

Record Number: 12450
Author, Monographic: Banton, O./Marquis, F.
Author Role:
Title, Monographic: Développement d'un outil informatique d'évaluation des pertes environnementales de fertilisants et de produits phytosanitaires utilisés dans le contexte des cultures en pépinières. Rapport d'étape no 2

Translated Title:
Reprint Status:
Edition:
Author, Subsidiary:
Author Role:
Place of Publication: Québec
Publisher Name: INRS-Eau
Date of Publication: 1996
Original Publication Date: Avril 1996
Volume Identification:
Extent of Work: ii, 43
Packaging Method: pages
Series Editor:
Series Editor Role:
Series Title: INRS-Eau, rapport de recherche
Series Volume ID: 442 e2
Location/URL:
ISBN: 2-89146-462-1
Notes: Rapport annuel 1995-1996
Abstract: Rapport réalisé pour le ministère des Ressources naturelles du Québec, secteur Forêts

10.00\$

Call Number:

R000442 e2

Keywords:

rapport/ ok/ dl

**Logiciel d'évaluation des pertes d'azote
et pesticides en pépinières
Rapport d'étape No 2
Banton et Marquis - INRS-Eau, Avril 1996**

**DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL INFORMATIQUE D'ÉVALUATION
DES PERTES ENVIRONNEMENTALES DE FERTILISANTS ET
DE PRODUITS PHYTOSANITAIRES UTILISÉS DANS LE CONTEXTE
DES CULTURES EN PÉPINIÈRES**

Rapport No 2

**Olivier Banton
François Marquis**

INRS-Eau

Travaux réalisés dans le cadre d'une subvention du
ministère des Ressources naturelles du Québec (secteur Forêts)

Projet 03266S

Avril 1996

Rapport scientifique INRS-Eau 442-b

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1	
STRUCTURE ET DÉVELOPPEMENT DE L'OUTIL	4
1.1 STRUCTURE GÉNÉRALE DE L'OUTIL	4
1.2 CHOIX DES PROCESSUS POUR LE BILAN DE L'AZOTE	4
1.3 DONNÉES D'ENTRÉE ET ÉCRANS DE SAISIE	6
1.4 ALGORITHMES DE CALCUL	8
1.5 RÉSULTATS	9
CHAPITRE 2	
CARACTÉRISATION DES COURBES DE PRÉLÈVEMENT DE L'AZOTE	
CHEZ LES SEMIS D'ESSENCES FORESTIÈRES CULTIVÉS EN PÉPINIÈRE	11
2.1 INTRODUCTION	11
2.2 PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODOLOGIE	12
2.2.1 Le modèle	12
2.2.2 Les données	13
2.2.3 Génération des courbes de prélèvement	14
2.3.4 Caractérisation des courbes de prélèvement	15
2.3.5 Analyse de sensibilité	15
2.3. LE PRÉLÈVEMENT DE L'AZOTE CHEZ LES SEMIS	
D'ESSENCES FORESTIÈRES	16
2.3.1 L'âge et les dimensions du semis.	17
2.3.2 Disponibilité de l'eau et de l'azote	18
2.3.3 Incidences des mycorhizes sur le prélèvement de l'azote	19
2.3.4 Incidence des caractéristiques du substrat d'enracinement	20
2.3.5 Les variables environnementales et la modélisation du prélèvement	22

2.4.	PRÉSENTATION DES COURBES DE PRÉLÈVEMENT ET DE L'ANALYSE DE SENSIBILITÉ	23
2.4.1	Les courbes de prélèvement	23
2.4.2	Analyse de sensibilité	26
2.4.3	Discussion des résultats	26
2.5.	CONCLUSION ET RECOMMANDATION	33
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	34

INTRODUCTION

Le présent rapport (rapport d'activités de l'année 95-96) fait état des résultats obtenus à ce jour concernant le développement d'un outil d'évaluation des pertes environnementales d'azote et de pesticides en pépinières forestières. Ce rapport est constitué de chapitres présentant (1) .

Considérant les objectifs initialement prévus (demande de subvention), les discussions entre les partenaires et les desiderata du ministère concernant un interfaçage entre les système Plantec et Sylvie, il a été proposé que:

- il paraissait souhaitable d'envisager des sorties hebdomadaires concernant les apports en azote résultant de la minéralisation et les pertes par ruissellement et lessivage;
- les calculs effectués par Sylvie doivent intégrer la variabilité spatiale et/ou l'incertitude existant au niveau de certains paramètres, et seront donc en mesure de fournir les résultats avec en plus leurs valeurs à plus ou moins un écart-type;
- dans le même esprit, les calculs dans Sylvie seront réalisés avec les statistiques de précipitations incluant les moyennes et écart-types mensuelles, ce qui permettra de réaliser des prévisions sur une base probabiliste;
- les informations demandées aux usagers doivent être simples et génériques. Par exemple l'information unique concernant le type de sol (e.g. sable limoneux) utilisera de façon transparente pour les calculs les données de conductivité hydraulique, porosité, capacité au champ, densité, permettant ainsi une paramétrisation facile et une bonne qualité des résultats obtenus;
- les données pouvant provenir de Plantec seraient les besoins en azote et en eau pour la période concernée (période totale ou période hebdomadaire), les apports réels en fertilisations, en eau et les températures moyennes. Ces informations seront entrés par l'utilisateur directement;

Il est évident que les nouvelles obligations que doit rencontrer Sylvie ont complexifier

grandement le développement du logiciel, puisque les calculs doivent alors faire appel à des données déclarées de façon hebdomadaire et à des données prévisionnelles. Ce couplage d'informations de deux niveaux et pouvant être effectué pour différents paramètres et à différents moments ont rendu à la fois la conceptualisation et le développement de Sylvie plus délicat et laborieux. La structure même de Sylvie a ainsi dû être complètement repensée depuis le début. Finalement, avec le consentement du ministère, l'échéancier a été extensionné d'une année pour rencontrer les nouvelles obligations.

L'outil sera développé sous l'environnement Windows permettant une utilisation très conviviale. Il permettra l'évaluation des flux hebdomadaires et annuels de nitrates et pesticides susceptibles de ruisseler en surface et de lessiver vers la nappe d'eau souterraine. Il fournira aussi les concentrations moyennes annuelles en nitrates et pesticides dans les eaux de ruissellement et de lessivage. Cet outil permettra ainsi d'évaluer de façon préliminaire les risques de contamination des eaux reliés à la fertilisation des cultures en pépinières et aux traitements phytosanitaires et herbicides qui leur sont associés.

L'outil SYLVIE peut être considéré comme une version simplifiée du logiciel AgriFlux. Le logiciel SYLVIE sera développé comme une version simplifiée de cet outil très performant et à la fine pointe des connaissances actuelles afin de faciliter la déclaration et l'intégration des données d'entrée et spécifiquement pour le contexte des pépinières. AgriFlux est un logiciel très performant constitué des modules HydriFlux, NitriFlux et PestiFlux permettant respectivement le calcul des flux journaliers d'eau, de nitrates et de pesticides.

Le modèle HydriFlux-NitriFlux-PestiFlux (logiciel AgriFlux, Banton et al., 1993; 1996) a été spécifiquement développé pour des fins de gestion pour le bénéfice du ministère de l'Environnement du Québec. Cet outil destiné à une utilisation pratique en intervention environnementale ou agronomique répond à des critères de développement spécifiques. Ce modèle est fiable et basé sur la représentation physique et bio-chimique des phénomènes. Il requiert un nombre de paramètres raisonnable et d'obtention facile (mesure ou évaluation), malgré le fait qu'il prenne en compte la majorité des processus contrôlant le devenir de l'azote et des pesticides dans le sol. Son interface usager conviviale en permette une utilisation aisée.

AgriFlux permet la définition d'un profil de sol présentant différents horizons ou couches de sol de caractéristiques différentes. A l'intérieur de chaque couche du sol, on retrouve

l'azote dans des réservoirs de formes organiques (litière, fumier (fèces) et humus) et inorganiques (ammonium et nitrates) de l'azote. La minéralisation, l'immobilisation, la nitrification et la dénitrification sont simulées. La décomposition, la minéralisation et la nitrification sont influencées par la température et l'humidité du sol. Les nitrates sont considérés comme étant entièrement en solution et se déplacent entre les couches de sol en suivant l'écoulement de l'eau, alors que l'ammonium est considéré comme très fortement adsorbé et donc non mobile. Le flux de nitrates est calculé, pour chaque couche de sol, en multipliant le flux d'eau par la concentration en nitrates.

Le modèle calcule les pertes de nitrates vers la nappe, ainsi que celles par ruissellement et par drainage. Un ensemble de fichiers de données sont nécessaires au fonctionnement du modèle portant sur les caractéristiques du sol, des cultures, du climat et des pratiques culturales. Bien que fonctionnant sur une base de calcul journalière, HydriFlux ne nécessite que les valeurs climatiques mensuelles moyennes rendant son usage très aisé en gestion. AgriFlux permet l'évaluation de différents scénarios de culture et pratiques culturales, des tendances à long terme concernant le devenir de l'azote et les impacts sur l'environnement.

Au niveau des pesticides, le module PestiFlux intègre l'ensemble des processus complexe actuellement reconnus comme influençant la persistance et le transport des pesticides dans le sol. PestiFlux comporte de nombreuses options concernant la filiation du pesticide, les différentes cinétiques de transformation et réaction, le rôle de la matière organique dissoute, la bioactivité, etc.

AgriFlux utilise par ailleurs une démarche de modélisation stochastique. Cette démarche permet la prise en compte de la variabilité spatiale et temporelle des paramètres. Les résultats calculés par ce modèle sont donc représentatifs de l'ensemble des conditions locales pouvant être rencontrées sur le site étudié. Ces résultats sont alors représentés par une moyenne et un écart-type pour chaque type de pertes (ruissellement, nappe, drain) et pour chaque jour. Le risque de contamination peut ainsi être évalué sur une base statistique.

CHAPITRE 1

STRUCTURE ET DÉVELOPPEMENT DE L'OUTIL

1.1 STRUCTURE GÉNÉRALE DE L'OUTIL

L'outil est développé indépendamment sous un environnement Windows, ce qui permet une grande flexibilité dans l'élaboration des différentes parties (dont l'interface-usager) et une grande convivialité avec l'utilisateur. La caractéristique principale du logiciel SYLVIE est de ne nécessiter qu'un nombre limité de données et paramètres d'entrée, ce qui en facilite l'emploi. SYLVIE effectuera le calcul du bilan environnemental des fertilisants et pesticides. La base temporelle est la semaine, pour des scénarios couvrant une ou plusieurs années. Si les tendances à long terme l'intéressent, il peut ainsi simuler plusieurs années successives et SYLVIE utilisera les résultats de la première année comme point de départ pour l'année suivante. Le bilan environnemental est basé sur le calcul d'un bilan hydrique auquel est combiné le bilan de l'azote et des pesticides.

1.2 PROCESSUS POUR LE BILAN DE L'AZOTE

Chacun des processus impliqués dans le cycle de l'azote représente un phénomène complexe dans lequel de nombreux facteurs interviennent. Pour intégrer le plus de processus possible dans SYLVIE, il a fallu simplifier les facteurs pris en compte. Les facteurs retenus sont le reflet de l'information disponible à l'utilisateur. Les paragraphes suivants décrivent les processus et les facteurs considérés.

Le ruissellement de nutriments est la perte des fertilisants à la surface du sol, causée par le ruissellement de l'eau. Les nitrates sont très solubles dans l'eau et peuvent être entraînés hors du champ sous forme de solutés dans l'eau de ruissellement. D'autres nutriments, comme le N-NH₄ et le N-organique sont adsorbés aux particules de sol et vont être entraînés par l'intermédiaire de l'érosion du sol. Dans SYLVIE, la fraction des fertilisants appliqués ainsi perdue est fonction de l'eau ruisselée, de la date de fertilisation, du délai d'incorporation et des quantités apportées des différents nutriments.

