

PEGGY MACAIGNE

**SUIVI DU DEVENIR DE L'EAU ET DES NITRATES
SOUS CULTURE DE POMMES DE TERRE
(*SOLANUM TUBEROSUM* L.) À L'AIDE DU
TRAÇAGE ISOTOPIQUE ^{18}O , ^2H ET ^{15}N ET D'UN
ÉCHANTILLONNAGE REPRÉSENTATIF DE LA
MICROTOPOGRAPHIE**

Thèse présentée
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de doctorat en Génie Civil
pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.)

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2007

Résumé

La quantification du lessivage des engrais azotés en vue de réduire les pertes dans l'environnement sous production de pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) sur sol sableux constitue un enjeu majeur de la recherche actuelle. L'objectif général de la thèse répond à cette problématique en trois parties. Le premier sous-objectif visait à suivre le devenir des pluies et du couvert neigeux fondu dans le sol tout au long de l'année par les isotopes stables de l'eau (^{18}O et ^2H), car les nitrates suivent le trajet de l'eau. Nos résultats évaluent la vitesse de percolation des pluies et de l'eau issue de la fonte du couvert neigeux à environ $1,5 \pm 0,5$ mois. L'eau circule plus lentement dans la couche arable supérieure que dans la couche sous-jacente. Finalement, un modèle perceptuel permet de distinguer le lessivage sur deux périodes : une première période entre la récolte et la plantation et une seconde période durant le développement de la plante. Le deuxième sous-objectif s'est intéressé au déplacement de l'engrais dans le sol et à estimer les quantités récupérées par la plante par le suivi de l'engrais enrichi en azote ^{15}N . Des profils de sol ont été prélevés les mêmes jours que pour l'oxygène ^{18}O et le deutérium. Les résultats montrent que l'engrais reste localisé au centre de la butte tant qu'il n'y a aucune pluie supérieure à 70 ± 10 mm. Les nitrates sont lessivés essentiellement à l'automne, ce qui confirme les résultats obtenus avec l'oxygène ^{18}O et le deutérium. A la récolte, le tubercule a prélevé 47% de l'azote issu du fertilisant, le reste étant susceptible au lessivage. Jusqu'au maximum de couverture foliaire, la plante prélève préférentiellement l'azote issu de l'engrais comparativement à l'azote issu de la minéralisation. La situation s'inverse ensuite. Le troisième sous-objectif était de simplifier la mesure des nitrates du sol à l'intérieur de la butte en vue d'améliorer la précision des bilans azotés. La butte a été échantillonnée sur une profondeur de cinquante centimètres à quatre endroits et à cinq moments durant la saison. Une relation robuste de pente de 0.78 liait les concentrations de nitrate du sol prélevées au centre de la butte à celles de l'intégralité du profil de sol (0-80 cm) dont la microtopographie avait été modifiée par le buttage.

Abstract

Quantifying nitrogen fertilizer leaching in order to reduce environmental losses in the potato (*Solanum tuberosum* L.) production on sandy soils is a major issue of current research. The general objective of the thesis was to address this problem in three parts. The first part aimed to follow the fate of rainfall and snowmelt in the soil during an entire year with water stable isotopes (^{18}O and ^2H) since nitrates follow water pathways. Rainfall and snow melt percolation rate was approximately 1.5 ± 0.5 months. Water percolates at slower rate in the upper soil layer than in sublayers. Finally, a perceptual model considered two periods of nitrate leaching: the first period from previous harvest to seeding and the second during the cropping season. In the second part, we followed the nitrogen fertilizer pathway through soil and estimated fertilizer recovered by plants after fortification with nitrogen 15. Soil profiles were sampled on the same days as for the oxygen 18 and deuterium samplings. Results show that the fertilizer remained in the hill until the occurrence of rainfall events exceeding 70 ± 10 mm. Nitrates are leached away mostly during the fall, as was the case for oxygen 18 and deuterium. At harvest, the tuber took up 47% of the nitrogen from fertilizer, leaving the remainder susceptible to leaching. Until maximum foliage coverage, the plant took up nitrogen more from fertilizer than mineralized organic nitrogen, but the reverse occurred thereafter. The third part was to simplify the sampling procedure of soil nitrate within the hill for budgeting nitrate. The hill was sampled across a 0-50 cm soil profile at four places and at five moments during the cropping season. A reliable relationship with a slope of 0.78 related soil nitrate content sampled at the centre of the hill to that of the entire hill for the 0-50 cm soil profile.

Avant-Propos

Quelle belle aventure que la recherche ! Quelle joie que de découvrir des réponses aux questions que l'on se pose. Je compare le doctorat à la conception d'une pierre philosophale, car ces quatre années de thèse m'ont beaucoup appris sur les étapes d'une recherche et sur moi-même. Le travail à la base de tout se mêle à l'innovation et au dépassement de soi.

Venant de France avec mon bagage isotopique j'ai été chaleureusement accueillie à l'Université Laval de Québec au sein d'une équipe de travail motivée, dynamique et efficace. Ensemble nous avons mené ce projet multidisciplinaire, résultat de la rencontre entre l'agronomie et l'hydrogéologie.

Ce travail présente les résultats de trois années d'échantillonnage dans les champs de pommes de terre de l'entreprise Dolbec, que je remercie grandement pour son intérêt dans la recherche et sa participation financière.

La première personne que je souhaite remercier est mon directeur de recherche François Anctil pour tout d'abord m'avoir fait confiance dans la conduite de ce projet en me laissant une grande liberté. Il a su m'apporter un soutien par son écoute et ses conseils en tout temps malgré ses nombreuses implications par ailleurs. J'ai tout particulièrement apprécié sa franchise et sa générosité dans le partage de ses connaissances et de son savoir-faire.

La deuxième personne que je remercie est mon co-directeur Léon-Étienne Parent pour sa présence et sa grande implication académique et financière dans le projet. Ses conseils et son expertise des sols ont été indispensables. Je le remercie tout particulièrement pour s'être grandement investi dans la correction des articles et de la thèse.

Parmi les membres de l'équipe il y a d'abord Nicolas Samson, que je remercie pour sa participation active dans la collecte des données, sa patience, son courage et son entrain. Il y a ensuite Annie-Claude Parent, que je remercie pour son aide dans le traitement des données, notamment dans la programmation MATLAB, mais aussi pour son support dans les commandes de matériel. Merci aussi à Jérôme Goulet-Fortin pour m'avoir fourni les données de prélèvement azotés de la plante issues du modèle de croissance CENTURY et SUBSTOR-DSSAT après calibration. Concernant la réalisation de la ligne de distillation

sous vide, je remercie Denis Jobin pour sa participation dans la construction, Michel Bisping et Mohammad-Hassan Zahedi-Niaki pour leurs recommandations. Concernant la théorie sur les isotopes stables, je remercie Jean-Luc Michelot pour ses conseils concernant l'oxygène 18 et le deutérium et Martin Chantigny pour ses recommandations sur l'azote 15. Je remercie aussi Marie-Hélène Lamontagne et Rahima Abdelhafid pour les analyses en laboratoire, Philippe Parent pour son aide au terrain et sa précision dans la collecte de la pluie, Simon Nolin et Mélanie Filion pour leur aide dans la collecte des données.

Je tiens aussi à remercier l'institut Hydro-Québec pour avoir porté intérêt à ce projet et m'avoir attribué une bourse IHQEDS.

Je remercie maintenant ma famille pour son soutien dans cette aventure.

Merci aussi à mes amis notamment Emmanuelle Vigne, Paola et Carolina Cardénas Gomez, Najat Kamal, Aïcha Ghézal, Philippe Chang, Charles Therrien, Marie-Amélie Boucher, Simon Nolin, François Nzokou, Harouna Yonaba, Yannick Protière, Frédéric Lory, Abibata Ouattara et Alexa Bresson qui ont contribué à maintenir la joie et le dynamisme dans le laboratoire tout au long de l'année dans une ambiance internationale. Merci à tous ceux qui m'ont soutenue dans ce projet et ceux qui ont traversé l'Atlantique nous ramener un peu de chaleur.

La thèse se présente sous une forme originale incluant à la fois des parties en français et des articles en anglais. La rédaction d'article en anglais a été privilégiée car c'est la forme reconnue de diffusion des résultats scientifiques et parce que cela représente un défi d'écriture et de concision. L'ensemble de ces travaux ont été analysés et écrits par moi-même puis corrigés par mes directeurs. Le premier chapitre présente un article dont je suis le premier auteur, François Anctil le deuxième auteur et Léon-Etienne Parent le troisième auteur ; il sera soumis à la revue scientifique *Journal of Hydrology*. Le deuxième chapitre donnera lieu à un article, dont je serai le premier auteur, François Anctil le deuxième auteur et Léon-Etienne Parent le troisième auteur. L'article présenté dans le troisième chapitre, dont je suis le premier auteur, Léon-Etienne Parent le deuxième auteur et François Anctil le

troisième auteur, a été soumis à la revue scientifique *Communications in Soil Sciences and Plant Analysis*. Il est en cours de révision.

*A mon père, A ma mère, pour m'avoir donné
le goût des études et de la persévérance et A
mon mari, Lionel, pour m'avoir
accompagnée dans ce projet*

*« La terre nous en apprend plus long sur
nous que tous les livres. Parce qu'elle nous
résiste. L'homme se découvre quand il se
mesure avec l'obstacle. »*
(Antoine de Saint-Exupéry 1900-1944)

*« La grande aventure, c'est de voir surgir
quelque chose d'inconnu, chaque jour, dans
le même visage. C'est plus grand que tous les
voyages autour du monde. »*
(Alberto Giacometti 1901-1966)

*« La neige possède ce secret de rendre au cœur en un souffle la joie naïve que les années
lui ont impitoyablement arrachée. »*
(Antonine Maillet 1929-)

Table des matières

RÉSUMÉ	I
ABSTRACT.....	II
AVANT-PROPOS.....	III
TABLE DES MATIÈRES.....	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
LISTE DES FIGURES	XII
LISTE DES PHOTOGRAPHIES.....	XIV
LISTE DES PHOTOGRAPHIES.....	XIV
LISTE DES ABRÉVIATIONS	XV
LISTE DES ABRÉVIATIONS	XV
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1	13
1. SUIVI DE LA PERCOLATION DES PLUIES ET DU COUVERT NEIGEUX FONDU AU TRAVERS DU SOL PENDANT LA SAISON PAR L'OXYGÈNE 18 (¹⁸O) ET LE DEUTÉRIUM (D OU ²H)	14
1.1 RÉSUMÉ.....	14
1.2 ARTICLE.....	15
1.2.1 <i>Abstract</i>	15
1.2.2 <i>Introduction</i>	16
1.2.3 <i>Material and methods</i>	18
1.2.3.1 Site description.....	18
1.2.3.2 Precipitation sampling.....	18
1.2.3.3 Soil sampling.....	19
1.2.3.4 Laboratory analysis.....	19
1.2.4 <i>Results</i>	20
1.2.4.1 Climatic and isotopic data from rainfalls and snowmelt runoff.....	20
1.2.4.2 Evolution of soil water content and isotopic signature.....	24
1.2.5 <i>Discussion</i>	35
1.2.5.1 Synthesis	35
1.2.5.2 Perceptual model.....	36
1.2.6 <i>Conclusion</i>	38
1.2.7 <i>References</i>	39
CHAPITRE 2	43
2. SUIVI DE L'ÉVOLUTION DU FERTILISANT AZOTÉ DANS LE SOL ET LA POMME DE TERRE PAR L'AZOTE 15 AU COURS DE LA SAISON	44
2.1 INTRODUCTION	44
2.2 THEORIE.....	45
2.2.1 <i>Efficacité du fertilisant par l'azote 15</i>	45

2.2.2 Bilan d'azote 15 et quantification du lessivage des nitrates issu du fertilisant.....	46
2.3 MATERIELS ET METHODES	49
2.3.1 Pratiques culturales	49
2.3.2 Echantillonnage	49
2.3.3 Analyses en laboratoire.....	50
2.3.4 Modèles CENTURY et SUBSTOR.....	50
2.4 RESULTATS	51
2.4.1 Suivi des précipitations de septembre 2004 à Mai 2006	52
2.4.2 Evolution des teneurs isotopiques d'azote 15 dans le sol au cours de la saison en fonction de la profondeur.....	53
2.4.3 Evaluation de l'efficacité du fertilisant par l'azote 15.....	56
2.4.4 Quantification de la minéralisation à partir des données d'azote 15 de la plante et liens avec l'évolution des prélèvements azotés de la plante au cours de la saison modélisé par CENTURY et SUBSTOR-DSSAT.....	58
2.4.5 Bilan d'azote 15 et quantification du lessivage issu du fertilisant	60
2.4.5.1 Estimation du lessivage de l'azote issu du fertilisant en fin de saison.....	61
2.4.5.2 Recommandations reliées aux bilans d'azote à l'intérieur de la saison	61
2.4.5.3 Importance de vérifier la cohérence des données par un bilan d'azote 15.....	65
2.5 CONCLUSION.....	67
CHAPITRE 3	70
3. ETABLISSEMENT D'UNE RELATION POUR L'ÉCHANTILLONNAGE DE L'AZOTE À PARTIR D'UN PROFIL DE SOL UNIQUE DANS LA BUTTE DE POMME DE TERRE.....	71
3.1 RÉSUMÉ	71
3.2 ARTICLE.....	72
3.2.1 Abstract	72
3.2.2 Introduction.....	73
3.2.3 Materials and methods	74
3.2.4 Results and discussion.....	77
3.2.5 Conclusion.....	80
3.2.6 References	80
CONCLUSION GÉNÉRALE	82
BIBLIOGRAPHIE.....	87
ANNEXES	91
A.I PLAN EXPERIMENTAL DES PARCELLES ISOTOPIQUES.....	92
A.II DESCRIPTIF DE LA LIGNE DE DISTILLATION SOUS VIDE ET PROTOCOLE EXPERIMENTAL.....	93
DESCRIPTION DES DIFFÉRENTES PARTIES DU MONTAGE	95
PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL DE LA CRYODISTILLATION SOUS VIDE DE L'EAU DU SOL	106
A.III CALCULS CONCERNANT LES DONNEES D'AZOTE 15 (CHAPITRE 3).....	111
ETAPES DE CALCULS DE L'ÉQUATION 2.2 (CHAP.2) :	112
CALCUL DE F	112
CALCUL DE A	113
CALCUL DE B	114
CALCUL DE C	114
CALCUL DE P	114
A.IV MODELE D'ESTIMATION DES TENEURS EN AZOTE 15 DU SOL APRES L'OPERATION DE BUTTAGE	116

A. V DONNEES METEOROLOGIQUES MESUREES AU CHAMP ET A LA STATION DE DONNACONA.....	119
A. VI DONNÉES ISOTOPIQUES CONCERNANT L'18O ET LE 2H MESURÉES DANS LA PLUIE, LA NEIGE ET LE SOL	121
A. VII DONNÉES ISOTOPIQUES CONCERNANT LE 15N MESURÉES DANS LE SOL ET LA PLANTE CONCERNANT LE 15N	124
A. VII DONNÉES ISOTOPIQUES CONCERNANT LE 15N MESURÉES DANS LE SOL ET LA PLANTE CONCERNANT LE 15N	124

