (modèle Vulpest) est négligeable. La technique de Monte Carlo est donc applicable sans biais dans les résultats.

2.2 FICHIERS D'ENTREE

Les paramètres d'entrée requis sont regroupés dans différents fichiers spécifiques selon la nature de l'information qu'ils contiennent. Actuellement, il existe six fichiers concernant les pratiques culturales, les données climatiques, les paramètres de définition des simulations, les données sur les fertilisants et leurs caractéristiques, le profil de sol et finalement les paramètres nécessaires à la simulation du cycle de l'azote. Six fichiers par défaut sont fournis avec le logiciel et représentent le site de St-Augustin-de-Desmaures tel que défini par Banton et al (1992): CULTURE.CLT, CLIMAT.CLI, SIMULAT.SIM, FERTILIS.FER, SOL.SOL et AZOTE.AZO.

Par l'intermédiaire des menus d'entrée de données, l'utilisateur a la possibilité de créer de nouveaux fichiers de données, d'appeler des fichiers existants, d'en modifier les valeurs et de les sauver sous un autre nom (les extensions, c'est-à-dire les trois lettres après le point qui caractérisent les types de fichiers de données, ne peuvent être modifiées). Si des modifications sont apportées dans un fichier et que le nom n'est pas changé lors de la sauvegarde, le fichier original est alors détruit et remplacé par le fichier modifié. Tous les fichiers sont de type ASCII et sont bâtis de façon à avoir une seule information par ligne. L'avantage des fichiers ASCII est qu'ils peuvent être édités avec n'importe quel éditeur ou traitement de texte (ASCII) et être ensuite appelés par le modèle comme fichiers d'entrée. L'annexe illustre la disposition des données dans chacun des six fichiers.

2.3 FICHIERS DE RESULTATS

La démarche stochastique génère autant de résultats journaliers qu'il y a de simulations stochastiques réalisées. Ainsi par exemple, pour 1000 simulations stochastiques (voir section 2.4) et dans le cas du calcul des flux d'eau, le modèle calcule pour chaque jour 1000 flux d'eau parvenant à la nappe. Afin de limiter la taille des fichiers de résultats tout en conservant l'essentiel de l'information générée par les simulations, la moyenne et l'écart-type des 1000 flux d'eau journaliers sont calculés et enregistrés dans le fichier correspondant. Tous les résultats ayant trait aux différents flux journaliers d'eau et de nitrates ainsi qu'aux concentrations en nitrates sont traités de façon similaire. Ces résultats sont le ruissellement de l'eau (RUISSEAU.RES), le ruissellement des nitrates (RUISSNIT.RES), la concentration en nitrates de l'eau ruissellée (RUISCONC.RES), le drainage de l'eau (DRAINEAU.-RES), le drainage des nitrates (DRAINNIT.RES), la concentration en nitrates de l'eau drainée (DRAICONC.RES), le flux d'eau atteignant la nappe (LESSEAU.RES), le flux de nitrates atteignant la nappe (LESSNIT.RES) et la concentration en nitrates de l'eau qui atteint la nappe (LESSCONC.RES). A la fin de chaque simulation principale, la moyenne et l'écart-type des contenus des différents réservoirs (litière, fèces, humus, ammonium et nitrates) sont enregistrés dans le fichier BILAN.RES.

Comme dans le cas des fichiers d'entrée, le nom des fichiers de résultats peut être changé, mais l'extension .RES ne se modifie pas. Les fichiers sont de type ASCII et contiennent une information par ligne. Ils peuvent être consultés à l'aide de l'unité de sortie du modèle ou par l'intermédiaire de n'importe quel éditeur, chiffrier ou logiciels graphique ou statistique. L'annexe illustre la disposition des résultats dans un fichier type.

2.4 STRATEGIE DE SIMULATION

La démarche stochastique impose la nécessité d'effectuer un nombre élevé de simulations. Considérant la grandeur de la variabilité potentielle des différents paramètres, il est recommandé d'effectuer entre 100 et 1000 simulations. Plus le nombre est élevé, plus la représentation statistique des résultats sera réaliste compte tenu des données d'entrées, mais plus le temps nécessaire pour simuler un scénario sera élevé.

L'utilisateur doit identifier le début et la fin de la période de simulation. La première date peut se situer n'importe où dans l'année, mais il est fortement déconseillé de débuter une simulation au milieu de l'hiver ou pendant la saison de croissance végétale, puisque certains phénomènes ne seraient pas représentés dans leur intégralité (accumulation de neige, croissance des plantes, ...), et qu'ainsi des biais d'évaluation pourraient survenir. Le moment conseillé pour le début d'une simulation est l'automne ou la fin de l'hiver.

3. DESCRIPTION TECHNIQUE

Les paragraphes suivants décrivent les différents processus intervenant dans les phénomènes représentés, discutent des diverses alternatives disponibles pour la représentation mathématique des processus, expliquent et justifient brièvement l'option retenue, présentent en quelques graphiques les performances de la modélisation et résument les différents paramètres requis, les sources possibles d'information ainsi que certaines valeurs typiques pour ces paramètres.

3.1 LOIS STATISTIQUES (DISTRIBUTIONS)

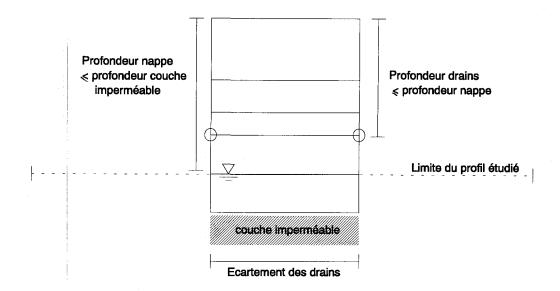
Comme mentionné précédemment, le modèle développé est de nature stochastique, c'est-à-dire qu'au lieu d'exiger une valeur ponctuelle pour chaque paramètre, il donne à l'utilisateur la possibilité de définir la distribution statistique auquel appartient chacun des paramètres requis. Au moment de l'exécution, le modèle effectue le nombre de simulations demandé en piochant aléatoirement, pour chaque simulation stochastique, dans la distribution de chaque paramètre. Les distributions pouvant être déclarées pour les données d'entrée sont les distributions discrète, uniforme, normale, lognormale ou Bêta.

3.2 PROFIL DE SOL

Le modèle AgriFlux simule le transport de l'eau et des contaminants dans la zone non saturée du sol. Il faut donc pour cela définir le profil de sol jusqu'à la nappe phréatique. La position déclarée de la nappe correspond à la plus grande profondeur atteinte par celle-ci pendant l'année. Il convient aussi d'identifier s'il existe une couche imperméable immédiatement sous-jacente à cette profondeur maximale de la nappe, et à travers laquelle la nappe ne peut s'écouler librement. Dans ce cas, il est considéré que les écoulements dans la zone non saturée n'alimentent pas de nappe profonde. Dans le cas contraire (fond perméable), l'écoulement n'est pas limité en profondeur et un flux de recharge de la nappe est calculé. Ces informations doivent être adéquatement fournies au modèle.

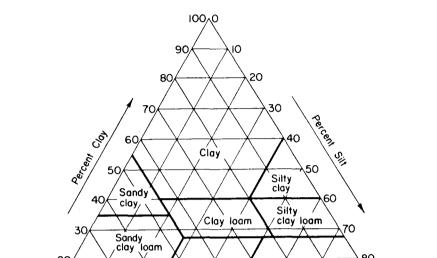
Le profil étudié doit être divisé en couches de sol physiquement homogènes. Pour chacune, il faut déterminer l'épaisseur, la conductivité hydraulique saturée, la composition sable-limon-argile, la porosité, la capacité au champ et le point de flétrissement. Ces paramètres devraient avoir fait l'objet d'une caractérisation sur le terrain, mais à défaut de disposer de toutes les données pour un site en particulier, certains d'entre eux peuvent être estimés à partir d'abaques ou de formules établies dans la littérature et utilisées dans d'autres modèles. Certains abaques et formules sont fournis dans ce rapport et dans le manuel d'usager d'AgriFlux. La Figure 2 illustre le schéma type d'un profil de sol tel que devant être déclaré par l'utilisateur.

Figure 2 Profil de sol type



Pour délimiter les couches homogènes, il est recommandé de se baser sur les horizons naturels du sol. Il peut cependant être nécessaire de définir plus de couches qu'il n'existe d'horizons (tel que deux (demi-)couches identiques pour un même horizon), comme par exemple pour placer des drains à la limite de deux couches (voir section 3.5.8). Evidemment, plus il y a de couches, plus les calculs sont proches de la réalité physique, mais plus le temps de calcul augmente.

A partir de la composition du sol en sable, limon et argile, la classe texturale peut être déterminée à l'aide de la Figure 3. A l'aide de cette texture, il est possible d'évaluer des valeurs approximatives de conductivité hydraulique, porosité, capacité au champ et point de flétrissement telles qu'indiquées au Tableau 3.



Silty loam

Figure 3 Classes texturales de sols (U.S. Soil Conservation Service)

La capacité au champ correspond à la teneur en eau du sol après que l'excédent d'eau ait été drainé et que le régime d'écoulement vers le bas soit devenu pratiquement nul. Pour la plupart des sols, cette teneur en eau correspond à une tension de 0.33 bar. Le point de flétrissement représente la teneur en eau en-deçà de laquelle les forces d'adsorption surpassent celles que la plante peut générer pour extraire l'eau nécessaire à sa croissance. On admet en général que cette teneur en eau correspond à une tension de 15 bars. Une régression permettant de calculer ces deux valeurs de teneurs en eau à partir de la texture du sol a été définie par Rawls et Brakensiek (1989) à partir de l'analyse de 1323 sols aux Etats-Unis.

theta(15) = 0.026 + 0.005 * %argile + 0.0158 * %m.o.theta(0.33) = 0.2391 - 0.0019 * %sable + 0.021 * %m.o. + 0.72 * theta(15)

theta(15) = teneur en eau au point de flétrissement theta(0.33) = teneur en eau à la capacité au champ %m.o. = contenu en matière organique

20

Sandy loam

60

50

Percent Sand

où nécessairement: porosité > théta(0.33) > théta(15)

Tableau 1 Propriétés hydrologiques des sols selon leur classe texturale (adapté de Rawls et Brakensiek 1989)

Texture	Porosité	Capacité au champs (eau à 0.33 bar)	Point de flé- trissement (à 15 bars)	Conduc. hydraul. (cm/h)
Sable	0.437 (0.063)	0.091 (0.073)	0.033 (0.026)	21.00
Sable loameux	0.437 (0.069)	0.125 (0.065)	0.055 (0.036)	6.11
Loam sableux	0.453 (0.102)	0.207 (0.081)	0.095 (0.064)	2.59
Loam	0.463 (0.088)	0.270 (0.075)	0.117 (0.048)	0.68
Loam silteux	0.501 (0.081)	0.330 (0.072)	0.133 (0.055)	1.32
Loam arg.sabl.	0.398 (0.066)	0.255 (0.069)	0.148 (0.063)	0.43
Loam argileux	0.464 (0.055)	0.318 (0.068)	0.197 (0.082)	0.23
Loam arg.silt.	0.471 (0.053)	0.366 (0.062)	0.208 (0.070)	0.15
Argile sableuse	0.430 (0.060)	0.339 (0.094)	0.239 (0.077)	0.12
Argile silteuse	0.479 (0.054)	0.387 (0.055)	0.250 (0.057)	0.09
Argile	0.475 (0.048)	0.396 (0.070)	0.272 (0.064)	0.06

Les paramètres requis par le modèle pour la définition du profil de sol sont les suivants:

Nom de la variable	Source	Distribution recommandée
Nombre de couches	usager	(ponctuelle obligatoirement)
Epaisseurs des couches (m)	usager	uniforme ou normale
Contenus sable-limon-argile (%)	usager	normale, c.v. 10%
Cond. hydr. saturées (m/jour)	usager (Tab. 1)	lognormale, c.v. 100%
Porosités (%)	usager (Tab. 1)	normale, c.v. 10%
Capacités au champ (%)	usager (Tab. 1)	normale, c.v. 10%
Points de flétrissement (%)	usager (Tab. 1)	normale, c.v. 10%

3.3 TEMPERATURE

3.3.1 Température du sol

La température du sol influence les vitesses de réactions biochimiques du cycle de l'azote. Il est donc nécessaire de connaître la température journalière (pas de temps utilisé pour les calculs) dans chaque couche de sol.

La température du sol peut être obtenue par simulation numérique du transfert de la chaleur (énergie) basée sur les principes de conduction et de convection thermiques, et sur la conservation de l'énergie. Ce type d'approche est utilisée par différents modèles de simulation comme le modèle SOIL (Jansson, 1991). Cette approche utilise des équations aux différences finies et requiert de ce fait un temps de calcul élevé. Par ailleurs, la discrétisation spatiale et temporelle nécessaire aux calculs doit être fine à très fine pour s'assurer de la précision des résultats.

Une alternative au calcul du transfert de chaleur dans le sol est de représenter l'évolution de la température aux différentes profondeurs du sol comme une fonction d'amortissement de la répartition sinusoïdale annuelle de la température de l'air (Richter, 1987). Cette relation amortit et déphase la fonction sinusoïdale selon les caractéristiques du sol suivant l'équation suivante:

```
T(z,t) = Tmoy - Tampl * e^{-z/z0} * cos(w * (t-tph) - z/z0)
```

```
Tmoy = température moyenne de l'air (°C) = somme (Tmoy.mens)/12

Tampl = amplitude annuelle des températures de l'air (°C) = (Tmax - Tmin)/2

z = profondeur au milieu de la couche (m)

z0 = profondeur d'amortissement (m)

t = temps (jour)

tph = déphasage du cycle (jour le plus froid de l'année)

w = fréquence du cosinus (1 an = 2*pi/365)
```

Les températures de l'air requises sont les 12 moyennes mensuelles pour la région étudiée. Le déphasage du cycle est le jour où la température est la plus froide dans l'année (début de la fonction sinusoïdale), habituellement vers la fin du mois de janvier au Québec. La profondeur d'amortissement, z0, est mathématiquement définie comme la profondeur à laquelle l'amplitude diminue dans une proportion de 1/e par rapport à la surface (Musy et Soutter, 1991):

La conductivité thermique représente la résistance d'un matériau à la propagation de la chaleur par conduction thermique, exprimant sa capacité à transmettre la chaleur d'un point à l'autre (Musy et Soutter, 1991). Ce paramètre étant rarement mesuré au champ, il est nécessaire de pouvoir l'estimer à partir d'informations limitées. Le modèle AgriFlux réalise lui-même cette estimation à partir de la formule empirique fournie par Horton et Chung (1991):

$$Kth = B1 + theta*B2 + theta^{0.5*}B3$$

où B1, B2 et B3 sont des coefficients qui varient selon la composition du sol.

La capacité thermique volumique est la capacité d'emmagasinement de chaleur d'un corps par unité de volume et de température (Musy et Soutter, 1991). Ce paramètre est lui aussi estimé automatiquement par le modèle à partir des caractéristiques du sol (Jansson, 1991):

theta = teneur en eau initiale du sol = capacité au champ Cth(sol) = 2X10⁶ J/m³/°C Cth(eau) = 4.18X10⁶ J/m³/°C

Pendant l'hiver au Québec, la couverture de neige agit comme un isolant sur le sol, diminuant l'influence des températures de l'air et empêchant le sol de geler en profondeur. La fonction sinusoïdale décrite plus haut, qui génère des températures du sol inférieures au point de congélation pendant la période hivernale, n'est donc pas adaptée pour cette saison. Une relation différente est utilisée pour la période de l'année durant laquelle il y a neige au sol. En admettant qu'il y a accumulation de neige dès le moment où la température de l'air passe sous 0°C, on peut alors appliquer la relation de Bolt et al (1966) développée pour représenter un changement soudain de température à une extrémité d'une colonne de sol à température homogène. Dans notre cas de figure, nous considérons comme température initiale celle de la couche de sol concernée au moment où la température de surface passe en dessous de 0°C. La température appliquée à l'extrémité supérieure du sol est alors 0°C, correspondant à la température de la neige à la surface du sol. La relation correspondante est:

$$(T - Ti) / (T0 - Ti) = erfc (z / (2 * (alphat * t)^{0.5})$$

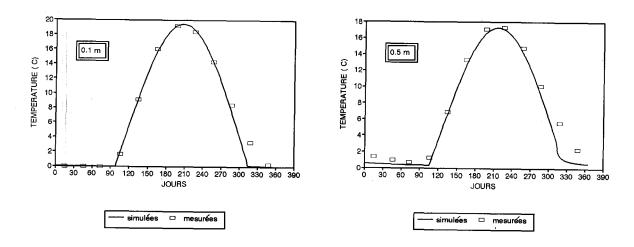
T = température du sol (°C)
Ti = température initiale du sol (°C)
T0 = température à la limite = 0°C
z = profondeur au milieu de la couche (m)

alphat = diffusivité thermique (conductivité thermique / capacité thermique, Kth/Cth) erfc = erreur fonction complémentaire (formule dans Abramovitz et Stegun, 1972)

Les deux fonctions n'étant pas continues entre elles, les températures journalières utilisées sont les plus élevées des deux températures calculées par chacune des équations.

Les Figures 4 et 5 comparent les températures du sol simulées pour les profondeurs de 0.1 et 0.5 m selon la démarche précédente avec les températures moyennes du sol mesurées aux mêmes profondeurs au site de St-Augustin-de-Desmaures (Environnement Canada, 1984). L'ajustement est considéré comme très satisfaisant, puisque les températures mesurées et calculées se comparent favorablement, et que les écarts maximaux observés entre les températures mesurées et simulées sont de 4°C.