La minéralisation est la transformation de la forme organique à la forme inorganique, directement assimilable par les plantes. Ce processus est fonction dans SYLVIE de la date de fertilisation (qui détermine la fraction de l'apport pouvant se minéraliser dans l'année), de la classe texturale (qui influence l'humidité et la température du sol) et de la présence des éléments "minéralisables". Il est à noter que la nitrification n'est pas représentée à cause de sa grande vitesse de réaction. Le $N-NH_4$ apporté par les fertilisants ainsi que celui produit par minéralisation sont considérés immédiatement transformés en $N-NO_3$ et incorporés dans le réservoir N-inorganique.

La dénitrification est la voie principale par laquelle le N-inorganique retourne à l'atmosphère. Elle est fonction de la date de fertilisation, de la classe texturale et la quantité de N-inorganique présente dans le sol.

Le prélèvement est l'absorption de N-inorganique contenu dans le sol par les plantes pour satisfaire leurs besoins nutritionnels. Les facteurs pris en compte dans SYLVIE sont la date de fertilisation, le type de culture (besoins spécifiques des plantes) et l'abondance relative du nutriment.

La fixation est l'absorption de N-atmosphérique par les racines des plantes pour combler leurs besoins nutritionnels. Seul le type de culture intervient dans ce processus, le N-atmosphérique étant considéré comme non-limitant.

Le lessivage est la perte de nutriments vers la nappe phréatique. Seuls les nitrates solubles dans l'eau peuvent être affectés par ce processus. Cette perte de nutriments est fonction du volume d'eau lessivée et de la solubilité relative des éléments "lessivables".

La récolte est la fraction de nutriments prélevés par les plantes qui est exportée du champ. La récolte est fonction du type de culture et donc des éléments prélevés durant la période de croissance.

Dans SYLVIE, l'incorporation des résidus végétaux est la seule voie par laquelle les nutriments organiques sont réincorporés au sol. Les résidus végétaux comprennent les restes de culture laissés au champ ou les apports de matières végétales. Les éléments impliqués sont les mêmes que pour le prélèvement et le processus dépend du type de culture et du prélèvement effectif durant la période de croissance.

1.3 DONNÉES D'ENTRÉE ET ÉCRANS DE SAISIE

L'outil sera bâti de façon à faciliter l'intervention de l'utilisateur. En général, les données à saisir sont simples et connues. Certains choix ont dû être faits par rapport aux unités des paramètres requis, mais des facteurs de conversion d'unités sont alors suggérés.

Le menu principal de SYLVIE permettra de choisir d'abord la parcelle et ensuite l'année de travail, que ce soit pour réaliser un nouveau calcul pour une nouvelle parcelle ou pour une nouvelle année, refaire un calcul déjà réalisé, ou encore pour visualiser les résultats qui viennent d'être calculés. Chaque parcelle représente un fichier de données différent.

Le menu suivant sera le menu Site permettant de saisir les caractéristiques physiques de la parcelle ainsi que la teneur initiale du sol en nutriments. Une texture représentant la texture moyenne du profil de sol doit être choisie parmi la liste fournie. De la même façon, la parcelle doit être associée à une région géographique ou climatique. La pente moyenne de la parcelle doit être saisie en %.

Pour plusieurs années successives sur une même parcelle, les résidus organiques de N sont utilisés pour le calcul de l'année suivante, avec intervention possible de l'utilisateur (item au menu). Il n'y a pas de résidus inorganiques de N car ceux-ci sont considérés comme entièrement entraînés dans l'eau de drainage et de lessivage chaque année.

Pour le menu des pratiques culturales, deux listes de culture seront fournies. Un item doit obligatoirement être choisi dans chacune des deux listes. La première liste proposera une essence végétale, alors que la seconde précisera l'année de croissance de cette culture. La courbe de croissance standard de la culture, incluant le besoin en azote, sera intégrée directement dans l'outil, sans nécessité à l'utilisateur de la déclarer. cependant et par ailleurs, il sera possible à l'usager de déclarer les besoins hebdomadaires, tels que par exemple fournis par Plantec.

L'utilisateur doit ensuite choisir entre différents travaux de sol. Ce choix influence l'infiltrabilité du sol et donc les calculs du bilan hydrique.

L'utilisateur indique le nombre de fertilisations qu'il veut simuler pour cette parcelle. Une liste déroulante permet de choisir parmi les engrais proposés. Des analyses moyennes sont utilisées par défaut si l'utilisateur ne connaît pas la composition de l'engrais. Dans le cas contraire (composition de l'engrais inorganique normalement connue), l'utilisateur doit

entrer la composition de l'engrais. Les unités sont des kg par tonne de dose brute. Le fait de mettre tout le N-inorganique sous forme de N-NO₃ permet d'éviter la volatilisation du N-NH₄ comme dans le cas d'application de fertilisant sous forme de granules. Pour chaque fertilisation, il faut choisir une date d'application et un délai d'incorporation du fertilisant au sol.

Au niveau des pesticides, une liste déroulante de produits phytosanitaires sera proposée. Par ailleurs, l'utilisateur aura la possibilité de déclarer un nouveau produit ayant ses propres caractéristiques physico-chimiques.

Informations à fournir à Sylvie	Commentaires
Type de sol	Choisi au travers d'une liste proposée de types de sol ayant des caractéristiques moyennes typiques
Données climatiques	Choisi au travers d'une liste proposée de climats typiques (précipitations, températures; avec moyenne et écart-type)
	Caractéristiques climatiques hebdomadaires
Travaux de sol	Choisi au travers d'une liste proposée de travaux de sol typiques
Culture et année de croissance	Choisi au travers d'une liste proposée de cultures typiques
	Données de besoins en azote de la culture à provenir de Plantec
Fertilisant(s) et dose(s)	Choisi(s) au travers d'une liste proposée de types de fertilisant avec précision de la date et de la dose appliquée
Pesticide(s) et dose(s)	Choisi au travers d'une liste proposé de pesticides typiques

1.4 ALGORITHMES DE CALCUL

L'exécution du programme débute par la saisie des données. Si l'utilisateur sélectionne une parcelle et une année pour laquelle il y a une année précédente, SYLVIE va utiliser les données déjà calculées pour les contenus initiaux en nutriments.

Chaque fertilisation est traitée comme un événement et tous les processus sont calculés pour chaque amendement. L'évolution des stocks initiaux en nutriments du sol est traitée à part, au même titre qu'une fertilisation.

Après chaque fertilisation, les apports des différents nutriments sont réduits proportionnellement aux pertes par ruissellement et volatilisation. L'apport net en N-organique, N-NH₄ et N-NO₃ est ensuite incorporé aux réservoirs proportionnellement à la composition de l'amendement. Il y a ensuite transformation de l'azote organique en nutriments inorganiques par l'intermédiaire de la minéralisation. Le N-inorganique est ensuite dénitrifié, affectant le contenu de ce réservoir de nutriments inorganiques.

Pour chaque culture, les nutriments inorganiques restant peuvent être prélevés par les plantes, selon les besoins de celles-ci. Si la plante ne parvient pas à prélever toute l'azote dont elle a besoin, le rendement est réduit proportionnellement au déficit encouru. La quantité de nutriments des résidus végétaux restant au champ est calculée.

Le N-inorganique n'ayant pas été dénitrifié ou prélevé par les plantes est entièrement entraîné hors du champ via le lessivage.

Les résidus végétaux (N-organique) sont ajoutés aux stocks de nutriments organiques qui serviront pour l'année subséquente.

Les pertes provenant de chaque fertilisation sont additionnées pour produire le bilan annuel (ruissellement d'eau et de nutriments, volatilisation de N-NH₄, dénitrification de N-inorganique, lessivage d'eau et de nitrates).

Les concentrations en nutriments des pertes via l'eau sont calculées (ruissellement et lessivage).

Les processus qui seront pris en compte par SYLVIE concernant le devenir des pesticides

sont les suivants:

- convection, i.e. le transfert des pesticides avec le déplacement de l'eau;
- dispersion hydrodynamique, au travers de l'approche stochastique;
- adsorption instantanée réversible (i.e. le terme retard);
- transformation en sous-produits
(ex. atrazine en dééthylatrazine ou en déisopropylatrazine);
- cinétique de dégradation physico-chimique par hydrolyse et photolyse
- cinétique de biodégradation reliée à la bioactivité microbienne;
- effet de la température sur les différents processus;
- effet du contenu en eau sur les différents processus;

Ces processus sont complexes et interdépendants. Les algorithmes résultants présentent donc des défis de conceptualisation et programmation élevés.

1.5 RÉSULTATS

Les résultats hebdomadaires et annuels se présenteront sous la forme de tableaux où seront affichés les caractéristiques de la parcelle, l'année en cours, la variation des stocks de nutriments, les flux pour chacun des nutriments et/ou pesticides, les flux d'eau ainsi que les concentrations en nutriments et/ou pesticides de ces flux d'eau.

Un menu à options sera proposé. Celui-ci permettra d'imprimer le tableau de résultats annuels, de visualiser un graphique en histogramme de flux hebdomadaires et annuel de nutriments et/ou pesticides, d'imprimer un tableau avec tous les résultats de toutes les années calculées avec des flux cumulés, de visualiser les graphiques de flux cumulés et de revenir au menu principal.

Avec la touche des graphiques de flux cumulés un menu est proposé, sur lequel il faut choisir la dernière année à utiliser pour les graphiques et les nutriments à représenter. Chaque graphique peut être imprimé après avoir fait une mise en page personnalisée.

Résultats de sortie de Sylvie	Commentaires
apports hebdomadaires en azote résultant de la minéralisation	information à fournir à Plantec
Masse et concentration de nitrates lessivés	en bilan annuel et hebdomadaire
Masses et concentrations de nitrates ruisselés	en bilan annuel et hebdomadaire
Masse et concentration de pesticides lessivés	en bilan annuel et hebdomadaire
Masse et concentration de pesticides ruisselés	en bilan annuel et hebdomadaire

CHAPITRE 2

CARACTÉRISATION DES COURBES DE PRÉLÈVEMENT DE L'AZOTE CHEZ LES SEMIS D'ESSENCES FORESTIÈRES CULTIVÉS EN PÉPINIÈRE

2.1 INTRODUCTION

La régénération des forêts par le biais de la plantation est une activité sylvicole importante au Québec. En 1992, 99,586 ha ont été reboisés et plus de 145 millions de plants ont été mis en terre (Parent 1994). En tout, 208 millions de plants ont été produits dans 36 pépinières différentes réparties dans 12 régions administratives du Québec. L'épinette noire, l'épinette blanche et le pin gris sont les principales essences reboisées.

La production de plants à vocation forestière est une activité qui s'apparente de près à la culture maraîchère. La fertilisation, l'usage de pesticide, et parfois l'irrigation sont au nombre des pratiques courantes. À l'instar du milieu agricole, la fertilisation en pépinière est susceptible d'amener des problèmes de contamination de la nappe phréatique et des eaux de surface. Cette perspective est déjà l'objet de préoccupations au Ministère des Ressources naturelles (e.g. Guay et Nadeau 1994).

Agriflux est un modèle simulant le cycle et le transport de l'eau et de l'azote dans le sol. Ce modèle a été développé afin de prédire les niveaux de contamination des eaux souterraines et de surface suite à la fertilisation azotée. Bien que ce modèle ait été conçu pour la gestion des fertilisants en milieu agricole, il est néanmoins envisageable d'en étendre l'utilisation à d'autres types de cultures tels que la production de plants à vocation forestière. Ce travail a pour objet de valider l'utilisation du modèle pour les pépinières forestières. Il porte sur un aspect bien précis, soit le prélèvement de l'eau et de l'azote par les semis d'essences forestières.