Liste des tableaux

Tableau 1.1 (Table 1.1) Organic Carbon (C), measured volumetric soil water content (θ) and estimated volumetric soil water content at field capacity for water potentials -33 kPa and -10 kPa (θ_{-33} and θ_{-10}).....	25
Tableau 2.1. Données brutes du pourcentage atomique d'azote 15 par rapport à l'azote total dans les échantillons de sol à chaque profondeur et à différents moments de la saison. Chaque donnée est la moyenne entre deux échantillons prélevés à la même profondeur issus de deux profils différents.	53
Tableau 2.2 Evolution des valeurs delta ^{15}N (‰) du sol.	54
Tableau 2.3 Calcul du pourcentage d'azote issu du fertilisant récupéré par la plante ($N_{\text{récupéré-plante}}$)	57
Tableau 2.4 Quantités d'azote total contenu dans chaque échantillon de sol (kg N ha^{-1})	62
Tableau 2.5 Quantités d'azote 15 du sol au centre de la butte, somme sur les profondeurs 0-40 cm et 40-80 cm et différentielles à chaque date par rapport à t_0 , avec $t_0 = 4$ mai 2005.	66
Tableau 3.13.2 Exemple d'application du modèle (étapes 1 à 3) avec les données d'azote 15 dans le sol de l'étude.....	117
Tableau A.IV.3.3 Estimation des quantités d'azote 15 du sol par assemblage des données issues du centre de la butte avec celles de l'entre-rang (étapes 4 et 5).....	118
Tableau A.V.0.1 Normales mensuelles à la station météorologique de Donnacona (Environnement Canada) concernant les pluies et les précipitations	119
Tableau A.V.0.2 Données mensuelles mesurées au Plateau Ste Anne et complétées par des données mesurées à la station météorologique de Donnacona (Environnement Canada) concernant les pluies.....	120

Liste des figures

Figure 0.1 Schéma illustrant le trajet de l'eau et des nitrates du champ vers la rivière.....	2
Figure 0.2 Droite Météorique Globale : relation entre l' ^{18}O et l' ^2H dans les précipitations (Rozanski et al., 1993).	8
Figure 1.1 Daily air temperature (T_a), daily rainfall (P), daily snow accumulation (S), oxygen 18 content in the precipitation samples ($\delta^{18}\text{O}$), and deuterium content in the precipitation samples ($\delta^2\text{H}$). Rainfall samples are identified by a circle, while snow pack samples are identified by a triangle.	21
Figure 1.2 Local Meteoric Water Line: a) rainfall (circle) and snow pack (triangle) isotopic signature b) Soil water (square) isotopic signature.....	23
Figure 1.3 Data from the 80 cm soil profile on May 04 2005 (after snowmelt, before the plantation): a) soil water content, b) delta oxygen 18, c) delta deuterium, d) Local Meteoric Water Line and soil water (square) isotopic signature.	26
Figure 1.4 Data from the 80 cm soil profile on July 20 2005 (foliage maximum) at centre hill: a) soil water content, b) delta oxygen 18, c) delta deuterium, d) Local Meteoric Water Line and soil water (square) isotopic signature.	27
Figure 1.5 Data from the 80 cm soil profile on July 20 2005 (foliage maximum) at inter-row: a) soil water content, b) delta oxygen 18, c) delta deuterium, d) Local Meteoric Water Line and soil water (square) isotopic signature.	28
Figure 1.6 Data from the 80 cm soil profile on September 12 2005 (just before harvest) at centre hill: a) soil water content, b) delta oxygen 18, c) delta deuterium, d) Local Meteoric Water Line and soil water (square) isotopic signature.	30
Figure 1.7 Data from the 80 cm soil profile on September 12 2005 (just before harvest) at inter-row: a) soil water content, b) delta oxygen 18, c) delta deuterium, d) Local Meteoric Water Line and soil water (square) isotopic signature.	31
Figure 1.8 Data from both 80 cm soil profiles on September 12 2005 (after harvest, before soil freeze): a) soil water content, b) delta oxygen 18, c) delta deuterium, d) and e) Local Meteoric Water Line and soil water (square) isotopic signature.	33

Figure 1.9 Data from the 80 cm soil profile on May 5 2006 (after snowmelt, before the next plantation): a) soil water content, b) delta oxygen 18, c) delta deuterium, d) Local Meteoric Water Line and soil water (square) isotopic signature.....	35
Figure 1.10 Perceptual model for water movement through the soil at the experimental site: a) bare soil conditions, b) cultivated soil conditions.	37
Figure 2.1 Comparaison des précipitations mensuelles observées avec les valeurs normales de la station Donnacona.....	52
Figure 2.2 Observations d'azote total contenu dans la plante et le tubercule et observations d'azote issu du fertilisant récupérées par la plante et le tubercule (20 juillet et 12 septembre 2005) rattachées à l'évolution des prélèvements azotés de la plante au cours de la saison modélisée par CENTURY et SUBSTOR-DSSAT.	59
Figure 2.3 Schéma des variations de reliefs à t au centre de la butte et dans l'entre-rang par rapport à la situation à t ₀	65
Figure 3.1 Cross section of a potato hill and position of the four boreholes (h).	75
Figure 3.2 Soil sampling procedure (A: before hilling; B: after hilling).	76
Figure 3.3 Evolution of soil nitrate in the center of the hill (hole 1). The confidence interval (P = 0.05) is 2 times the mean standard error.	78
Figure 3.4 Daily precipitations (mm) from May 5th to September 29 th	79
Figure 3.5 Relationship between nitrate concentration in center hill and in the entire soil for the 0-50 cm profile at St-Ubalde and St-Alban, Quebec.	79
Figure A.I.1 Disposition des zones de prélèvements des sols à l'intérieur du champ.....	92
Figure A.II.1 Schéma représentatif de la ligne de distillation sous vide (vue de dessus)...	106

Liste des photographies

Photographie 1. Ligne de cryodistillation sous vide.....	94
Photographie 2. Rampe de distribution (vue de dessus).....	97
Photographie 3. Raccord en caoutchouc entre le piège à froid relié à la pompe à vide et la rampe de distribution (vue de dessus).....	98
Photographie 4. Détails sur le piège à froid relié à la pompe à vide	99
Photographie 5. Rubans chauffants (vue de dessus).....	100
Photographie 6. Détail des extrémités de la rampe de distribution	101
Photographie 7. Détail des extrémités de la rampe de distribution	102
Photographie 8. Détails sur les rubans chauffant et la sonde à vide.....	103
Photographie 9. Robinet permettant de réguler le flux de gaz N ₂ sur le montage et d'éviter la surpression.	104
Photographie 10. Détail sur l'assemblage des pièces du montage	105

Liste des abréviations

Général

D ou ^2H	Deutérium ou dihydrogène (nombre d'atomes)
GMWL	Global Meteoric Water Line Ligne de l'eau météorique globale (mondiale)
H ou ^1H	Hydrogène (nombre d'atomes)
IAEA	International Atomic Energy Agency Agence internationale de l'énergie atomique
LMWL	Local Meteoric Water Line Ligne de l'eau météorique locale
N_2	Gaz de diazote ou azote moléculaire
^{14}N	Azote 14 (nombre d'atomes)
^{15}N	Azote 15 (nombre d'atomes)
NH_3	Ammoniaque
NH_4^+	Ion ammonium
NO_3^-	Ion nitrate
N_2O	Oxyde nitreux
NSAT	Near Surface Air Temperature / Température de l'air proche de la surface terrestre ($^{\circ}\text{C}$)
O ou ^{16}O	Oxygène 16 (nombre d'atomes)
^{18}O	Oxygène 18 (nombre d'atomes)
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
R	Rapport isotopique
R^2 ou r^2	Coefficient de détermination
VSMOW	Vienna Standard Mean Ocean Water Standard de Vienne d'une océanique moyenne

Spécifiques aux équations

a Pourcentage de ^{15}N dans le fertilisant

b	Pourcentage de ^{15}N dans le sol à t
b_0	Pourcentage de ^{15}N dans le sol à t_0 , conditions initiales du sol avant application d'engrais enrichis en azote 15
BS	Biomasse sèche (kg)
C	Concentration en nitrate ($\text{mg NO}_3^- \cdot \text{N kg}^{-1}$)
c	Pourcentage de ^{15}N dans les plantes
F	Azote appliqué dans le fertilisant (kg ha^{-1})
L	Azote lessivé (kg N ha^{-1})
L^*	Azote issu du fertilisant lessivé (kg N ha^{-1})
M	Azote total produit naturellement par minéralisation (kg N ha^{-1})
$M_{\text{NH}_4\text{NO}_3}$	Masse molaire de la molécule NH_4NO_3 (g mol^{-1})
$M_{\text{NH}_4\text{NO}_3}^*$	Masse molaire de NH_4NO_3 marqué (g mol^{-1})
$m_{\text{NH}_4\text{NO}_3}$	Masse de la molécule NH_4NO_3 (g)
$m_{\text{NH}_4\text{NO}_3}^*$	Masse de l'engrais NH_4NO_3 marqué (kg)
$M_{\text{N}_{\text{tot}}}$	Masse molaire de l'azote total (g mol^{-1})
$m_{\text{N}_{\text{tot}}}$	Masse totale d'azote par hectare (kg N ha^{-1})
$m_{\text{N}_{\text{tot}}/\text{NO}_3\text{NH}_4}$	Masse totale d'azote N dans NH_4NO_3 (g)
$m_{^{15}\text{N}_{\text{tot}}}$	Masse d'azote 15 par hectare ($\text{kg }^{15}\text{N ha}^{-1}$)
NBH	Nombre de plants par hectare
$N_{\text{engrais marqué}}$	Quantité d'azote marquée NH_4NO_3 par l'azote 15 (kg ha^{-1})
$N_{\text{engrais non marqué}}$	Quantité d'azote non marquée par l'azote 15 (kg ha^{-1})
$n^{14}\text{N}$	Nombre de moles d'azote ^{14}N dans l'engrais
$n^{15}\text{N}$	Nombre de moles d'azote ^{15}N dans l'engrais
$n\text{N}_{\text{tot}}$	Nombre de moles d'azote dans l'engrais
$^{15}\text{N}_c$	Quantité d'azote 15 du sol au centre de la butte (kg N ha^{-1})
$^{15}\text{N}_{\text{er}}$	Quantité d'azote 15 du sol dans l'entre-rang (kg N ha^{-1})
$^{15}\text{N}_F$	Azote 15 contenu dans le fertilisant ($\text{kg }^{15}\text{N ha}^{-1}$)
$^{15}\text{N}_L$	Azote 15 contenu dans le fertilisant ($\text{kg }^{15}\text{N ha}^{-1}$)
$^{15}\text{N}_p$	Azote 15 contenu dans la plante ($\text{kg }^{15}\text{N ha}^{-1}$)

$^{15}\text{N}_{\text{sol}}$	Azote 15 contenu dans le sol ($\text{kg } ^{15}\text{N ha}^{-1}$)
$\% \text{N}_{\text{récupéré-plante}}$	Pourcentage d'azote issu du fertilisant récupéré par la plante
$\% \text{N}_{\text{récupéré-sol}}$	Pourcentage d'azote issu du fertilisant récupéré par le sol
P	Azote total dans les plantes (kg ha^{-1})
P^*	Azote issu du fertilisant dans la plante (kg N ha^{-1})
r	Erreur lors de la mesure au spectromètre de masse
S	Surface des parcelles où l'engrais enrichi a été appliqué (ha)
S^*	Azote issu du fertilisant dans le sol (kg N ha^{-1})
T_{annuelle}	Température annuelle ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{\text{mensuelle}}$	Température mensuelle ($^{\circ}\text{C}$)
z	Profondeur du sol (cm)

Signes grecs

α	Fractionnement isotopique thermodynamique
α_i	Proportion du volume de sol dans un volume considéré (1/6 ou 1/3)
$\Delta ^{15}\text{N}_s$	Différence d'azote 15 du sol entre t et t_0 ($\text{kg } ^{15}\text{N ha}^{-1}$)
$\delta^{18}\text{O}, \delta^2\text{H}, \delta^{15}\text{N}$	Excès isotopique de l'oxygène 18, du deutérium et de l'azote 15
ΔS	Excédent d'azote dans le sol par rapport aux quantités initialement présentes au printemps (kg N ha^{-1})
Σ	Somme
ρ	Densité du sol (g cm^{-3})

Unités

$^{\circ}\text{C}$	Degrés Celsius
g	Gramme
g mol^{-1}	Gramme par mole
ha	Hectare
kg	Kilogramme
kg N ha^{-1}	Kilogramme d'azote par hectare
$\text{kg } ^{15}\text{N ha}^{-1}$	Kilogramme d'azote 15 par hectare

m	mètre
mg	milligramme
nm	nanomètre
N-NO ₃ kg ⁻¹	quantité d'azote sous forme nitrate par kilogramme

Introduction

La pollution azotée engendrée par les apports excessifs d'engrais sous culture intensive a été identifiée comme problématique depuis de nombreuses années au Québec (Milburn et al., 1990; Tran et Giroux, 1991; Schindler et al., 2006). Un excès d'azote dans la nappe phréatique pose un double problème, celui de la consommation d'eau et celui de la dégradation du milieu. Concernant la consommation de l'eau, l'Organisation Mondiale de la Santé s'accorde pour considérer qu'au-delà de $50 \text{ mg NO}_3^- \text{ l}^{-1}$ (soit $10 \text{ NO}_3\text{-N mg l}^{-1}$) présente un risque chez les très jeunes enfants envers la méthéoglobinémie (Super et al., 1981; O.M.S., 1998).

Au-delà de ces problèmes de santé humaine, un excès d'azote sous forme de nitrate dans l'environnement présente un danger pour les écosystèmes. L'excès de cet élément nutritif acheminé par le système hydrologique du champ aux rivières (Fig.0.1) entraîne la prolifération d'algues et l'eutrophisation des milieux aquatiques (Wang et al., 2004; Jickells, 2005; Smolders et al., 2006). Ce phénomène d'eutrophisation donne lieu à des réactions en chaîne qui conduisent à l'accélération du vieillissement des écosystèmes aquatiques, c'est-à-dire la diminution du taux d'oxygène de l'eau, la disparition des poissons nobles et de leurs prédateurs entre autres. Une étude canadienne récente révèle que le Canada, qui a jusqu'alors été peu concerné par la pollution azotée de ses eaux compte-tenu de ses faibles démographie et industrialisation, commence à voir ce problème émerger essentiellement à cause du développement de l'agriculture (Schindler et al., 2006). Les auteurs préconisent une stratégie de prévention pour éviter les problèmes déjà rencontrés par d'autres pays industrialisés.

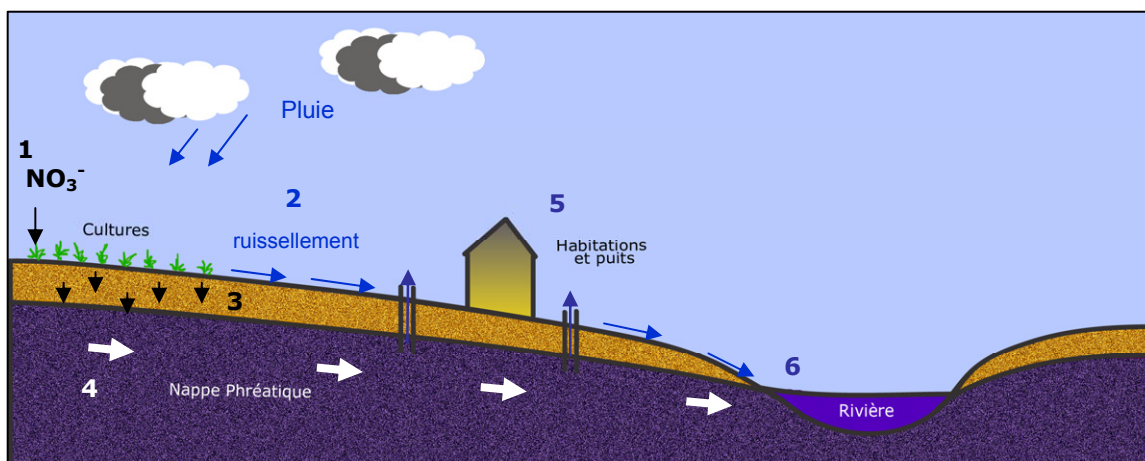


Figure 0.1 Schéma illustrant le trajet de l'eau et des nitrates du champ vers la rivière

1. Les fertilisants azotés sont appliqués dans les cultures situées en amont du bassin versant.
2. Les précipitations vont entraîner un phénomène de ruissellement plus ou moins important selon la pente du champ et vont initier le processus d'infiltration de l'eau en profondeur.
3. Les nitrates percolent à travers le sol pour rejoindre la nappe phréatique en profondeur.
4. Les nitrates suivent le trajet de l'eau de la nappe phréatique, qui circule plus ou moins lentement vers la rivière.
5. L'eau de la nappe chargée en nitrates est prélevée dans les puits proches des habitations.
6. Les excès de nitrates finissent par rejoindre la rivière plus ou moins rapidement selon la pente du bassin versant et la vitesse de circulation de la nappe phréatique. Ils contribuent à la prolifération des algues et à l'eutrophisation des milieux aquatiques en commençant par les plus stagnants (marais, lacs, rivières).