Figures 4 et 5 Températures du sol à St-Augustin-de-Desmaures



Les paramètres requis spécifiquement pour la simulation des températures du sol sont les suivants:

Nom de la variable	Source ou valeurs recommandées
Températures moyennes mensuelles de l'air (°C)	usager
Jour de plus basse température de l'air (jour/mois)	20-25 janvier (au Québec)
Profondeur d'amortissement	calculée par le modèle
Conductivité thermique	calculée par le modèle (formule empirique)
Capacité thermique	calculée par le modèle (formule empirique)

3.3.2 Température de l'air

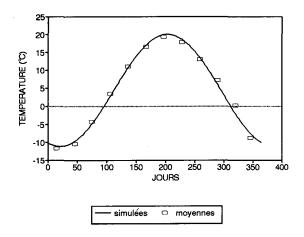
La température de l'air est nécessaire pour identifier les deux jours (automne et printemps) où la température passe par 0°C et pour effectuer le calcul de la fonte de neige (voir paragraphe 3.5.2). Puisque les températures moyennes mensuelles de l'air sont utilisées pour le calcul des températures du sol et puisque les deux méthodes doivent être compatibles, l'approche choisie pour simuler les températures de l'air est dérivée de l'équation utilisée pour les températures du sol:

$$T(z,t) = Tmoy - Tampl * sin(w * (t-tph))$$

La Figure 6 illustre les températures mensuelles moyennes de l'air mesurées et celles simulées pour le site de St-Augustin-de-Desmaures. De façon générale, l'ajustement est très satisfaisant, malgré les températures simulées légèrement inférieures aux températures mesurées pour les mois d'automne. Ce non ajustement d'automne peut être attribuable au phénomène de l'été des Indiens correspondant dans l'est du Canada à des températures justement plus élevées que les normales climatiques.

Les paramètres nécessaires au calcul des températures de l'air ont été définis dans la section précédente (3.3.1).

Figure 6 Températures de l'air à St-Augustin-de-Desmaures

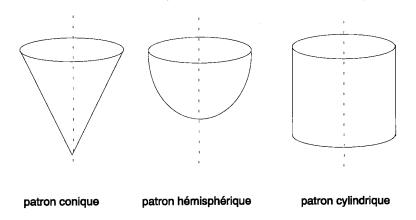


3.4 CROISSANCE DES RACINES

La croissance des racines est simulée lorsque l'option culture de HydriFlux est employée. L'utilisateur peut choisir de simuler une ou plusieurs cultures annuelles (ex. céréale), une culture pérenne (ex. fraisière) ou pérenne à coupes (ex. luzerne), dont il doit spécifier la succession sur la période de simulation.

Le prélèvement d'eau et d'azote par la plante est fonction de la densité de racines dans chaque couche. Il est donc nécessaire d'identifier le patron racinaire afin d'évaluer la fraction du prélèvement potentiel pour chaque couche. Le patron de densité racinaire dans le sol varie selon l'espèce cultivée. Dans la littérature, on reconnaît que la densité racinaire décroît à partir de la surface de façon exponentielle ou linéaire, ou qu'elle est constante pour tout le profil racinaire. La distribution exponentielle est considérée dans la littérature comme la plus fréquemment représentative du profil racinaire. Cette distribution est cependant difficile à définir pour les cultures, du fait que la courbe de densité correspondante est mathématiquement infinie, alors que le profil racinaire est fini (profondeur maximale). Dans AgriFlux, les profils racinaires sont définis selon une autre approche, en trois dimensions. Cette approche repose sur la démonstration que la distribution exponentielle provient en fait d'un patron racinaire conique, que la distribution linéaire résulte d'un patron racinaire hémisphérique (ou hémi-ellipsoïdal) et que la distribution uniforme est le résultat d'un patron racinaire cylindrique (Figure 7). Il appartient à l'utilisateur de spécifier le patron racinaire de chaque culture simulée.

Figure 7 Patrons racinaires types



Pour une culture annuelle, les racines subissent un cycle de croissance complet durant la saison végétative, c'est-à-dire que les racines croissent de zéro jusqu'au patron racinaire maximal en quelques mois, après lesquels les racines meurent et sont naturellement incorporées à la litière du sol. Toutefois, la croissance des racines n'est pas uniforme pendant la période estivale. Elle dépend de plusieurs facteurs dont la température, l'humidité du sol, la concentration en certains ions (aluminium, calcium), la compaction du sol et l'aération (Jones et al, 1991). La considération de ces facteurs limitatifs est relativement complexe et requiert plusieurs paramètres difficiles à obtenir. Afin de simplifier la représentation mathématique utilisée dans AgriFlux, la croissance racinaire s'effectue de façon constante (relation linéaire) entre l'émergence (profondeur des racines nulle) et la maturité de la plante (profondeur des racines maximale). Donc, à chaque jour, la densité de racines dans chaque couche est calculée selon un patron racinaire qui se rend jusqu'à la profondeur racinaire calculée pour la journée en question.

Dans le cas d'une culture pérenne considérée "mature", la profondeur racinaire varie peu durant une saison de culture. La densité de racines dans chaque couche est considérée constante tout au long de la période de croissance et correspond à un patron racinaire se rendant jusqu'à la profondeur maximale spécifiée par l'utilisateur. Les cultures associées (simultanées) ne peuvent être définies individuellement dans l'état actuel du modèle. On peut toutefois les représenter comme une seule culture équivalente à l'aide de ses caractéristiques résultantes (racines, besoins en eau et en azote).

Les paramètres requis spécifiquement pour l'évaluation de la croissance racinaire sont les suivants:

Nom de la variable	Source ou valeurs recommandées
Nombre de cultures successives	usager
Type de culture	(1) annuelle
	(2) pérenne
Patron racinaire	(1) conique
	(2) hémisphérique
	(3) cylindrique
Profondeur des racines à maturité (m)	usager

3.5 BILAN HYDRIQUE

Les processus décrits dans les paragraphes suivants font partie du module HydriFlux. Les options simulant le prélèvement d'eau par la plante et le drainage peuvent être activées lorsqu'elles sont pertinentes pour le scénario étudié.

3.5.1 Précipitations

Les précipitations constituent l'apport principal d'eau au sol et sont nécessaires pour les calculs des quantités d'eau qui s'infiltrent et ruissellent chaque jour.

L'approche classique d'établissement des données journalières de précipitations est de les demander à l'utilisateur pour toutes les années qu'il veut simuler. Cette approche est laborieuse pour l'utilisateur du fait du grand nombre de données à saisir. De plus, elle se heurte généralement à l'absence de données qu'il est alors nécessaire d'inventer ou d'extrapoler. Finalement, elle ne permet pas de prendre en compte le caractère aléatoire des précipitations et la variabilité interannuelle manifestée par des années plus sèches et des années plus humides. En ce sens, elle ne profite pas des avantages que présente la modélisation stochastique qui permet la prise en compte de la variabilité spatiale ou temporelle des paramètres.

Une autre façon d'obtenir les précipitations journalières consiste à les simuler à partir de la distribution connue des valeurs. Plusieurs types de distribution ont été testés pour les précipitations et sont abondament citées dans la littérature (normale, lognormale, exponentielle, gamma, logPearson, Pearson type III, Gamma généralisée, ...). Parmi celles-ci, la loi de distribution exponentielle se prête mieux à la modélisation, puisqu'elle ne nécessite qu'un seul paramètre, correspondant par ailleurs à l'inverse de la moyenne arithmétique des précipitations. Cette approche permet de générer un grand nombre de précipitations journalières à partir d'un nombre limité d'informations. Elle permet de générer aléatoirement des extrêmes statistiques secs ou humides. L'équation utilisée dans AgriFlux est la suivante:

 $F = 1 - e^{-lambda*x}$ (fonction de répartition)

X = -In (1 - F) / lambda (fonction de répartition inverse)

F = probabilité (cumulée, entre 0 et 1) de réalisation de l'événement X

X = événement de probabilité F

lambda = paramètre de la distribution exponentielle = 1 / précipitation moyenne

Cette approche nécessite l'hypothèse de la non auto-corrélation des précipitations. Ceci signifie que l'on puisse admettre que la valeur de la précipitation d'une journée donnée n'est pas reliée aux précipitations des journées précédentes. Cette contrainte peut être divisée en deux phénomènes à vérifier. Premièrement, on doit vérifier si le fait qu'une journée soit pluvieuse est relié ou conditionné à la réalisation de cet évènement dans les journées précédentes. Deuxièmement, on doit vérifier si l'intensité de la précipitation d'une journée est reliée ou conditionnée aux intensités des précipitations précédentes.

Afin de répondre à la première question, il est possible de calculer les probabilités conditionnelles d'occurence des évènements pluvieux ou sec, en fonction des conditions d'humidité antérieure (pluvieux ou sec). La méthode des chaînes de Markov permet de calculer ces probabilités. Cette méthode peut être utilisée inversement pour générer une suite de jours de pluie ou sans pluie, comme employée par Haan et al. (1976). La compilation des jours de précipitation pour la station de l'aéroport de Québec a permis de calculer les valeurs de probabilités conditionnelles suivantes:

Probabilité conditionnelle	qu'il pleuve	qu'il ne pleuve pas
s'il a plu la veille	0.63	0.37
s'il n'a pas plu la veille	0.43	0.57

Comme le montre les résultats obtenus, la probabilité d'occurence d'un évènement semble conditionnée par les occurences antérieures. Cependant, et malgré le fait qu'elle représente plus fidèlement les conditions réelles, cette méthode présente l'inconvénient majeur de nécessiter les valeurs de probabilités conditionnelles, lesquelles ne s'obtiennent qu'à partir de la compilation des événements passés. L'alternative retenue consiste donc à générer la suite de jours secs et pluvieux à partir d'un tirage aléatoire basé sur le nombre annuel moyen de jours de précipitations. Cette méthode purement aléatoire génère un nombre annuel de jours de précipitations suivant une distribution normale dont la moyenne correspond à la valeur du paramètre entré et dont l'écart-type est faible (c.v. = 5%) comme l'illustre la Figure 8.

Le phénomène même de saisonalité des précipitations invalide la seconde hypothèse portant sur l'indépendance des hauteurs de précipitation. Il est cependant possible de contourner ce fait. Pour cela, on norme ces hauteurs de précipitations en les divisant par la précipitation mensuelle. Ainsi, chaque précipitation peut être exprimée par la fraction de la précipitation mensuelle qu'elle représente. Ces hauteurs adimensionnelles ont été calculées pour les sites de Saint-Augustin (Figure 9). Comme le montrent les résultats, ces hauteurs adimensionnelles s'ajustent très bien à une loi de distribution exponentielle.

Figure 8 Nombre de jours de précipitations simulés à St-Augustin-de-Desmaures

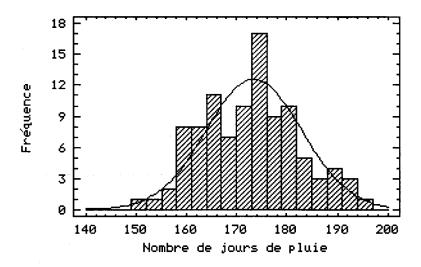
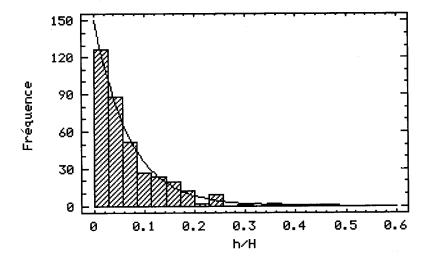


Figure 9 Distribution des hauteurs d'eau adimensionnelles simulées pour St-Augustin-de-Desmaures



L'algorithme de calcul, développé dans HydriFlux pour générer les précipitations journalières, consiste donc en trois étapes. Premièrement, une suite aléatoire de jours pluvieux est générée à partir du nombre annuel moyen de jours de pluie déclaré par l'utilisateur. Deuxièmement, pour les jours où il y a précipitation, un nombre est aléatoirement tiré entre 0 et 1 (F) puis utilisé par la fonction de densité de probabilité inverse pour calculer une hauteur d'eau adimensionnelle, c'est-à-dire une fraction de précipitation mensuelle (X). En troisièmement lieu, cette dernière valeur est multipliée par la précipitation moyenne mensuelle correspondante déclarée par l'utilisateur.

Cette approche ne nécessite ainsi que les 12 valeurs de précipitations moyennes mensuelles et le nombre de jours de précipitations par année. Les précipitations moyennes mensuelles sont les mêmes pour toute la durée d'une simulation, mais puisque le nombre de jours de précipitations et la suite de jours secs et pluvieux varient de façon aléatoire, les précipitations journalières sont différentes pour chaque année de simulation.

Les paramètres requis spécifiquement pour la simulation des précipitations sont les suivants:

Nom de la variable	Source ou valeurs recommandées
Précipitations moyennes mensuelles (mm)	usager
Nombre de jours de précipitations par an	usager

3.5.2 Fonte de la neige

Au Québec, la fonte de neige printanière constitue un apport d'eau important à la surface du sol. Au même titre que les précipitations, la fonte est à la base des calculs de ruissellement et d'infiltration. Durant la période de fonte, il est nécessaire de connaître pour chaque jour la hauteur d'eau rendue disponible.

La méthode la plus réaliste pour évaluer la fonte de la neige intègre les bilans énergétiques en tenant compte des radiations solaires, du vent, de la pluie et des échanges de chaleur à l'interface sol-neige pour suivre l'évolution du couvert nival (Gray, 1972). L'application de cette méthode requiert la température de l'air et plusieurs autres données difficiles à obtenir. L'approche par degrés-jours est une alternative plus simple à l'évaluation de la fonte, étant donné qu'elle utilise seulement la température de l'air comme facteur global représentant l'influence combinée des radiations, du vent, de la pluie et des échanges thermiques (Linsley et al, 1975). Cette approche a été utilisée dans de nombreux modèles hydrologiques, entre autres dans le modèle PRZM (Carsel et al., 1984). Elle est représentée par l'équation suivante.

Fonte = K * T

K = taux de fonte journalier (mm/°C/jour) T = température moyenne journalière de l'air (°C)

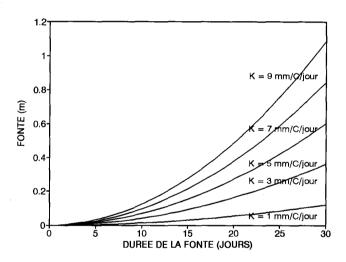
On admet que les précipitations s'accumulent sous forme de neige à partir du moment où la température de l'air passe sous zéro à l'automne et ce, jusqu'au jour où la température de l'air devient supérieure à zéro au printemps. A ce moment (début de la fonte), un facteur de réduction est appliqué à la quantité totale de précipitations tombées pendant la période hivernale, afin de représenter approximativement l'état printanier du couvert de neige (évaporation, balayage par le vent). Plus précisément, ce facteur représente la fraction d'équivalent d'eau des précipitations totales de l'hiver qui reste au champ lorsque la fonte débute. Il ne représente donc pas le phénomène de compaction de la neige qui ne modifie nullement le contenu en eau de la couche de neige. L'utilisateur doit donc être attentif à fournir une valeur adéquate. Le même taux de fonte et le même facteur de neige résiduelle sont utilisés pour toutes les années d'une simulation.

Le mûrissement du stock de neige a été ajouté à la méthode des degrés-jours afin de décaler le début de la fonte de quelques jours (Linsley et al, 1975). Les premiers jours de fonte servent à saturer le stock de neige. L'eau de fonte s'accumule ainsi dans la couche de neige jusqu'à ce que la rétention globale atteigne un certain pourcentage de l'équivalent en eau de la neige. Au-delà de ce seuil, l'eau percole librement vers le sol où elle peut s'infiltrer de la même façon

qu'une précipitation. Le pourcentage d'eau retenue dans le stock de neige est fixé dans HydriFlux à 10%, tel qu'utilisé par Brandt (1990).

La Figure 10, compilée à partir des résultats calculés pour différentes valeurs du taux de fonte permet à l'utilisateur de déterminer approximativement la valeur de ce paramètre. La méthode d'évaluation consiste à localiser sur l'axe vertical du graphique la hauteur d'eau équivalente de la neige qui reste au sol au début de la fonte et sur l'axe horizontal le nombre de jours nécessaire à la fonte de cette couche de neige. L'intersection de ces deux valeurs identifie la courbe correspondant au paramètre recherché. Cet abaque ne tenant pas compte de la rétention d'eau, il faut soustraire environ cinq jours à la durée de la fonte (axe horizontal). L'accroissement de la température printanière ayant servi à bâtir l'abaque correspond au passage des températures de 0°C à 8°C en 30 jours.

Figure 10 Abaque de fonte de la neige



Les paramètres spécifiques à la simulation de la fonte de la neige sont les suivants:

Nom de la variable	Source ou valeurs recommandées
Taux de fonte journalier (m/°C/jour)	0 - 0.009
Fraction des précipitations totales qui res- te au sol au début de la fonte	0.25 - 1

3.5.4 Infiltration et ruissellement

Le module de calcul de l'infiltration intègre les apports d'eau (précipitations et fonte de neige) et génère la quantité d'eau qui pénètre dans la première couche du profil de sol. Le calcul de l'infiltration fournit le volume d'eau qui s'infiltre dans le sol à chaque jour. Le volume d'eau qui ne peut pas s'infiltrer représente le ruissellement.

L'infiltration est souvent représentée comme l'apport total d'eau duquel est soustrait le ruissellement. Ce dernier peut être calculé à l'aide de la méthode des numéros de courbe (Soil Conservation Service, 1972), telle qu'utilisée dans différents modèles comme PRZM (Carsel et al., 1984). Cette approche a l'avantage d'intégrer des facteurs reliés aux caractéristiques du sol, aux pratiques agricoles et aux cultures. Elle s'applique relativement bien à l'échelle d'un bassin versant, mais comporte certaines limitations qui restreignent considérablement son utilisation à une échelle plus petite.

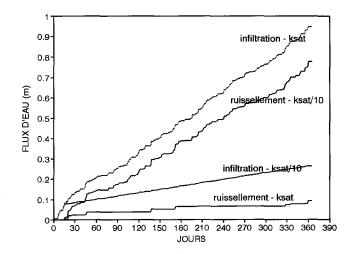
A cause de l'échelle parcellaire utilisée dans le présent modèle, une approche différente a été appliquée. Cette approche est basée sur le calcul de l'infiltration plutôt que sur celui du ruissellement. L'infiltration est calculée comme étant la valeur minimale entre le volume d'apport (précipitations et fonte) et le volume d'eau qui peut s'infiltrer dans la première couche. Le ruissellement a lieu lorsque la couche supérieure du profil de sol est saturée et ne peut donc plus recevoir d'eau. Si la pente du terrain est supérieure à 0, l'eau excédentaire est alors entièrement ruisselée chaque jour. A l'opposé, si la pente du terrain est nulle, l'eau excédentaire s'accumule à la surface et peut s'infiltrer le jour suivant si les teneurs en eau de la première couche le permettent. Une évaluation approximative de la pente du terrain est donc suffisante.