2.2 PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODOLOGIE

2.2.1 Le modèle

Agriflux simule les différents flux d'eau et d'azote ainsi que l'évolution de l'état du système sol-plante (T° , H%, C/N, N%, etc.) avec un pas de temps journalier à partir des paramètres climatiques et physico-chimiques du sol et à partir des renseignements fournis sur le type de culture et différents scénarios de fertilisation. Le modèle se compose de deux modules. L'un des modules, Hydriflux, simule le transport de l'eau à l'aide des différents processus mis en cause tels que les précipitations, le ruissellement, l'infiltration et le prélèvement. L'autre module, nommé Nitriflux, simule le cycle et le transport de l'azote en tenant compte des valeurs générées par Hydriflux.

Selon une étude de sensibilité exécutée sur le modèle SOILN, le prélèvement de l'azote par la végétation exercerait une forte influence sur le lessivage des nitrates (Larocque et Banton 1994). Dans Agriflux, le prélèvement de l'eau et de l'azote se calcule à partir des valeurs, fournies par l'utilisateur, des besoins estimés d'une culture donnée pour la saison de croissance. Ces valeurs sont réparties selon une courbe normale limitée arbitrairement de part et d'autre de la valeur centrale à trois écarts-types afin de simuler les taux de prélèvement journalier entre le début et la fin de la saison de croissance. Selon la méthode de calcul utilisée, la surface sous la courbe correspond au besoin en eau ou en azote spécifié au modèle par l'utilisateur. La surface sous la courbe correspondant à une journée donnée représente le besoin potentiel en azote pour cette journée (kg/ha/jour). Elle se calcule à l'aide de la fonction de répartition approximative d'une normale centrée-réduite:

$$F(x) \approx (1 + \exp(-1.5976 * z * (1 + 0.04417 * z^2)))^{-1}$$

où: $z = (x - \mu) / \sigma$

$$\mu = (\text{Fin de la croissance} - \text{début de la croissance}) / 2$$

$$\sigma = (\text{Fin de la croissance} - \text{début de la croissance}) / 6$$

Le prélèvement potentiel pour une journée (Prépot) se calcule en multipliant la probabilité $P(J)$ de se trouver entre le jour $j - 1$ et le jour j , par le besoin potentiel total (BPT) de la culture pour la saison.

$$\text{Prépot.} = P(J) * \text{BPT}$$

où $P(J)$ est la fraction du BPT correspondant au jour J , soit

$$P(j-1 \leq X \leq j) = F(j) - F(j-1)$$

Dans le cas de l'azote, le prélèvement différentiel de NH_4^+ et de NO_3^- s'effectue au prorata de la disponibilité de chacune des deux formes d'azote en fonction des quantités disponibles dans le sol.

$$\text{Prélèvement de } \text{NO}_3^- = P(J) * \text{BPT} * \text{NO}_3^- / (\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+)$$

$$\text{Prélèvement de } \text{NH}_4^+ = P(J) * \text{BPT} * \text{NH}_4^+ / (\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+)$$

La présente section a pour principal objectif d'évaluer la représentativité de l'approche utilisée pour le calcul du prélèvement journalier des différentes formes de l'azote. Plus explicitement, nous tenterons de répondre aux questions suivantes:

- 1) L'approche utilisée pour simuler les prélèvements de l'eau et de l'azote par les plants reflète-t-elle la réalité?
- 2) Le prélèvement a-t-il une influence significative sur les quantités de nitrates ruisselées et lessivées simulées par le modèle.

Afin de répondre à la première question, nous avons produit des courbes de prélèvement à partir de valeurs observées dans trois pépinières. *Picea glauca* et *Picea mariana* sont les espèces considérées. Les données ont été traitées de manière à pouvoir être comparées aux valeurs journalières de prélèvement générées par le modèle à partir du prélèvement potentiel total. Les résultats obtenus sont présentés à la section quatre de ce rapport. Une analyse de sensibilité des valeurs de ruissellement et de lessivage des nitrates en réponse aux valeurs de prélèvement et à la longueur de la saison de croissance complète également cette section.

2.2.2 Les données

Les courbes présentées à la section quatre de ce rapport ont été produites à l'aide de données obtenues des pépinières de Berthierville (73°10'; 46°03'), Sainte-Luce (68°20'; 48°33') et Saint-Modeste (69°30'; 47°50'). Ces pépinières produisent à grande échelle des semis d'essences forestières destinés à la plantation. Le tableau 2.1 nous informe sur les caractéristiques de la saison de croissance à chacune de ces pépinières.

Tableau 2.1 Caractéristiques de la saison de croissance aux pépinières de Berthierville, Sainte-Luce et Saint-Modeste (Wilson 1971).

Saison de croissance	Berthierville	Sainte-Luce	Saint-Modeste
Début	20 avril	30 avril	30 avril
Fin	26 octobre	16 octobre	16 octobre
Durée	190 jours	170 jours	170 jours

Les données provenant de la pépinière de Berthierville portent sur des semis d'épinette blanche 2010 et 2020¹. Ces données nous informent sur le contenu en azote des plants, mesuré en huit ou neuf occasions au cours de la saison de croissance 1994. Les données concernant les pépinières de Sainte-Luce et Saint-Modeste proviennent d'analyses effectuées par M. Jean Gagnon du Ministère des Ressources naturelles. Elles portent sur le contenu en azote de semis d'épinette noire 2020, mesuré en cinq occasions au cours de l'été 1994.

2.2.3 Génération des courbes de prélèvement

Des courbes du prélèvement journalier de l'azote ont été générées à partir de la dérivée de l'équation décrivant l'évolution du contenu en azote des plants, mesuré en fonction du temps (200 jours). L'ajustement de la courbe aux valeurs de contenu s'est faite par régression non-linéaire (Quasi-Newton) à l'aide du logiciel Statistica. Le modèle choisi est celui d'une courbe logistique usuellement utilisée pour décrire la croissance d'une population (Ramade 1984), auquel nous avons ajouté un paramètre afin d'obtenir un meilleur ajustement. Ce choix s'est fait en fonction de l'allure des données.

$$\text{Cont.} = (a / (1 + b * \exp(-c * t))) + d$$

où Cont: Contenu en azote
 t: nombre du jour de croissance
 a, b c et d: des paramètres ajustables

Le code 2000 signifie que les plants étaient âgés de 2 ans lors du repiquage. Les codes 10 et 20 signifient que les plants en sont à leur première et deuxième année au champ respectivement.

Ainsi le prélèvement journalier a pu être calculé à l'aide de la dérivée de l'équation précédente qui se présente sous la forme suivante:

$$Pr = abc * \exp(-c * t) / (1 + \exp(-c * t))^2$$

Les courbes de prélèvement simulé par le modèle ont été générées à l'aide des équations 2.1 et 2.2 à partir des BPT mesurés pour chacune des cultures présentées à la section 2.2.

2.2.4 Caractérisation des courbes de prélèvement

Il est possible à partir d'une distribution de fréquence, de calculer des statistiques telles que la moyenne et l'écart-type d'une population (Steel et Torrie 1980). Nous avons donc, à l'aide des équations décrivant les courbes de prélèvement réel, simulé une distribution de fréquence pour chacune d'entre elles. Cette approche a permis le calcul de paramètres servant de base à la description des courbes de prélèvement. Il nous a été possible de décrire les courbes en fonction d'une moyenne (jour où le prélèvement est maximal), d'un écart-type et d'un coefficient d'aplatissement (Kurtosis). Il n'a pas été possible de mesurer l'asymétrie des courbes puisque le modèle utilisé pour l'ajustement de celles-ci est symétrique par nature. Les statistiques ainsi obtenues ont permis de comparer les courbes de prélèvement obtenues par échantillonnage, aux courbes normales générées par le modèle.

2.2.5 Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité a été effectuée à l'aide de simulations portant sur une séquence de huit ans de culture biannuelle (tableau 2.2). Cette séquence a été choisie afin d'obtenir une stabilité relative des différents réservoirs considérés par le modèle (Larocque et Banton 1994). Les résultats considérés sont les quantités de nitrates ruisselés et lessivés annuellement. Seules la septième et la huitième année ont servi à la comparaison des résultats.

Tableau 2.2 Caractéristiques de la culture biannuelle

Activités	Première année	Deuxième année
Travail du sol	Premier mai	--
Fertilisation	2 mai	2 mai
Repicage	10 mai	--
Récolte	--	30 avril

L'analyse de sensibilité a été effectuée en fonction du BPT et de la durée de la saison de croissance selon un dispositif factoriel (5x3) avec 50 répétitions (50 simulations). Le tableau 2.3 présente les niveaux utilisés pour chacun des facteurs.

Tableau 2.3 Facteurs et niveaux utilisés pour l'analyse de sensibilité

Facteurs		Niveaux					
		Première année			Deuxième année		
Prélèvement (kg/ha/an)		48, 64, 80, 96 et 112			180, 240, 300, 360 et 420		
Saisons	Nb jours	124	137	152	138	152	167
	Début	29 mai	15 mai	15 mai	15 mai	1 ^{er} mai	1 ^{er} mai
	Fin	30 sept.	30 sept.	15 oct.	30 sept.	30 sept.	15 oct.

2.3 LE PRÉLÈVEMENT DE L'AZOTE CHEZ LES SEMIS D'ESSENCES FORESTIÈRES

Cette section identifie à partir des données disponibles dans la littérature, les principaux facteurs ayant une incidence sur le prélèvement de l'azote par les semis d'essences forestières. Cette analyse est faite afin de faciliter l'interprétation des courbes de prélèvement présentées à la section quatre de ce rapport et afin de valider sur une base scientifique, l'approche utilisée dans Agriflux pour le calcul du prélèvement des différentes

formes de l'azote par les semis d'essences forestières. Une évaluation est également faite sur le potentiel qu'offre chacun de ces facteurs pour la simulation du prélèvement de l'azote au cours d'une saison de croissance.

L'importance du prélèvement de l'azote chez le semis d'essences forestières est liée de près à son environnement. L'incidence des différents facteurs environnementaux est variable et dépend en fait de leur nature. Les données de la littérature traitant du sujet portent généralement sur l'étude de une ou de quelques unes de ces variables. Parmi celles-ci nous avons identifié: 1) l'âge et les dimensions du semis, 2) la disponibilité de l'eau et des différentes formes de l'azote, 3) les associations symbiotiques tel que les mycorhizes, et finalement 4) les caractéristiques chimiques et la température du substrat d'enracinement. Les essences usuellement cultivées en pépinière au Québec ont reçu peu d'attention de sorte que nous avons étendu notre investigation aux essences exotiques en nous limitant toutefois à celle des climats tempéré et boréal. Peu d'études portent sur la caractérisation du prélèvement *in situ* au cours d'une saison de croissance. Les données disponibles portant sur cet aspect précis sont traitées à la section 4.

2.3.1 L'âge et les dimensions du semis.

En raison principalement de l'accroissement du volume de sol exploré par les racines et de l'accroissement de la surface foliaire de la plante, le prélèvement de l'eau et des nutriments par les semis d'essences forestières croît avec la taille et l'âge de la plante. L'accroissement de la plante est donc une des composantes responsables de l'allure de la courbe de prélèvement de l'azote au cours de la saison de croissance.

L'accroissement absolu de la plante, tout comme le prélèvement, est fortement dépendant de sa taille. C'est pourquoi plusieurs auteurs l'expriment en terme de taux d'accroissement relatif (relative growth rate) (e.g. Shipley et Peters 1990; Stadenberg *et al.* 1994; Laurence *et al.* 1994). Dans les conditions communément rencontrées en pépinière au cours d'une saison de croissance, la température exerce une forte influence sur l'accroissement du système racinaire (Lopushinsky et Kaufmann 1990; Vapaavuori *et al.* 1992), comparativement aux autres facteurs du milieu puisque ces derniers sont maintenus à un niveau optimal.

L'expression du prélèvement par unité de masse racinaire (e.g. Rygielwicz *et al.* 1984a/b) permet d'isoler l'influence de la taille du plant sur le prélèvement. Ceci est souhaitable si l'on veut étudier l'effet de différents facteurs environnementaux sur le prélèvement et

éventuellement modéliser le prélèvement. La longueur des racines (e.g. Li *et al.* 1991) ou la masse du plant (e.g. Peuke et Tischner 1994) peuvent également servir de pondérateur. La connaissance du taux de prélèvement par unité de masse racinaire permet de prédire l'évolution du prélèvement absolu à partir de la masse initiale du système racinaire et de son taux de croissance (relative growth rate) pour les conditions spécifiées au modèle.