Pour diminuer la pollution des eaux de consommation ainsi que l'eutrophisation des écosystèmes aquatiques, de nombreuses stratégies ont été mises en place comme la restauration des milieux, l'épuration des eaux et la réduction des fertilisants azotés. Une étude néerlandaise a montré que la diminution des surplus agricole de 1 kg N ha^{-1} donne lieu à une baisse de seulement $0.08 \text{ kg N ha}^{-1}$ dans les eaux souterraines et de $0.12 \text{ kg N ha}^{-1}$ dans les eaux de surface à l'échelle nationale (Oenema et al., 2005). Les auteurs insistent

sur les disparités régionales pour expliquer ce faible résultat car certaines régions sont plus touchées par les apports provenant de l'industrie et des eaux usées. Les auteurs préconisent toutefois de diminuer les excès azotés et phosphatés dans les applications agricoles tout en diminuant les autres sources d'azote et de phosphore. Sous l'hypothèse d'une infiltration annuelle des pluies dans le sol de 250 mm (sachant qu'au Québec, les pluies annuelles sont de l'ordre de 1000 mm), il ne faudrait pas dépasser un lessivage de $25 \text{ kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$ afin de respecter le critère de la normale internationale d'un maximum de $10 \text{ mg NO}_3\text{-N L}^{-1}$ dans l'eau souterraine,. Deux autres études effectuées sur la culture de maïs (*Zea mays* L.) préconisent de mesurer la quantité d'azote disponible en début de saison dans le sol plutôt que d'utiliser un historique basé sur le rendement pour ajuster les apports de fertilisant azoté, ce qui permet de diminuer de manière importante les pertes par lessivage à l'automne (Durieux et al., 1995; Sogbedji et al., 2000). Il s'agit de satisfaire les besoins de la plante.

La difficulté de cette dernière solution réside tout particulièrement dans l'évaluation des besoins optimaux de la plante. De nombreuses études sur la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) s'y sont intéressées (Bélanger et al., 2001; Snapp et Fortuna, 2003; Zebarth et al., 2004a; Li et al., 2006). Zebarth (2004a) a mis en évidence que cet optimum dépend du cultivar de pomme de terre, les cultivars hâtifs assimilant moins bien l'azote que les cultivars de mi-saison ou tardifs. La diminution des apports azotés dans les cultures entraînait des baisses de rendements et du lessivage des nitrates en profondeur (Bélanger et al., 2000, 2002). Au-delà de $80 \text{ mg N-NO}_3 \text{ kg}^{-1}$ sol mesuré à la mi-saison, il n'était pas nécessaire d'ajouter de l'engrais supplémentaire (Bélanger et al., 2001). Une autre étude (Li et al., 2003) a révélé l'importance du précédent cultural et a montré qu'un apport de 70 kg N ha^{-1} a produit des rendements en pommes de terre comparables à ceux d'apports azotés plus élevés (jusqu'à 210 kg N ha^{-1}). Ces apports d'engrais plus importants ont conduit à des teneurs résiduelles d'azote dans le sol d'environ 100 kg N ha^{-1} de plus par rapport à celles obtenues avec un épandage de seulement 70 kg N ha^{-1} et par conséquent à un lessivage accru. Un apport d'engrais azoté trop élevé par rapport aux besoins des plantes entraîne la diminution du poids spécifique du tubercule et, par conséquent, de leur qualité (Bélanger et al., 2002; Li et al., 2003; Zebarth et al., 2004b).

Par ailleurs, il n'est pas aisé d'ajuster les quantités d'engrais azoté aux besoins des plantes compte tenu de la complexité du dynamisme de l'azote dans le système sol-eau-plante. En effet, la forme la plus mobile de l'azote est l'ion nitrate (NO_3^-) alors que l'ion ammonium (NH_4^+) est adsorbé par la phase solide du sol (Gardiner et Miller, 2004). Les nitrates vont donc suivre le déplacement de l'eau dans le sol (phénomène de lessivage). Bien que les nitrates soient la forme d'azote prélevée préférentiellement par les plantes, une partie de l'azote est directement absorbée sous forme NH_4^+ surtout lorsque les apports azotés sont faibles (Barraclough et al., 1985). La disponibilité des nitrates dans le sol joue un rôle primordial dans leur développement surtout lors de la phase de croissance, car les rendements vont diminuer si la plante manque d'azote durant cette période (Li et al., 2003). Toutefois, les besoins de la plante diminuent après la phase de croissance jusqu'à la récolte (Haverkort et MacKerron, 2000). Les excès d'azote par rapport aux besoins des plantes restent donc stockés dans le sol et sont susceptibles d'être lessivés par les fortes pluies tout particulièrement après la récolte (Kengni et al., 1994; Milburn et Richards, 1994).

De plus, de nombreux autres processus caractérisent le cycle de l'azote comme la fixation, la volatilisation, la nitrification, la minéralisation, la dénitrification et l'immobilisation (Gardiner et Miller, 2004), ce qui complexifie l'estimation des quantités lessivées de nitrates :

La fixation de l'azote gazeux N_2 par le sol est un processus microbien qui constitue la source primaire d'azote dans les écosystèmes naturels.

La volatilisation est une réaction chimique qui consiste en une perte de l'azote NH_4^+ du sol sous forme ammoniacale NH_3 vers l'atmosphère, cette composante peut être négligée si des précautions d'enfouissement de l'engrais azoté sont prises lors de son ajout. Ce phénomène concerne surtout les fertilisants azotés appliqués sous forme d'urée en sols calcaires (Gardiner et Miller, 2004).

La nitrification est le processus de transformation de l'ammonium en nitrate. Ce processus se produit rapidement en condition aérobie (Brady, 1974; Gardiner et Miller, 2004).

La minéralisation consiste à l'apport d'azote minéral sous forme ammonium par la décomposition de matière organique du sol. L'ammonium se nitrifie ensuite rapidement en nitrate. Cet apport de nitrate issu de la matière organique provenant entre autres de la décomposition des résidus végétaux des cultures précédentes est relativement important. La minéralisation de la matière organique du sol au cours de la saison dépend de nombreux facteurs comme le type de culture, la texture du sol, l'humidité, la température, le précédent cultural (Prescott, 2005). C'est un paramètre indispensable pour réaliser des bilans d'azote au cours de la saison.

La dénitrification est une réaction biologique qui donne lieu à la transformation des nitrates en gaz N_2 et N_2O . Cette réaction est favorisée en condition acide et limitée en oxygène (Gardiner et Miller, 2004). Il est particulièrement difficile de mesurer les quantités d'azote dénitrifiées du sol (McCray et al., 2005; Groffman et al., 2006). La dénitrification peut être négligée dans le cas de sols sableux, car le processus le lessivage prédomine (Saffigna et al., 1977; Liang et Mackenzie, 1994).

L'immobilisation consiste à l'absorption de l'azote par les organismes du sol pour leur croissance (Brady, 1974; Gasser, 2000). Tant que l'azote reste immobilisé dans les organismes, il n'est pas disponible pour la plante. Les organismes vont toutefois relâcher dans le sol une partie de l'azote qu'ils contiennent par le processus de la minéralisation (Prescott, 2005).

Les précipitations contribuent avec l'irrigation au lessivage des nitrates du sol vers la profondeur. L'intensité des précipitations influencent tout particulièrement sur la quantité et la vitesse du lessivage des nitrates en profondeur (Yadav, 1997). Plus le sol est aéré et bien drainé (ce qui est le cas des sols sableux) et plus le lessivage sera important (Tran et Giroux, 1998). Par ailleurs, la variabilité et l'imprévisibilité des précipitations engendre la crainte d'une perte massive de l'engrais et, par conséquent, d'une perte de rendement en fin de saison ; ce qui complexifie davantage les prévisions d'épandage de fertilisants azotés pour la saison. Le suivi précis des précipitations et leur devenir à l'intérieur du sol est donc

indispensable à la caractérisation du dynamisme azoté dans le sol afin de relier l'impact des événements pluvieux au lessivage de l'azote et aux pertes de rendements. L'oxygène 18 (^{18}O) et le deutérium (D ou ^2H) sont des outils performants qui permettent de suivre le devenir de chaque événement de précipitation dans le sol.

L'oxygène 18 et le deutérium sont des isotopes stables de l'oxygène et de l'hydrogène, respectivement. Des isotopes sont des éléments de même numéro atomique (même nombre de protons) mais dont la masse molaire varie selon le nombre de neutrons dans le noyau atomique. Les isotopes sont dits « stables » lorsqu'ils ne se désintègrent pas contrairement aux isotopes radioactifs voués principalement aux études sur la datation. L'abondance naturelle du rapport isotopique $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ est de 0.204%, tandis que celui de $^2\text{H}/^1\text{H}$ est de 0.015%. Cette rareté naturelle est exploitée dans les études de traçage. Les éléments sont exprimés en delta pour mille correspondant à l'excès isotopique par rapport à une concentration de référence. Dans le cas des études hydrologiques impliquant l'oxygène et le deutérium de la molécule d'eau, la concentration de référence est le Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW) de l'agence internationale de l'énergie atomique (IAEA) élaborée à partir des travaux de Craig (1961). Des mesures effectuées sur ce standard ont révélé les valeurs suivantes pour les rapports isotopiques mesurés dans le standard VSMOW :

$$\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{VSMOW}} = 2.0052 \cdot 10^{-3} \quad (\text{Baertschi, 1976}) \quad (0.1)$$

$$\left(\frac{^2\text{H}}{^1\text{H}} \right)_{\text{VSMOW}} = 1.5575 \cdot 10^{-4} \quad (\text{Hageman et al., 1970}) \quad (0.2)$$

L'expression isotopique des échantillons est exprimée en delta pour mille en fonction de ce standard selon l'expression suivante :

$$\begin{aligned} \delta^{18}\text{O}_{\text{échantillon}} &= \frac{r(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{échantillon}} - r(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}}{r(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}} \cdot 1000 \text{ ‰ VSMOW} \\ &= \left(\frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{échantillon}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}} - 1 \right) \cdot 1000 \text{ ‰ VSMOW} \end{aligned} \quad (0.3)$$

Il en est de même pour le rapport $^2\text{H}/^1\text{H}$. Cette expression en delta pour mille permet d'apprécier les faibles variations d'un élément rare tandis que la standardisation permet de comparer les mesures à l'échelle de la planète tout en supprimant les erreurs locales de mesures au spectromètre de masse (r). Le standard de référence pour l'oxygène 18 et le deutérium dans le cas d'études sur l'eau est le VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water).

Le fractionnement isotopique thermodynamique (α) est une autre notion qui correspond à la modification du rapport isotopique lors d'un changement de phase ou d'état ou autre transformation. Il s'exprime de la façon suivante :

$$\alpha = \frac{R_{\text{reactif}}}{R_{\text{produit}}} \quad (0.4)$$

R étant le rapport isotopique. Ce phénomène se produit par exemple lors de l'évaporation de l'eau et s'exprime comme suit :

$$\alpha^{18}\text{O}_{\text{eau-vapeur}} = \frac{\left(^{18}\text{O}/^{16}\text{O}\right)_{\text{eau}}}{\left(^{18}\text{O}/^{16}\text{O}\right)_{\text{vapeur}}} \quad (0.5)$$

Le coefficient α dépend de la température de l'air au moment de l'évaporation. En effet, la signature isotopique d'une eau qui s'évapore (nuage) ou qui se condense (précipitation) varie en fonction des fluctuations de température de l'air. Cette dépendance thermique du rapport isotopique dans l'eau permet de distinguer les précipitations formées à des températures différentes. Dansgaard (1964) a trouvé les relations suivantes entre l'excès isotopique de l'oxygène 18 et du deutérium et la température annuelle (T_{annuelle}) en degrés Celsius à l'échelle mondiale:

$$\begin{aligned} \delta^{18}\text{O} &= 0.695 \cdot T_{\text{annuelle}} - 13.6\text{‰ SMOW} \\ \delta^2\text{H} &= 5.6 \cdot T_{\text{annuelle}} - 100\text{‰ SMOW} \end{aligned} \quad (0.6)$$

Une autre relation a été établie pour l'oxygène 18 à l'échelle mondiale par Yurtsever et Gat (1981) comme suit à partir de la température mensuelle :

$$\delta^{18}\text{O} = (0.338 \pm 0.028) \cdot T_{\text{mensuelle}} - 11.99\text{‰ SMOW} \quad (0.7)$$

Toutefois ces relations ne sont valables qu'à l'échelle mondiale car la signature isotopique des précipitations varie localement. Des travaux menés à l'IAEA pendant 30 ans à différentes stations rendent compte de différences à l'échelle locale (Rozanski et al., 1993). Dans l'eau, il existe aussi une relation linéaire entre $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ (Fig. 0.2) connue sous le nom de Global Meteoric Water Line (GMWL) et mise en évidence par Craig (1961) à l'échelle mondiale (Fig. 0.2).

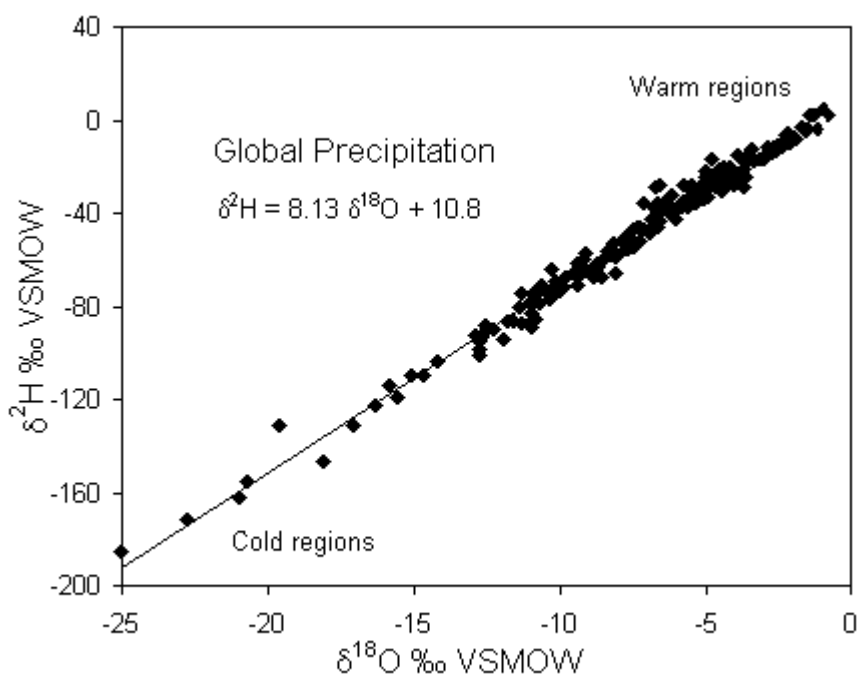


Figure 0.2 Droite Météorique Globale : relation entre l' ^{18}O et l' ^2H dans les précipitations (Rozanski et al., 1993).

Cette relation globale présente aussi des variations locales. Il est donc important de trouver ou d'établir la relation à l'échelle régionale appelée Local Meteoric Water Line (LMWL)

pour les précipitations. Les échantillons d'eau situés en-dessous de la LMWL ont subi de l'évaporation ou des mélanges avec une eau ayant subi de l'évaporation. C'est souvent le cas de l'eau du sol qui subit de l'évaporation surtout en surface. Cela permet aussi d'écartier des échantillons qui auraient subi de l'évaporation lors du transport ou lors de leur stockage en laboratoire.