La Figure 11 illustre l'effet de la capacité d'infiltration de la couche supérieure, représentée par Ksat, sur le ruissellement. On observe qu'une réduction de Ksat d'un facteur 10 (passant d'une argile sableuse à une argile pure) augmente drastiquement le ruissellement, alors que l'infiltration diminue de façon marquée.

Les paramètres nécessaires à la simulation de l'infiltration et du ruissellement sont les suivants:

Nom de la variable	Source ou valeurs recommandées
Pente du terrain (%)	usager

Figure 11 Influence de la conductivité hydraulique sur le ruissellement et l'infiltration



3.5.5 Prélèvement d'eau par la plante

Le prélèvement d'eau par la plante est la quantité d'eau extraite par les racines pour satisfaire les besoins en eau de la plante. Ce prélèvement permet d'établir le bilan en eau de chaque couche de la zone racinaire à chaque jour.

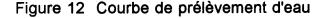
Il existe plusieurs approches pour représenter mathématiquement le prélèvement d'eau par la plante. La première est basée sur une analogie avec les systèmes électriques. La plante prélève l'eau proportionnellement à la somme des résistances qui limitent le transport de l'eau dans les tissus de la plante (résistance à l'interface sol-racine, résistance dans l'endoderme de la plante, dans le xylem, dans la feuille, ...) (Campbell, 1991). Le problème inhérent à cette méthode est la quantification des différentes résistances.

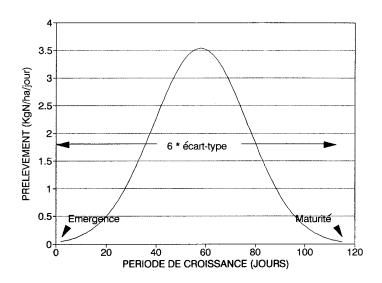
Une approche plus empirique considère les variations du prélèvement au cours de l'été. Au début de la saison estivale, le prélèvement d'eau par la plante est très faible, puis il augmente rapidement jusqu'à un maximum, au delà duquel le prélèvement baisse rapidement pour se terminer au moment de la maturité (ou de la coupe). La courbe de prélèvement résultante peut être assimilée à une cloche. Le modèle SOIL (Jansson, 1991) représente cette courbe comme la dérivée d'une courbe exponentielle. Malgré sa relative simplicité, cette représentation requiert l'ajustement de trois paramètres empiriques propres à chaque culture.

La méthode développée dans HydriFlux consiste à associer une courbe normale à la courbe de prélèvement (Figure 12). Les caractéristiques connues de la culture permettent de définir entièrement la courbe (limitée arbitrairement de part et d'autre de la valeur centrale à trois écarts-types). Dans le cas d'une culture annuelle, la courbe s'étale entre l'émergence et la maturité, tandis que dans le cas d'une culture pérenne, elle s'applique entre le début et la fin de la période de croissance. Pour une culture pérenne coupée, il y a autant de cloches successives qu'il y a de coupes durant l'été. La méthode de calcul considère ces bornes temporelles comme les valeurs à trois écarts-types, et le prélèvement annuel total d'eau comme l'intégrale sous la courbe.

L'équation suivante représente une approximation de la fonction de répartition d'une normale centrée-réduite:

```
phi(x) = (1 + exp(-1.5976 * z * (1 + 0.04417 * z<sup>2</sup>)))<sup>-1</sup>
z = (x - mu) / sigma
mu = (maturité - émergence) / 2
sigma = (maturité - émergence) / 6
```





Le prélèvement potentiel pour un jour "j" est calculé en multipliant la probabilité de se trouver entre le jour "j-1" et le jour "j" par le besoin total d'eau pour toute la période de croissance:

Prélpot = P(j) * BesoinE

P(j) = fraction du prélèvement potentiel du jour j = $P(j-1 \le X \le ji)$ = phi(j) - phi(j-1) Prélpot = prélèvement potentiel total qui a lieu au jour j (m) BesoinE = Besoin potentiel en eau pour toute la saison de croissance

Le prélèvement potentiel total ainsi calculé est extrait de chacune des couches de sol en proportion de la fraction de racines (section 3.4) qui s'y trouve.

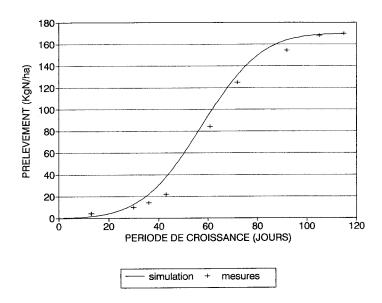
Prél(z) = Prélpot * fraction(z)

Prél(z) = prélèvement d'eau de la couche z fraction(z) = fraction de racines dans la couche z

La Figure 13 illustre la courbe de prélèvement cumulé pour une culture de maïs calculée à l'aide de HydriFlux, à laquelle sont superposées des mesures au champ (Olson et Kurtz, 1982). Malgré un accroissement un peu plus rapide des valeurs calculées, l'allure de la courbe représente adéquatement l'accroissement du

prélèvement.

Figure 13 Prélèvement d'eau calculé et mesuré pour le maïs



De plus, l'approche utilisée permet de gérer un déficit de prélèvement d'eau. Le déficit est accumulé durant sept jours consécutifs au-delà desquels, il est considéré que le manque d'eau du premier jour déficitaire ne peut plus être comblé par un apport subséquent. Ce déficit est accumulé pour toutes les couches et peut être comblé par un prélèvement d'eau dans n'importe quelle couche où l'eau est disponible. Finalement, l'effet du déficit d'eau sur la croissance de la plante n'est pas considéré.

Les paramètres spécifiques à la simulation du prélèvement d'eau par la plante sont les suivants:

Nom de la variable	Source ou valeurs recommandées
Date d'émergence (jour/mois/année)	usager
Date de maturité (jour/mois/année)	usager
Besoin potentiel en eau (m /ha/année)	usager
Nombre de coupes par année (pérenne)	usager
Date des coupes (jour/mois/année)	usage

3.5.6 Evaporation

L'évaporation est le transfert d'eau des couches superficielles du sol vers l'atmosphère géré par le gradient d'humidité. Ce processus est considéré dans le modèle comme intervenant après le prélèvement d'eau par la plante. Il est effectué en fonction du volume potentiel d'eau à évaporer du sol à chaque jour.

L'approche la plus répandue pour le calcul de l'évaporation est l'utilisation de l'équation de Penman (Gray, 1972). Cette équation établit en fait l'évaporation potentielle. Elle demande par ailleurs la quantification d'un grand nombre de paramètres, dont la plupart sont très difficiles à évaluer.

L'approche utilisée par HydriFlux consiste à soustraire du sol les volumes d'eau nécessaires pour satisfaire l'évaporation potentielle journalière jusqu'à une profondeur maximale déterminée par l'utilisateur. Elle est utilisée par de nombreux autres modèle, comme par exemple le modèle PRZM (Carsel et al., 1984). Dans HydriFlux, l'évaporation potentielle journalière est obtenue en divisant l'évaporation potentielle mensuelle des mois où il y a évaporation par le nombre de jours du mois. A chaque jour, un volume d'eau est soustrait de la première couche, correspondant au minimum entre l'évaporation potentielle journalière et l'eau disponible dans cette couche (la teneur en eau d'une couche ne peut pas descendre sous le point de flétrissement). Si l'évaporation potentielle n'a pu être comblée, l'eau est extraite de la couche suivante, et ainsi de suite jusqu'à la profondeur maximale d'évaporation. Les évaporations potentielles journalières sont les mêmes pour toutes les années simulées.

Afin de représenter adéquatement l'évapotranspiration (combinaison de l'évaporation du sol et du prélèvement par les plantes), lorsqu'il y a une culture en croissance l'évaporation potentielle est réduite à la différence entre l'évaporation calculée à partir des données entrées par l'utilisateur et le prélèvement potentiel par la plante. Dans le cas d'un résultat négatif, l'évaporation potentielle du sol est nulle.

Les paramètres spécifiques à la simulation de l'évaporation sont les suivants:

Nom de la variable	Source ou valeur recommandée
Evaporation potentielle moyenne mensuelle (m)	usager
Profondeur maximale d'évaporation (m)	0.10 - 0.15

3.5.8 Percolation

La percolation est le transport vertical de l'eau entre les couches du sol et vers la nappe phréatique. Les teneurs en eau et les flux d'eau journaliers entre les couches permettent le calcul du bilan hydrique et sont nécessaires à l'évaluation de la migration des nitrates.

Plusieurs approches au calcul du transport de l'eau existent. Parmi celles-ci, on retrouve l'approche déterministe, telles qu'utilisée par exemple dans le modèle SOIL (Jansson, 1991). Cette approche utilise le principe de continuité et la loi de Darcy appliquée au milieu non saturée pour simuler les équations du flux d'eau dans le sol en réponse à un gradient de tension d'eau. Une telle approche étant mathématiquement très complexe, son application peut présenter des problèmes d'instabilité et sa paramétrisation est ardue. Les modèles qui l'utilise sont plutôt destinés à un cadre de recherche fondamentale portant sur l'étude des divers processus et de leurs interactions, et sont donc généralement peu applicables dans le cadre d'une approche de gestion, où l'utilisation du modèle et l'acquisition des paramètres doivent être aisées.

A l'opposé, l'approche par bilans calcule les bilans d'eau journaliers à l'aide d'équations empiriques ou semi-empiriques. Les modèles qui l'utilise sont généralement beaucoup plus simples d'utilisation et requièrent très peu de données d'entrée. Par contre, ils ne sont vraiment applicables que pour évaluer les tendances à long terme, et pour des scénarios de conditions stables.

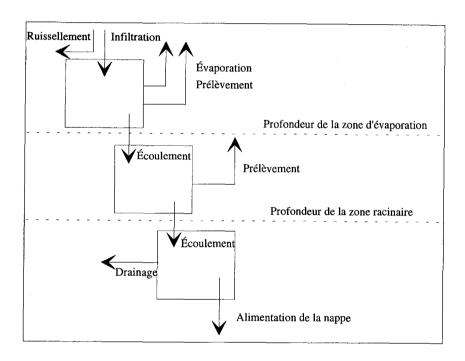
L'approche utilisée dans HydriFlux est de type conceptuel mécanistique. Elle est en effet basée sur la représentation des mécanismes (comme dans l'approche déterministe), mais cette approche est physiquement simplifiée de manière à être plus facilement modélisable mathématiquement. Elle est utilisée par différents modèles hydrologiques, comme le modèle PRZM (Carsel et al., 1984). Chaque couche de sol est définie comme un réservoir (voir Figure 14). L'eau peut s'accumuler dans une couche jusqu'à ce que tous les pores soient remplis (saturation). Si la teneur en eau dépasse la capacité au champ, l'excédent peut s'écouler par gravité vers la couche suivante. Sous la capacité au champ, l'eau ne s'écoule pas mais peut être prélevée par les plantes (dans la zone racinaire) ou évaporée (dans la zone d'évaporation). La teneur en eau d'une couche ne peut cependant descendre sous le point de flétrissement car en-deçà de celui-ci l'eau est retenue fortement au sol et non déplaçable par prélèvement ou évaporation.

L'écoulement d'une couche à la suivante s'effectue à la vitesse déterminée par la conductivité hydraulique (non saturée) de la première couche. Si le volume qui peut s'écouler dans une journée (i.e. quitter la première couche) excède le volume d'eau que peut recevoir la couche suivante (sans excéder sa porosité), c'est ce

dernier volume (le minimum des deux écoulements possibles) qui représente la percolation. La variation de la conductivité hydraulique (non saturée) en fonction de la teneur en eau est calculée à l'aide de la relation suivante (Bear, 1988):

K = Ksat * ((theta - capacité au champ) / (porosité - capacité au champs))3

Figure 14 Modèle par réservoirs



Tel que mentionné à la section 3.2, la position (minimale) de la nappe phréatique est la plus grande profondeur atteinte par la nappe pendant l'année. Le modèle gère la remontée de la nappe au-dessus de ce niveau. L'utilisateur doit spécifier si l'écoulement est non restreint en profondeur ou si au contraire la position de la nappe correspond à une couche imperméable. Dans le premier cas, l'eau qui arrive à cette profondeur s'écoule sans restriction dans la nappe. Dans le second cas, l'écoulement vertical est impossible et l'eau est drainée (s'ily a des drains agricoles) ou s'accumule dans le profil.

Les paramètres nécessaires à la simulation de la percolation sont les suivants:

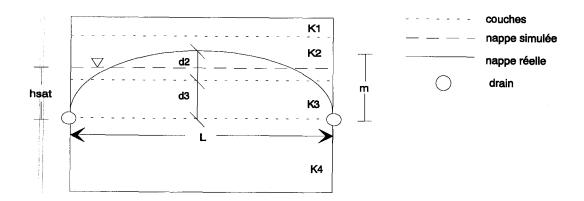
Nom de la variable	Source ou valeur recommandée
Profondeur maximale de la nappe (position minimale) (m)	usager
Présence d'une couche imperméable sous la nappe	oui/non

3.5.9 Drainage

Le drainage artificiel de l'eau est une composante importante du bilan hydrologique de nombreux sols agricoles. Le drainage agricole vise généralement à rabattre la nappe d'eau souterraine sous la zone racinaire afin d'allouer une aération suffisante pour les racines. Ceci s'effectue à l'aide d'un système de drains disposés à intervalles réguliers dans le sol. Ces drains, en évacuant l'eau, entraînent alors les nitrates et pesticides qui y sont dissous. Le calcul du drainage doit représenter ce rabattement de la nappe en calculant les flux d'eau et d'azote journaliers correspondant. Il doit aussi tenir compte de l'écoulement vers la nappe profonde d'une partie de l'eau percolant des couches supérieures.

La représentation mathématique du drainage souterrain est un problème complexe qui requiert normalement une représentation des écoulements en deux ou trois dimensions, afin de tenir compte entre autres des drains et de leur espacement. Pour être inclus dans un modèle en une dimension, la représentation du phénomène doit être physiquement simplifiée.

Figure 15 Schéma du drainage



L'approche développée dans HydriFlux considère que les écoulements de la zone saturée soumise à l'effet de drains parallèles confèrent à cette zone saturée la forme d'une demi-ellipse (Figure 15). Afin de conserver les volumes d'eau, la surface sous cette demi-ellipse doit alors être identique à celle résultant du produit de la hauteur saturée (au dessus des drains) calculée dans HydriFlux, par la distance entre les drains. La hauteur résultante de la demi-ellipse peut alors être calculée des équations suivantes:

$$Ae = pi * m * L/2 * 1/2$$

Ae = aire de la demi-ellipse (m²)

m = demi petit axe de la demi-ellipse (m)

L/2 = demi grand axe de la demi-ellipse ou demi-distance entre les drains (m)

Ar = aire du rectangle (m^2)

hsat = hauteur d'eau saturée au dessus des drains (m)

L = distance entre les drains (m)

Le flux d'eau évacué par les drains est alors calculé à l'aide d'une simplification de l'équation proposée par Bouwer et van Schilfgaarde (1963):

$$Q = (4 * Ke * m^2) / L^2$$

Q = flux (m/jour)

Ke = conductivité hydraulique latérale équivalente (m/jour)

La conductivité hydraulique latérale équivalente est calculée comme suit (Skaggs, 1991):

$$Ke = (K1 * d1 + K2 * d2 + K3 * d3 + ...) / (d1 + d2 + d3 + ...)$$

Ki = Conductivité hydraulique saturée de la couche i

di = épaisseur de la couche saturée i

Le volume d'eau drainé (Q) est soustrait des couches au dessus des drains en partant de la couche saturée supérieure et en descendant jusqu'à la profondeur des drains.

Les paramètres spécifiques à la simulation du drainage sont les suivants:

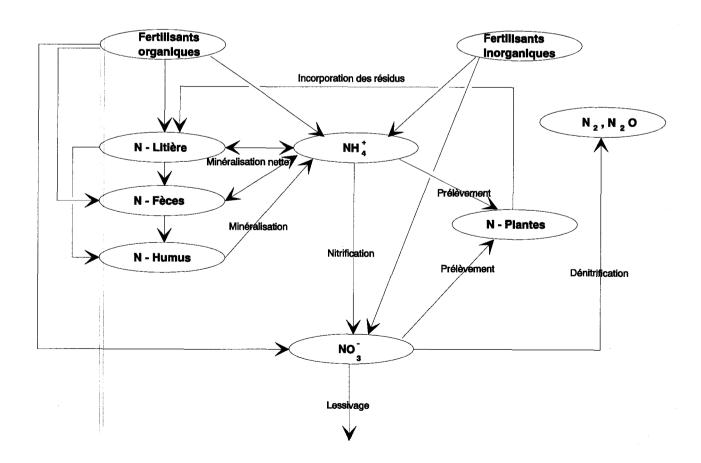
Nom de la variable	Source ou valeur recommandée
Profondeur des drains (m)	1 - 2
Espacement entre les drains (m)	15 - 20

3.6 CYCLE DE L'AZOTE

Le cycle de l'azote est simulé lorsque le module NitriFlux est activé. La représentation générale du cycle de l'azote adoptée dans ce modèle est inspirée en partie de celle adoptée par la plupart des modèles du cycle de l'azote, dont le modèle SOILN (Johnsson et al, 1987).

Dans chaque couche, l'azote est présent dans six réservoirs. L'azote organique se retrouve dans les réservoirs Litière (résidus végétaux à décomposition rapide), Fèces (azote d'origine animale à décomposition rapide) et Humus (résidus végétaux à décomposition lente). Les deux premiers réservoirs sont doublés d'un réservoir de carbone qui gère la minéralisation nette. L'azote inorganique se retrouve dans les réservoirs Ammonium (NH4⁺) et Nitrates (NO3⁻). Le sixième réservoir est le réservoir Plantes. Il y a échanges d'azote entre les différents réservoirs par l'intermédiaire des processus biochimiques du cycle de l'azote. Les nitrates (la seule forme mobile de l'azote) migrent d'une couche à l'autre en fonction de la percolation car ils sont en solution dans l'eau. La Figure 16 illustre le cycle de l'azote tel que représenté dans le modèle.

Figure 16 Cycle de l'azote



3.6.1 Conditions initiales

Au début d'une simulation, il est nécessaire d'identifier les contenus en carbone et en azote des différents réservoirs. Ces valeurs sont souvent mesurées au champ au début du printemps, mais si elles sont inconnues, elles peuvent être évaluées approximativement à partir de teneurs moyennes en C et N des années précédentes. Au cours des années que dure une simulation, les contenus en C et N varient pour tendre vers un "état permanent" (i.e. des entrées et sorties de C et N à peu près constantes pour un site donné). Donc, plus une simulation est longue, plus l'influence des conditions initiales diminue.