2.3.2 Disponibilité de l'eau et de l'azote

La solution de sol fournit la majorité des éléments dont les plantes ont besoin pour vivre et croître. Le prélèvement est conséquemment corrélé à l'activité des différents nutriments dans la solution de sol (Sposito 1989). Une baisse significative de la disponibilité en eau devrait également limiter le prélèvement des éléments nutritifs.

Incidences de la disponibilité en eau sur le prélèvement de l'azote

L'incidence de la disponibilité de l'eau sur le prélèvement de l'azote a reçu peu d'attention. Timmer et Armstrong (1989) ont néanmoins rapporté une baisse du prélèvement des nutriments chez des semis d'épinette rouge (*Picea rubens*) cultivés en godet et soumis à un régime d'irrigation sec, comparativement au régime humide. Cette baisse du prélèvement a été principalement liée à une perte de croissance, davantage qu'à une baisse de la concentration foliaire. Van den Driessche et Dangerfield (1975) ont observé une réponse similaire chez *Pseudotsuga menziesii* soumis à différentes fréquences d'irrigation lorsque la forme d'azote était NH_4^+ . Cette réponse chez les plants nourris avec NO_3^- a été de moindre importance.

Incidences de la disponibilité des différentes formes d'azote

L'intensification du prélèvement de l'azote avec l'augmentation de sa disponibilité est largement rapportée dans la littérature (Fowells et Krauss 1959; Alexander et Fairley 1986; Kraske et Fernandez 1990; Li *et al.* 1991; Proe et Millard 1994; Teng et Timmer 1995). Cette intensification est associée aussi bien à une hausse de la concentration dans les tissus (Lovett et Tobiessen 1993), qu'à un gain de la croissance et du contenu total en azote de la plante (Gezelius et Näsholm 1993).

En pépinière, où la disponibilité de l'azote est maintenue à un niveau optimal grâce à la fertilisation, celle-ci influence peu le prélèvement au cours de la saison de croissance. La forme de l'azote disponible en fonction du type de culture influence toutefois l'importance

du prélèvement. En effet, les nitrates doivent être réduits avant d'être utilisés pour la synthèse des acides aminés. Le prélèvement de ceux-ci implique donc une activité métabolique et une dépense d'énergie (Clarkson 1986) susceptible de ralentir le prélèvement. Bien que la réduction des nitrates soit généralement considérée comme l'étape limitante dans le métabolisme de l'azote (Beever et Hageman 1983), le transport des nitrates dans la racine peut également être un facteur limitant la croissance chez certaines espèces (Lavoie *et al.* 1992)

Les essences résineuses présentent généralement une meilleure croissance et un prélèvement supérieur de l'azote lorsque celui-ci est disponible sous la forme NH_4^+ comparativement à la forme NO_3^- (Van den Driessche 1971; Van den Driessche et Dangerfield 1975; Marchner *et al.* 1991). Lavoie *et al.* (1992) ont rapporté des taux de prélèvement chez *Pinus banksiana* variant de 0.43 à 0.52 $\mu\text{mol plant}^{-1} \text{h}^{-1}$ pour la forme NO_3^- et de 0.94 à 1.43 $\mu\text{mol plant}^{-1} \text{h}^{-1}$ pour la forme NH_4^+ . Rygiewicz *et al.* (1984a/b) ont mesuré chez *Picea sitchensis* des prélèvements moyens de 6.4 et 0.8 $\mu\text{eq gdwtr}^{-1} \text{h}^{-1}$ avec NH_4^+ et NO_3^- respectivement, et rapportent des résultats similaires chez *Tsuga heterophylla* et *Pseudotsuga menziesii*. Le prélèvement s'est révélé trois fois supérieur avec NH_4^+ qu'avec NO_3^- dans une étude réalisée sur *Pinus sylvestris* par Flaig et Mohr (1992).

En outre, le prélèvement des nitrates est susceptible d'être affecté par la présence de l'ion ammonium (Marchner *et al.* 1991; Peuke et Tischner 1991). Le rapport ammonium:nitrate pouvant induire une inhibition du prélèvement de NO_3^- varie d'une espèce à l'autre (Boxman et Roelofs 1988). À titre d'exemple, Bigg et Daniel (1978) ont observé avec un rapport $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ de 1:3,4 molaire comparativement à la nutrition avec NO_3^- pure, une baisse de 30 et 35% de l'activité enzymatique responsable de la réduction de NO_3^- chez *Pseudotsuga menziesii* et *Pinus concorta* respectivement. Peuke et Tischner (1991) ont noté une inhibition du prélèvement de NO_3^- chez *Picea abies*, lorsque NH_4^+ composait 10% de l'azote minéral en solution.

2.3.3 Incidences des mycorhizes sur le prélèvement de l'azote

L'infection des racines par les ectomycorhizes est une association symbiotique courante chez plusieurs espèces de conifères. Cette symbiose augmente chez l'hôte le taux de prélèvement de certains nutriments. Le cas du phosphore est bien connu (Bowen 1973).

Microequivalents per grams of dry weight root per hour

Plusieurs études font état d'une augmentation du prélèvement de NH_4^+ chez des espèces de conifères suite à l'infection par les micorhizes (Bledsoe et Zasoski 1983; Boxman et Roelofs 1988). Dans l'expérience réalisée par Rygiiewicz *et al.* (1984a), l'infection par les mycorhizes a doublé le prélèvement de NH_4^+ chez *Tsuga heterophylla* et *Pseudotsuga menziesii*. Chez *Picea sitchensis*, le prélèvement a augmenté de 27%. Pour la même essence, Alexander et Fairley (1986) ont noté des augmentations variant de 15 à 41% selon la disponibilité de NH_4^+ .

Des augmentations du prélèvement de NO_3^- suite à l'infection par les micorhizes sont également rapportées dans la littérature (Boxman et Roelofs 1988). Rygiiewicz *et al.* (1984b) rapporte une augmentation du prélèvement de 31% chez *Pseudotsuga menziesii* alors qu'aucune augmentation n'a été observée chez *Picea sitchensis*. En outre, l'augmentation notée chez *Pseudotsuga menziesii* s'est montrée dépendante du pH et non significative pour des valeurs de pH inférieures à 3.5.

2.3.4 Incidence des caractéristiques du substrat d'enracinement

Les caractéristiques physico-chimiques du substrat d'enracinement sont déterminantes pour la croissance des semis d'essences forestières et le prélèvement des éléments nutritifs par la plante. Outre la disponibilité intrinsèque des nutriments, la sécheresse, les conditions d'anaérobiose, les températures froides et la présence d'éléments toxiques dans la solution de sol sont susceptibles d'inhiber le prélèvement.

En pépinière, le drainage, l'acidité et la disponibilité des nutriments dans le sol sont généralement maintenus à des niveaux acceptables grâce à des techniques culturales appropriées. De plus, les sols sont généralement adaptés aux cultures auxquelles on les destine. Le pH du sol peut toutefois varier d'une pépinière à l'autre alors que la température du sol varie considérablement au cours de la saison de croissance.

Incidence du pH

Lors du prélèvement des cations, les plantes exsudent des ions H^+ afin de préserver l'électroneutralité de leurs tissus. La facilité avec laquelle ces ions sont exsudés dépend de la concentration de H^+ dans la rhizosphère. À l'inverse, le prélèvement des anions est associé à l'exsudation d'ion OH^- (Raven et Smith 1976). Le pH du sol est donc susceptible d'affecter le prélèvement de l'azote aussi bien sous la forme NH_4^+ que sous la forme NO_3^- .

Rygiewicz *et al.* (1984a) ont étudié l'effet du pH sur les prélèvements de NH_4^+ chez trois espèces de conifères (*Pseudotsuga menziesii*, *Picea sitchensis* et *Tsuga heterophylla*) en culture hydroponique. Le prélèvement de NH_4^+ a montré des augmentations variant de 51 à 120% selon l'espèce et la présence de mycorhizes, lorsque le pH passait de 3,9 à 7,1. Ces augmentations ont effectivement été associées à des hausses d'ions H^+ exsudés par les racines. Il faut néanmoins demeurer prudent lors de l'extrapolation au champ, de résultats obtenus *in vitro*. Par exemple, Van den Driessche (1971) a plutôt observé une baisse du prélèvement de NH_4^+ chez les même espèces cultivées sur sable, lorsque le pH passait de 5 à 7.5.

Dans une étude sur *Picea abies*, Peuke et Tischner (1991) ont observé une augmentation linéaire du prélèvement de NO_3^- avec le pH et un maximum de prélèvement à pH 5,5. À ce pH, le prélèvement présentait un gain de 70% par rapport aux valeurs de pH inférieure à 4,5 et de 35% par rapport aux valeurs de pH supérieure à 6. Les résultats obtenus par Van den Driessche (1971) ont également montré une diminution du prélèvement de NO_3^- pour des valeurs de pH supérieures à 5,5 chez *Picea glauca* et *Tsuga heterophylla*. Rygiewicz *et al.* (1984b) ont quant à eux observé une augmentation du prélèvement de NO_3^- entre les pH 2,3 et 7,5 chez *Picea sitchensis* et *Pseudotsuga menziesii* alors que l'effet du pH a été nul chez *Tsuga heterophylla*.

Les apparentes contradictions dans la littérature concernant le prélèvement des différentes formes d'azote, reflètent la complexité des phénomènes de prélèvement en fonction des environnements chimiques. En fait, le respect de l'électroneutralité du système racinaire des plantes s'impose par la balance ionique des différents flux d'ions (Kirkby 1969), impliquant non seulement H^+ et OH^- , mais bien l'ensemble des ions entrant ou sortant des racelles.

Incidence de la température du sol

La température a une incidence directe sur le métabolisme de nombreux organismes vivants. En outre, la température du sol semble déterminant pour l'activité métabolique des végétaux vasculaires. Vapaavuori *et al.* (1992) ont rapporté une baisse significative du prélèvement du CO_2 dans l'atmosphère et une complète inhibition de la croissance des racines lorsque la température du substrat était inférieure à 8°C chez *Pinus sylvestris* et *Picea abies*. Chez plusieurs espèces (*Pseudotsuga menziesii*, *Abies amabilis*, *Abies procera*, *Pinus concorta* et *Pinus ponderosa*), la croissance racinaire a débuté au-dessus de 5°C, s'est accélérée au-dessus de 10°C, a atteint un maximum à 20°C, pour ralentir à

des températures supérieures à 20°C (Lopushinsky et Max 1990). Des résultats similaires ont été obtenus chez *Pinus resinosa* (Andersen *et al.* 1986).

Outre l'inhibition de la croissance des méristèmes apicaux, les températures froides limitent le prélèvement de l'eau (Kaufmann 1975; Lopushinsky et Kaufmann 1984). Chez *Pinus radiata*, Kaufmann (1977) a observé une baisse significative de l'absorption de l'eau à des températures inférieures à 12°C. La température du sol influe également sur le prélèvement des nutriments (Bowen 1970; Clarkson *et al.* 1986; Clarkson *et al.* 1988)

2.3.5 Les variables environnementales et la modélisation du prélèvement

Parmi les variables considérées dans cette analyse, la température du sol est la plus susceptible d'influencer l'allure des courbes de prélèvement au cours de la saison de croissance. Elle conditionne le réveil physiologique au printemps et le ralentissement à l'automne. Une fonction de répartition du prélèvement tenant compte de l'évolution de la température du sol pourrait simuler adéquatement l'évolution du taux de prélèvement journalier au cours d'une saison de croissance. Avec cette approche, il faudrait néanmoins tenir compte de l'accroissement du plant au cours de la saison de croissance, en raison de l'incidence de la masse racinaire sur le taux de prélèvement à une température donnée.