Des chercheurs se sont intéressés à la caractérisation et à la modélisation de profils isotopiques de l'eau du sol en fonction de la profondeur (Zimmerman et Ehhalt, 1967; Barnes et Allison, 1988; Barnes et Turner, 2000). Ces profils présentent un enrichissement relatif en deutérium (ou en oxygène 18) caractéristique appelé « pic évaporatoire » dans la partie supérieure du sol dû à l'évaporation. Il est possible d'estimer le taux d'évaporation à partir de la profondeur du pic évaporatoire, s'il n'y a pas eu de nouvelle pluie et si le profil de sol est à l'équilibre (le flux d'eau ascendant compense le flux descendant).

Il est donc possible de retracer des précipitations de signatures isotopiques distinctes dans le sol et de savoir si cette eau a subi ou non de l'évaporation grâce à la mesure de l'abondance naturelle en ^{18}O et ^2H des échantillons d'eau (précipitations et eau du sol).

Par ailleurs, il est possible d'observer précisément les déplacements du fertilisant azoté dans le sol par des méthodes d'enrichissement en azote 15 (^{15}N) du fertilisant afin d'estimer les quantités de nitrate lessivées (Knowles et Blackburn, 1993). L'azote 15 (^{15}N) est un isotope stable de la forme la plus courante de l'azote : l'azote 14. Son abondance naturelle dans l'air est de 0.3663% d'atomes (Junk et Svec, 1958). Tout comme l'oxygène 18 et le deutérium, les teneurs naturelles ou bien celles d'échantillons très faiblement enrichis, présentant des valeurs de l'ordre de grandeur de l'abondance naturelle, s'exprime en delta pour mille :

$$\delta^{15}\text{N}_{\text{échantillon}} = \frac{R_{\text{échantillon}} - R_{\text{air}}}{R_{\text{air}}} 1000 \text{ ‰}$$

$$R = \frac{{}^{15}\text{N}}{{}^{15}\text{N} + {}^{14}\text{N}}$$
(0.8)

Le standard de référence dans le cas de l'azote est l'abondance naturelle en ^{15}N du N_2 de l'air. Souvent, l'azote 15 est utilisé comme traceur des phénomènes reliés au cycle de l'azote. Par exemple, le suivi de l'évolution des teneurs en ^{15}N du sol au cours de la saison permet de comprendre le dynamisme du fertilisant enrichi en ^{15}N (Knowles et Blackburn, 1993). De nombreux autres phénomènes peuvent être suivis comme la fixation de l'azote par le sol, les phénomènes de nitrification, dénitrification et de minéralisation (Kendall, 2000). Le marquage du fertilisant par un faible pourcentage en ^{15}N permet d'établir la part du fertilisant qui a été absorbée par la plante selon l'équation suivante (Hauck, 1994):

$$\% \text{N}_{\text{récupéré-plante}} = 100 P \frac{(c - b_0)}{F(a - b_0)} \quad (0.9)$$

a : % ^{15}N du fertilisant

b_0 : % ^{15}N du sol à t_0

c : % ^{15}N des plantes

P : azote total des plantes (kg ha^{-1})

F : azote appliqué dans le fertilisant (kg ha^{-1})

Ce calcul permet d'évaluer l'efficacité du fertilisant pour chaque type de culture, de sols et de conditions climatiques.

La microtopographie caractéristique de la culture de pomme de terre complexifie la mesure des concentrations de nitrate du sol et par conséquent la réalisation de bilans d'azote. En effet, la culture de pomme de terre nécessite un buttage 45 jours après la plantation afin de protéger le tubercule de la lumière, qui le rend impropre à la consommation. Cette opération consiste à creuser le sol de 10 cm environ de chaque côté de l'entre-rang pour le rabattre au centre du rang. Cela crée une butte d'environ 25-30 cm de hauteur. Ce microrelief intervient au milieu de la saison, il perturbe les couches de sol et donne lieu à la redistribution de l'engrais azoté appliqué. Une étude a d'ailleurs montré que suite à l'opération de buttage, l'azote inorganique est beaucoup plus concentré au centre de la butte que dans l'entre-rang (Zebarth et Milburn, 2003). Les auteurs de cet article préconisent un

échantillonnage détaillé du sol de la butte de pomme de terre afin de rendre compte de la variabilité du sol.

Objectifs de la thèse

L'objectif de l'étude était de faire le suivi saisonnier des nitrates dans la culture de pomme de terre en sol sableux à l'aide des isotopes ^{18}O , ^2H et ^{15}N et d'un échantillonnage adapté à la microtopographie.

A l'intérieur de cet objectif global, trois sous-objectifs ont été fixés.

1. Le premier sous-objectif était de suivre le devenir des précipitations dans le sol à l'aide des isotopes stables de l'eau (^{18}O et ^2H) afin de comprendre la percolation de l'eau des précipitations dans le sol, d'identifier les périodes de l'année où le lessivage est le plus intense et d'évaluer la vitesse du lessivage.
2. Le deuxième sous-objectif était de faire le suivi du fertilisant azoté au cours de la saison dans le sol par l'azote ^{15}N afin de comprendre la manière dont l'engrais diffuse au cours de la saison, de quantifier l'efficacité du fertilisant en terme de récupération par la plante et d'évaluer les quantités de fertilisants lessivées.
3. Le troisième sous-objectif était de simplifier à une seule prise l'échantillonnage du sol pour estimer le contenu en nitrates du sol compte tenu de la microtopographie imposée par l'opération culturale du buttage.

Plan de la thèse

La thèse comprend trois chapitres dont deux en anglais sous forme d'articles scientifiques. Le premier chapitre est écrit sous forme d'un article scientifique intitulé «Dynamics of rainfall and snow melt through cultivated soil with ^{18}O and ^2H », qui s'est intéressé à retracer précisément la percolation des précipitations dans le sol et à estimer le temps de transfert de l'eau dans le sol par les isotopes stables de l'eau (^{18}O et D). Le deuxième chapitre fait le suivi dans le sol du fertilisant azoté marqué à l'azote ^{15}N au cours de la saison ainsi que la partie du fertilisant récupérée par la plante. Le troisième chapitre est écrit sous forme d'un article scientifique intitulé « Single-hole soil sampling for nitrogen in the potato hill », dont les résultats permettent de quantifier les nitrates du sol dans l'ensemble de la butte de pomme de terre à partir d'une seule mesure prise au centre de la butte de pomme de terre, considérant une fertilisation azotée en bandes.

Chapitre 1

1. Suivi de la percolation des pluies et du couvert neigeux fondu au travers du sol pendant la saison par l'oxygène 18 (^{18}O) et le deutérium (D ou ^2H)

Ce chapitre est constitué sous la forme d'un article en anglais qui sera soumis par la suite à une revue scientifique.

1.1 Résumé

Les isotopes sont souvent utilisés comme traceurs en agronomie et en hydrologie. Dans cette étude, la teneur en eau du sol, les teneurs en oxygène 18 et en deutérium des précipitations et de l'eau du sol ont été mesurées avant, pendant et après une saison de culture de la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.). L'objectif de cette étude était de relier les valeurs $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ de l'eau du sol aux signatures isotopiques et aux volumes des précipitations et d'estimer la vitesse de percolation des pluies et du couvert neigeux fondu. Les teneurs isotopiques ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) de l'eau du sol, des précipitations et du couvert neigeux ont été échantillonnés durant la saison 2005 et au printemps 2006 dans un champ de pommes de terre près de la ville de Québec, Canada. Deux couches de sol distinctes influençant la vitesse de percolation en profondeur ont été identifiées. La couche supérieure (0-40 cm) présente des teneurs en eau volumiques élevées (24-30%). La partie inférieure du sol (40-80 cm avant la plantation) contient de faibles teneurs en eau tout particulièrement durant l'été (3-5%). Après la création d'une butte de 30 cm, la couche supérieure arable est plus développée au centre de la butte que dans l'entre-rang. A l'intérieur de la couche supérieure, la vitesse de percolation des fortes pluies (68-105 mm/jour pour la période enregistrée) ou du couvert neigeux fondu de 50 cm a été estimée entre 1 et 2 mois. La percolation de l'eau est plus rapide dans la partie inférieure du sol dans les profils de sol d'octobre 2005 et de mai 2006, compte-tenu du fait que les teneurs isotopiques de l'eau du

sol restent constantes sur une plus grande distance que dans la zone supérieure. Le double suivi des teneurs d'oxygène 18 et de deutérium révèle une plus forte influence de l'évaporation durant l'été comparativement au printemps ou à l'automne. Dans cette étude, les pluies de l'été n'ont pas été suffisantes pour remplacer l'eau porale du sol contrairement aux importants événements pluvieux du printemps et de l'automne ou de l'eau issue de la fonte des neiges. Nous présentons un modèle perceptuel de percolation en deux périodes incluant la pratique culturale, la quantité et l'intensité des pluies, les prélèvements de la plante et l'évaporation.

1.2 Article

Dynamics of rainfall and snow melt through cultivated soil with ^{18}O and ^2H .

Peggy Macaigne¹, François Anctil¹, Léon-Etienne Parent²

1 Department of Civil Engineering, Université Laval (Québec, Canada) G1K 7P4; 2

Department of Soils and Agrifood Engineering, Université Laval (Québec, Canada) G1K 7P4

1.2.1 Abstract

Isotopes are commonly used to track the fate of precipitations in the soil. In this study, soil water content, oxygen 18 and deuterium contents in precipitation and in soils were monitored before, during and after a potato (*Solanum tuberosum* L.) cropping season. The objective of this study was to relate $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ signatures of soil water to isotopic signatures and volumes of incoming precipitations and to evaluate the percolation rate of rainfalls and snow melt. The isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$) of soil water, rainfall and snow pack was analyzed during the season 2005 and in spring 2006 in a potato field near Québec City, Canada. There were two distinct soil layers in soil influencing the water downward displacement. The volumetric water content of the soil top layer (0-40 cm)

varied between 24 to 30% (cm^3/cm^3) during the year. The volumetric water contents of the sublayer (40-80 cm) were lower especially during the summer (3-5%). After hilling, the top layer was made of a hill 30 cm higher than the inter-row. The percolation rate through the upper soil layer of an intensive rainfall (between 68 and 105 mm/day for the recorded period) or of a 50 cm high snow pack after melting to completely pass was estimated to be 1 to 2 month. Water downflow was found to be faster in the sublayer than in the upper layer in October 2005 and May 2006 since the isotopic signature of soil water remained constant across the sublayer. The dual measurement of oxygen 18 and deuterium indicated a strong influence of soil water evaporation on soil water composition during the summer compared to spring or winter conditions. In this study, summer rainfalls were not heavy enough to replenish soil porosity, as opposed to spring and fall important precipitations or inflow from snowmelt. A perceptual model presents water percolation through soil including the cultural practice, rainfalls amount and intensity, plant uptake and evaporation.

Keywords

Soil water; Oxygen and Hydrogen isotope; Deuterium; Precipitation; Evaporation; Snowmelt

1.2.2 Introduction

Natural isotopes of water such as ^{18}O and ^2H (deuterium) are useful tools to track water movements in catchment (Gat, 1996; Kendall and McDonnell, 2000). Annual isotopic variations in precipitations are linearly correlated to the near-surface air temperature (NSAT) provided that NSAT is also closely related to temperature in the higher atmosphere where precipitation originates (Yurtsever and Gat, 1981). Hence, temporal variations in ^{18}O and ^2H allowed to link soil water composition to particular rainfall events (Bengtsson et al., 1987; Hsieh et al., 1998; Cane and Clark, 1999; Landon et al., 1999; Rosen et al., 1999; Gazis and Feng, 2004; Goller et al., 2005; O'Driscoll et al., 2005; Robertson and Gazis, 2006). Craig (1961) was the first to propose a relationship between ^{18}O and ^2H for precipitation on the global scale, the Global Meteoric Water Line (GMWL), with a characteristic slope of 8. Later studies (Yurtsever and Gat, 1981; Burns and McDonnell, 1998; Corbin et al., 2005; Mayr et al., 2007; Palmer et al., 2007) revealed that isotopic

signatures below GMWL indicates evaporation and that both ^{18}O and ^2H isotopes should be determined to account for evaporation.

Early work on isotopes dynamics were conducted under different soil water conditions (Zimmerman and Ehhalt, 1967; Allison et al., 1983; Barnes and Allison, 1984, 1988; Barnes et al., 1989). For example, Zimmerman and Ehhalt (1967) showed that deuterium concentration increased with evaporation in the liquid phase of the upper soil layers but that plant transpiration did not affect the isotopic signature. Oxygen 18 and deuterium were used to track snowmelt infiltration as source of recharge and vector of pollutant displacement (Saxena, 1984; Maule et al., 1994; Burns and McDonnell, 1998; Landon et al., 1999; Gazis and Feng, 2004; O'Driscoll et al., 2005; Robertson and Gazis, 2006). A recent study conducted on Prince Edward Island (Canada) used Oxygen 18 and deuterium in order to determine whether precipitation or groundwater did feed surface water streams (Liao et al., 2005). This study showed that groundwater of the study was a mixture of snowfalls and rainfalls and that surface waters were essentially fed by groundwater. They also determined the influence of evaporation in groundwater based on the LMWL, which illustrates the relevance of the combined use of oxygen 18 and deuterium. Some studies examined the transport of water stable isotopes through bare soil (Melayah et al., 1996; Braud et al., 2005) or cropped fields (Gehrels et al., 1998; Cane and Clark, 1999; Boujamlaoui et al., 2005; Corbin et al., 2005). To our knowledge, no study reported on soil water dynamics during the cropping season.

The potato crop (*Solanum tuberosum* L.) is generally grown in coarse-textured soils where water retention is limited and water percolation is fast. The fate of melted snow and rainfall in sandy soils used for rainfed potato production must be determinant for yield potential and nitrate leaching in these vulnerable agroecosystems.

The purpose of this study was to follow the seasonal soil water dynamics as related to rainfall and snowmelt in a potato agroecosystem. The combined use of ^{18}O and ^2H allowed isolating the influence of evaporation.

The materials and the methods include a brief description of the site and methods of data collection (1.2.3). Thereafter we will present relationships between climatic conditions, soil water content, soil organic matter content and isotopic signature of precipitations and soil

water (1.2.4). A synthesis and a perceptual model will be presented (1.2.5) before concluding (1.2.6).

1.2.3 Material and methods

1.2.3.1 Site description

The experimental field was located at Saint-Ubalde near Québec City, Canada (46°45'23''N, 72°19'57''W). The soil was a Bévin loamy sand (humo-ferric gleyed podzol (Raymond et al., 1976)). The soil contained 60.4% sand, 35% silt, and 4.6% clay. The water table was about 40 cm deep after snowmelt and may reach 2 m under dry summer conditions. The soil may freeze down to 1 m during winter. Meteorological data, such as daily precipitation and air temperature, were collected on site during the growing season. Missing data, including temporal variation of height of the snow pack, were obtained from the Environment Canada weather station at Donnacona 30 km south of the site. The monthly rainfall at Donnacona varied from 19.2 to 123.3 mm with a maximum in July. Snowfall of 10.6 to 59.8 cm per month occurs from November to April with a peak in December.

Potato (*Solanum tuberosum* L. cv. 'Goldrush') seeds were planted 5 cm below the soil surface, 30 cm apart on the row, and 90.5 cm apart between rows. Planting occurred on May 25th, hilling on July 6th, top-kill in early September, and harvest on September 12th. Cultural practices were those recommended by local authorities.

1.2.3.2 Precipitation sampling

From the 22nd of September 2004 to the 27th of April 2006, rainfall was collected for isotopic analyses every two weeks using a 30-L collector equipped with a funnel and lined with 3 mm of mineral oil to prevent isotopic fractionation from evaporation (Gazis and Feng, 2004). Samples were refrigerated at 4°C. Snow was sampled shortly before melting on the 16th of March 2005 (two snow profiles) and on the 15th of March 2006 (three snow

profiles). The entire profiles were collected using tight containers and kept refrigerated after melting.