Au Québec, l'automne et l'hiver permettent généralement une décomposition substantielle du carbone et de l'azote des réservoirs Litière et Fèces. Si la simulation débute au printemps (avant fertilisation et semailles), il est plausible de poser à zéro les contenus en C et N des réservoirs Litière et Fèces. Ceux-ci seront augmentés au cours de la première année par l'intermédiaire des fertilisations et de l'incorporation des résidus. A cette période de l'année, on peut mettre tout l'azote organique mesuré au champ dans le réservoir Humus qui contient l'azote décomposé et qui se minéralise très lentement. S'il est connu, le reliquat d'azote inorganique (NO3⁺ et NH4⁻) doit aussi être inclus dans les réservoirs correspondants. Si le reliquat est inconnu, on peut supposer que tout l'ammonium a été nitrifié et que tous les nitrates ont été lessivés à l'automne et ainsi poser ces contenus à zéro.

Les paramètres requis pour représenter les conditions initiales sont les suivants:

Nom de la variable	Source ou valeur recommandée
Contenus initiaux en C du réservoir Litière	usager
Contenus initiaux en N du réservoir Litière	usager
Contenus initiaux en C du réservoir Fèces	usager
Contenus initiaux en N du réservoir Fèces	usager
Contenus initiaux en N du réservoir Humus	usager
Contenus initiaux en N du réservoir Ammonium	usager
Contenus initiaux en N du réservoir Nitrates	usager

3.6.1 Amendements

Les amendements sont les apports organiques (fumiers, lisiers et résidus de récolte) et inorganiques incorporés aux différents réservoirs d'azote du sol. L'azote atmosphérique incorporé via les précipitations n'est pas considéré à cause de son influence très faible sur les bilans en azote du sol au Québec (Larocque et Banton, 1993). L'utilisateur désireux d'en tenir compte pourra les intégrer sous forme fractionnée comme fertilisant inorganique.

Les amendements peuvent être appliqués en plusieurs doses au cours de l'année, toutes les combinaisons de fertilisants étant permises. Pour chaque amendement, l'utilisateur doit identifier la date d'application mais le modèle peut déplacer l'application afin qu'elle coïncide avec une période relativement sèche: ceci permet de représenter les conditions réelles d'épandage qui doivent entre autres permettre la circulation de la machinerie au champ.

Les apports de fumiers sont composés d'une partie de litière (paille ou autre substrat utilisé à l'étable), d'une partie de fèces (déjections animales) et d'une partie sous forme d'azote inorganique (ammonium et nitrates), chacune étant incorporée au réservoir correspondant. Pour chaque application, l'utilisateur doit identifier la composition du fumier utilisé. Il doit aussi spécifier si l'apport est incorporé au sol et à quelle profondeur.

Les apports de lisiers sont composés d'une très grande proportion d'eau, laquelle est alors incorporée au sol au même titre qu'une pluie. La fraction solide se divise en une partie de fèces et une partie d'azote inorganique (ammonium et nitrates), chacune incorporée au réservoir correspondant. Comme pour le fumier, il appartient à l'utilisateur de définir la composition et la quantité de lisier ainsi que son mode d'application.

L'utilisateur doit identifier la fraction de l'azote total prélevé par la plante exportée par la récolte et la fraction demeurant à la surface du sol comme résidus de récolte. Ces fractions permettent d'établir la partie de l'azote total prélevé par la plante qui demeure dans le sol sous forme de racines au moment de la récolte. Les racines sont incorporées au réservoir Litière de chaque couche proportionnellement à la fraction de racines (section 3.4) qui y est présente à la fin de la période de croissance. La fraction d'azote demeurant sous forme de résidus à la surface est incorporée au réservoir Litière au moment du labour. Il est donc nécessaire de définir une date ainsi qu'une profondeur de labour afin d'incorporer les résidus de récolte à la matière organique du sol. Il est à noter que, dans la présente version (1.0) de NitriFlux, le travail du sol n'a pas d'influence sur l'infiltration ou l'activité biochimique du sol, et que le labour d'incorporation des résidus de récolte sert uniquement à la prise en compte de ces derniers.

Les engrais inorganiques sont généralement composés d'une partie ammoniacale (NH4⁺) et d'une partie nitrique (NO3⁻). L'utilisateur doit identifier la quantité totale appliquée de chaque forme. Une constante de dissolution est aussi requise afin de simuler la dissolution graduelle intervenant lorsque le fertilisant est appliqué sous forme de granules. Cette constante permet de fractionner l'apport en doses constantes étalées sur plusieurs jours.

Les paramètres requis spécifiquement pour la simulation des amendements sont les suivants:

Nom de la variable	Source ou valeur recommandée
Nombre d'épandage(s)	usager
Nature du fertilisant (organique, inorganique)	usager
Date d'épandage (jour/mois/année)	usager
Profondeur d'incorporation (m)	0 - 0.25
Apport d'eau (lisier) (m³/ha)	usager
Apport d'N par la litière (fumier) (kgN/ha)	usager
Apport d'N par les fèces (fumier et lisier) (kgN/ha)	usager
Apport d'N sous forme d'ammonium (kgN-NH4 ⁺ /ha)	usager
Apports d'N sous forme de nitrates (kg N-NO3 ⁻ /ha)	usager
Constante de dissolution de l'engrais inorganique (1/j)	0.05 - 0.5
Fraction d'azote récolté	0.3 - 0.6
Fraction d'azote sous forme de résidus	0.05 - 0.3
Rapport C/N des racines	20 - 30
Rapport C/N des résidus	20 - 100
Nombre de labour (incorporation des résidus)	usager (0 ou 1)
Date de labour (jour/mois/année)	usager
Profondeur de labour (m)	0.05 - 0.3

3.6.2 Pertes d'azote par ruissellement

La perte d'azote par ruissellement est un phénomène relativement complexe dans la réalité, représenté dans le modèle de façon simplifiée. Le ruissellement d'azote a lieu lorsque la teneur en eau de la couche superficielle du sol ne peut permettre l'infiltration de toute l'eau précipitée, que la pente est non-nulle.

Lorsqu'il y a ruissellement d'azote au champ, différentes formes d'azote migrent avec l'eau ruisselée. L'azote organique et l'ammonium, qui ont tendance à s'adsorber aux particules de sol, ne peuvent être transportés qu'avec les particules érodés, alors que les nitrates migrent sous forme dissoute dans l'eau. Dans la présente version (1.0) du modèle, l'érosion n'étant pas simulée, seuls les nitrates sont considérés transportés par le ruissellement. La quantité exportée correspond à la fraction ruisselée du réservoir Nitrates des quelques centimètres (5 cm) supérieurs du profil de sol.

Les paramètres nécessaires au ruissellement d'azote ont été définis dans le paragraphe sur le ruissellement d'eau (section 3.5.4).

3.6.3 Facteurs abiotiques

Un certain nombre de facteurs influencent l'activité microbiologique à la base des réactions biochimiques du cycle de l'azote (humidité, température, pH, présence de certains ions, ...). Dans NitriFlux, seuls les deux principaux facteurs sont pris en compte, ceux d'humidité et de température. Ils sont nommés "facteurs abiotiques" du fait de leur indépendance de l'activité microbienne du sol, et sont représentés sous la forme d'un facteur multipliant chacune des constantes de réaction. Les facteurs abiotiques sont calculés de façon journalière afin de représenter les variation de conditions d'humidité et de température du sol.

Le facteur abiotique tenant compte de la teneur en eau du sol, prend deux formes selon que la réaction a lieu en présence d'oxygène (processus aérobie tel que minéralisation nette et nitrification) ou en absence d'oxygène c'est-à-dire à teneurs en eau élevées (processus anaérobie tel que dénitrification). Dans le cas d'un processus aérobie, Stanford et Epstein (1974) ont montré que l'humidité (théta) optimale est proche de la capacité au champ (CC) et que la constante de vitesse de la réaction décroît linéairement de part et d'autre de cet optimum. Le facteur abiotique de correction de la vitesse de réaction est donné par les rapports suivants (Prat, 1982):

```
f.a.a.= théta/CC, pour théta < CC f.a.a.= CC/théta, pour théta > CC
```

f.a.a.= facteur abiotique aérobie CC = capacité au champ du sol théta = humidité du sol

Dans le cas d'un processus anaérobie, l'activité microbienne a uniquement lieu lorsque les teneurs en eau sont proches de la saturation. La dénitrification est ainsi reconnue comme débutant à des teneurs en eau voisines de la capacité au champ et atteignant son optimum à saturation. La représentation adoptée pour les deux facteurs est illustrée à la Figure 17 (Godwin et Jones, 1991):

Le facteur abiotique représentant l'influence de la température est le même pour les processus aérobie et anaérobie. La forme retenue est une exponentielle de la forme Q10 tel qu'illustré à la Figure 18.

```
f.a.t.= Q10 ^ ((t - tbase)/10)
```

f.a.t.= facteur abiotique température Q10 = facteur multiplicatif de la vitesse pour une augmentation de température de 10°C t = température du sol (C) tbase = température de référence à laquelle le f.a.t. vaut 1 (20°C)

Les paramètres requis pour simuler les facteurs abiotiques ont été définis lors de la caractérisation du profil de sol (section 3.2).

Figure 17 Facteurs abiotiques teneur en eau

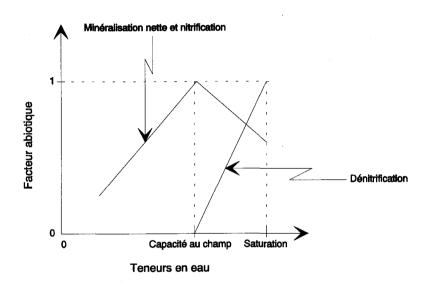
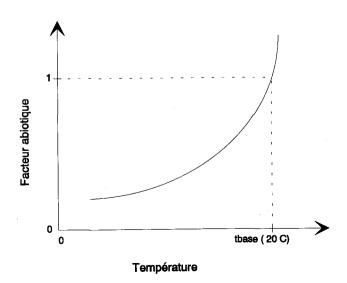


Figure 18 Facteur abiotique température



3.6.3 Minéralisation nette

La minéralisation nette est la somme de deux phénomènes agissant en sens opposé, la minéralisation et l'immobilisation, l'importance de chacun étant déterminée par le rapport C/N du sol. La minéralisation est la transformation de l'azote organique en azote minéral par des bactéries aérobies. L'immobilisation est la transformation de l'azote inorganique (principalement sous la forme d'ammonium, mais parfois sous la forme de nitrates) à la forme organique par d'autres bactéries aussi aérobies. La minéralisation excédant généralement l'immobilisation, la résultante des deux processus est nommée minéralisation nette.

Différentes représentations mathématiques de la minéralisation nette existent dans la littérature, les différences ayant principalement trait à l'ordre de la réaction et au nombre de réservoirs qui composent la matière organique du sol. La représentation retenue est similaire à celle utilisée dans le modèle SOILN (Johnsson et al., 1987): une réaction d'ordre 1, et 3 réservoirs contenant la matière organique. Le lecteur peut se reférer à l'article de Johnsson et al (1987) pour une description exhaustive des équations utilisées.

Il est à noter que la valeur utilisée pour chacune des constantes de réaction (dégradation de la litière, des fèces et de l'humus) doit avoir été déterminée dans des conditions optimales de teneur en eau (capacité au champ) et de température (20°C). Les facteurs abiotiques ajusteront les constantes de réaction selon les variations d'humidité et de température du sol.

Les paramètres requis spécifiquement pour la simulation de la minéralisation nette sont les suivants:

Nom de la variable	Valeur recommandée
Constante de dégradation de la litière (1/jour)	0.0001 - 0.1
Constante de dégradation des fèces (1/jour)	0.0001 - 0.1
Efficacité de la syntèse microbienne de la litière	0.2 - 0.7
Efficacité de la synthèse microbienne des fèces	0.2 - 0.7
Fraction de la litière passant à l'humus	0.1 - 0.9
Fraction des fèces passant à l'humus	0.1 - 0.9
Rapport C/N du sol	5 - 15
Constante de minéralisation de l'humus (1/jour)	1E-5 - 20E-5

3.6.4 Nitrification

La nitrification est le processus par lequel les ions ammonium sont oxydés en ions nitrates. Le processus est principalement réalisé par des bactéries aérobies.

La nitrification est représentée de différentes façons dans la littérature, les variantes provenant principalement de l'ordre de réaction privilégié. Dans AgriFlux, la réaction est d'ordre 1, telle que le plus généralement utilisée, comme par exemple dans le modèle SOILN (Johnsson et al., 1987):

$$N-NH4==>N-NO3(z) = Knit * f.a.a. * f.a.t. * (N-NH4(z) - N-NO3(z)/rapp)$$

N-NH4==>N-NO3 (z) = quantité d'azote nitrifié dans la couche z Knit = constante de nitrification (1/jour) N-NH4(z) = ammonium présent dans la couche z N-NO3(z) = nitrates présents dans la couche z rapp = rapport Nitrates/Ammonium du sol

Comme pour la minéralisation nette, la constante de nitrification utilisée doit correspondre aux conditions optimales de teneur en eau et de température.

Les paramètres requis spécifiquement pour la simulation de la nitrification sont les suivants:

Nom de la variable	Valeur recommandée
Constante de nitrification (1/jour)	0.01 - 1
Rapport Nitrates/Ammonium du sol	1 - 15

3.6.5 Prélèvement d'azote

Le prélèvement d'azote est la quantité d'azote extraite par les racines pour satisfaire les besoins en azote de la plante.

Tout comme dans le cas du prélèvement d'eau par la plante (section 3.5.5), il existe plusieurs approches pour simuler ce processus. Puisque l'azote est prélevé en solution dans l'eau, l'approche développée dans NitriFlux est similaire à celle développée dans HydriFlux pour le prélèvement d'eau (assimilation de la courbe de prélèvement à une courbe normale).

Puisque la plante prélève à la fois l'azote sous forme d'ammonium et de nitrates, le prélèvement s'effectue selon la disponibilité de chacun, tout en respectant la fraction d'azote inorganique disponible pour le prélèvement et la fraction de racines dans chaque couche (section 3.4):

Prélèvement = min (besoin potentiel, quantité disponible)

besoin potentiel pourvu par NO3 = P(j) * fraction(z) * BesoinN * NO3/(NO3+NH4) besoin potentiel pourvu par NH4 = P(j) * fraction(z) * BesoinN * NH4/(NO3+NH4)

P(j) = fraction du prélèvement annuel ayant lieu le jour j fraction(z) = fraction de racines dans la couche z BesoinN = besoin potentiel total en azote

Tout comme pour le prélèvement d'eau, un déficit d'azote peut aussi être accumulé pendant 7 jours (section 3.5.5).

Les paramètres requis spécifiquement pour la simulation du prélèvement d'azote par la plante sont les suivants:

Nom de la variable	Valeur recommandée
Fraction d'azote inorganique disponible pour le prélèvement et l'immobilisation	0.05 - 0.12

3.6.6 Dénitrification

La dénitrification est la voie principale par laquelle l'azote passe du sol à l'atmosphère. La dénitrification biologique est la réduction des nitrates par des bactéries anaérobies.

La dénitrification est un processus extrêmement complexe et jusqu'à date très peu étudié. Pour cette raison, les représentations utilisées dans les différents modèles sont extrêmement variables. L'approche préconisée dans NitriFlux est une cinétique de type Michaelis-Menten, telle qu'utilisée dans le modèle SOILN (Johnsson et al., 1987):

N-NO3==>N2 (z) = Kdenit * f.a.an. * f.a.t. * (NO3/(NO3 + Cdemi)

N-NO3==>N2 (z) = quantité d'azote dénitrifiée dans la couche z

Kdenit = constante de dénitrification (gN/m2/jour)

f.a.an. = facteur abiotique anaérobie

Cdemi = constante de demi-saturation (mgN/l)

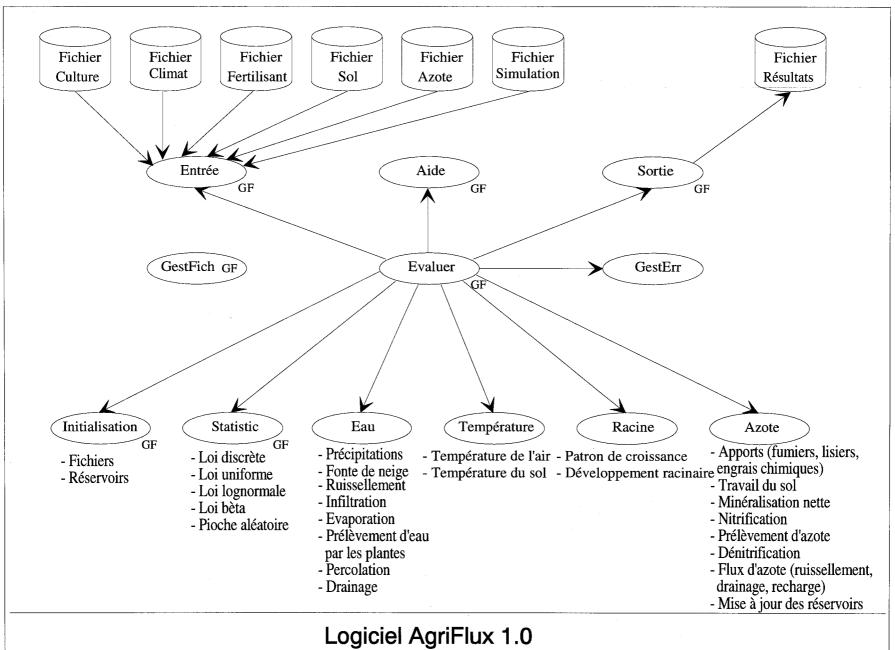
La constante de dénitrification doit correspondre à une teneur en eau à saturation et à une température de 20°C.

Les paramètres requis spécifiquement pour la simulation de la dénitrification sont les suivants:

Nom de la variable	Valeur recommandée
Constante de dénitrification (gN/m²/jour)	0.04 - 0.2
Constante de demi-saturation pour la dénitrifica- tion (mg N/I)	5 - 15

3.6.7 Flux d'azote

Les nitrates constituent la seule forme de l'azote suffisamment soluble dans l'eau pour migrer avec celle-ci. Chaque jour, une concentration en nitrates est calculée dans chaque couche en divisant l'azote du réservoir Nitrates par l'eau contenue dans la couche. A chaque flux d'eau (ruissellement, drainage et lessivage) est ensuite associé un flux d'azote directement proportionnel à la concentration en nitrates dans l'eau de la couche concernée.