Les périodes prolongées de sécheresse affectent certainement le prélèvement de l'azote d'une manière significative. Toutefois, les effets de la sécheresse sur le prélèvement sont complexes à prédire. En effet, le taux d'humidité du sol seul ne peut rendre compte de l'état de stress hydrique causé à la plante, en raison de la pluralité des facteurs incidents tels que la température et le taux d'humidité de l'air, la texture du sol, de même que les caractéristiques physiologiques de la plante.

Les études portant sur le prélèvement des différentes formes de l'azote montrent clairement la préférence des essences résineuses pour la forme NH_4^+ . Dans les études consultées, cette préférence a varié par un facteur de 3 à 8 selon les espèces et probablement en fonction des conditions expérimentales. Les implications au niveau de la simulation risquent d'être significatives. Cette préférence devrait être quantifiée pour les essences d'intérêt (celles cultivées au Québec) et prise en compte lors des simulations.

Selon les études consultées, l'infection par les mycorhizes augmente le prélèvement dans des proportions variant entre 15 et 200%. Toutefois, celle-ci ne devrait affecter la forme

de la courbe de prélèvement que dans la phase d'adaptation du plant suivant le repiquage, si toutefois les plants repiqués ne sont pas déjà infectés. Chez les plants établis, l'infection devrait se traduire par une hausse du prélèvement total, valeur entrée par l'utilisateur.

L'âge et les dimensions du semis jouent un rôle prépondérant sur les quantités totales d'azote prélevées au cours de la saison de croissance. Néanmoins, on tient compte de ces facteurs en spécifiant des valeurs adéquates de BPT au modèle.

2.4 PRÉSENTATION DES COURBES DE PRÉLÈVEMENT ET DE L'ANALYSE DE SENSIBILITÉ

2.4.1 Les courbes de prélèvement

Les figures 4.1 à 4.8 montrent les courbes de prélèvement cumulatif ainsi que les courbes de prélèvement journalier réel et simulé pour les cultures des pépinières de Berthierville, Sainte-Luce et Saint-Modeste. Les paramètres décrivant les courbes de prélèvement journalier réel sont présentés au tableau 4.1.

Pépinière de Berthierville

Les figures 4.1 à 4.4 montrent l'évolution du contenu en azote des plants au cours de la saison de croissance ainsi que les taux de prélèvement journalier réel et simulé chez l'épinette blanche 2010 et 2020. Le jour zéro correspond au 26 avril. Les courbes du prélèvement simulé ont été ajustées pour 180 jours de croissance.

Chez les plants 2010 (figures 4.1 et 4.2), le prélèvement commence tardivement, soit vers le 40^e jour de croissance. Le prélèvement réel maximal est atteint au 113^e jour comparativement au 90^e jour pour le prélèvement simulé. La courbe du prélèvement réel est nettement leptocurtique par rapport à la normale (tableau 4.1). Chez les plants 2020 (figures 4.3 et 4.4), l'utilisation de la courbe normale simule bien le prélèvement journalier réel avec des prélèvements maximaux les 90^e et 93^e jour de croissance. La courbe du prélèvement réel demeure toutefois légèrement leptocurtique par rapport à la normale. De ce fait, la courbe simulée sous-estime légèrement le prélèvement entre le 71^e et le 118^e jour de croissance et le sur-estime de part et d'autre.

Pépinière de Sainte-Luce

Les figures 4.5 et 4.6 montrent l'évolution du contenu en azote des plants au cours de la saison de croissance ainsi que les taux de prélèvement journalier réel et simulé chez l'épinette noire 2020 à la pépinière de Sainte-Luce. Le jour zéro correspond au 1^{er} mai. La courbe du prélèvement simulé a été ajustée pour 140 jours de croissance tel que le suggère les données de l'échantillonnage. Les jours de prélèvement maximal sont les 70^e et 73^e jours de croissance pour les prélèvement simulé et réel respectivement. La courbe de prélèvement réel est leptocurtique par rapport à la normale. La simulation sous-estime donc le prélèvement entre le 55^e et le 90^e jour de croissance le sur-estime de part et d'autre.

Pépinière de Saint-Modeste

Les figures 4.7 et 4.8 montrent l'évolution du contenu en azote des plants au cours de la saison de croissance ainsi que les taux de prélèvement journalier réel et simulé chez l'épinette noire 2020 à la pépinière de Saint-Modeste. Le jour zéro correspond au 1^{er} mai. La courbe du prélèvement simulé a été ajustée pour 180 jours de croissance tel que le suggère les données de l'échantillonnage. Le prélèvement maximal réel est atteint au 96^e jour comparativement au 90^e jour pour la simulation. La courbe réel est légèrement leptocurtique par rapport à la normale.

Tableau 4.1 Paramètres décrivant les courbes de prélèvement réel

Paramètres	Berthierville Epb 2010	Berthierville Epb 2020	Ste-Luce Epn 2020	St- Modeste Epn 2020
Jours du prélèvement maximal	113	93	73	96
Écart-type (jours)	22.63	28.24	20.06	29.98
Coefficient d'applatissage (kurtosis)	624.81	117.92	171.38	103.02

Figure 4.1 Contenu en azote dans les plants d'épinette blanche 2010 à la pépinière de Berthierville au cours de la saison 1994

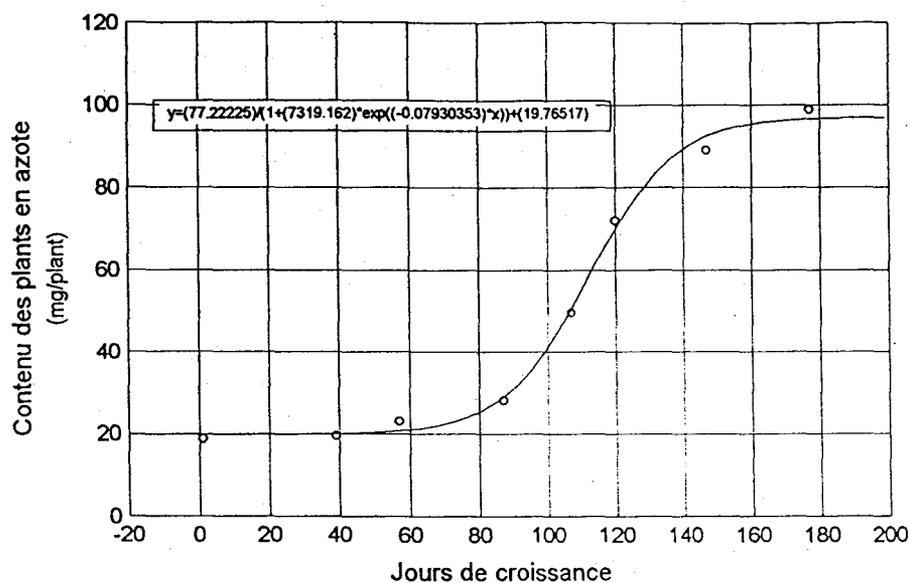


Figure 4.2 Évolution du taux de prélèvement de l'azote réel et simulé chez l'épinette blanche 2010 de la pépinière de Berthierville au cours de la saison 1994

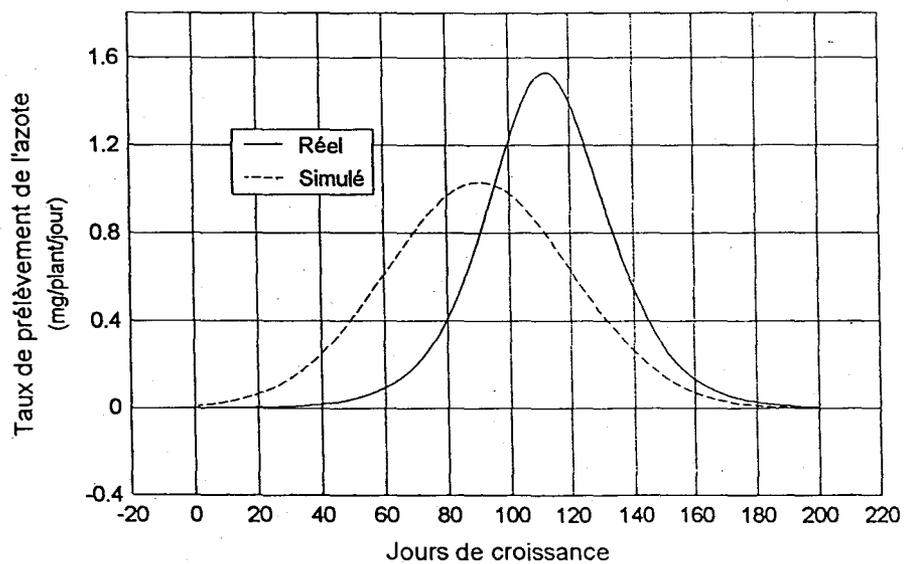


Figure 4.3 Contenu en azote dans les plants d'épinette blanche 2020 à la pépinière de Berthierville au cours de la saison 1994

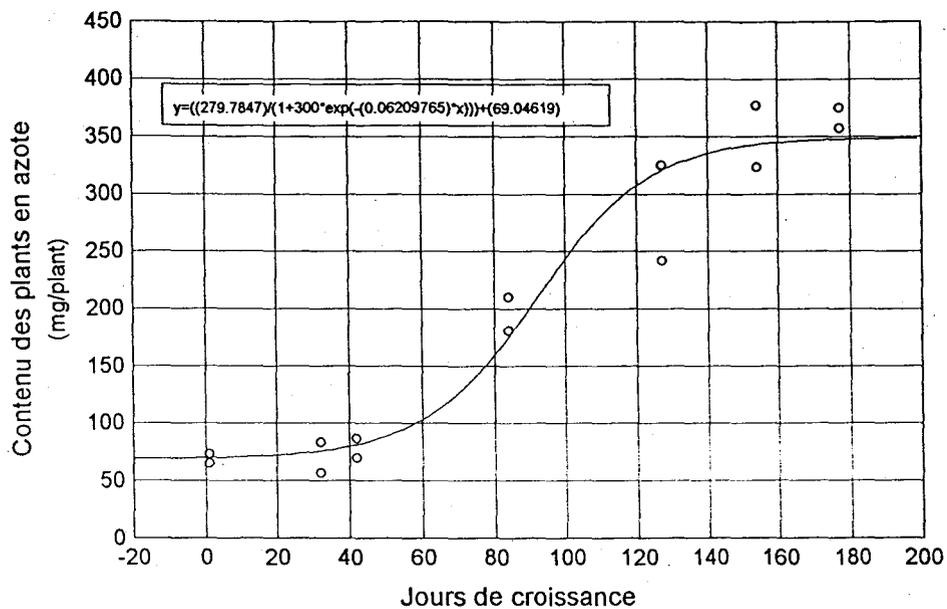


Figure 4.4 Évolution du taux de prélèvement de l'azote réel et simulé chez l'épinette blanche 2020 de la pépinière de Berthierville au cours de la saison 1994

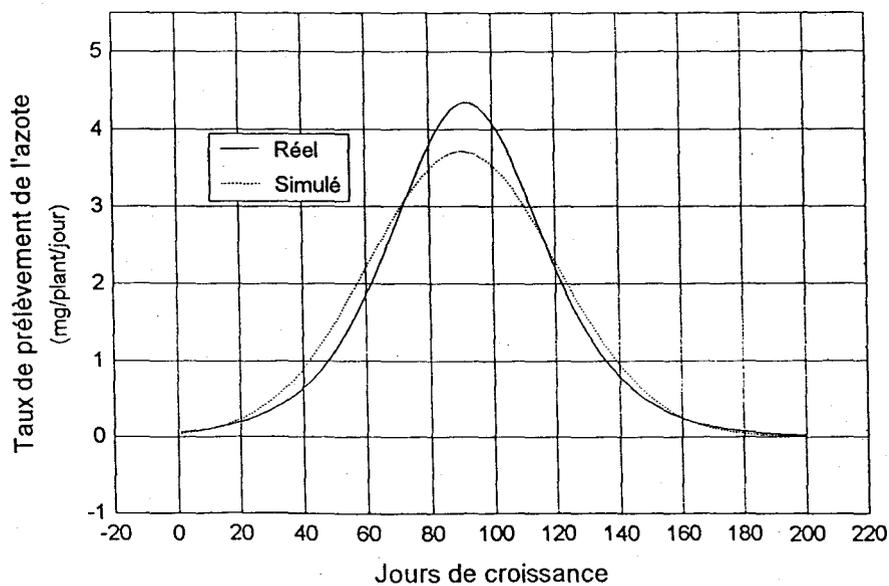


Figure 4.5 Contenu en azote dans les plants d'épinette noire 2020 à la pépinière de Sainte-Luce au cours de la saison 1994