1.2.3.3 Soil sampling

Soils profiles were directly sampled with a knife and plastic boxes on five days between May 2005 and May 2006 within randomly selected 4 m per 4 rows parcels that were at least 4 m apart. The first profile was collected on the 4th of May 2005 on a bare and flat soil before planting. The second and third samplings were conducted on the 20th of July and the 12th of September 2005, respectively, after hilling, where soil profiles were sampled in the center of the hill and in the inter-row. Soil profiles were also sampled on the 27th of October 2005 and on the 5th of May 2006 on a bare and flat soil. Soil profile were sampled down to 80 cm and composed of 9 sub-samples as follows: six 5-cm layers down to 30 cm, one 10-cm layer from 30 to 40 cm and two 20-cm layers between 40 to 80 cm. Samples were refrigerated at 4°C and kept in their plastic boxes to prevent evaporation.

1.2.3.4 Laboratory analysis

Soil water was extracted using vacuum distillation¹, a robust method that preserves isotope signature when more than 98 % of the initial soil water is extracted (Araguas-Araguas et al., 1995). Soil water was extracted from macro- and micro-pores. After extraction soil was dried at 105°C for 24 h to determine the volumetric soil water content (Table 1.1) and make sure that extraction efficiency was at least 98%.

Isotopic water analysis was performed spectrometrically (Gaz Bench II, DeltaV, Finnigan MAT™) at the Institut National de la Recherche Scientifique, Québec, Canada. Each sample was prepared using 300 10⁻⁹ L of sampled water making 0.3 % of a mixture of CO₂ and He for ¹⁸O samples, and 2 % of a ²H and He mixture with platinum catalyst. The analytical

¹ Le détail du montage de cryodistillation sous vide construit pour les besoins de l'expérience est décrit à l'annexe II.

accuracy was 0.1 ‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and 1 ‰ for δD , corresponding to the variation of analytical results repeated 3 times for selected samples. Isotopic concentration was expressed in delta per mil (‰) according to Clark and Fritz (1997) as follows:

$$[2.1] \quad \delta^{18}\text{O}_{\text{sample}} = \left(\frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{sample}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{VSMOW}}} - 1 \right) \cdot 1000\text{‰ VSMOW}$$

Carbon content was determined using a CNS Leco2000. Soil water content at potentials of -33 kPa (θ_{-33}) and -10 kPa (θ_{-10}) assumed as field capacity was assessed from texture and organic matter content ($= 1.724 \times \text{C}$) using pedotransfer functions as follows (Rawls et al., 1982):

$$[2.2] \quad \theta_{-33} = 0.2576 - 0.002\text{sand} (\%) + 0.0036\text{clay} (\%) + 0.0299\text{organic matter} (\%)$$

$$[2.3] \quad \theta_{-10} = 0.4118 - 0.003\text{sand} (\%) + 0.0023\text{clay} (\%) + 0.0317\text{organic matter} (\%)$$

These values (θ_{-33} and θ_{-10}) are volumetric water contents. They correspond to the field capacity and give a range of maximal potential water expected in soil pores for each depth.

1.2.4 Results

1.2.4.1 Climatic and isotopic data from rainfalls and snowmelt runoff

The nearly 50°C amplitude in daily air temperature between summer and winter led to contrasting isotopic signatures among precipitations. Daily air temperature (°C), rainfall (mm) and snow accumulation (cm), and isotopic signatures (^{18}O and ^2H) are presented in Figure 1.1. Monthly precipitations were 132.5 mm in May, 136.4 mm in June, 91.3 mm in July, 129.7 mm in August, and 256.6 mm in September. Some daily events were amenable to soil water replenishment: 81 mm on May 3rd, 68 mm on August 31st, 78 mm on September 17th, and 105 mm on September 26th. Lighter rainfalls, generally less than 10 mm per day, have no noticeable effect (water penetration into soil from colour change at soil surface) on the soil water dynamics. The sequence of the effective rainfall (> 10 mm) comprised four periods: spring, plant growth, tuber filling, and autumn. The period between

March 7th and May 4th 2005 was particularly wet, with an effective total rainfall of 253 mm in addition to snowmelt water. The plant growing season from May 5th to July 19th was moderately wet with an effective total rainfall of 174 mm, and showed no event with more than 30 mm. Water uptake by plant and evaporation from soil depleted soil water content due to plant growth. During the drier tuber filling period from July 20th to September 11th, 68 of total 100 mm of rainfall occurred on the same day. During the wet autumn from September 12th to October 26th rainfall was 383 mm. In spring 2006 between March 7th and May 5th, the effective rainfall was only 93 mm. The maximum thickness of the snow pack before thawing was about 50 cm in both 2005 and 2006 (Fig. 1.1). In 2005, the snow pack started to thaw on March 9th until April 4th. While in 2006, the snow pack started to thaw on March 4th until April 5th. These data show that the thaw of the snow pack concerns the same period for both years and that it takes one month for the snow pack to thaw.

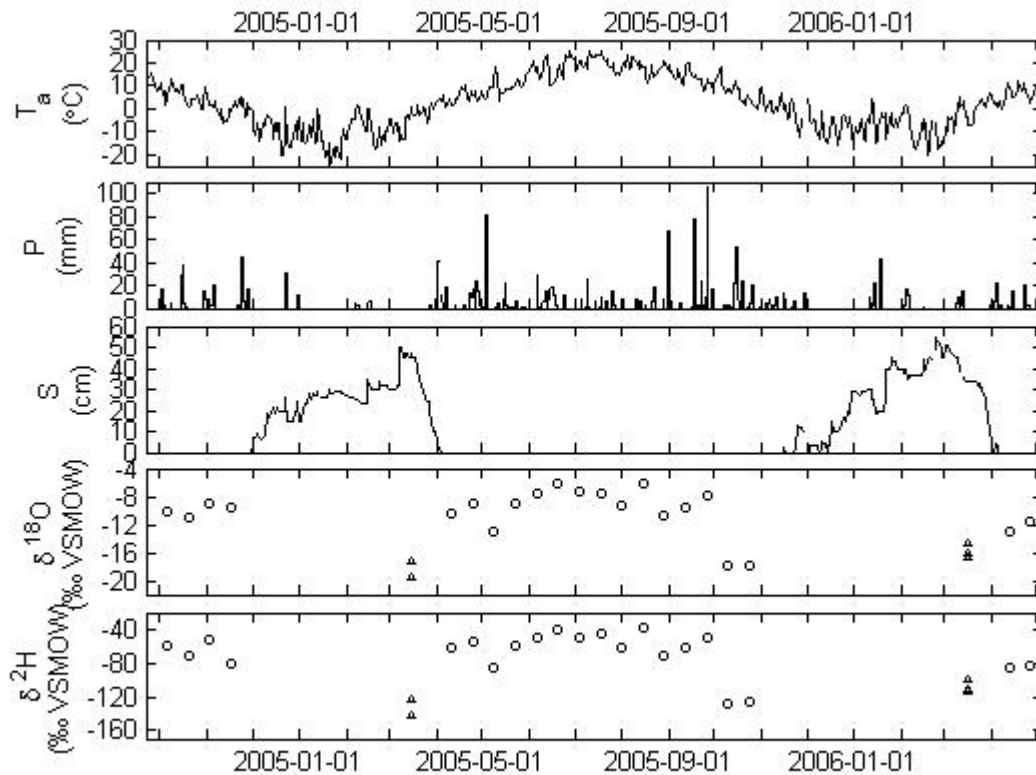


Figure 1.1 Daily air temperature (T_a), daily rainfall (P), daily snow accumulation (S), oxygen 18 content in the precipitation samples ($\delta^{18}\text{O}$), and deuterium content in the

precipitation samples ($\delta^2\text{H}$). Rainfall samples are identified by a circle, while snow pack samples are identified by a triangle.

Rainfall and snow pack isotopic delta values (Fig. 1.1) depended in part on near-surface air temperatures, with higher delta values in summer, as also found by Yurstever and Gat (1981). Snow $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in 2005 were -18.4‰ and -133.6‰, respectively, and -15.9‰ and -108.6‰ in 2006, whereas rainfall isotopic signatures ranged from -17.8‰ to -6.1‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and from -128.1‰ to -39.5‰ for $\delta^2\text{H}$. Two consecutive rainfall samples collected on the 10th and 24th of October had a signature closer to snow than rain: -17.8‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and -127.5‰ for $\delta^2\text{H}$. Such a sharp drop was not in line with near-surface temperature due presumably to a lack of correlation between near-surface and cloud temperatures in late autumn.

Figure 2.2 shows rainfall and snow samples as a $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ plot to determine the Local Meteoric Water Line (LMWL) as follows:

$$[2.5] \quad \delta^2\text{H} = 7.65 \delta^{18}\text{O} + 10.39, R^2 = 0.98$$

This equation is very close to the relation established by Craig (1961) for the Global Meteoric Water Line ($\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$). Soil water signatures in a $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ plot (Fig. 1.2b) are located below LMWL, indicating isotopic fractionation during evaporation.

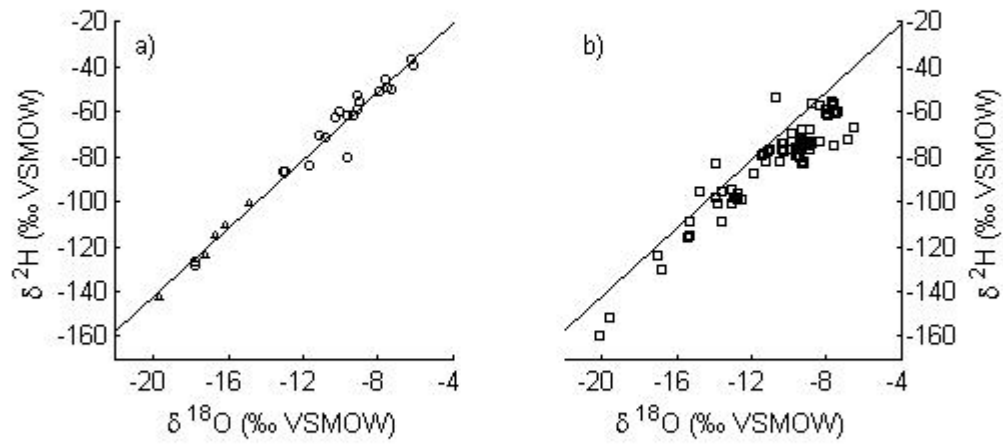


Figure 1.2 Local Meteoric Water Line: a) rainfall (circle) and snow pack (triangle) isotopic signature b) Soil water (square) isotopic signature.

1.2.4.2 Evolution of soil water content and isotopic signature

The upper layer contained 2 to 4% organic carbon (C) compared to 0.1 to 1% organic carbon (C) in the sublayer (Table 1.1). After hilling, the upper layer reached 40 or 60 cm in the hill and 30 or 40 cm in the inter-row. Results are presented by sampling date.

2005 May 4th: pre-planting conditions

Organic matter content was 3.5 to 5% in the top layer and 0.3% in the deepest layer. The measured volumetric soil water content was about 30% in the upper layer, down to 15 % in the deepest layer (Fig.1.3.a). Estimated volumetric water content was $\sim 25\%$ at $\theta_{.33}$ and $\sim 35\%$ at $\theta_{.10}$ in the upper layer compared to $\theta_{.33} \sim 16\%$ and $\theta_{.10} \sim 25\%$ in deeper layers, which means that soil water was close to saturation for the entire soil profile (Table 1.1). Soil water isotopic signature (Fig.1.3.b-c) appeared invariant across depths with mean values of -12.7‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and -94.6‰ for $\delta^2\text{H}$ and maxima of -11.2‰ and -82.1‰ for both isotopes respectively in the 15-20 cm layer as an example. This signature was similar to the latest large rainfall (148 mm, April 25th to May 3rd, $\delta^{18}\text{O}$ of -12.9‰ and $\delta^2\text{H}$ of -86.4‰) but not to the snow pack signature ($\delta^{18}\text{O}$ of -18.4‰ and $\delta^2\text{H}$ of -133.6‰). One month of rainfall after snowmelt with an intense rain on May 3rd (81 mm) thus sufficed to wash off snowmelt water from the soil profile, leaving a small residual fraction of the snow in soil pores (10%). The $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ plot (Fig.1.3.d) was slightly below the LMWL, indicating that some evaporation occurred.

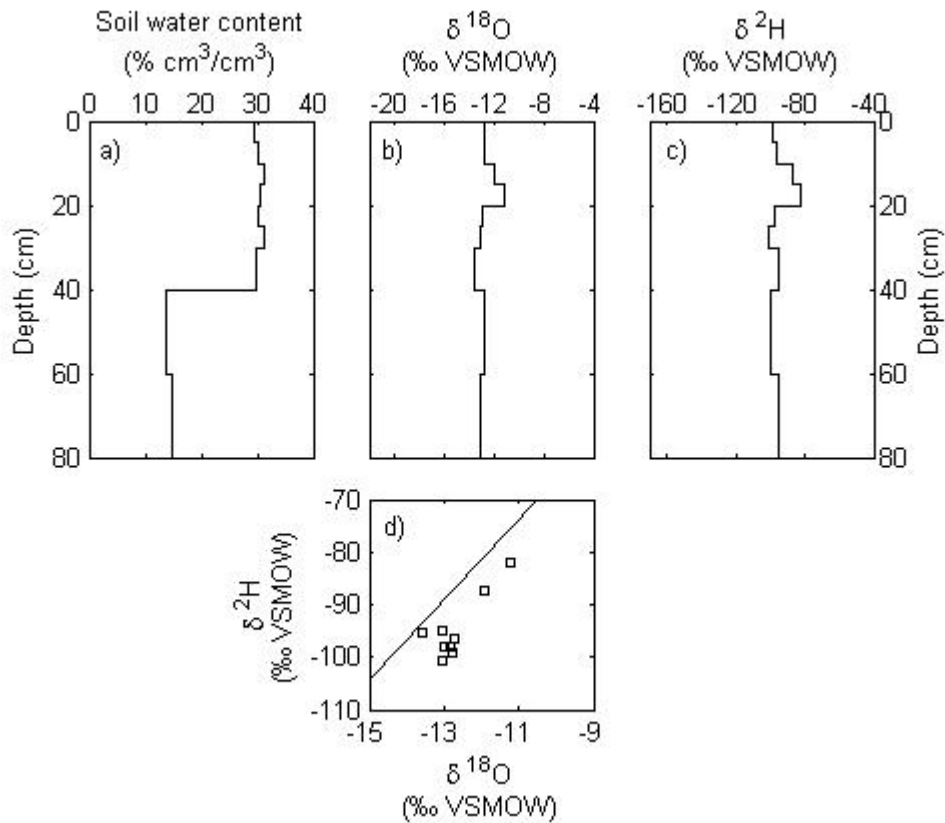


Figure 1.3 Data from the 0-80 cm soil profile on May 4 2005 (after snowmelt, before seeding): a) soil water content, b) delta oxygen 18, c) delta deuterium, d) Local Meteoric Water Line and soil water (square) isotopic signature.

2005 July 20th: maximum foliage cover

The measured volumetric soil water content was 26% in the upper layer (roughly the root zone) of hill (Fig.1.4.a) and reached 8 to 3 % in the deepest layers. Estimated volumetric water content was ~ 32% at $\theta_{.33}$ and ~ 42% at $\theta_{.10}$ in the upper layer (0-40 cm for the centre of the hill and 0-30 cm for the inter-row) compared to $\theta_{.33}$ ~ 19% and $\theta_{.10}$ ~ 28% in deeper layers, which means that measured soil water was relatively high in the upper soil layer, while very low close to the wilting point in lower soil layers (Table 1.1). The isotopic signature of soil water increased with depth from -9.2 to -7.6‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and from -81.7 to -60.7‰ for $\delta^2\text{H}$ (Fig.1.4.b-c). Hence, the low intensity high-isotope summer rainfall ($\delta^{18}\text{O}$

of -7.1‰ and $\delta^2\text{H}$ of -45.8‰) was ineffective in leaching spring rainfall ($\delta^{18}\text{O}$ of -12.9‰ and $\delta^2\text{H}$ of -86.4‰). Soil water was a mixture of spring water for the most part with the latest rainfall. High soil evaporation increased oxygen 18 content and the $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ plot was below the LMWL (Fig.1.4.d).