CONCLUSION

Le schéma global du logiciel AgriFlux (version 1.0) est représenté à la Figure 19. Ce schéma fait ressortir les différentes composantes du logiciel traitant des flux et bilans d'eau et d'azote dans le sol. L'actuelle version d'AgriFlux (1.0) comporte donc les modules HydriFlux (1.0) et NitriFlux (1.0).

La structure modulaire d'AgriFlux est constituée de manière à pouvoir aisément recevoir des améliorations et de nouveaux modules. Nous prévoyons ainsi la mise à jour des modules et de l'outil en fonction de l'avancée des connaissances. Deux modules sont déjà envisagés, PestiFlux qui tiendra compte du devenir des pesticides dans le sol et les eaux, et le module PhosFlux qui portera sur le devenir du phosphore. Il pourra en être ainsi pour d'autres nouveaux modules portant sur le potassium, sur l'érosion, etc. Des améliorations de la version actuelle (1.0) d'AgriFlux sont déjà envisagées. Ces améliorations porteront sur les modules HydriFlux (1.0) et NitriFlux (1.0). Ces améliorations qui devraient faire l'objet des nouvelles versions de ces modules, sont:

Module HydriFlux:

- influence du travail du sol sur l'infiltration et le ruissellement
- prise en compte de la capillarité
- calcul du ruissellement en fonction de la pente du terrain
- possibilité d'entrer les valeurs initiales de contenus en eau lorsque connues

Sous-module Racine:

- croissance racinaire non-linéaire (représentation par une double exponentielle)
- gestion du déficit en eau (éventuellement en azote) pour la croissance des plants

Sous-module Température:

- amélioration du calcul de la température du sol (solution continue)

Module IrriFlux (nouveau module très relié à HydriFlux):

- gestion de l'irrigation de surface en tenant compte des périodes de déficit en eau
- irrigation souterraine versus drainage contrôlé (rabattement de la nappe)

Module NitriFlux:

- influence du travail du sol sur le cycle de l'azote (processus aérobie/anaérobie)
- pertes d'N sous forme adsorbée avec l'érosion-ruissellement

Le logiciel AgriFlux est accompagné d'un manuel d'usager très complet permettant de le faire fonctionner sans difficulté. Développé en langage C, le logiciel possède une interface usager très conviviale, facilitant la saisie des données, le choix des options et l'édition des résultats et graphiques.

Le Logiciel AgriFlux peut être obtenu auprès de la personne indiquée ci-après. Un montant est exigé pour l'envoi du logiciel contribuant aux frais de reproduction (disquettes, manuel d'usager, documents). Ces frais permettent aussi d'envoyer des informations concernant les nouvelles améliorations et versions du logiciel au fur et à mesure de leur disponibilité.

Pour tout contact:

Olivier Banton, professeur INRS-Eau, Université du Québec CP 7500, Sainte Foy, Québec G1V 4C7 Canada

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abramovitz, M. et I.A. Stegun. 1972. Handbook of mathematical functions. Ed. M. Abramovitz et I.A. Stegun. Dover publications. New York, NY.

Baes, C.F. et R.D. Sharp. 1983. A proposal for estimation of soil leaching constants for use in assessment models. J. Env. Qual. 12:17-28.

Banton, O., Chapdelaine, M.C., Larocque, M., Trépanier, L. et J.P. Villeneuve. 1992. Evaluation des pertes en composés azotés dans les eaux souterraines lors de l'épandage des fumiers et lisiers. Développement d'un outil d'évaluation. Etablissement des hypothèses (Rapport d'étape No 2). Rapport scientifique INRS-Eau-349. INRS-Eau, Sainte-Foy, Québec.

Banton, O., Lafrance, P. Camara, O. et J.P. Villeneuve. 1991. Evaluation des pertes en composés azotés dans les eaux souterraines lors de l'épandage des fumiers et lisiers. Développement d'un outil d'évaluation. Revue bibliographique (Rapport d'étape No 1). Rapport scientifique INRS-Eau-309. INRS-Eau, Sainte-Foy, Québec.

Banton, O., P. Lafrance, R. Martel et J.-P. Villeneuve. 1992. Planning of soil-pore water sampling campaigns using pesticide transport modeling. Ground Water Monit. Rev. 12(3):195-202.

Banton, O., Larocque, M. et F. Surateau. 1993. Agriflux (1.0), un logiciel d'évaluation des flux de contaminants d'origine agricole. Modules HydriFlux (1.0) et NitriFlux (1.0). Manuel d'usager. Rapport scientifique INRS-Eau-380. INRS-Eau, Sainte-Foy, Québec.

Bear, J. 1988. Dynamics of fluids in porous media. Dover publications, Inc. New York, NY.

Bolt, G.M., A.R.D. Janse et F.F.R. Koenigs. 1966. Basic elements of soil chemistry and soil physics II: Soil physics. Wageningen.

Bouwer, H. et van Schilfgaarde. 1963. Simplified method of predicting fall of water table in drained land. Trans. ASAE. 6(4):288-291.

Brandt, M. 1990. Simulation of runoff and nitrate transport from mixed basins in Sweden. Nordic Hydrology, 21:13-34.

Campbell, G.S. 1991. Simulation of water uptake by plant roots. Dans: Modeling plant and soil systems. Ed. J. Hanks et J.T. Ritchie. ASA, CSSA et SSSA. Madison, WI.

Carsel, R.F., C.N. Smith, L.A. Mulkey, J.D. Dean et P. Jowise. 1984. Users manual for the pesticide root zone model (PRZM). U.S. Environmental protection agency. Athens, GA.

Environnement Canada. 1984a. Normales climatiques au Canada. Volume 2. Température. 1951-1980. Service de l'environnement atmosphérique. Publication du programme climatologique canadien.

Environnement Canada. 1984b. Normales climatiques au Canada. Volume 9. Température du sol, évaporation à la surface des lacs, jours de ... 1951-1980. Service de l'environnement atmosphérique. Publication du programme climatologique canadien.

Environnement Canada. 1984c. Normales climatiques au Canada. Volume 3. Précipitations. 1951-1980. Service de l'environnement atmosphérique. Publication du programme climatologique canadien.

Freeze, R.A. et J.A. Cherry. 1979. Groundwater. Prentice Hall. Englewood Cliffs, N.J. 604 p.

Gallichand, J., R.S. Broughton, J. Boisvert et P. Rochette. 1992. Simulation of irrigation requirements for major crops in south western Québec. Can. J. Agric. Eng.

Godwin, D.C. et C.A. Jones. Nitrogen dynamics in soil-plant systems. Dans:"Modeling plant and soil systems". Ed. J. Hanks et J.T. Ritchie. ASA, CSSA, et SSSA. Madison, WI.

Gray, D.M. 1972. Principles of Hydrology. Water Information Center, Inc. Plainview, NY.

Haan, C.T., D.M. Allen et J.O. Street. 1976. A Markov chain model of daily rainfall. Water Res. Res. 12:443-449.

Horton, R. et S.-O. Chung. 1991. Soil heat flow. Dans: Modeling plant and soil systems. Ed. J. Hanks et J.T. Ritchie. ASA, CSSA et SSSA. Madison, WI.

Jansson, P-E. 1991. Simulation model for soil water and heat conditions. Description of the SOIL model. Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala, Suède. 73 p.

Johnsson, H., L. Bergström et P.-E. Jansson. 1987. Simulated nitrogen dynamics and losses in a layered agricultural soil. Agric. Ecosys. Environ. 18:333-356.

Jones, C.A., W.L. Bland, J.T. Ritchie et J.R. Williams. 1991. Simulation of root growth. Dans: Modeling plant and soil systems. Ed. J. Hanks et J.T. Ritchie. ASA, CSSA and SSSA. Madison, WI.

Larocque, M. et O. Banton. 1993. Significance of parameter precision in modeling the nitrogen cycle and nitrate leaching. Soumis au Soil Sci. Soc. Am. J.

Linsley, R.K., M.A. Kohler et J.L.H. Paulhus. 1975. Hydrology for engineers. 2ième édition. McGraw-Hill.

Musy, A. et M. Soutter. 1991. Physique du sol. Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne, Suisse.

Olson, R.A. et L.T. Kurtz, 1982. Crop nitrogen requirements, utilization and fertilization. Dans: Nitrogen in agricultural crops. F.J. Stevenson Ed. Agronomy No 22. American Soc. of Agronomy. Madison, WI.

Prat, M. 1982. Simulation théorique du transport de produits réactifs dans les sols. Cas de l'azote dans les relations bassin versant-rivière. Thèse de Docteur Ingénieur, Inst. Nat. Polytechn. Toulouse, France.

Rawls, W.J. et D.L. Brakensiek. 1989. Estimation of soil water retention and hydraulic properties. *Dans*: Unsaturated flow in hydrologic modeling theory and practice. H.J. Morel-Seytoux (ed.). Kluwer Academic Publ. Pays-Bas. pp275-300.

Rawls, W.J. et D.L. Brakensiek. 1982. Estimating soil water retention from soil properties. Proc. ASCE, vol. 108. No. IR2. Juin. pp161-171.

Richter, J. 1987. The soil as a reactor. Modelling processes in the soil. Catena Verlag. Cremlingen, Allemage.

Rolston, D.E., P.S.C. Rao, J.M. Davidson et R.E. Jessup. 1984. Simulation of denitrification losses of nitrate fertilizer applied to uncropped, cropped, and manureamended field plots. Soil Sci. 137:270-279.

Skaggs, R.W. 1991. Drainage. Dans: Modeling plant and soil systems. Ed. J. Hanks et J.T. Ritchie. ASA, CSSA and SSSA. Madison, WI.

Soil Conservation Service. 1972. National engineering handbook. USDA-SCS, U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.

Stanford, G. et E. Epstein. 1974. Nitrogen mineralization. Water relations in soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 38:103-107.

EXEMPLE D'UN FICHIER .SOL

2 1 2.5	Nombre de couches dans le profil Profondeur de la nappe (m) - loi - para	mètre(s)	
1	Profondeur maximale d'évaporation (m)) - loi	
0.2		- para	amètre(s)
1	Pente du terrain (%) - loi		
3.5	- paramètre(s)	
1	Présence de drains agricoles? (0=N, 1=	=O)	
1	Profondeur des drains (m) - loi	·	
1	- para	mètre(s)	
1	Espacement entre les drains - loi		
20	•	mètre(s)	
0	Couche imperméable immédiatement s	ous la nappe	? (0=N, 1=O)
1	Conductivité hydraulique de la 1ère cou	• •	- loi
0.03	• •	. 2	-paramètre(s)
52.2	Pourcentage de sable de la 1ère couch	ne (%)	• ()
24.7	Pourcentage de limon de la 1ère couch		
23.1	Pourcentage d'argile de la 1ère couche		
1	Porosité de la 1ère couche (m³/m³)	- loi	
0.447	,	- paramètre(s)
1	Point de flétrissement de la 1ère couch	•	- loi
0.2		,	-paramètre(s)
1	Capacité au champ de la 1ère couche	(m³/m³)	- loi
0.26	- пр	,	-paramètre(s)
1	Epaisseur de la 1ère couche (m)	- loi	F(-/
0.2	— , — , — , — , — , — , — , — , — , — ,	- paramètre(s)
1	Conductivité hydraulique de la 2ème co	•	- loi
0.05	,		-paramètre(s)
54	Pourcentage de sable de la 2ème couc	he (%)	
26.1	Pourcentage de limon de la 2ème couc		
19.9	Pourcentage d'argile de la 2ème couch	• •	
1	Porosité de la 2ème couche (m³/m³)	- loi	
0.46	,	- paramètre(s)
1	Point de flétrissement de la 2ème couc		- loi
0.18		, ,,,	-paramètre(s)
1	Capacité au champ de la 2ème couche	(m³/m³)	- loi
0.27			-paramètre(s)
1	Epaisseur de la 2ème couche (m)	- loi	. (-/
0.2	,	- paramètre(s)
·=		- =:: =:::: = (•

- A.2 -

EXEMPLE D'UN FICHIER .SIM

1	Date de début de simulation	- jour
11		- mois
1986		- année
1	Date de fin de simulation	- jour
11		- mois
1987		- année
100	Nombre de simulations	
1	Exécution de l'option culture? (0=N, 1=O)	
1	Exécution du module NitriFlux?	? (0=N. 1=O)

EXEMPLE D'UN FICHIER .CLI

175 1	Nombre de jours de précipitations Jour où la température de l'air est la plus basse - mois
21	- jour
1	Fraction des précipitations hivernales à fondre - loi
0.5	-paramètre(s)
1	Taux de fonte journalier (m/°C/jour) - loi
0.009	- paramètre(s)
0.0904	Précipitations moyennes de janvier (m)
-11.7	Température moyenne de l'air en janvier (°C)
0	Evaporation potentielle de janvier (m)
0.0847	Précipitations moyennes de février (m)
-10.4	Température moyenne de l'air en fèvrier (°C)
0	Evaporation potentielle de février (m)
0.0778	Précipitations moyennes de mars (m)
-4.3	Température moyenne de l'air en mars (°C)
0	Evaporation potentielle de mars (m)
0.0694	Précipitations moyennes d'avril (m)
3.5	Température moyenne de l'air en avril (°C)
0	Evaporation potentielle d'avril (m)
0.086	Précipitations moyennes de mai (m)
11.1	Température moyenne de l'air en mai (°C)
0.1003	Evaporation potentielle de mai (m)
•••••	
0.1149	Précipitations moyennes de septembre (m)
13.1	Température moyenne de l'air de septembre (°C)
0.0644	Evaporation potentielle de septembre (m)
0.0888	Précipitations moyennes d'octobre (m)
7.2	Température moyenne de l'air d'octobre (°C)
0.0376	Evaporation potentielle d'octobre (m)
0.0958	Précipitations moyennes de novembre (m)
0.3	Température moyenne de l'air de novembre (°C)
0	Evaporation potentielle de novembre (m)
0.1176	Précipitations moyennes de décembre (m)
-8.7	Température moyenne de l'air de décembre (°C)
0	Evaporation potentielle de décembre (m)

EXEMPLE D'UN FICHIER .CLT

2	Nombre de cultures Type de la 1ère culture (1=annuelle, 2=pérenne)	
1	Date d'émergence de la 1ère culture - jour	
6	- mois	
1986	- année	
15	Date de maturité de la 1ère culture - jour	
09	- mois	
1986	- année	
1	Nombre de coupe(s) de la 1ère culture	
10	Date(s) de coupe(s) de la 1ère culture - jour	
9 1986	- mois - année	
	Nombre de labour (0 ou 1)	
1 20	Date de labour (s'il y a lieu) - jour	
09	- mois	
1986	- année	
1	Besoin potentiel en azote de la 1ère culture (kgN/ha)- loi	
143	-paramètre	s)
1	Besoin potentiel en eau de la 1ère culture (m)- loi	Ο,
0.3	- paramètre(s)	
1	Fraction d'azote récolté de la 1ère culture - loi	
0.6	- paramètre(s)	
1	Fraction d'azote résiduel de la 1ère culture - loi	
0.3	- paramètre(s)	
1	Rapport C/N des racines de la 1ère culture - loi	
25	- paramètre(s)	
1	Rapport C/N des résidus de la 1ère culture - loi	
60	- paramètre(s)	
1	Profondeur des racines à maturité (m) - loi	
1	- paramètre(s)	
2	Patron racinaire (1=cônique, 2=hémisphérique, 3=cylindrique)	
1	Type de la 2ème culture (1=annuelle, 2=pérenne)	
1	Date d'émergence de la 2ème culture - jour	
6	- mois	
1987	- année	
15	Date de maturité de la 2ème culture - jour	
09	- mois	
1987	- année	
1	Nombre de coupe(s) de la 2ème culture	

10	Date(s) de coupe(s) de la 2ème culture - jour	
9		- mois
1987		- année
1	Nombre de labour (0 ou 1)	
20	Date de labour (s'il y a lieu) - jour	
09	- mois	
1987	- année	
1	Besoin total en azote de la 2ème culture (kgl	l/ha) - loi
143	, •	-paramètre(s)
1	Besoin total en eau de la 2ème culture (m)	- loi
0.3	, ,	- paramètre(s)
1	Fraction d'azote récolté de la 2ème culture	- loi
0.6		- paramètre(s)
1	Fraction d'azote résiduel de la 2ème culture	- loi
0.3		- paramètre(s)
1	Rapport C/N des racines de la 2ème culture	- loi
25		- paramètre(s)
1	Rapport C/N des résidus de la 2ème culture	- loi
60		- paramètre(s)
1	Profondeur maximale des racines (m) - loi	• .
1	- para	ımètre(s)
2	Patron racinaire (1=cônique, 2=hémisphérique	· · ·

EXEMPLE D'UN FICHIER .AZO

1 0.035	Constante de dégradation de la litière (1/j)	- loi - paramètre(s)
1 0.035 1 0.5 1	Constante de dégradation des fèces (1/j)	loiparamètre(s)
	Efficacité de la synthèse microbienne de la lit	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
	Efficacité de la synthèse microbienne des fèc	-
1 0.2	Fraction de la litière passant à l'humus	- loi - paramètre(s)
1 0.2	Fraction des fèces passant à l'humus - loi	amètre(s)
1	Rapport C/N du sol - loi - paramètre(s)	
1 0.0001	Constante de minéralisation de l'humus (1/j)	- loi - paramètre(s)
1 0.2	Constante de nitrification (1/j) - loi - paramètre	
1 0.08	Fraction de l'azote inorganique disponible	- loi - paramètre(s)
1 0.2	Constante de dénitrification (gN/m²/j) - loi - para	amètre(s)
1	Constante de demi-saturation (mgN/l) - loi	amètre(s)
1 15	Rapport NO ₃ ⁻ /NH ₄ ⁺ du sol - loi - paramètre(s)	
1 5000	Contenu initial en C-litière de la 1ère couche	- loi - paramètre(s)
1 2000	Contenu initial en N-litière de la 1ère couche	
1 4000	Contenu initial en C-fèces de la 1ère couche	- loi - paramètre(s)
1 3000	Contenu initial en N-fèces de la 1ère couche	- loi - paramètre(s)
1 10000	Contenu initial en N-humus de la 1ère couche	
1 1000	Contenu initial en N-NO ₃ de la 1ère couche	- loi - paramètre(s)
1 1500	Contenu initial en N-NH ₄ ⁺ de la 1ère couche	parametre(s)paramètre(s)