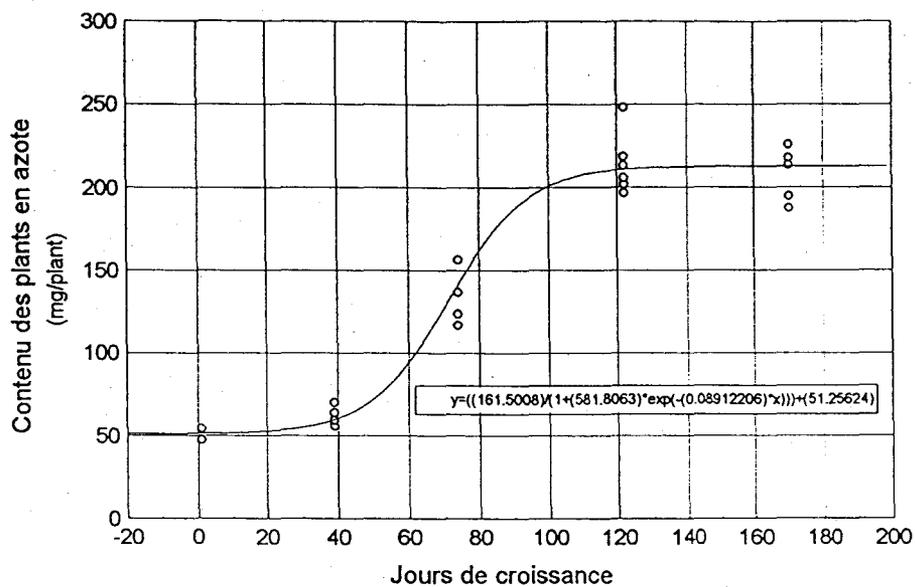


Figure 4.6 Évolution du taux de prélèvement de l'azote réel et simulé chez l'épinette noire 2020 de la pépinière de Sainte-Luce au cours de la saison 1994

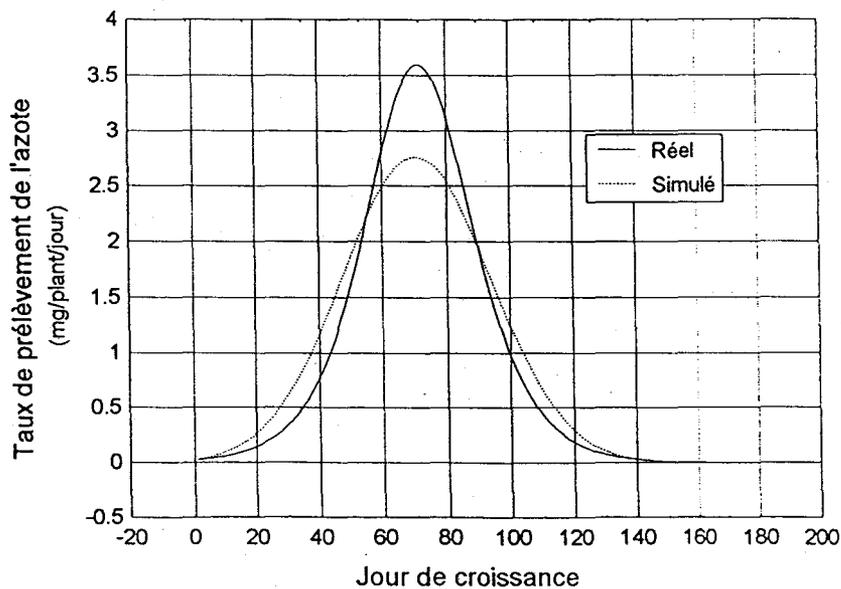


Figure 4.7 Contenu en azote dans les plants d'épinette noire 2020 à la pépinière de Saint-Modeste au cours de la saison 1994

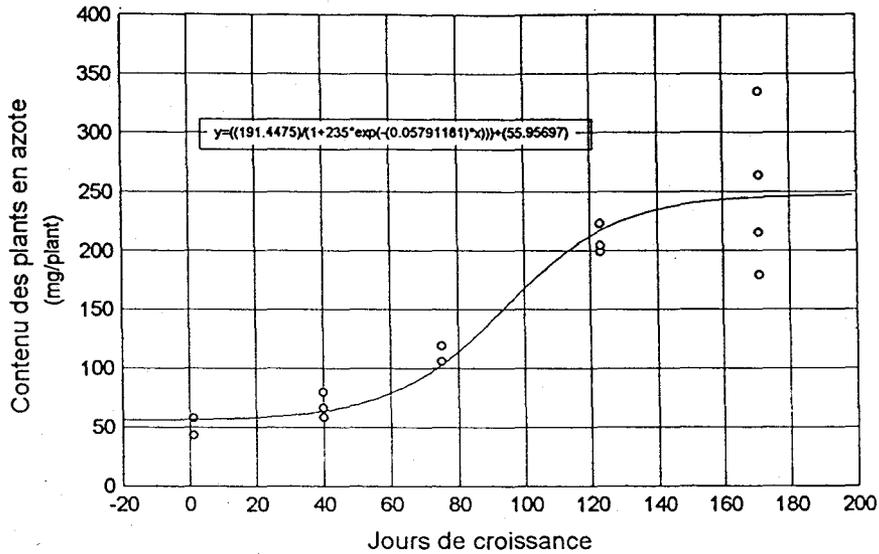
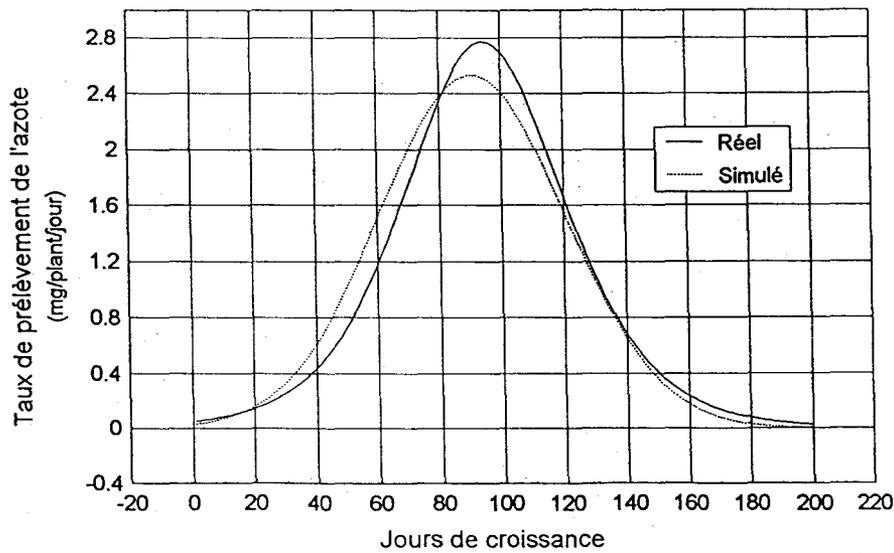


Figure 4.8 Évolution du taux de prélèvement de l'azote réel et simulé chez l'épinette noire 2020 de la pépinière de Saint-Modeste au cours de la saison 1994



2.4.2 Analyse de sensibilité

Incidence du prélèvement et de la longueur de la saison de croissance sur le ruissellement des nitrates

La réponse du ruissellement des nitrates aux différentes valeurs de prélèvement montre un effet nettement quadratique aussi bien pour la culture 2010 (figure 4.9) que pour la culture 2020 (figure 4.10). Une baisse de 40% du prélèvement induit des augmentations de 233% et 97% des quantités de nitrates ruisselés pour les cultures 2010 et 2020 respectivement (tableau 4.2). À l'inverse, une augmentation de 40% du prélèvement ne cause qu'une diminution de 27% et 9% pour les cultures 2010 et 2020 respectivement. Bien que les saisons de 124 et 138 jours aient augmenté de 18% et 12% le ruissellement de nitrates comparativement aux saisons de 137 et 152 jours respectivement, l'effet observé est non significatif à l'analyse de variance (tableau 4.3a et 4.3b)

Incidence du prélèvement et de la longueur de la saison de croissance sur le lessivage des nitrates

Les différentes valeurs de prélèvement induisent d'importantes variations dans les quantités de nitrates lessivés (tableau 4.2). Une baisse de 40% du prélèvement provoque des hausses de 249% et 180% des quantités de nitrates lessivés lors des première et deuxième année de culture respectivement. À l'instar du ruissellement, l'effet observé est nettement quadratique à l'exception toutefois des saisons de 124 et 138 jours chez les cultures 2010 et 2020 respectivement où l'on observe un effet linéaire (figure 4.11 et 4.12). Cette interaction est significative à l'analyse de variance (tableau 4.3c et 4.3d). L'incidence de la longueur de la saison de croissance est également significative, fort probablement en raison des saisons de 124 et 138 jours. L'effet global de la longueur de la saison de croissance se traduit par des hausses de 36% et 22% du ruissellement des nitrates, les première et deuxième année respectivement, lorsque la longueur de la saison diminue de 9% (tableau 4.2).

2.4.3 Discussion des résultats

Le ruissellement et le lessivage des nitrates sont sensibles aux valeurs de prélèvement spécifiées au modèle. Il semble toutefois y avoir une valeur en deçà de laquelle l'augmentation du ruissellement et du lessivage soit particulièrement importante. Dans le

cas du lessivage, cette valeur pourrait être liée, pour les conditions de la simulation, à la longueur de la saison de croissance puisque l'effet observé pour les saisons courtes est linéaire. La date du début de la saison de croissance distingue la saison courte (124 et 138 jours) de la saison médiane (137 et 152 jours) alors que la fin de la saison distingue la saison longue (152 et 167 jours) de la saison médiane (voir tableau 2.3). On peut donc anticiper qu'une part importante du lessivage observé pour les saisons courtes s'opère en début de saison avant que ne débute le prélèvement.

Bien que des erreurs de 40% ou même de 20% sur le prélèvement puissent paraître grossière, les données dont nous disposons ne nous permettent pas d'évaluer la variabilité de ce paramètre d'une année à l'autre. Un été froid et pluvieux peut en effet succéder à un été chaud et sec et avoir une incidence significative sur le prélèvement. Dans le même ordre d'idées, quelle peut-être l'incidence d'un printemps hâtif sur le début de la saison de croissance? Force est d'admettre que l'approche utilisée pour le calcul du prélèvement de l'azote impose un certain degré d'incertitude.

Néanmoins, l'épinette blanche 2020 et l'épinette noire 2020 présentent des courbes de prélèvement pouvant être approchées par la courbe normale. Un biais systématique négatif est toutefois institué en ce qui a trait à la journée présentant le plus fort prélèvement ainsi qu'en ce qui concerne les valeurs de prélèvement maximales. Il n'est malheureusement pas possible sans une modification de la méthode de calcul utilisée dans Agriflux, de mesurer l'impact de ces biais sur les quantités de nitrates ruisselés et lessivés simulées par le modèle.