The very low precipitations during the summer of 2005 did not replenish soil water reserves. Soil water content, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ were similar in the inter-row (Fig.1.5. a-c), but hilling produced a shift of 30 cm downward. Evaporation was similar, except for two samples in the furrow (30-60 cm in Fig.1.5.d) ($\delta^{18}\text{O}$ of -6.7‰ and $\delta^2\text{H}$ of -69.6‰).

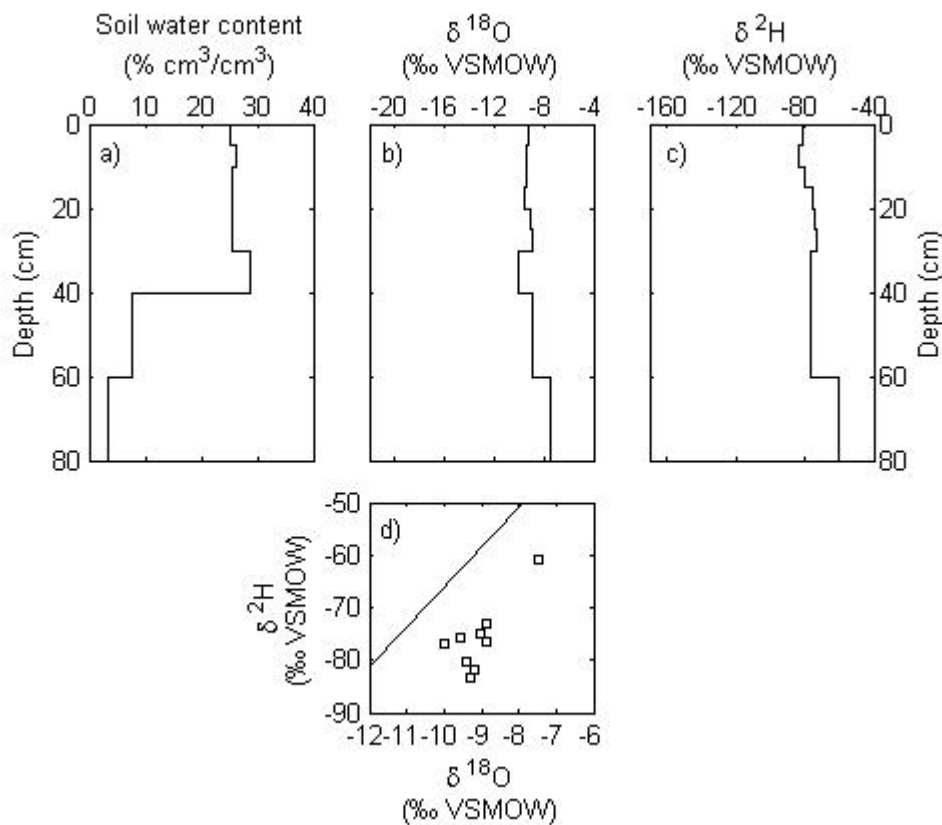


Figure 1.4 Data from the 0-80 cm soil profile on July 20 2005 (maximum foliage coverage) at centre hill: a) soil water content, b) delta oxygen 18, c) delta deuterium, d) Local Meteoric Water Line and soil water (square) isotopic signature.

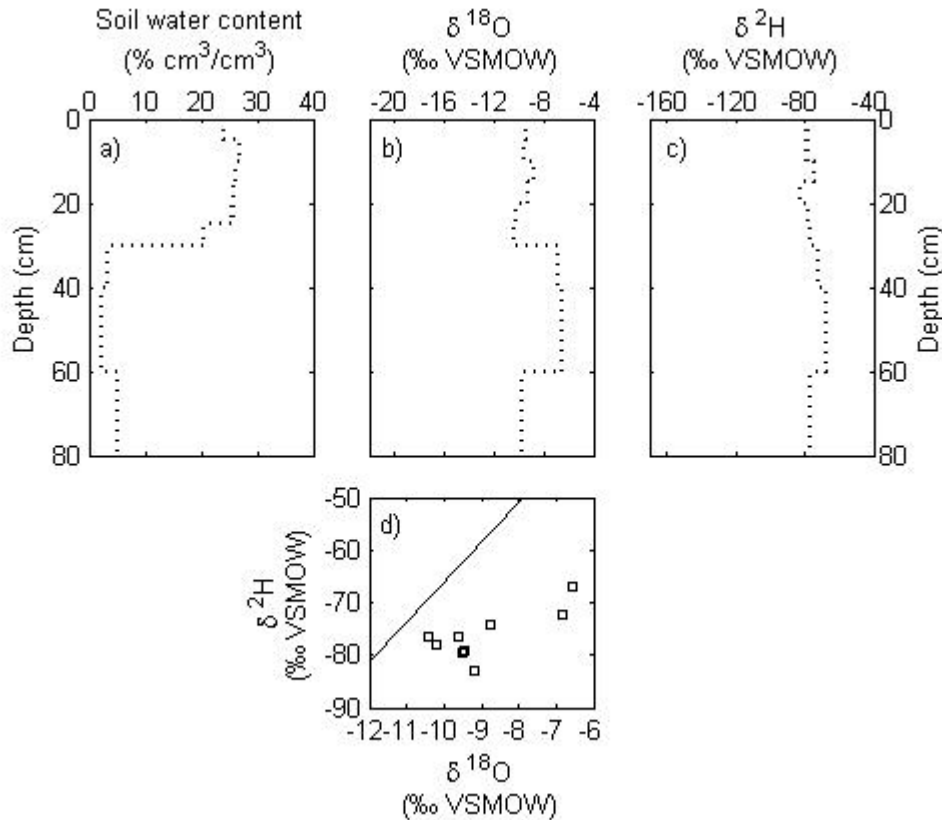


Figure 1.5 Data from the 0-80 cm soil profile on July 20 2005 (maximum foliage coverage) at inter-row: a) soil water content, b) delta oxygen 18, c) delta deuterium, d) Local Meteoric Water Line and soil water (square) isotopic signature.

2005 September 12th: end of the season

The measured volumetric soil water content in the hill increased from 14% in the 0-5 cm layer to 28% in the 25-30 cm layer, but was 5% in layers below 60 cm (Fig. 1.6.a). Estimated volumetric water content was $\sim 33\%$ at $\theta_{.33}$ and $\sim 43\%$ at $\theta_{.10}$ in the upper layer (0-40 cm for the centre of the hill and 0-30 cm for the inter-row) compared to $\theta_{.33} \sim 17\%$ and $\theta_{.10} \sim 26\%$ in deeper layers, which means that measured soil water was relatively high in the upper soil layer, while very low close to the wilting point in lower soil layers as observed on July 20th (Table 1.1). Evaporation occurred mainly in the 0-10 cm layer ($\delta^{18}\text{O}$ of -7.1% and $\delta^2\text{H}$ of -45.8% , Fig. 1.6.e), soil water isotopic signature being relatively constant with depth thereafter. The 0-5 cm showed an isotopically enriched $\delta^{18}\text{O}$ value of -

7.5‰ compared to mean values of -9.4 and -73.6‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$, respectively, deeper in the profile (5-80 cm) (Fig. 1.6.b-c). The isotopic signatures of -10.8‰ $\delta^{18}\text{O}$ and -71.3‰ $\delta^2\text{H}$ between August 15th and 29th (39 mm) and of -9.6‰ $\delta^{18}\text{O}$ and -61.7‰ $\delta^2\text{H}$ between August 29th and September 12th (80 mm) were similar to the average annual soil signature ($\delta^{18}\text{O}$ of -11.3‰ and $\delta^2\text{H}$ of -76.0‰). Thus, isotopic values were fairly constant with depth on September 12th, despite a sharp drop of soil water content at 60-80 cm (5%). Hence, it is difficult to set apart the influence of rainfall events on the soil water (Fig. 1.6.a). However, it appeared that the 68 mm rainfall on August 31st influenced soil water composition since isotopic values on September 12th showed a different pattern with depth compared to July 20th. Thus, a rainfall event of approximately 70 mm was required to influence the soil water profile.

The main peculiarity of the inter-row was its higher soil water content of 23-25 % in the upper 15 cm (Fig. 1.7.a) where a difference in isotopic signatures occurred (Fig. 1.7.b-c). Isotopic signature between 5 and 25 cm was slightly depleted (-11.2‰ $\delta^{18}\text{O}$ and -78‰ $\delta^2\text{H}$). The $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ plot (Fig. 1.7.d) indicated negligible evaporation. Hence, recent isotope-depleted rainfalls stayed in the upper layer. Even though soil water was slightly more depleted compared to the 15-day rainfall sample (80 mm from August 29th to September 12th, with -9.6‰ $\delta^{18}\text{O}$ and -61.7‰ $\delta^2\text{H}$), it seems that the 68 mm rainfall on August 31st replenished soil water reserves. Evaporation was dominant at the soil surface (at 0-5 cm: -8.4‰ $\delta^{18}\text{O}$ and -73‰ $\delta^2\text{H}$). Water of older origin in deeper layers (25-80 cm) was more enriched through evaporation and entrapped in micro-pores, since soil water content was low (13%).

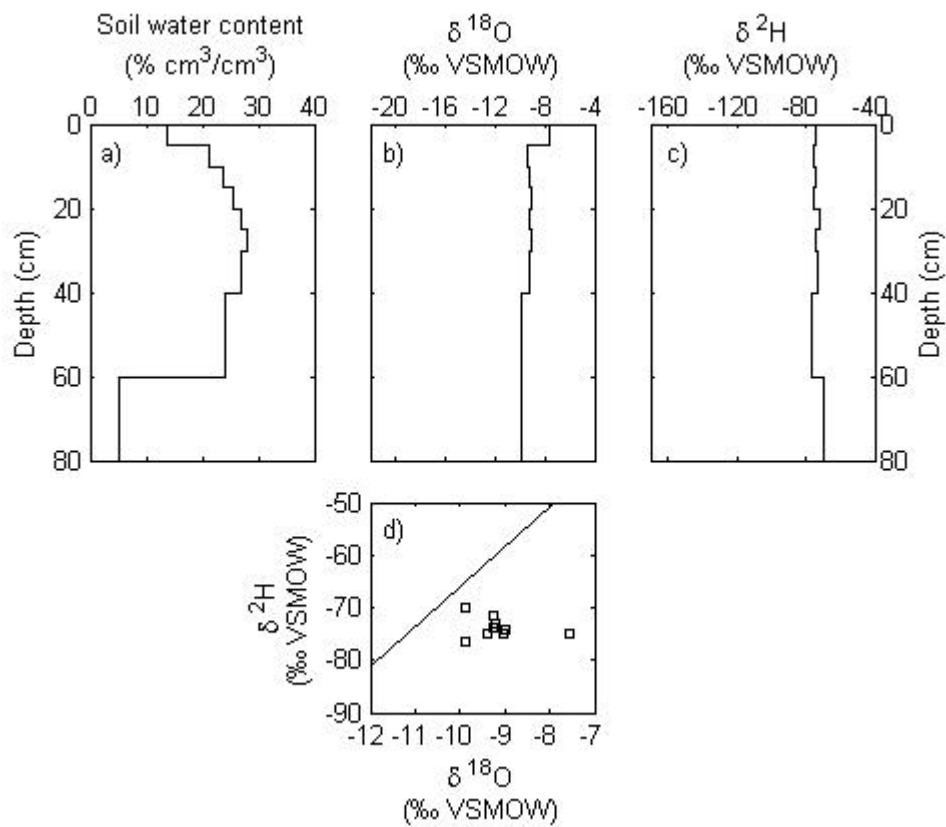


Figure 1.6 Data from the 0-80 cm soil profile on September 12 2005 (just before harvest) at centre hill: a) soil water content, b) delta oxygen 18, c) delta deuterium, d) Local Meteoric Water Line and soil water (square) isotopic signature.

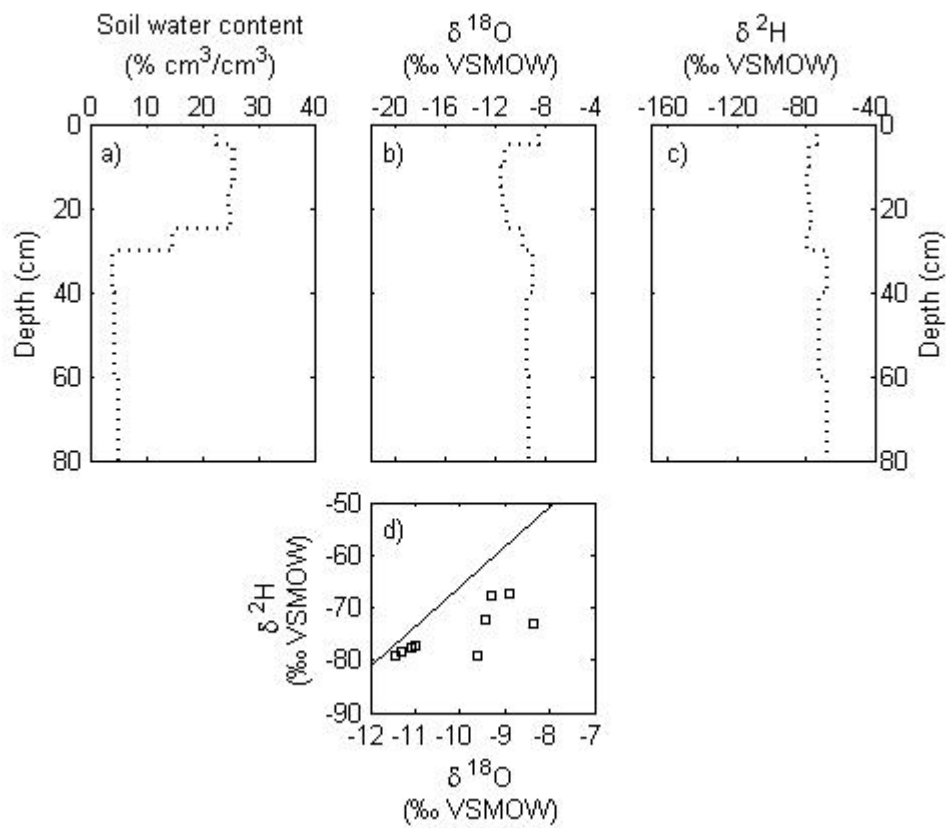


Figure 1.7 Data from the 0-80 cm soil profile on September 12 2005 (just before harvest) at inter-row: a) soil water content, b) delta oxygen 18, c) delta deuterium, d) Local Meteoric Water Line and soil water (square) isotopic signature.

2005 October 27: post-harvest

The soil was again bare and flat. Hill and inter-row samples may thus be considered as replicates. Figure 1.8 shows the repeatability of the procedure, except at a depth of 30 cm, indicating local variations in the thickness due to the levelling of the top layer.