1	Contenu initial en C-litière de la 2ème couche	- loi
6000		-paramètre(s)
1	Contenu initial en N-litière de la 2ème couche -	· loi
1000	-	paramètre(s)
1	Contenu initial en C-fèces de la 2ème couche -	loi
5000	-	paramètre(s)
1	Contenu initial en N-fèces de la 2ème couche -	loi
2000	-	paramètre(s)
1	Contenu initial en N-humus de la 2ème couche	- loi
10000		-paramètre(s)
1	Contenu initial en N-NO ₃ de la 2ème couche -	loi
9000	<u> </u>	paramètre(s)
1	Contenu initial en N-NH ₄ ⁺ de la 2ème couche -	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
1000		paramètre(s)
		. ,

Évaluation des pertes en composés azotés vers les eaux souterraines Rapport d'étape No 3 Banton, Larocque, Surateau, Villeneuve INRS-Eau, Mars 1993

Projet PARDE-Fumier-89-2 Dossier No 3333.13.90.04 Ministère de l'Environnement du Québec Direction de la recherche et des technologies environnementales 2360, chemin Ste-Foy, Sainte-Foy, Québec, G1V 4H2

Evaluation des pertes de composés azotés dans les eaux souterraines lors de l'épandage des fumiers et lisiers Développement d'un outil d'évaluation

Rapport scientifique d'étape No 3

Développement de l'outil

par

Olivier Banton
Marie Larocque
Fabienne Surateau
Jean-Pierre Villeneuve

mars 1993

Institut National de la Recherche Scientifique, INRS-Eau 2800, Einstein, CP 7500, Sainte-Foy, Québec, G1V 4C7

Rapport Scientifique INRS-Eau No R-379

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION	1
1.1 PROBLEMATIQUE 1.2 CONTRAINTES DE DEVELOPPEMENT	1
2. CARACTERISTIQUES GENERALES D'AGRIFLUX	4
 2.1 CONCEPT D'APPROCHE STOCHASTIQUE 2.2 FICHIERS D'ENTREE 2.3 FICHIERS DE RESULTATS 2.4 STRATEGIE DE SIMULATION 	4 5 5 6
3. DESCRIPTION TECHNIQUE	7
3.1 LOIS STATISTIQUES (DISTRIBUTIONS) 3.2 PROFIL DE SOL 3.3 TEMPERATURE 3.4 CROISSANCE DES RACINES 3.5 BILAN HYDRIQUE 3.6 CYCLE DE L'AZOTE	7 7 11 16 18 35
4. CONCLUSION	47
5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	49
A. ANNEXE	A.1

1. INTRODUCTION

1.1 PROBLEMATIQUE

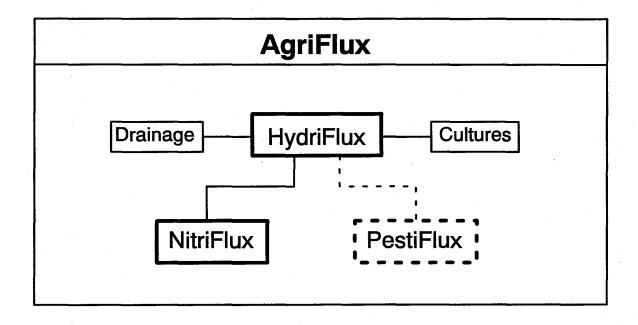
L'objectif du projet était de développer un outil d'évaluation des risques de contamination des eaux souterraines reliés à l'épandage au champ des fumiers et lisiers. Nous avons identifié dans un premier temps (Banton et al., 1991) l'ensemble des phénomènes pouvant intervenir dans ce contexte, et principalement les processus gérant le devenir des formes azotées dans le sol. Dans un deuxième temps (Banton et al., 1992), nous avons vérifié l'applicabilité de la modélisation mathématique à l'évaluation des risques de contamination par les nitrates. Ceci a consisté en l'application d'un modèle très complexe sur un site de suivi des nitrates au Québec. Par ailleurs nous avons étudié l'importance de la variabilité des concentrations observables au champ, reflétant celle des facteurs qui conditionnent le devenir de l'azote dans le sol. Finalement, nous avons identifié parmi ces processus, ceux qui sont les principaux responsables du devenir de l'azote, et ceux qui conditionnent la qualité des évaluations réalisées par modélisation.

Suite à ces travaux, nous avons établi que l'évaluation des risques de contamination des eaux souterraines par les nitrates résultant de l'épandage au champ de fumiers et lisiers était réalisable par le biais de l'utilisation de la modélisation mathématique. Pour ce faire, il était cependant nécessaire de disposer d'un outil de modélisation qui soit tout à la fois fiable et pratique. Cet outil devait donc rencontrer deux exigences principales: prendre en compte l'ensemble des processus dominant le devenir de l'azote, et être basé sur un ensemble de paramètres faciles à quantifier. Il a donc été décidé que le modèle prendrait en compte les phénomènes hydrologiques de ruissellement, infiltration, percolation et drainage artificiel. Les principaux processus du cycle de l'azote serait aussi intégrés dans l'outil. L'outil serait donc basé sur la représentation mathématique des processus intégrant les paramètres physiques, chimiques et biologiques qui s'y rapportent. Ces représentations mathématiques devraient cependant répondre au double critère de la fiabilité de représentation et d'évaluation, et sur l'accessibilité et la fiabilité des paramètres requis.

1.2 CONTRAINTES DE DEVELOPPEMENT

Les contraintes établies pour le développement du modèle d'évaluation sont résumées dans le tableau ci-après:

Figure 1 Modèle AgriFlux



Le présent rapport se divise en deux parties. La première traite des caractéristiques générales de l'outil développé alors que la seconde décrit en détail les processus utilisés pour représenter le transport de l'eau et des nitrates dans le sol. L'utilisateur du modèle peut consulter le manuel d'AgriFlux pour des informations complémentaires concernant le logiciel (installation, environnement, fonctionnement, gestion des fichiers, ...).

2.2 FICHIERS D'ENTREE

Les paramètres d'entrée requis sont regroupés dans différents fichiers spécifiques selon la nature de l'information qu'ils contiennent. Actuellement, il existe six fichiers concernant les pratiques culturales, les données climatiques, les paramètres de définition des simulations, les données sur les fertilisants et leurs caractéristiques, le profil de sol et finalement les paramètres nécessaires à la simulation du cycle de l'azote. Six fichiers par défaut sont fournis avec le logiciel et représentent le site de St-Augustin-de-Desmaures tel que défini par Banton et al (1992): CULTURE.CLT, CLIMAT.CLI, SIMULAT.SIM, FERTILIS.FER, SOL.SOL et AZOTE.AZO.

Par l'intermédiaire des menus d'entrée de données, l'utilisateur a la possibilité de créer de nouveaux fichiers de données, d'appeler des fichiers existants, d'en modifier les valeurs et de les sauver sous un autre nom (les extensions, c'est-à-dire les trois lettres après le point qui caractérisent les types de fichiers de données, ne peuvent être modifiées). Si des modifications sont apportées dans un fichier et que le nom n'est pas changé lors de la sauvegarde, le fichier original est alors détruit et remplacé par le fichier modifié. Tous les fichiers sont de type ASCII et sont bâtis de façon à avoir une seule information par ligne. L'avantage des fichiers ASCII est qu'ils peuvent être édités avec n'importe quel éditeur ou traitement de texte (ASCII) et être ensuite appelés par le modèle comme fichiers d'entrée. L'annexe illustre la disposition des données dans chacun des six fichiers.

2.3 FICHIERS DE RESULTATS

La démarche stochastique génère autant de résultats journaliers qu'il y a de simulations stochastiques réalisées. Ainsi par exemple, pour 1000 simulations stochastiques (voir section 2.4) et dans le cas du calcul des flux d'eau, le modèle calcule pour chaque jour 1000 flux d'eau parvenant à la nappe. Afin de limiter la taille des fichiers de résultats tout en conservant l'essentiel de l'information générée par les simulations, la moyenne et l'écart-type des 1000 flux d'eau journaliers sont calculés et enregistrés dans le fichier correspondant. Tous les résultats ayant trait aux différents flux journaliers d'eau et de nitrates ainsi qu'aux concentrations en nitrates sont traités de façon similaire. Ces résultats sont le ruissellement de l'eau (RUISSEAU.RES), le ruissellement des nitrates (RUISSNIT.RES), la concentration en nitrates de l'eau ruissellée (RUISCONC.RES), le drainage de l'eau (DRAINEAU.-RES), le drainage des nitrates (DRAINNIT.RES), la concentration en nitrates de l'eau drainée (DRAICONC.RES), le flux d'eau atteignant la nappe (LESSEAU.RES), le flux de nitrates atteignant la nappe (LESSNIT.RES) et la concentration en nitrates de l'eau qui atteint la nappe (LESSCONC.RES). A la fin de chaque simulation principale, la moyenne et l'écart-type des contenus des différents réservoirs (litière, fèces, humus, ammonium et nitrates) sont enregistrés dans le fichier BILAN, RES.

3. DESCRIPTION TECHNIQUE

Les paragraphes suivants décrivent les différents processus intervenant dans les phénomènes représentés, discutent des diverses alternatives disponibles pour la représentation mathématique des processus, expliquent et justifient brièvement l'option retenue, présentent en quelques graphiques les performances de la modélisation et résument les différents paramètres requis, les sources possibles d'information ainsi que certaines valeurs typiques pour ces paramètres.

3.1 LOIS STATISTIQUES (DISTRIBUTIONS)

Comme mentionné précédemment, le modèle développé est de nature stochastique, c'est-à-dire qu'au lieu d'exiger une valeur ponctuelle pour chaque paramètre, il donne à l'utilisateur la possibilité de définir la distribution statistique auquel appartient chacun des paramètres requis. Au moment de l'exécution, le modèle effectue le nombre de simulations demandé en piochant aléatoirement, pour chaque simulation stochastique, dans la distribution de chaque paramètre. Les distributions pouvant être déclarées pour les données d'entrée sont les distributions discrète, uniforme, normale, lognormale ou Bêta.

3.2 PROFIL DE SOL

Le modèle AgriFlux simule le transport de l'eau et des contaminants dans la zone non saturée du sol. Il faut donc pour cela définir le profil de sol jusqu'à la nappe phréatique. La position déclarée de la nappe correspond à la plus grande profondeur atteinte par celle-ci pendant l'année. Il convient aussi d'identifier s'il existe une couche imperméable immédiatement sous-jacente à cette profondeur maximale de la nappe, et à travers laquelle la nappe ne peut s'écouler librement. Dans ce cas, il est considéré que les écoulements dans la zone non saturée n'alimentent pas de nappe profonde. Dans le cas contraire (fond perméable), l'écoulement n'est pas limité en profondeur et un flux de recharge de la nappe est calculé. Ces informations doivent être adéquatement fournies au modèle.

Le profil étudié doit être divisé en couches de sol physiquement homogènes. Pour chacune, il faut déterminer l'épaisseur, la conductivité hydraulique saturée, la composition sable-limon-argile, la porosité, la capacité au champ et le point de flétrissement. Ces paramètres devraient avoir fait l'objet d'une caractérisation sur le terrain, mais à défaut de disposer de toutes les données pour un site en particulier, certains d'entre eux peuvent être estimés à partir d'abaques ou de formules établies dans la littérature et utilisées dans d'autres modèles. Certains abaques et formules sont fournis dans ce rapport et dans le manuel d'usager d'AgriFlux. La Figure 2 illustre le schéma type d'un profil de sol tel que devant être déclaré par l'utilisateur.

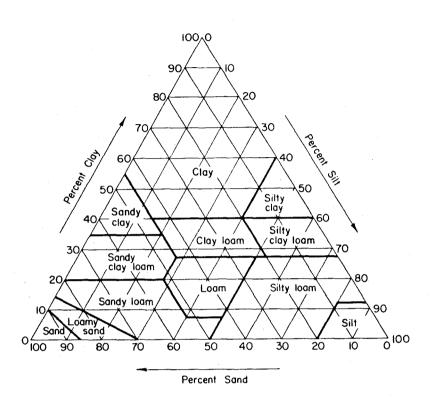


Figure 3 Classes texturales de sols (U.S. Soil Conservation Service)

La capacité au champ correspond à la teneur en eau du sol après que l'excédent d'eau ait été drainé et que le régime d'écoulement vers le bas soit devenu pratiquement nul. Pour la plupart des sols, cette teneur en eau correspond à une tension de 0.33 bar. Le point de flétrissement représente la teneur en eau en-deçà de laquelle les forces d'adsorption surpassent celles que la plante peut générer pour extraire l'eau nécessaire à sa croissance. On admet en général que cette teneur en eau correspond à une tension de 15 bars. Une régression permettant de calculer ces deux valeurs de teneurs en eau à partir de la texture du sol a été définie par Rawls et Brakensiek (1989) à partir de l'analyse de 1323 sols aux Etats-Unis.

theta(15) =
$$0.026 + 0.005 *$$
%argile + $0.0158 *$ %m.o. theta(0.33) = $0.2391 - 0.0019 *$ %sable + $0.021 *$ %m.o. + $0.72 *$ theta(15)

theta(15) = teneur en eau au point de flétrissement theta(0.33) = teneur en eau à la capacité au champ %m.o. = contenu en matière organique

où nécessairement: porosité > théta(0.33) > théta(15)

3.3 TEMPERATURE

3.3.1 Température du sol

La température du sol influence les vitesses de réactions biochimiques du cycle de l'azote. Il est donc nécessaire de connaître la température journalière (pas de temps utilisé pour les calculs) dans chaque couche de sol.

La température du sol peut être obtenue par simulation numérique du transfert de la chaleur (énergie) basée sur les principes de conduction et de convection thermiques, et sur la conservation de l'énergie. Ce type d'approche est utilisée par différents modèles de simulation comme le modèle SOIL (Jansson, 1991). Cette approche utilise des équations aux différences finies et requiert de ce fait un temps de calcul élevé. Par ailleurs, la discrétisation spatiale et temporelle nécessaire aux calculs doit être fine à très fine pour s'assurer de la précision des résultats.

Une alternative au calcul du transfert de chaleur dans le sol est de représenter l'évolution de la température aux différentes profondeurs du sol comme une fonction d'amortissement de la répartition sinusoïdale annuelle de la température de l'air (Richter, 1987). Cette relation amortit et déphase la fonction sinusoïdale selon les caractéristiques du sol suivant l'équation suivante:

```
T(z,t) = Tmoy - Tampl * e^{-z/z0} * cos(w * (t-tph) - z/z0)
```

Tmoy = température moyenne de l'air (°C) = somme (Tmoy.mens)/12

Tampl = amplitude annuelle des températures de l'air (°C) = (Tmax - Tmin)/2

z = profondeur au milieu de la couche (m)

z0 = profondeur d'amortissement (m)

t = temps (jour)

tph = déphasage du cycle (jour le plus froid de l'année)

w = fréquence du cosinus (1 an = 2*pi/365)

Les températures de l'air requises sont les 12 moyennes mensuelles pour la région étudiée. Le déphasage du cycle est le jour où la température est la plus froide dans l'année (début de la fonction sinusoïdale), habituellement vers la fin du mois de janvier au Québec. La profondeur d'amortissement, z0, est mathématiquement définie comme la profondeur à laquelle l'amplitude diminue dans une proportion de 1/e par rapport à la surface (Musy et Soutter, 1991):

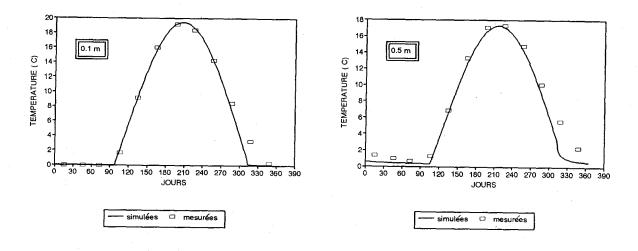
$$z0 = ((2 * Kth) / (Cth * w * 86400))^{1/2}$$

Kth = conductivité thermique (J/m/°C/s) Cth = capacité thermique volumique (J/m³/°C) alphat = diffusivité thermique (conductivité thermique / capacité thermique, Kth/Cth) erfc = erreur fonction complémentaire (formule dans Abramovitz et Stegun, 1972)

Les deux fonctions n'étant pas continues entre elles, les températures journalières utilisées sont les plus élevées des deux températures calculées par chacune des équations.

Les Figures 4 et 5 comparent les températures du sol simulées pour les profondeurs de 0.1 et 0.5 m selon la démarche précédente avec les températures moyennes du sol mesurées aux mêmes profondeurs au site de St-Augustin-de-Desmaures (Environnement Canada, 1984). L'ajustement est considéré comme très satisfaisant, puisque les températures mesurées et calculées se comparent favorablement, et que les écarts maximaux observés entre les températures mesurées et simulées sont de 4°C.

Figures 4 et 5 Températures du sol à St-Augustin-de-Desmaures



3.3.2 Température de l'air

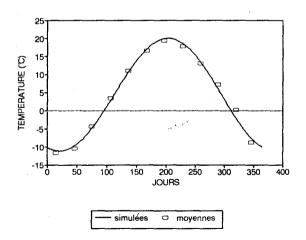
La température de l'air est nécessaire pour identifier les deux jours (automne et printemps) où la température passe par 0°C et pour effectuer le calcul de la fonte de neige (voir paragraphe 3.5.2). Puisque les températures moyennes mensuelles de l'air sont utilisées pour le calcul des températures du sol et puisque les deux méthodes doivent être compatibles, l'approche choisie pour simuler les températures de l'air est dérivée de l'équation utilisée pour les températures du sol:

$$T(z,t) = Tmoy - Tampl * sin(w * (t-tph))$$

La Figure 6 illustre les températures mensuelles moyennes de l'air mesurées et celles simulées pour le site de St-Augustin-de-Desmaures. De façon générale, l'ajustement est très satisfaisant, malgré les températures simulées légèrement inférieures aux températures mesurées pour les mois d'automne. Ce non ajustement d'automne peut être attribuable au phénomène de l'été des Indiens correspondant dans l'est du Canada à des températures justement plus élevées que les normales climatiques.

Les paramètres nécessaires au calcul des températures de l'air ont été définis dans la section précédente (3.3.1).