Le prélèvement chez l'épinette blanche 2010 présente un retard important par rapport aux plants 2020. Ce retard peut s'expliquer par l'effort d'adaptation que doit consentir le plant fraîchement repiqué. Selon les données de l'échantillonnage, la saison de croissance chez l'épinette blanche 2010 aurait commencé aux alentours du premier juin et ne serait que de 150 jours. Nous comprendrons à la lumière de l'analyse de sensibilité que ce retard puisse avoir un impact significatif sur les quantités de nitrates lessivés. Ce retard doit être pris en compte lors de la simulation afin de ne pas biaiser les prédictions obtenues à l'aide de la modélisation.

Figure 4.9 Ruissellement des nitrates pour une culture 2010 en fonction du prélèvement et de la durée de la saison de croissance

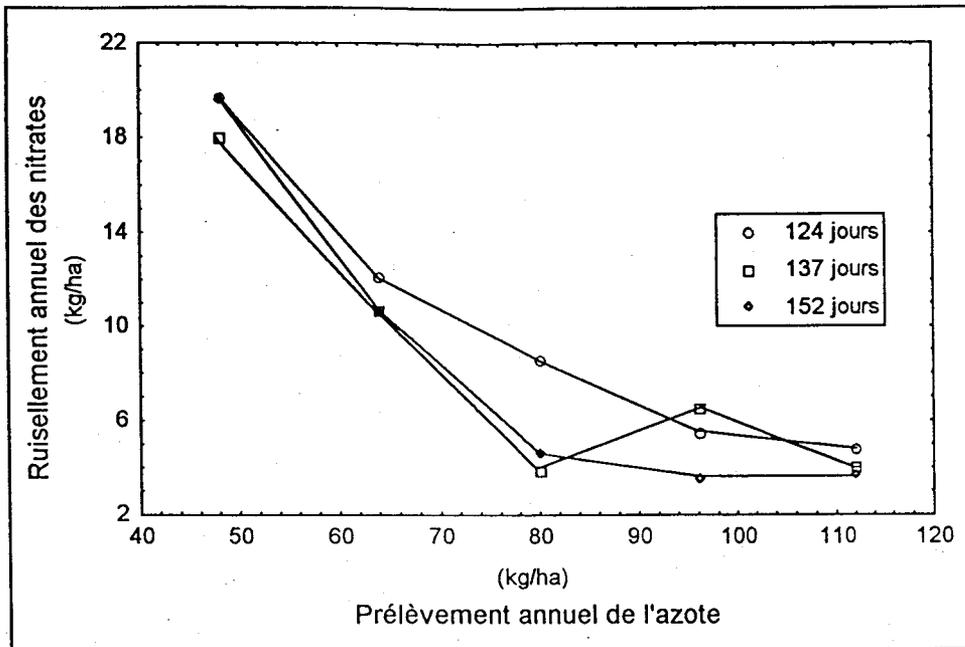


Figure 4.10 Ruissellement des nitrates pour une culture 2020 en fonction du prélèvement et de la durée de la saison de croissance

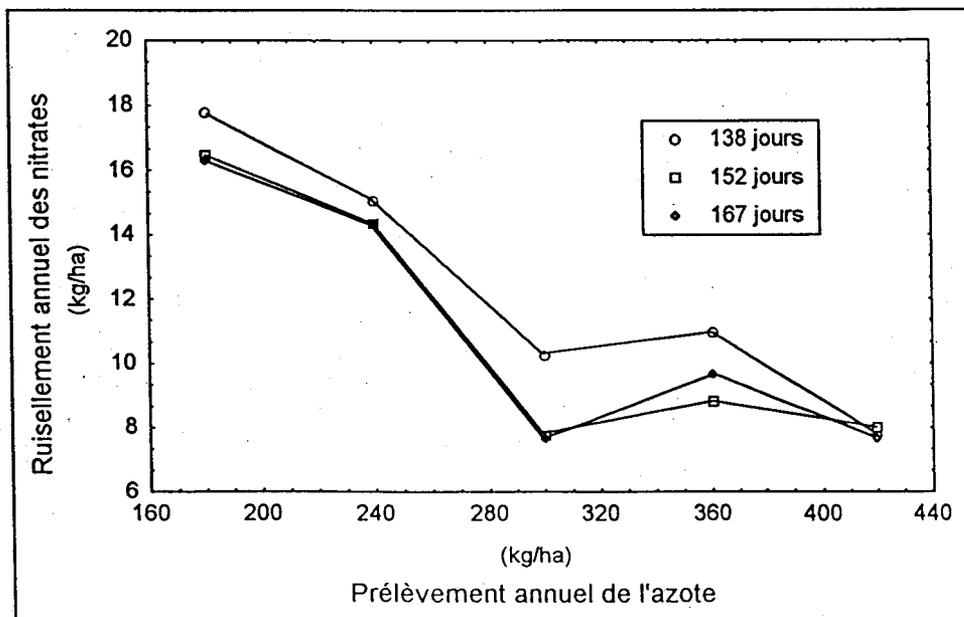


Figure 4.11 Lessivage des nitrates pour une culture 2010 en fonction du prélèvement et de la durée de la saison de croissance

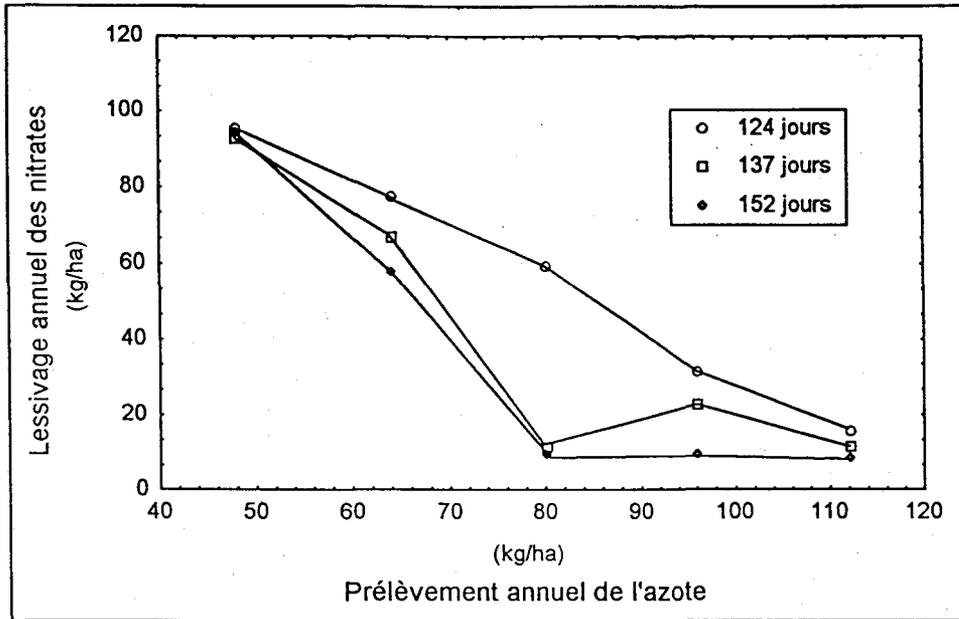


Figure 4.12 Lessivage des nitrates pour une culture 2020 en fonction du prélèvement et de la durée de la saison de croissance

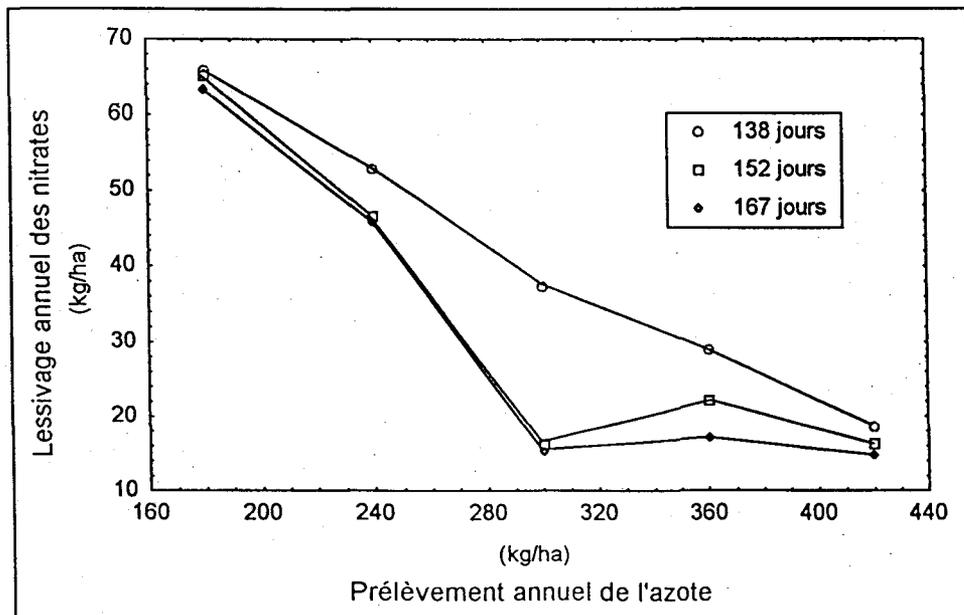


Tableau 4.2 Importance relative des changements induits dans le ruissellement et le lessivage des nitrates en réponse aux variations imposées au prélèvement et à la longueur de la saison de croissance

Facteurs	Culture	Niveaux		Réponses	
		Intrinsèques	Relatifs	Ruisselle- ment	Lessivage
Saison	2010	124 jours	-9.49%	17.77%	35.83%
		137 jours	0.00%	0.00%	0.00%
		152 jours	10.95%	-2.24%	-12.30%
	2020	138 jours	-9.21%	11.65%	22.20%
		152 jours	0.00%	0.00%	0.00%
		167 jours	9.87%	0.45%	-6.06%
Prélève- ment	2010	48 kg/ha/an	-40.00%	233.60%	249.28%
		64 kg/ha/an	-20.00%	94.76%	150.24%
		80 kg/ha/an	0.00%	0.00%	0.00%
		96 kg/ha/an	20.00%	-9.80%	-20.37%
		112 kg/ha/an	40.00%	-27.12%	-55.65%
	2020	180 kg/ha/an	-40.00%	97.16%	180.78%
		240 kg/ha/an	-20.00%	70.75%	110.35%
		300 kg/ha/an	0.00%	0.00%	0.00%
		360 kg/ha/an	20.00%	14.99%	-1.17%
		420 kg/ha/an	40.00%	-8.65%	-28.16%

Tableau 4.3a Résultats de l'analyse de variance portant sur l'incidence du prélèvement et de la longueur de la saison de croissance sur le ruissellement des nitrates dans une culture 2010

	SS	d.f.	MS	F	P
Traitement	24361	14	1740	1.84	0.05
Nb jours	446	2	223	0.24	NF ¹
Prélèvement	23298	4	5824	6.14	<0.005
Interaction	617	8	77	0.08	NF
Erreur	696871	735	948		
Total	721232	749			

¹ Non significatif

Tableau 4.3b Résultats de l'analyse de variance portant sur l'incidence du prélèvement et de la longueur de la saison de croissance sur le ruissellement des nitrates dans une culture 2020

	SS	d.f.	MS	F	P
Traitement	9970	14	712	2.83	<0.005
Nb jours	268	2	134	0.53	NF
Prélèvement	9543	4	2386	9.47	<0.005
Interaction	158	8	20	0.08	NF
Erreur	185230	735	252		
Total	195200	749			

Tableau 4.3c Résultats de l'analyse de variance portant sur l'incidence du prélèvement et de la longueur de la saison de croissance sur le lessivage des nitrates dans une culture 2010

	SS	d.f.	MS	F	P
Traitement	839724	14	59980	71.32	<0.005
Nb jours	53269	2	26634	31.67	<0.005
Prélèvement	737540	4	184385	219.26	<0.005
Interaction	48916	8	6114	7.27	<0.005
Erreur	618094	735	841		
Total	1457819	749			

Tableau 4.3d Résultats de l'analyse de variance portant sur l'incidence du prélèvement et de la longueur de la saison de croissance sur le lessivage des nitrates dans une culture 2020

	SS	d.f.	MS	F	P
Traitements	276063	14	19719	125.93	<0.005
Nb jours	12319	2	6160	39.34	<0.005
Prélèvement	255170	4	63793	407.40	<0.005
Interaction	8574	8	1072	6.84	<0.005
Erreur	115090	735	157		
Total	391153	749			

Par ailleurs, l'allure des courbes de prélèvement semble liée aux conditions environnementales qui prévalent à chacune des pépinières. Ceci pourrait expliquer la différence importante observée dans la longueur des saisons de croissance observée aux pépinières de Saint-Modeste et de Sainte-Luce où normalement il devrait y avoir similitude (voir tableau 2.1). L'évolution de la température du sol en fonction de ses propriétés physiques au cours de la saison de croissance pourrait être un facteur déterminant. Ce fait met en relief l'importance de bien connaître les caractéristiques du prélèvement sur une station donnée.