The measured volumetric soil water content was $\sim 31\%$ in the upper layer (0-30 cm) and $\sim 14\%$ in the sublayers (30-80 cm). It reached a maximum of 36% in the 20-30 cm layer, followed by a sharp decrease to 15 to 10% deeper in the soil profile (Fig 1.8.a). Estimated volumetric water content was $\sim 34\%$ at θ_{-33} and $\sim 44\%$ at θ_{-10} in the upper layer (0-30 cm) compared to $\theta_{-33} \sim 19\%$ and $\theta_{-10} \sim 28\%$ in deeper layers (30-80 cm), which means that soil water was close to saturation for the entire soil profile as observed on May 4th 2005 (Table 1.1). There was a linear isotopic enrichment from -19.6 to -7.7‰ $\delta^{18}\text{O}$ and from -151.4 to -55.6‰ $\delta^2\text{H}$ with depth down to 30 cm, followed by constant values of -7.7‰ $\delta^{18}\text{O}$ and -57.5‰ $\delta^2\text{H}$ (Fig. 1.8). Such profile concurred with the most recent rainfalls of 123 mm between September 12th and 26th (-7.9‰ $\delta^{18}\text{O}$ and -50.7‰ $\delta^2\text{H}$) and of 243 mm between September 27th and October 24th (-17.8‰ $\delta^{18}\text{O}$ and -127.5‰ $\delta^2\text{H}$). The September 12th to 26th rainfalls were detected 1 to 1.5 months later from 20 cm in the upper layer until 80 cm in the bottom layer. This means that 1.5 month after the strong rain on September 12th, observed rainfalls have percolated down to 20 cm, which is almost the bottom of the upper layer (0-30 cm). The uniform signature in the bottom layer indicated that the soil water moved more rapidly in deeper than in upper layers. This is due to a sandier texture in sublayers, which induces a rapid percolation rate of soil water. On the other hand, the progressive isotopic enrichment in the upper layer may be explained either by a mixture of older and more recent water or by rainfall isotopic changes for the 15-day rainfall sample due to a gradual lowering of air temperature. Also the lowering of near-surface air temperature from 8 to 2°C between October 11th and 26th may explain why surface isotopic values of -19.6‰ $\delta^{18}\text{O}$ and -151.4‰ $\delta^2\text{H}$ are slightly lower compared to the latest 15-day rainfall sample (-17.8‰ $\delta^{18}\text{O}$ and -127.5‰ $\delta^2\text{H}$). Figures 1.8.d (centre hill) and 1.8.e (inter-row) show that soil water signature was close to the LMWL at both centre hill and inter-row positions, indicating negligible evaporation of soil water at this period of the year.

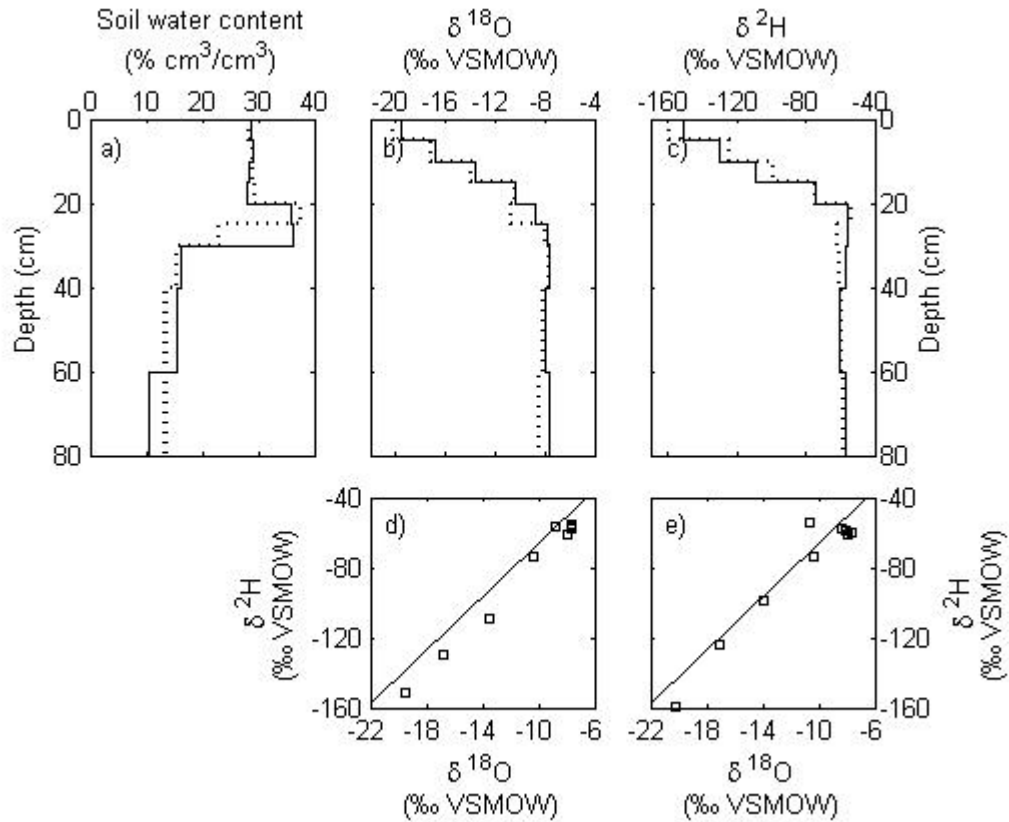


Figure 1.8 Data from both 0-80 cm soil profiles on October 27 2005 (after harvest, before soil freeze): a) soil water content, b) delta oxygen 18, c) delta deuterium, d) and e) Local Meteoric Water Line and soil water (square) isotopic signature at centre hill and inter-row respectively.

2006 May 5: pre-planting conditions

One month after the end of snowmelt in 2006, the observed volumetric soil water content (Fig. 1.9) was similar (30%) compared to the one observed in 2005 (Fig. 1.3.a) due presumably to similar thickness of the snow pack. Estimated volumetric soil water content was $\sim 31\%$ at θ_{-33} and $\sim 41\%$ at θ_{-10} in the upper layer (0-40 cm) compared to $\theta_{-33} \sim 17\%$ and $\theta_{-10} \sim 26\%$ in deeper layers (40-80 cm), which means that soil water was close to saturation for the entire soil profile as observed on May 4th 2005 (Table 1.1). The sharp discrepancy between 0-40 cm and 40-80 water content values reveals that the arable upper layer concerns the 0-40 cm soil profile. However, the isotopic soil water signature differed (Figs. 1.9.b-c), due to the different origin of soil water and higher rainfall in the spring of 2006. As a result, the upper layer was progressively depleted of isotopes from -7.4 to -15.4‰ $\delta^{18}\text{O}$ and from -59.8 to -115.2‰ $\delta^2\text{H}$. The isotopic signature in the 20-30 cm layer resembled that of the snow pack (-15.9‰ $\delta^{18}\text{O}$ and -108.6‰ $\delta^2\text{H}$). This shows that the water from snow melt is still in the upper arable layer at 20 cm deep. Hence, more than 2 months after the beginning of snow melt were necessary for water displacement beyond the upper layer.

Below 40 cm in the soil profile, where soil water content was lower, the isotopic signature increased from -14.8 to -13.0‰ $\delta^{18}\text{O}$ and from -95.5 to -83.35‰ $\delta^2\text{H}$. Such variations in isotopic signature may have two causes: 1) the isotopic signature of the snow pack may change during the course of snow melting (Friedman et al., 1991; Sommerfield et al., 1991; Cooper et al., 1993; Cooper, 2000); 2) some of the fall water may still be present, considering that the isotopic signature in the 60-80 cm layer (-13.9‰ $\delta^{18}\text{O}$ and -83.4‰ $\delta^2\text{H}$) resembled that of October 2005 in the upper layer (-13.5‰ $\delta^{18}\text{O}$ and of -108.8‰ $\delta^2\text{H}$ in the 15-20 cm layer). Again, all signatures were close to the LMWL, confirming little evaporation.

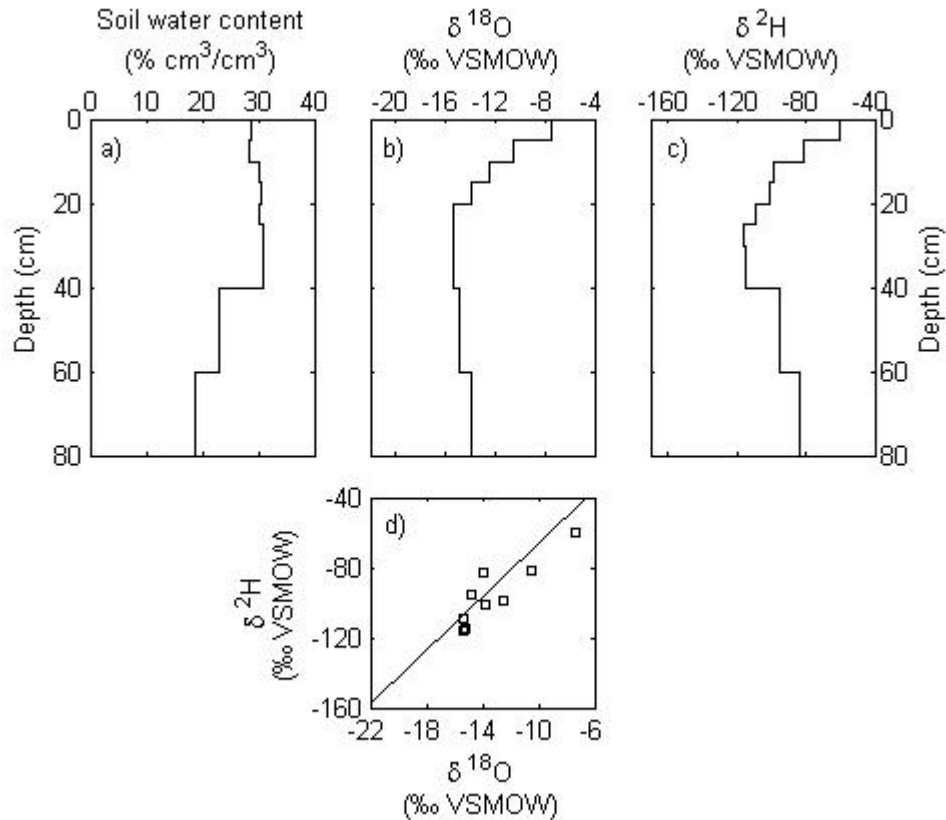


Figure 1.9 Data from the 0-80 cm soil profile on May 5 2006 (after snowmelt, before the next plantation): a) soil water content, b) delta oxygen 18, c) delta deuterium, d) Local Meteoric Water Line and soil water (square) isotopic signature.

1.2.5 Discussion

1.2.5.1 Synthesis

During most of the growing season, cultural operations, especially hilling, modified the spatial distribution and the thickness of the top layer. The hill was about 30 cm higher than the inter-row. However, soil water content and isotopic values were very comparable between the hill and the inter-row. The isotopic signatures of soil water showed that a substantial rainfall event (> 60-80 mm) was necessary to fill soil porosity. Moderate rainfall less than 30 mm per day and small rainfall less than 10 mm per day as between May and July 2005 had negligible impact on the isotopic signature of soil water. Nonetheless, during

summer 2005, the top layer remained moist in spite of plant water uptake and evidence of evaporation from $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ plots.

The previous isotopic analyses of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ of soil water in years 2005 and 2006 allowed a simulation of the fate of water throughout a complete season. This leads to a perceptual model for water transfer through the soil of the site based on a succession of two distinct leaching scenarios (Fig. 1.10).

1.2.5.2 Perceptual model

In a first scenario, bare and flat soil in spring and autumn (Fig. 1.10.a), the upper layer of the soil is usually wet (volumetric soil water contents $\sim 30\%$ down to 30-40 cm) compared to moderately dry lower layers ($\sim 15\%$). Water percolates easily into this loamy sand and evaporation is small at this time of the year. Snowmelt generates enough water to fill soil porosity. Snowmelt water leaches out of the top layer in one to two months as indicated by isotopic patterns of ^{18}O and ^2H . However, the leaching process may be accelerated by a single rainfall event exceeding 70 ± 10 mm according to September 12th soil water profile. For example, in 2006, snowmelt water is still detected at depth 20 cm under the surface in the upper layer of soil more than one month after complete snowmelt, while spring rainfalls in April 2005 entirely replenished the soil water reserves, leading to a loss of snowmelt signature in the entire 0-80 cm soil profile. Hence, leaching of plant nutrients such as nitrate may occur at that time of the year and yield potential may decrease as a result of early spring rainfall events. To mitigate nitrate leaching in early spring, controlled-release fertilizers and split applications of fertilizer nitrogen could be required.

A second scenario takes place due to crop canopy intercepting rainfall and to a hill-inter-row microtopography produced by the hilling operation (Fig. 1.10.b). Potato plants growing at fast rate produce more evapotranspiration, primarily in the upper layer. Since water percolates more slowly in the upper layer than in sublayers, more water must flow into the inter-row thus increasing the risk of leaching. In deeper layers, nutrients are no more available to the crop and may be lost to the environment by leaching. The volumetric water content remains low (2 to 8%) in sublayers and retained in micro-pores as a mixture of

annual rainfalls with average signature, ca. -11.3‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and -76.0‰ for $\delta^2\text{H}$. During summer, water retained in the microporosity has also undergone evaporation as shown by $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ plots.

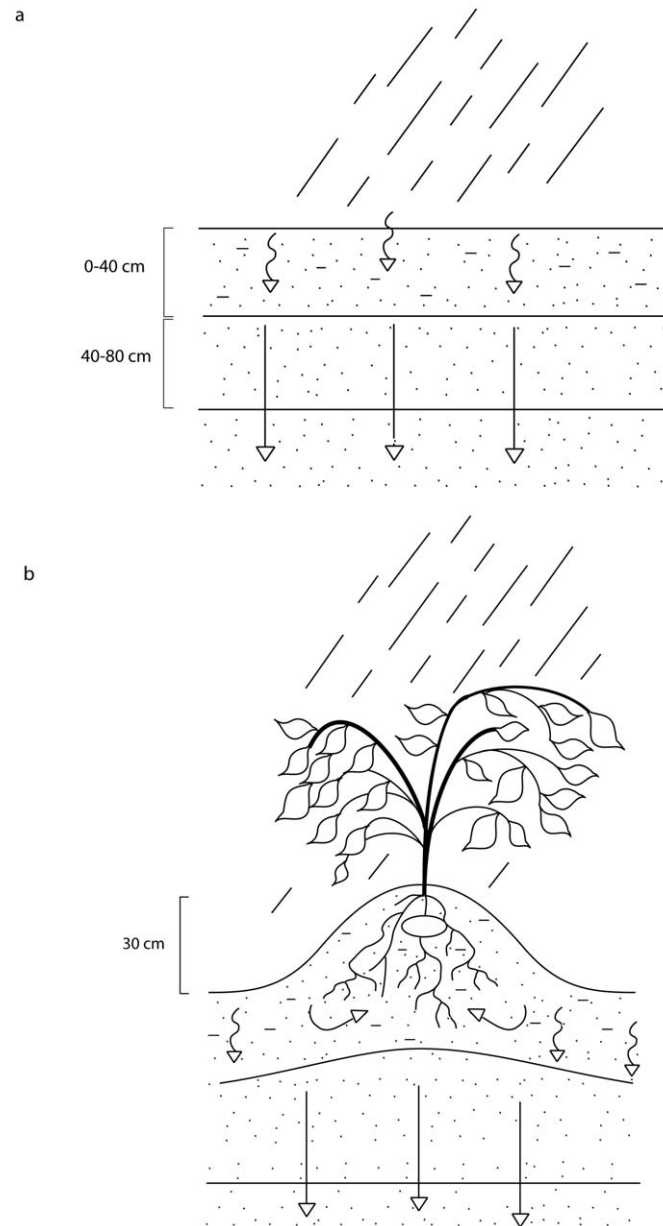


Figure 1.10 Perceptual model for water movement through the soil at the experimental site:
a) bare soil conditions, b) cultivated soil conditions.

1.2.6 Conclusion

Soil water content and isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$) of soil water were monitored in five 80-cm deep profiles during the 2005 season and in spring 2006 in a potato field. Soil water $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ values were associated to precipitation volumes and their isotopic signatures. The isotopic rainfall values allowed the determination of a Local Meteoric Water Line (LMWL) with slope of 7.65 and an intercept point of 10.39, in line with the Global Meteoric Water Line. Simultaneous analyses of ^{18}O and ^2H provided information on isotopic fractionation of water through evaporation. The isotopic signatures of water across soil profiles revealed a 1 to 2 months delay for the spring snow melt or the fall strong rainfalls (170-200 mm cumulated) to flow through the top 0-40 cm layer. The spring snow melt percolation process was accelerated by an intensive rainfall of 81 mm observed on May 3rd 2005, while the fall fast downward percolation was due to intensive rainfalls of 68 mm on August 31st, 78 mm on September 17th and 105 mm on September 26th. The top layer corresponding to the root zone had high water content and a slow water percolation rate, while the sublayers had lower water content and a faster water transfer. When reaching the deeper layers, water and fertilizers are free to move throughout the environment, adding to other diffuse sources of pollution.