Figure 6 Températures de l'air à St-Augustin-de-Desmaures



Pour une culture annuelle, les racines subissent un cycle de croissance complet durant la saison végétative, c'est-à-dire que les racines croissent de zéro jusqu'au patron racinaire maximal en quelques mois, après lesquels les racines meurent et sont naturellement incorporées à la litière du sol. Toutefois, la croissance des racines n'est pas uniforme pendant la période estivale. Elle dépend de plusieurs facteurs dont la température, l'humidité du sol, la concentration en certains ions (aluminium, calcium), la compaction du sol et l'aération (Jones et al, 1991). La considération de ces facteurs limitatifs est relativement complexe et requiert plusieurs paramètres difficiles à obtenir. Afin de simplifier la représentation mathématique utilisée dans AgriFlux, la croissance racinaire s'effectue de façon constante (relation linéaire) entre l'émergence (profondeur des racines nulle) et la maturité de la plante (profondeur des racines maximale). Donc, à chaque jour, la densité de racines dans chaque couche est calculée selon un patron racinaire qui se rend jusqu'à la profondeur racinaire calculée pour la journée en question.

Dans le cas d'une culture pérenne considérée "mature", la profondeur racinaire varie peu durant une saison de culture. La densité de racines dans chaque couche est considérée constante tout au long de la période de croissance et correspond à un patron racinaire se rendant jusqu'à la profondeur maximale spécifiée par l'utilisateur. Les cultures associées (simultanées) ne peuvent être définies individuellement dans l'état actuel du modèle. On peut toutefois les représenter comme une seule culture équivalente à l'aide de ses caractéristiques résultantes (racines, besoins en eau et en azote).

Les paramètres requis spécifiquement pour l'évaluation de la croissance racinaire sont les suivants:

Nom de la variable	Source ou valeurs recommandées
Nombre de cultures successives	usager
Type de culture	(1) annuelle
	(2) pérenne
Patron racinaire	(1) conique
	(2) hémisphérique
	(3) cylindrique
Profondeur des racines à maturité (m)	usager

donnée n'est pas reliée aux précipitations des journées précédentes. Cette contrainte peut être divisée en deux phénomènes à vérifier. Premièrement, on doit vérifier si le fait qu'une journée soit pluvieuse est relié ou conditionné à la réalisation de cet évènement dans les journées précédentes. Deuxièmement, on doit vérifier si l'intensité de la précipitation d'une journée est reliée ou conditionnée aux intensités des précipitations précédentes.

Afin de répondre à la première question, il est possible de calculer les probabilités conditionnelles d'occurence des évènements pluvieux ou sec, en fonction des conditions d'humidité antérieure (pluvieux ou sec). La méthode des chaînes de Markov permet de calculer ces probabilités. Cette méthode peut être utilisée inversement pour générer une suite de jours de pluie ou sans pluie, comme employée par Haan et al. (1976). La compilation des jours de précipitation pour la station de l'aéroport de Québec a permis de calculer les valeurs de probabilités conditionnelles suivantes:

Probabilité conditionnelle	qu'il pleuve	qu'il ne pleuve pas
s'il a plu la veille	0.63	0.37
s'il n'a pas plu la veille	0.43	0.57

Comme le montre les résultats obtenus, la probabilité d'occurence d'un évènement semble conditionnée par les occurences antérieures. Cependant, et malgré le fait qu'elle représente plus fidèlement les conditions réelles, cette méthode présente l'inconvénient majeur de nécessiter les valeurs de probabilités conditionnelles, lesquelles ne s'obtiennent qu'à partir de la compilation des événements passés. L'alternative retenue consiste donc à générer la suite de jours secs et pluvieux à partir d'un tirage aléatoire basé sur le nombre annuel moyen de jours de précipitations. Cette méthode purement aléatoire génère un nombre annuel de jours de précipitations suivant une distribution normale dont la moyenne correspond à la valeur du paramètre entré et dont l'écart-type est faible (c.v. = 5%) comme l'illustre la Figure 8.

Le phénomène même de saisonalité des précipitations invalide la seconde hypothèse portant sur l'indépendance des hauteurs de précipitation. Il est cependant possible de contourner ce fait. Pour cela, on norme ces hauteurs de précipitations en les divisant par la précipitation mensuelle. Ainsi, chaque précipitation peut être exprimée par la fraction de la précipitation mensuelle qu'elle représente. Ces hauteurs adimensionnelles ont été calculées pour les sites de Saint-Augustin (Figure 9). Comme le montrent les résultats, ces hauteurs adimensionnelles s'ajustent très bien à une loi de distribution exponentielle.

L'algorithme de calcul, développé dans HydriFlux pour générer les précipitations journalières, consiste donc en trois étapes. Premièrement, une suite aléatoire de jours pluvieux est générée à partir du nombre annuel moyen de jours de pluie déclaré par l'utilisateur. Deuxièmement, pour les jours où il y a précipitation, un nombre est aléatoirement tiré entre 0 et 1 (F) puis utilisé par la fonction de densité de probabilité inverse pour calculer une hauteur d'eau adimensionnelle, c'est-à-dire une fraction de précipitation mensuelle (X). En troisièmement lieu, cette dernière valeur est multipliée par la précipitation moyenne mensuelle correspondante déclarée par l'utilisateur.

Cette approche ne nécessite ainsi que les 12 valeurs de précipitations moyennes mensuelles et le nombre de jours de précipitations par année. Les précipitations moyennes mensuelles sont les mêmes pour toute la durée d'une simulation, mais puisque le nombre de jours de précipitations et la suite de jours secs et pluvieux varient de façon aléatoire, les précipitations journalières sont différentes pour chaque année de simulation.

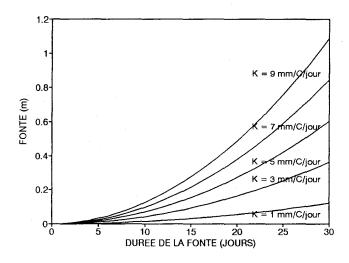
Les paramètres requis spécifiquement pour la simulation des précipitations sont les suivants:

Nom de la variable	Source ou valeurs recommandées
Précipitations moyennes mensuelles (mm)	usager
Nombre de jours de précipitations par an	usager

qu'une précipitation. Le pourcentage d'eau retenue dans le stock de neige est fixé dans HydriFlux à 10%, tel qu'utilisé par Brandt (1990).

La Figure 10, compilée à partir des résultats calculés pour différentes valeurs du taux de fonte permet à l'utilisateur de déterminer approximativement la valeur de ce paramètre. La méthode d'évaluation consiste à localiser sur l'axe vertical du graphique la hauteur d'eau équivalente de la neige qui reste au sol au début de la fonte et sur l'axe horizontal le nombre de jours nécessaire à la fonte de cette couche de neige. L'intersection de ces deux valeurs identifie la courbe correspondant au paramètre recherché. Cet abaque ne tenant pas compte de la rétention d'eau, il faut soustraire environ cinq jours à la durée de la fonte (axe horizontal). L'accroissement de la température printanière ayant servi à bâtir l'abaque correspond au passage des températures de 0°C à 8°C en 30 jours.

Figure 10 Abaque de fonte de la neige



Les paramètres spécifiques à la simulation de la fonte de la neige sont les suivants:

Nom de la variable	Source ou valeurs recommandées
Taux de fonte journalier (m/°C/jour)	0 - 0.009
Fraction des précipitations totales qui res- te au sol au début de la fonte	0.25 - 1

Figure 11 Influence de la conductivité hydraulique sur le ruissellement et l'infiltration

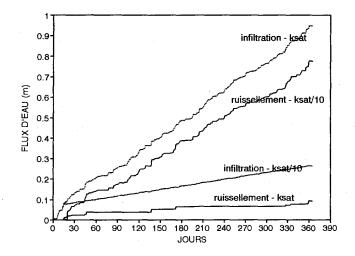
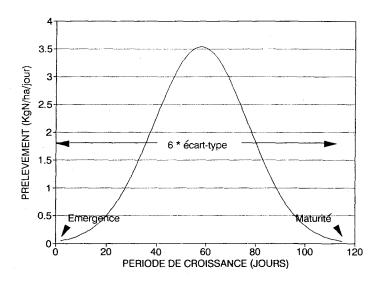


Figure 12 Courbe de prélèvement d'eau



Le prélèvement potentiel pour un jour "j" est calculé en multipliant la probabilité de se trouver entre le jour "j-1" et le jour "j" par le besoin total d'eau pour toute la période de croissance:

Prélpot = P(j) * BesoinE

P(j) = fraction du prélèvement potentiel du jour j = $P(j-1 \le X \le ji)$ = phi(j) - phi(j-1) Prélpot = prélèvement potentiel total qui a lieu au jour j (m) BesoinE = Besoin potentiel en eau pour toute la saison de croissance

Le prélèvement potentiel total ainsi calculé est extrait de chacune des couches de sol en proportion de la fraction de racines (section 3.4) qui s'y trouve.

Prél(z) = Prélpot * fraction(z)

Prél(z) = prélèvement d'eau de la couche z fraction(z) = fraction de racines dans la couche z

La Figure 13 illustre la courbe de prélèvement cumulé pour une culture de mais calculée à l'aide de HydriFlux, à laquelle sont superposées des mesures au champ (Olson et Kurtz, 1982). Malgré un accroissement un peu plus rapide des valeurs calculées, l'allure de la courbe représente adéquatement l'accroissement du

3.5.6 Evaporation

L'évaporation est le transfert d'eau des couches superficielles du sol vers l'atmosphère géré par le gradient d'humidité. Ce processus est considéré dans le modèle comme intervenant après le prélèvement d'eau par la plante. Il est effectué en fonction du volume potentiel d'eau à évaporer du sol à chaque jour.

L'approche la plus répandue pour le calcul de l'évaporation est l'utilisation de l'équation de Penman (Gray, 1972). Cette équation établit en fait l'évaporation potentielle. Elle demande par ailleurs la quantification d'un grand nombre de paramètres, dont la plupart sont très difficiles à évaluer.

L'approche utilisée par HydriFlux consiste à soustraire du sol les volumes d'eau nécessaires pour satisfaire l'évaporation potentielle journalière jusqu'à une profondeur maximale déterminée par l'utilisateur. Elle est utilisée par de nombreux autres modèle, comme par exemple le modèle PRZM (Carsel et al., 1984). Dans HydriFlux, l'évaporation potentielle journalière est obtenue en divisant l'évaporation potentielle mensuelle des mois où il y a évaporation par le nombre de jours du mois. A chaque jour, un volume d'eau est soustrait de la première couche, correspondant au minimum entre l'évaporation potentielle journalière et l'eau disponible dans cette couche (la teneur en eau d'une couche ne peut pas descendre sous le point de flétrissement). Si l'évaporation potentielle n'a pu être comblée, l'eau est extraite de la couche suivante, et ainsi de suite jusqu'à la profondeur maximale d'évaporation. Les évaporations potentielles journalières sont les mêmes pour toutes les années simulées.

Afin de représenter adéquatement l'évapotranspiration (combinaison de l'évaporation du sol et du prélèvement par les plantes), lorsqu'il y a une culture en croissance l'évaporation potentielle est réduite à la différence entre l'évaporation calculée à partir des données entrées par l'utilisateur et le prélèvement potentiel par la plante. Dans le cas d'un résultat négatif, l'évaporation potentielle du sol est nulle.

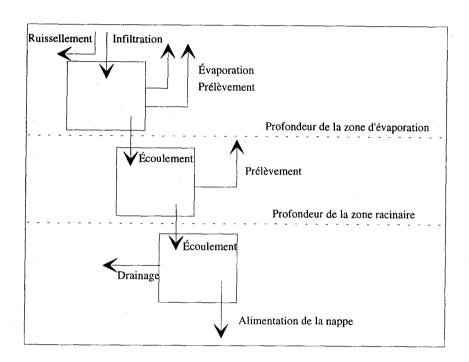
Les paramètres spécifiques à la simulation de l'évaporation sont les suivants:

Nom de la variable	Source ou valeur recommandée
Evaporation potentielle moyenne mensuelle (m)	usager
Profondeur maximale d'évaporation (m)	0.10 - 0.15

dernier volume (le minimum des deux écoulements possibles) qui représente la percolation. La variation de la conductivité hydraulique (non saturée) en fonction de la teneur en eau est calculée à l'aide de la relation suivante (Bear, 1988):

K = Ksat * ((theta - capacité au champ) / (porosité - capacité au champs))3

Figure 14 Modèle par réservoirs



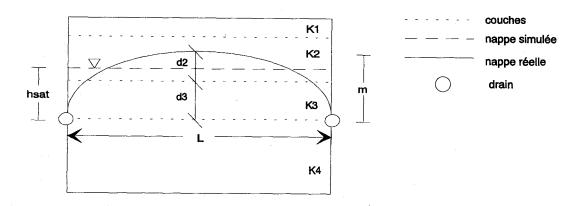
Tel que mentionné à la section 3.2, la position (minimale) de la nappe phréatique est la plus grande profondeur atteinte par la nappe pendant l'année. Le modèle gère la remontée de la nappe au-dessus de ce niveau. L'utilisateur doit spécifier si l'écoulement est non restreint en profondeur ou si au contraire la position de la nappe correspond à une couche imperméable. Dans le premier cas, l'eau qui arrive à cette profondeur s'écoule sans restriction dans la nappe. Dans le second cas, l'écoulement vertical est impossible et l'eau est drainée (s'ily a des drains agricoles) ou s'accumule dans le profil.

3.5.9 Drainage

Le drainage artificiel de l'eau est une composante importante du bilan hydrologique de nombreux sols agricoles. Le drainage agricole vise généralement à rabattre la nappe d'eau souterraine sous la zone racinaire afin d'allouer une aération suffisante pour les racines. Ceci s'effectue à l'aide d'un système de drains disposés à intervalles réguliers dans le sol. Ces drains, en évacuant l'eau, entraînent alors les nitrates et pesticides qui y sont dissous. Le calcul du drainage doit représenter ce rabattement de la nappe en calculant les flux d'eau et d'azote journaliers correspondant. Il doit aussi tenir compte de l'écoulement vers la nappe profonde d'une partie de l'eau percolant des couches supérieures.

La représentation mathématique du drainage souterrain est un problème complexe qui requiert normalement une représentation des écoulements en deux ou trois dimensions, afin de tenir compte entre autres des drains et de leur espacement. Pour être inclus dans un modèle en une dimension, la représentation du phénomène doit être physiquement simplifiée.

Figure 15 Schéma du drainage



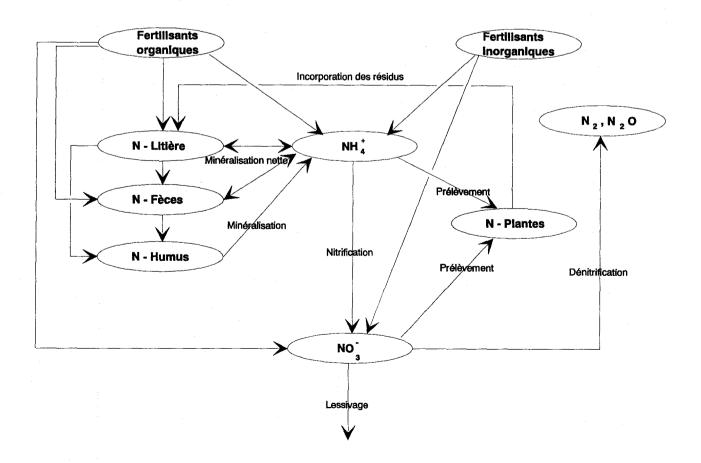
L'approche développée dans HydriFlux considère que les écoulements de la zone saturée soumise à l'effet de drains parallèles confèrent à cette zone saturée la forme d'une demi-ellipse (Figure 15). Afin de conserver les volumes d'eau, la surface sous cette demi-ellipse doit alors être identique à celle résultant du produit de la hauteur saturée (au dessus des drains) calculée dans HydriFlux, par la distance entre les drains. La hauteur résultante de la demi-ellipse peut alors être calculée des équations suivantes:

3.6 CYCLE DE L'AZOTE

Le cycle de l'azote est simulé lorsque le module NitriFlux est activé. La représentation générale du cycle de l'azote adoptée dans ce modèle est inspirée en partie de celle adoptée par la plupart des modèles du cycle de l'azote, dont le modèle SOILN (Johnsson et al, 1987).

Dans chaque couche, l'azote est présent dans six réservoirs. L'azote organique se retrouve dans les réservoirs Litière (résidus végétaux à décomposition rapide), Fèces (azote d'origine animale à décomposition rapide) et Humus (résidus végétaux à décomposition lente). Les deux premiers réservoirs sont doublés d'un réservoir de carbone qui gère la minéralisation nette. L'azote inorganique se retrouve dans les réservoirs Ammonium (NH4⁺) et Nitrates (NO3⁻). Le sixième réservoir est le réservoir Plantes. Il y a échanges d'azote entre les différents réservoirs par l'intermédiaire des processus biochimiques du cycle de l'azote. Les nitrates (la seule forme mobile de l'azote) migrent d'une couche à l'autre en fonction de la percolation car ils sont en solution dans l'eau. La Figure 16 illustre le cycle de l'azote tel que représenté dans le modèle.

Figure 16 Cycle de l'azote



3.6.1 Amendements

Les amendements sont les apports organiques (fumiers, lisiers et résidus de récolte) et inorganiques incorporés aux différents réservoirs d'azote du sol. L'azote atmosphérique incorporé via les précipitations n'est pas considéré à cause de son influence très faible sur les bilans en azote du sol au Québec (Larocque et Banton, 1993). L'utilisateur désireux d'en tenir compte pourra les intégrer sous forme fractionnée comme fertilisant inorganique.

Les amendements peuvent être appliqués en plusieurs doses au cours de l'année, toutes les combinaisons de fertilisants étant permises. Pour chaque amendement, l'utilisateur doit identifier la date d'application mais le modèle peut déplacer l'application afin qu'elle coïncide avec une période relativement sèche: ceci permet de représenter les conditions réelles d'épandage qui doivent entre autres permettre la circulation de la machinerie au champ.

Les apports de fumiers sont composés d'une partie de litière (paille ou autre substrat utilisé à l'étable), d'une partie de fèces (déjections animales) et d'une partie sous forme d'azote inorganique (ammonium et nitrates), chacune étant incorporée au réservoir correspondant. Pour chaque application, l'utilisateur doit identifier la composition du fumier utilisé. Il doit aussi spécifier si l'apport est incorporé au sol et à quelle profondeur.