2.5 CONCLUSION ET RECOMMANDATION

Il ressort des données de la littérature que les essences résineuses affichent une certaine préférence pour le prélèvement de la forme ammonium. La répartition par le modèle, du prélèvement entre les différentes formes de l'azote est en conséquence suspecte et doit faire l'objet d'une investigation. Différents ratios devraient être testés pour leurs impacts sur les résultats de la simulation afin de juger de la pertinence d'entreprendre des recherches en ce sens pour les principales essences produites au Québec.

Selon les données d'échantillonnage obtenues des différentes pépinières, l'utilisation de la courbe normale pour le calcul du prélèvement journalier de l'azote serait valable bien que les courbes de prélèvement réel soient légèrement leptocurtiques par rapport à la normale et faiblement décentrée vers la fin de la saison. Une attention particulière doit cependant être accordée au début et à la fin de la saison de croissance qui seront spécifiés au modèle afin d'éviter un biais substantiel dans les prédictions sur le lessivages des nitrates, notamment en ce qui a trait à la saison suivant le repiquage du plant. En fait, l'utilisation du modèle devrait reposer sur une bonne connaissance des caractéristiques du prélèvement de l'azote par une espèce donnée sur un site donné. La variabilité du prélèvement d'une année à l'autre doit être connue si on veut estimer l'erreur potentielle qu'on peut faire si on applique les valeurs mesurées pour une année aux années subséquentes.

La modélisation du prélèvement de l'azote par les semis d'essences forestières au cours d'une saison de croissance, bien que peu étudiée, offre à ce stade-ci des perspectives de développement intéressantes. En outre, le développement d'une fonction de répartition basée sur la température du sol pourrait s'avérer intéressant. À plus court terme, il pourrait être intéressant d'offrir à l'utilisateur la possibilité d'entrer sa propre fonction de répartition.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alexander, I.J. et R.I. Fairley, 1986. Growth and nitrogen uptake rates of ectomyccorhizal spruce seedling. *In* Physiological and Genetical Aspects of Mycchorhizae. V. Gianinazzi-Pearson et S. Gianinazzi (Ed.). pp. 377-382. Proc. 1st European Symposium on Mycchorhizae (Dijon, 1-5 July 1986). INRA, Paris.
- Andersen, C.P., E.I. Sucoff et R.K. Dixon, 1986. Effects of root zone temperature on root initiation and elongation in red pine seedlings. *Can. J. For. Res.* **16**:696-700
- Beevers, L. et R.H. Haguman, 1983. Uptake and reduction of nitrate: bacteria and higher plants. *In* Läuchli et Bielecki (ed), Encyclopedia of Plant Physiology. Springer-Verlag, New York. pp. 351-376
- Bigg, W.L. et T.W. Daniel, 1978. Effects of nitrate, ammonium and pH on the growth of conifer seedlings and their production of nitrate reductase. *Plant Soil*, **50**: 371-385
- Bledsoe, C.S. et R.J. Zasoski, 1983. Effects of ammonium and nitrate on growth and nitrogen uptake by myccorhizal Douglas-fir seedlings. *Plant Soil*, **71**: 445-454
- Bowen, G.D., 1970. Effects of soil temperature on root growth and on phosphate uptake along *Pinus radiata* roots. *Autr. J. Soil Res.*, **8**: 31-42
- Bowen, G.D., 1973. Mineral nutrition of ectomyccorhizae. *In* Ectomyccorhizae. G.C. Marks et T.T. Koslowski (ed.). pp. 151-206
- Boxman, A.W. et J.G.M. Roelofs, 1988. Some effects of nitrate versus ammonium nutrition on the nutrient fluxes in *Pinus sylvestris* seedlings. Effects of myccorhizal infection. *Can. J. Bot.* **66**:1091-1097
- Clarkson, D.T., 1986. Regulation of the absorption and release of nitrate by plant cells: a review of current ideas and methodology. *In* Fundamental, ecological and agricultural Aspects

of Nitrogen Metabolism in higher Plants. H. Lambers, J.J. Neeteson et I. Stulen (Ed.). Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht. pp. 3-27

Clarkson, D.T., M.J. Hopper et L.H.P. Jones, 1986. The effect of root temperature on the uptake of nitrogen and the relative size of the root system in *Lolium perenne*. I. Solutions containing both NH_4^+ and NO_3^- . *Plant Cell Environ.*, **9**: 535-543

Clarkson, D.T., M.J. Earnshaw, P.J. White et H.D. Cooper, 1988. Temperature dependant factors influencing nutrient uptake: an analysis of responses at different levels of organisation. *In* Plants and Temperature. S.P. Long et F.I. Woodward (Ed). Company of Biologists, Symp. Soc. Exp. Biol. **42**: 281-309

Flaig, H. et H. Mohr, 1992. Assimilation of nitrate and ammonium by the scots pine (*Pinus sylvestris*) seedling under conditions of high nitrogen supply. *Physiol. Plant.* **84**:568-576

Fowells, H.A. et R.W. Krauss, 1959. The inorganic nutrition of loblolly pine and virginia pine with special reference to nitrogen and phosphorus. *For. Sci.* **5**:95-113

Gezelius, K. et T. Näsholm, 1993. Free amino acids and protein in scots pine seedlings cultivated at different nutrient availabilities. *Tree Physiol.* **13**:71-86

Guay, J.Y. et M. Nadeau, 1994. Étude quadriennale du lessivage des éléments minéraux. Doc. Trav., Gouv. Qué., Min. Ress. Nat., Pépin. for. St-Modeste, Qué., 31 p.

Kaufmann, M.R., 1975. Leaf water stress in Engelmann spruce. *Plant Physiol.* **56**: 841-844

Kaufmann, M.R., 1977. Soil temperature and drying cycle effects on water relations of *pinus radiata*. *Can. J. Bot.*, **55**: 2412-2418

Kirkby, E.A., 1969. Ion uptake and ionic balance in plants in relation to the form of nitrogen nutrition. *In* Ecological Aspects of mineral Nutrition of Plants. I. Rorison (Ed.) Blackwell, Oxford. pp. 215-235

Kraske, C.R. et I.J. Fernandez, 1990. Conifer seedling growth response to soil type and selected nitrogen availability indices. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **54**:246-251

- Lavoie, N., L.P. Vézina et H.A. Margolis, 1992. Absorption and assimilation of nitrate and ammonium ions by jack pine seedlings. *Tree Physiol.* **11**:171-183
- Larocque, M. et O. Banton, 1994. Determining parameter precision for modeling nitrate leaching: Inorganic Fertilization in nordic climates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **58**:396-400
- Laurence, J.A., R.G. Amondson, A.L. Friend, E.J. Pell et P.J. Temple, 1994. Allocation of carbon in plants under stress: an analysis of ROPIS experiments. *J. Environ. Qual.*, **23**: 412-417
- Li, B., S.E. McKeand et H.L. Allen, 1991. Genetic variation in nitrogen use efficiency of loblolly pine seedlings. *For. Sci.* **37**:613-626
- Lopushinsky, W. et M.R. Kaufmann, 1984. Effects of cold soil on water relations and spring growth of Douglas-fir seedlings. *For. Sci.* **30**:628-634
- Lopushinsky, W. et T.A. Max, 1990. Effect of soil temperature on root and shoot growth and on budburst timing in conifer seedlings transplants. *New For.* **4**:107-124
- Lovett, G.M. et P. Tobiessen, 1993. Carbon and nitrogen assimilation in red oaks (*Quercus rubra* L.) subject to defoliation and nitrogen stress. *Tree Physiol.* **12**:259-269
- Marschner, H., M. Häussling et E. George, 1991. Ammonium and nitrate uptake rates and rhizosphere pH in non-mycorrhizal roots of Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.]. *Trees*, **5**: 14-21
- Parent, B., 1994. Ressource et Industrie forestières - Portrait statistique. Gouv. Qué., Min. Ress. Nat., Dir. Rel. Pub., ISBN 2-550-29911-6
- Peuke, A.D. et R. Tischner, 1991. Nitrate uptake and reduction of aseptically cultivated spruce seedlings, *Picea abies* (L.) Karst. *J. Exp. Bot.* **42**:723-728
- Peuke, A.D. et R. Tischner, 1993. The effects of SO₂ fumigation on nitrogen metabolism of aseptically grown spruce seedlings. *Environ. Pollut.* **83**:371-377
- Proe, M.F. et P. Millard, 1994. Relationships between nutrient supply, nitrogen partitioning and growth in young Sitka spruce (*Picea sitchensis*). *Tree Physiol.* **14**:75-88

- Ramade, F., 1984. Élément d'écologie - écologie fondamentale. Éd. McGraw-hill, 75014 Paris, ISBN: 2-7040-1062-4, 397 p.
- Raven, J.A. et F.A. Smith, 1976. Nitrogen assimilation and transport in vascular land plants in relation to intracellular pH regulation. *New Phytol.*, **76**: 415-431
- Rygiewicz, P.L., C.S. Bledsoe et R.J. Zasoski, 1984. Effects of ectomyccorhizae and solution pH on [¹⁵N]ammonium uptake by coniferous seedlings. *Can. J. For. Res.* **14**:885-892
- Rygiewicz, P.L., C.S. Bledsoe et R.J. Zasoski, 1984. Effects of ectomyccorhizae and solution pH on [¹⁵N]nitrate uptake by coniferous seedlings. *Can. J. For. Res.* **14**:893-899
- Shipley, B. et R.H. Peters, 1990. The allometry of seed weight and seedling relative growth rate. *Funct. Ecol.*, **4**: 523-529
- Sposito, G. 1989. *The Chemistry of Soil*. Oxford Univ. Press, New York. 277 p.
- Stadenberg, I., A.J.S. McDonald et S. Palmer, 1994. Diurnal variation in leaf extension of *Salix viminalis* at two nitrogen supply rates. *Tree Physiol.*, **14**: 1131-1138
- Steel, R.G.D. et J.H. Torrie, 1980. *Principles and Procedures of Statistics - a biometrical Approach*, second Ed. Éd. McGraw-Hill, U.S., ISBN 0-07-060926-8, 633 p.
- Teng, Y, et V.R. Timmer, 1995. Rhizosphere phosphorus depletion induced by heavy nitrogen fertilization in forest nursery soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **59**:227-233
- Timmer, V.R. et G. Armstrong, 1989. Growth and nutrition of containerized *Pinus Resinosa* seedlings at varying moisture regimes. *New For.* **3**:171-180
- Van den Driessche, R., 1971. Response of conifer seedlings to nitrate and ammonium sources of nitrogen. *Plant Soil* **34**:421-439
- Van den Driessche, R. et J. Dangerfield, 1975. Response of douglas-fir seedlings to nitrate and ammonium nitrogen sources under various environmental conditions. *Plant Soil* **42**:685-702

Vapaavuori, E.M., R. Rikala et A. Ryyppö, 1992. Effects of temperature on growth and photosynthesis in conifer seedlings during shoot elongation. *Tree Physiol.* **10**:217-230

Wilson, C.V., 1971. Le climat du Québec en deux parties - Atlas climatique première partie. Service Météorologique du Canada. U.D.C. 551.582.3, catalogue t57-7/11-1.