Les apports de lisiers sont composés d'une très grande proportion d'eau, laquelle est alors incorporée au sol au même titre qu'une pluie. La fraction solide se divise en une partie de fèces et une partie d'azote inorganique (ammonium et nitrates), chacune incorporée au réservoir correspondant. Comme pour le fumier, il appartient à l'utilisateur de définir la composition et la quantité de lisier ainsi que son mode d'application.

L'utilisateur doit identifier la fraction de l'azote total prélevé par la plante exportée par la récolte et la fraction demeurant à la surface du sol comme résidus de récolte. Ces fractions permettent d'établir la partie de l'azote total prélevé par la plante qui demeure dans le sol sous forme de racines au moment de la récolte. Les racines sont incorporées au réservoir Litière de chaque couche proportionnellement à la fraction de racines (section 3.4) qui y est présente à la fin de la période de croissance. La fraction d'azote demeurant sous forme de résidus à la surface est incorporée au réservoir Litière au moment du labour. Il est donc nécessaire de définir une date ainsi qu'une profondeur de labour afin d'incorporer les résidus de récolte à la matière organique du sol. Il est à noter que, dans la présente version (1.0) de NitriFlux, le travail du sol n'a pas d'influence sur l'infiltration ou l'activité biochimique du sol, et que le labour d'incorporation des résidus de récolte sert uniquement à la prise en compte de ces derniers.

3.6.2 Pertes d'azote par ruissellement

La perte d'azote par ruissellement est un phénomène relativement complexe dans la réalité, représenté dans le modèle de façon simplifiée. Le ruissellement d'azote a lieu lorsque la teneur en eau de la couche superficielle du sol ne peut permettre l'infiltration de toute l'eau précipitée, que la pente est non-nulle.

Lorsqu'il y a ruissellement d'azote au champ, différentes formes d'azote migrent avec l'eau ruisselée. L'azote organique et l'ammonium, qui ont tendance à s'adsorber aux particules de sol, ne peuvent être transportés qu'avec les particules érodés, alors que les nitrates migrent sous forme dissoute dans l'eau. Dans la présente version (1.0) du modèle, l'érosion n'étant pas simulée, seuls les nitrates sont considérés transportés par le ruissellement. La quantité exportée correspond à la fraction ruisselée du réservoir Nitrates des quelques centimètres (5 cm) supérieurs du profil de sol.

Les paramètres nécessaires au ruissellement d'azote ont été définis dans le paragraphe sur le ruissellement d'eau (section 3.5.4).

t = température du sol (C) tbase = température de référence à laquelle le f.a.t. vaut 1 (20°C)

Les paramètres requis pour simuler les facteurs abiotiques ont été définis lors de la caractérisation du profil de sol (section 3.2).

Figure 17 Facteurs abiotiques teneur en eau

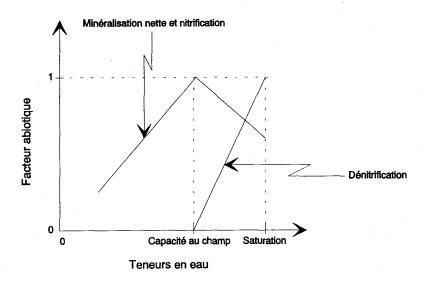
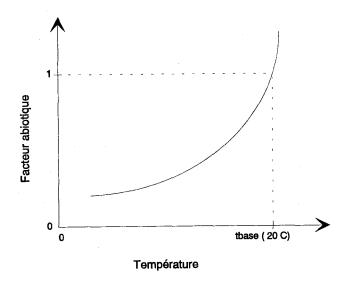


Figure 18 Facteur abiotique température



3.6.4 Nitrification

La nitrification est le processus par lequel les ions ammonium sont oxydés en ions nitrates. Le processus est principalement réalisé par des bactéries aérobies.

La nitrification est représentée de différentes façons dans la littérature, les variantes provenant principalement de l'ordre de réaction privilégié. Dans AgriFlux, la réaction est d'ordre 1, telle que le plus généralement utilisée, comme par exemple dans le modèle SOILN (Johnsson et al., 1987):

$$N-NH4==>N-NO3(z)=Knit*f.a.a.*f.a.t.*(N-NH4(z)-N-NO3(z)/rapp)$$

N-NH4==>N-NO3 (z) = quantité d'azote nitrifié dans la couche z Knit = constante de nitrification (1/jour) N-NH4(z) = ammonium présent dans la couche z N-NO3(z) = nitrates présents dans la couche z rapp = rapport Nitrates/Ammonium du sol

Comme pour la minéralisation nette, la constante de nitrification utilisée doit correspondre aux conditions optimales de teneur en eau et de température.

Les paramètres requis spécifiquement pour la simulation de la nitrification sont les suivants:

Nom de la variable	Valeur recommandée
Constante de nitrification (1/jour)	0.01 - 1
Rapport Nitrates/Ammonium du sol	1 - 15

3.6.6 Dénitrification

La dénitrification est la voie principale par laquelle l'azote passe du sol à l'atmosphère. La dénitrification biologique est la réduction des nitrates par des bactéries anaérobies.

La dénitrification est un processus extrêmement complexe et jusqu'à date très peu étudié. Pour cette raison, les représentations utilisées dans les différents modèles sont extrêmement variables. L'approche préconisée dans NitriFlux est une cinétique de type Michaelis-Menten, telle qu'utilisée dans le modèle SOILN (Johnsson et al., 1987):

N-NO3==>N2 (z) = Kdenit * f.a.an. * f.a.t. * (NO3/(NO3 + Cdemi)

N-NO3==>N2 (z) = quantité d'azote dénitrifiée dans la couche z

Kdenit = constante de dénitrification (gN/m2/jour)

f.a.an. = facteur abiotique anaérobie

Cdemi = constante de demi-saturation (mgN/l)

La constante de dénitrification doit correspondre à une teneur en eau à saturation et à une température de 20°C.

Les paramètres requis spécifiquement pour la simulation de la dénitrification sont les suivants:

Nom de la variable	Valeur recommandée
Constante de dénitrification (gN/m²/jour)	0.04 - 0.2
Constante de demi-saturation pour la dénitrification (mg N/I)	5 - 15

3.6.7 Flux d'azote

Les nitrates constituent la seule forme de l'azote suffisamment soluble dans l'eau pour migrer avec celle-ci. Chaque jour, une concentration en nitrates est calculée dans chaque couche en divisant l'azote du réservoir Nitrates par l'eau contenue dans la couche. A chaque flux d'eau (ruissellement, drainage et lessivage) est ensuite associé un flux d'azote directement proportionnel à la concentration en nitrates dans l'eau de la couche concernée.

CONCLUSION

Le schéma global du logiciel AgriFlux (version 1.0) est représenté à la Figure 19. Ce schéma fait ressortir les différentes composantes du logiciel traitant des flux et bilans d'eau et d'azote dans le sol. L'actuelle version d'AgriFlux (1.0) comporte donc les modules HydriFlux (1.0) et NitriFlux (1.0).

La structure modulaire d'AgriFlux est constituée de manière à pouvoir aisément recevoir des améliorations et de nouveaux modules. Nous prévoyons ainsi la mise à jour des modules et de l'outil en fonction de l'avancée des connaissances. Deux modules sont déjà envisagés, PestiFlux qui tiendra compte du devenir des pesticides dans le sol et les eaux, et le module PhosFlux qui portera sur le devenir du phosphore. Il pourra en être ainsi pour d'autres nouveaux modules portant sur le potassium, sur l'érosion, etc. Des améliorations de la version actuelle (1.0) d'AgriFlux sont déjà envisagées. Ces améliorations porteront sur les modules HydriFlux (1.0) et NitriFlux (1.0). Ces améliorations qui devraient faire l'objet des nouvelles versions de ces modules, sont:

Module HydriFlux:

- influence du travail du sol sur l'infiltration et le ruissellement
- prise en compte de la capillarité
- calcul du ruissellement en fonction de la pente du terrain
- possibilité d'entrer les valeurs initiales de contenus en eau lorsque connues

Sous-module Racine:

- croissance racinaire non-linéaire (représentation par une double exponentielle)
- gestion du déficit en eau (éventuellement en azote) pour la croissance des plants

Sous-module Température:

- amélioration du calcul de la température du sol (solution continue)

Module IrriFlux (nouveau module très relié à HydriFlux):

- gestion de l'irrigation de surface en tenant compte des périodes de déficit en eau
- irrigation souterraine versus drainage contrôlé (rabattement de la nappe)

Module NitriFlux:

- influence du travail du sol sur le cycle de l'azote (processus aérobie/anaérobie)
- pertes d'N sous forme adsorbée avec l'érosion-ruissellement

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abramovitz, M. et I.A. Stegun. 1972. Handbook of mathematical functions. Ed. M. Abramovitz et I.A. Stegun. Dover publications. New York, NY.

Baes, C.F. et R.D. Sharp. 1983. A proposal for estimation of soil leaching constants for use in assessment models. J. Env. Qual. 12:17-28.

Banton, O., Chapdelaine, M.C., Larocque, M., Trépanier, L. et J.P. Villeneuve. 1992. Evaluation des pertes en composés azotés dans les eaux souterraines lors de l'épandage des fumiers et lisiers. Développement d'un outil d'évaluation. Etablissement des hypothèses (Rapport d'étape No 2). Rapport scientifique INRS-Eau-349. INRS-Eau, Sainte-Foy, Québec.

Banton, O., Lafrance, P. Camara, O. et J.P. Villeneuve. 1991. Evaluation des pertes en composés azotés dans les eaux souterraines lors de l'épandage des fumiers et lisiers. Développement d'un outil d'évaluation. Revue bibliographique (Rapport d'étape No 1). Rapport scientifique INRS-Eau-309. INRS-Eau, Sainte-Foy, Québec.

Banton, O., P. Lafrance, R. Martel et J.-P. Villeneuve. 1992. Planning of soil-pore water sampling campaigns using pesticide transport modeling. Ground Water Monit. Rev. 12(3):195-202.

Banton, O., Larocque, M. et F. Surateau. 1993. Agriflux (1.0), un logiciel d'évaluation des flux de contaminants d'origine agricole. Modules HydriFlux (1.0) et NitriFlux (1.0). Manuel d'usager. Rapport scientifique INRS-Eau-380. INRS-Eau, Sainte-Foy, Québec.

Bear, J. 1988. Dynamics of fluids in porous media. Dover publications, Inc. New York, NY.

Bolt, G.M., A.R.D. Janse et F.F.R. Koenigs. 1966. Basic elements of soil chemistry and soil physics II: Soil physics. Wageningen.

Bouwer, H. et van Schilfgaarde. 1963. Simplified method of predicting fall of water table in drained land. Trans. ASAE. 6(4):288-291.

Brandt, M. 1990. Simulation of runoff and nitrate transport from mixed basins in Sweden. Nordic Hydrology, 21:13-34.

Campbell, G.S. 1991. Simulation of water uptake by plant roots. Dans: Modeling plant and soil systems. Ed. J. Hanks et J.T. Ritchie. ASA, CSSA et SSSA. Madison, WI.

Jones, C.A., W.L. Bland, J.T. Ritchie et J.R. Williams. 1991. Simulation of root growth. Dans: Modeling plant and soil systems. Ed. J. Hanks et J.T. Ritchie. ASA, CSSA and SSSA. Madison, Wl.

Larocque, M. et O. Banton. 1993. Significance of parameter precision in modeling the nitrogen cycle and nitrate leaching. Soumis au Soil Sci. Soc. Am. J.

Linsley, R.K., M.A. Kohler et J.L.H. Paulhus. 1975. Hydrology for engineers. 2ième édition. McGraw-Hill.

Musy, A. et M. Soutter. 1991. Physique du sol. Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne, Suisse.

Olson, R.A. et L.T. Kurtz, 1982. Crop nitrogen requirements, utilization and fertilization. Dans: Nitrogen in agricultural crops. F.J. Stevenson Ed. Agronomy No 22. American Soc. of Agronomy. Madison, WI.

Prat, M. 1982. Simulation théorique du transport de produits réactifs dans les sols. Cas de l'azote dans les relations bassin versant-rivière. Thèse de Docteur Ingénieur, Inst. Nat. Polytechn. Toulouse, France.

Rawls, W.J. et D.L. Brakensiek. 1989. Estimation of soil water retention and hydraulic properties. *Dans*: Unsaturated flow in hydrologic modeling theory and practice. H.J. Morel-Seytoux (ed.). Kluwer Academic Publ. Pays-Bas. pp275-300.

Rawls, W.J. et D.L. Brakensiek. 1982. Estimating soil water retention from soil properties. Proc. ASCE, vol. 108. No. IR2. Juin. pp161-171.

Richter, J. 1987. The soil as a reactor. Modelling processes in the soil. Catena Verlag. Cremlingen, Allemage.

Rolston, D.E., P.S.C. Rao, J.M. Davidson et R.E. Jessup. 1984. Simulation of denitrification losses of nitrate fertilizer applied to uncropped, cropped, and manureamended field plots. Soil Sci. 137:270-279.

Skaggs, R.W. 1991. Drainage. Dans: Modeling plant and soil systems. Ed. J. Hanks et J.T. Ritchie. ASA, CSSA and SSSA. Madison, WI.

Soil Conservation Service. 1972. National engineering handbook. USDA-SCS, U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.

Stanford, G. et E. Epstein. 1974. Nitrogen mineralization. Water relations in soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 38:103-107.

EXEMPLE D'UN FICHIER .SOL

2 1 2.5	Nombre de couches dans le profil Profondeur de la nappe (m) - loi - para	amètre(s)	
1	Profondeur maximale d'évaporation (m	• • •	
0.2	, voice and market and a star (in	•	amètre(s)
1	Pente du terrain (%) - loi	Part	arrio a 0 (0)
3.5	- paramètre	(e)	
1	Présence de drains agricoles? (0=N, 1	• •	
	•	-0)	
1 1		mòtro(c)	
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	amètre(s)	
1	Espacement entre les drains - loi	màtro/o)	
20	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	amètre(s)	0 (0-N 4-O)
0	Couche imperméable immédiatement s	• •	
.1	Conductivité hydraulique de la 1ère con	ucne (m/j)	- loi
0.03			-paramètre(s)
52.2	Pourcentage de sable de la 1ère couch	` '	
24.7	Pourcentage de limon de la 1ère couch	• •	
23.1	Pourcentage d'argile de la 1ère couche	€ (%)	
1	Porosité de la 1ère couche (m³/m³)	- loi	
0.447		- paramètre	(s)
1	Point de flétrissement de la 1ère couch	ne (m³/m³)	- loi
0.2			-paramètre(s)
1	Capacité au champ de la 1ère couche	(m^3/m^3)	- loi
0.26	·		-paramètre(s)
1	Epaisseur de la 1ère couche (m)	- loi	
0.2	. , ,	- paramètre	(s)
1	Conductivité hydraulique de la 2ème co	•	` - loi
0.05	4	(3)	-paramètre(s)
54	Pourcentage de sable de la 2ème couc	che (%)	p
26.1	Pourcentage de limon de la 2ème couc		
19.9	Pourcentage d'argile de la 2ème couch	· ·	
10.0	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	- loi	
0.46	Torosite de la Zeme codone (m/m/)	- paramètre	(e)
1	Point de flétrissement de la 2ème couc		- loi
0.18	Tomit de neurosement de la Zeme Codo		
1	Capacité au champ de la 2ème couche	$^{3}/m^{3}$	-paramètre(s) - loi
0.27	Capacite au criamp de la Zeme Couche	= (III /III)	
0.27	Engiagour de la 2ème seuche (m)	loi	-paramètre(s)
0.0	Epaisseur de la 2ème couche (m)	- loi	(a)
0.2		- paramètre	(S)

EXEMPLE D'UN FICHIER .CLI

175	Nombre de jours de précipitations
1	Jour où la température de l'air est la plus basse - mois
21	- jour
1	Fraction des précipitations hivernales à fondre - loi
0.5	-paramètre(s)
1	Taux de fonte journalier (m/°C/jour) - loi
0.009	- paramètre(s)
0.0904	Précipitations moyennes de janvier (m)
-11.7	Température moyenne de l'air en janvier (°C)
0	Evaporation potentielle de janvier (m)
0.0847	Précipitations moyennes de février (m)
-10.4	Température moyenne de l'air en février (°C)
0	Evaporation potentielle de février (m)
0.0778	Précipitations moyennes de mars (m)
-4.3	Température moyenne de l'air en mars (°C)
0	Evaporation potentielle de mars (m)
0.0694	Précipitations moyennes d'avril (m)
3.5	Température moyenne de l'air en avril (°C)
0	Evaporation potentielle d'avril (m)
0.086	Précipitations moyennes de mai (m)
11.1	Température moyenne de l'air en mai (°C)
0.1003	Evaporation potentielle de mai (m)
0.1149	Précipitations moyennes de septembre (m)
13.1	Température moyenne de l'air de septembre (°C)
0.0644	Evaporation potentielle de septembre (m)
0.0888	Précipitations moyennes d'octobre (m)
7.2	Température moyenne de l'air d'octobre (°C)
0.0376	Evaporation potentielle d'octobre (m)
0.0958	Précipitations moyennes de novembre (m)
0.3	Température moyenne de l'air de novembre (°C)
0	Evaporation potentielle de novembre (m)
0.1176	Précipitations moyennes de décembre (m)
-8.7	Température moyenne de l'air de décembre (°C)
0	Evaporation potentielle de décembre (m)

10	Date(s) de coupe(s) de la 2ème culture - jour
9	- mois
1987	- année
1	Nombre de labour (0 ou 1)
20	Date de labour (s'il y a lieu) - jour
09	- mois
1987	- année
1	Besoin total en azote de la 2ème culture (kgN/ha) - loi
143	-paramètre(s)
1	Besoin total en eau de la 2ème culture (m) - loi
0.3	- paramètre(s)
1	Fraction d'azote récolté de la 2ème culture - loi
0.6	- paramètre(s)
1.	Fraction d'azote résiduel de la 2ème culture - loi
0.3	- paramètre(s)
1	Rapport C/N des racines de la 2ème culture - loi
25	
25	- paramètre(s)
1	Rapport C/N des résidus de la 2ème culture - loi
60	- paramètre(s)
1	Profondeur maximale des racines (m) - loi
1	- paramètre(s)
2	Patron racinaire (1=cônique, 2=hémisphérique, 3=cylindrique)

tre(s)
tre(s)
()