A reliable perceptual model supports management decisions in maximizing yield while minimizing harm to the environment such as nitrate leaching to the water table. The perceptual model proposed separates the cropping season in two periods: the bare soil conditions and the growing crop conditions. Under bare soil conditions in spring and fall, the soil is flat, its porosity is replenished by heavy rainfalls and water moves down rapidly. During crop growth in summer, soil presents a microtopography due to hilling that favours percolation toward the inter-row. During the cropping season, the plant water uptakes are considerable and it seems that the plant apparently prefers soil water from recent rainfall than older soil water. Thus, soil water content remains relatively high (20-25%) in the top layer but drops drastically in the sublayers due to less organic matter in soil and strong evaporation of the water from previous precipitation before it percolates in soil.

It would not have been possible to build a plausible perceptual model of water transfer based on soil water content alone. Only isotopic signatures allow to distinguish water sources as rainfall or snowmelt.

Acknowledgments

We thank Nicolas Samson, Annie-Claude Parent, Denis Jobin and Mohammad-Hassan Zahedi-Niaki for field and laboratory assistance. We also thank Jean-Luc Michelot for helpful discussion. This research was supported by Cultures H. Dolbec Inc, Ferme Daniel Bolduc (1980) Inc. and the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (CRDPJ 305166-03).

1.2.7 References

- Allison, G. B., Barnes, C. J. and Hughes, M. W., 1983. The distribution of deuterium and O-18 in dry soils.2. Experimental. *Journal of Hydrology* 64 (1-4), 377-397.
- Araguas-Araguas, L., Rozanski, K., Gonfiantini, R. and Louvat, D., 1995. Isotope effects accompanying vacuum extraction of soil water for stable isotope analyses. *Journal of Hydrology* 168, 159-171.
- Barnes, C. J. and Allison, G. B., 1984. The distribution of deuterium and O-18 In Dry Soils.3. Theory for non-isothermal water-movement. *Journal of Hydrology* 74 (1-2), 119-135.
- Barnes, C. J. and Allison, G. B., 1988. Tracing of water-movement in the unsaturated zone using stable isotopes of hydrogen and oxygen. *Journal of Hydrology* 100 (1-3), 143-176.
- Barnes, C. J., Allison, G. B. and Hughes, M. W., 1989. Temperature-gradient effects on stable isotope and chloride profiles In dry soils. *Journal of Hydrology* 112 (1-2), 69-87.
- Bengtsson, L., Saxena, R. K. and Dressie, Z., 1987. Soil-Water Movement Estimated From Isotope Tracers. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques* 32 (4), 497-520.
- Boujamlaoui, Z., Bariac, T., Biron, P., Canale, L. and Richard, P., 2005. Depth of extraction roots and water isotopic signature uptake by plant roots. *Comptes Rendus Geoscience* 337 (6), 589-598.
- Braud, I., Bariac, T., Gaudet, J. P. and Vauclin, M., 2005. SiSPAT-Isotope, a coupled heat, water and stable isotope (HDO and (H₂O)-O-18) transport model for bare soil. Part I. Model description and first verifications. *Journal of Hydrology* 309 (1-4), 277-300.
- Burns, D. A. and McDonnell, J. J., 1998. Effects of a beaver pond on runoff processes: comparison of two headwater catchments. *Journal of Hydrology* 205 (3-4), 248-264.

- Cane, G. and Clark, I. D., 1999. Tracing ground water recharge in an agricultural watershed with isotopes. *Ground Water* 37 (1), 133-139.
- Clark, I. and Fritz, P., 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*.
- Cooper, L. W., 2000. Isotopic fractionation in snow cover. In: *Isotope tracers in catchment hydrology*. C. Kendall and J. J. McDonnell, Elsevier, 119-136.
- Cooper, L. W., Solis, C., Kane, D. L. and Hinzman, L. D., 1993. Application of O-18 tracer techniques to arctic hydrological processes. *Arctic and Alpine Research* 25 (3), 247-255.
- Corbin, J. D., Thomsen, M. A., Dawson, T. E. and D'Antonio, C. M., 2005. Summer water use by California coastal prairie grasses: fog, drought, and community composition. *Oecologia* 145 (4), 511-521.
- Craig, H., 1961. Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters. *Science* 133 (346), 1833-1834.
- Friedman, I., Benson, C. and Gleason, J., 1991. Isotopic changes during snow metamorphism. In: *Stable Isotope Geochemistry: A Tribute to Samuel Epstein*. H. P. Taylor, J. R. O'Neil and I. R. Kaplan. San Antonio, The Geochemical Society, 177-224.
- Gat, J. R., 1996. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 24, 225-262.
- Gaziz, C. and Feng, X. H., 2004. A stable isotope study of soil water: evidence for mixing and preferential flow paths. *Geoderma* 119 (1-2), 97-111.
- Gehrels, J. C., Peeters, J. E. M., De Vries, J. J. and Dekkers, M., 1998. The mechanism of soil water movement as inferred from ^{18}O stable isotope studies. *Hydrological Sciences Journal-Journal des Sciences Hydrologiques* 43 (4), 579-594.
- Goller, R., Wilcke, W., Leng, M. J., Tobschall, H. J., Wagner, K., Valarezo, C. and Zech, W., 2005. Tracing water paths through small catchments under a tropical montane rain forest in south Ecuador by an oxygen isotope approach. *Journal of Hydrology* 308 (1-4), 67-80.
- Hsieh, J. C. C., Chadwick, O. A., Kelly, E. F. and Savin, S. M., 1998. Oxygen isotopic composition of soil water: Quantifying evaporation and transpiration. *Geoderma* 82 (1-3), 269-293.
- Kendall, C. and McDonnell, J. J., 2000. *Isotope tracers in catchment hydrology*. C. Kendall and J. J. McDonnell.
- Landon, M. K., Delin, G. N., Komor, S. C. and Regan, C. P., 1999. Comparison of the stable-isotopic composition of soil water collected from suction lysimeters, wick samplers, and cores in a sandy unsaturated zone. *Journal of Hydrology* 224 (1-2), 45-54.
- Liao, S.L., Savard, M.M., Somers, G.H., Paradis, D. and Jiang, Y., 2005. Preliminary results from water-isotope characterization of groundwater, surface water, and precipitation in the Wilmot River watershed, Prince Edward Island. Geological Survey of Canada, Current Research 2005-D4, Ressources Naturelles Canada.
- Maule, C. P., Chanasyk, D. S. and Muehlenbachs, K., 1994. Isotopic Determination of Snow-Water Contribution To Soil-Water And Groundwater. *Journal of Hydrology* 155 (1-2), 73-91.
- Mayr, C., Lucke, A., Stichler, W., Trimborn, P., Ercolano, B., Oliva, G., Ohlendorf, C., Soto, J., Fey, M., Haberzettl, T., Janssen, S., Schabitz, F., Schleser, G. H., Wille, M. and Zolitschka, B., 2007. Precipitation origin and evaporation of lakes in semi-arid

- Patagonia (Argentina) inferred from stable isotopes (δ O-18, δ H-2). *Journal of Hydrology* 334 (1-2), 53-63.
- Melayah, A., Bruckler, L. and Bariac, T., 1996. Modeling the transport of water stable isotopes in unsaturated soils under natural conditions. 1. Theory. *Water Resources Research* 32 (7), 2047-2054.
- O'Driscoll, M. A., DeWalle, D. R., McGuire, K. J. and Gburek, W. J., 2005. Seasonal O-18 variations and groundwater recharge for three landscape types in central Pennsylvania, USA. *Journal of Hydrology* 303 (1-4), 108-124.
- Palmer, P. C., Gannett, M. W. and Hinkle, S. R., 2007. Isotopic characterization of three groundwater recharge sources and inferences for selected aquifers in the upper Klamath Basin of Oregon and California, USA. *Journal of Hydrology* 336 (1-2), 17-29.
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L. and Saxton, K. E., 1982. Estimation of soil water Properties. *Transactions of the ASAE* 25 (5), 1316-1320.
- Raymond, R., Laflamme, G. and Godbout, G. 1976. *Pédologie du comté de Portneuf*. bulletin technique n°18., Ministère de l'agriculture du Québec.
- Robertson, J. A. and Gazis, C. A., 2006. An oxygen isotope study of seasonal trends in soil water fluxes at two sites along a climate gradient in Washington state (USA). *Journal of Hydrology* 328 (1-2), 375-387.
- Rosen, M. R., Bright, J., Carran, P., Stewart, M. K. and Reeves, R., 1999. Estimating rainfall recharge and soil water residence times in Pukekohe, New Zealand, by combining geophysical, chemical, and isotopic methods. *Ground Water* 37 (6), 836-844.
- Saxena, R. K., 1984. Seasonal-variations of O-18 in soil-moisture and estimation of recharge in esker and moraine formations. *Nordic Hydrology* 15 (4-5), 235-242.
- Sommerfield, R. A., Judy, C. and Friedman, I., 1991. Isotopic changes during the formation of depth hoar in experimental snowpacks. In: *Stable Isotope Geochemistry: A Tribute to Samuel Epstein*. H. P. Taylor, J. R. O'Neil and I. R. Kaplan. San Antonio, 205-210.
- Yurtsever, Y. and Gat, J. R., 1981. Stable isotopes in atmospheric waters. In: J.R. Gat and R. Gonfiantini (Eds), *Stable Isotopes Hydrology, Deuterium and Oxygen-18 in the water Cycle*, IAEA Technical Series Report. In: Vienna, pp. 103-142.
- Zimmerman, U. and Ehhalt, D., Münnich, K.O., 1967. Soil-water movement and evapotranspiration: changes in the isotopic composition of the water. In: *Proceedings of the IAEA Symposium on Isotopes in Hydrology*, IAEA, pp. 567-585.

Le chapitre 1 a mis en évidence le lessivage de l'eau antécédente par des événements pluvieux ou de fonte des neiges ainsi que l'influence de l'évaporation sur la composition isotopique de l'eau du sol. Le lessivage de l'eau est d'une grande importance pour les substances dissoutes dans l'eau et qui se déplacent donc en même temps. Au chapitre 3, nous allons examiner le cas du nitrate à l'aide d'un autre traceur isotopique, le ^{15}N . Ainsi, une relation devrait pouvoir être établie entre l'oxygène 18 (^{18}O) et le deutérium (D ou ^2H), d'une part, et le ^{15}N , de l'autre, selon un scénario de dose, de moment et de mode d'application d'engrais azoté recommandé en sol sableux au Québec (jusqu'à environ 175 kg N ha^{-1} en bandes au semis).

Chapitre 2

2. Suivi de l'évolution du fertilisant azoté dans le sol et la pomme de terre par l'azote 15 au cours de la saison

2.1 Introduction

L'azote 15 (^{15}N) est un isotope stable de faible abondance naturelle (0.3663%) par rapport à l'azote 14 (99.6337%). Cette rareté naturelle en fait un remarquable traceur de l'azote. En effet, l'ajout d'une quantité même faible d'azote 15 dans le sol (par exemple 1% de l'azote total) permet d'en faire le suivi. Par ailleurs, l'azote 15 va suivre les mêmes déplacements et transformations que l'azote 14. D'une manière générale, l'azote 15 est un traceur incontournable à l'intérieur des bassins versants (Kendall, 2000). Différentes étapes du cycle de l'azote peuvent en effet être étudiées grâce à l'azote 15 comme la nitrification, la dénitrification, la volatilisation impliquant à chaque fois des techniques et précautions différentes (Knowles et Blackburn, 1993). L'azote 15 a été fréquemment utilisé comme traceur en contexte agricole car il permet de suivre directement le fertilisant enrichi dans le sol et dans la plante comme l'illustre une étude récente de Stevens et al. (2005). D'autres études se sont plus particulièrement intéressées à évaluer le coefficient d'efficacité du fertilisant appliqué (Morvan et al., 1997; Chantigny et al., 2004; Ruckauf et al., 2004; Collins et al., 2007). D'autres encore ont cherché à évaluer le lessivage des nitrates à partir d'application d'azote 15 à l'intérieur de lysimètres (Prunty et al., 2000; Gasser et al., 2002; Bergstrom et Kirchmann, 2004).

Le premier objectif relié à l'utilisation de l'azote 15 était de suivre les déplacements dans le sol du fertilisant enrichi au cours de la saison en tenant compte des transformations de la microtopographie occasionnées par l'opération de buttage propre à la culture de pomme de terre. Cela a permis d'apporter des précisions sur la diffusion de l'engrais dans le sol ainsi que sa répartition à l'intérieur de la butte de pomme de terre au cours de la

saison. Le deuxième objectif portait sur les quantités d'azote récupérées par la plante à deux moments durant la saison : au maximum de couverture foliaire et à la récolte. L'utilisation de l'azote 15 a permis de distinguer la quantité d'azote issue du fertilisant dans l'azote total de la plante et donc de quantifier la part d'azote issue de la minéralisation ainsi que son augmentation au cours de la saison. Les résultats ont ensuite été reliés aux prélèvements azotés journaliers de la plante du début à la fin de la saison comme modélisé par CENTURY dans SUBSTOR-DSSAT. Le troisième objectif était de réaliser des bilans d'azote et d'estimer le lessivage des nitrates issus du fertilisant.

La méthodologie ainsi que le matériel de l'étude seront exposés dans un premier temps. Dans un second temps, les différents résultats seront présentés en suivant l'ordre des objectifs exposés plus haut.

2.2 Théorie

2.2.1 Efficacité du fertilisant par l'azote 15

L'efficacité du fertilisant azoté peut être calculée à partir des teneurs en azote 15 mesurées dans le fertilisant, le sol et la plante par la formule suivante (Hauck, 1994) :

$$\%N_{\text{récupéré-plante}} = \frac{100 P(c - b_0)}{F(a - b_0)} \quad (2.1)$$

$\%N_{\text{récupéré-plante}}$: pourcentage d'azote issu du fertilisant récupéré par la plante (%)

P : N total dans la plante (kg N ha^{-1})

F : N total dans le fertilisant appliqué ($178.01 \text{ kg N ha}^{-1}$)

a : concentration en $\% \text{ }^{15}\text{N}/\text{N}_{\text{tot}}$ dans le fertilisant (1.335%)

b_0 : concentration en $\% \text{ }^{15}\text{N}/\text{N}_{\text{tot}}$ dans le sol à t_0 , conditions initiales du sol avant application d'engrais enrichis en azote 15 (0.369%)

c : concentration pondérale en $\% \text{ }^{15}\text{N}/\text{N}_{\text{tot}}$ dans les plantes (%)

et

$$\% \text{ } ^{15}\text{N}/\text{N}_{\text{tot}} = 100 \frac{^{15}\text{N}}{^{15}\text{N} + ^{14}\text{N}}$$

2.2.2 Bilan d'azote ^{15}N et quantification du lessivage des nitrates issu du fertilisant

Les bilans classiques d'azote sont faits en fin de saison. Ils incluent principalement deux sources d'azote apportées au sol : le fertilisant et la minéralisation de la matière organique. Une partie de cet azote est prélevé par la plante, une partie est stockée dans le sol et le reste est lessivé en profondeur, volatilisé (ammoniac, dénitrification) ou perdu par ruissellement. La volatilisation et le ruissellement peuvent être négligés en sol acide et en présence d'engrais nitriques. Le bilan d'azote par ha se calcule alors de la façon suivante :

$$F + M = P + \Delta S + L \quad (2.2)$$

F : azote total dans le fertilisant appliqué (kg N ha^{-1})

M : azote total produit naturellement par minéralisation (kg N ha^{-1})

P : azote dans la plante (kg N ha^{-1})

ΔS : excédent d'azote dans le sol par rapport aux quantités initialement présentes du printemps (kg N ha^{-1})

L : azote lessivé (kg N ha^{-1})

Une grande difficulté généralement rencontrée dans ces bilans est de pouvoir quantifier précisément l'azote issu de la minéralisation. C'est pourquoi les calculs sont faits en fin de saison et la quantité d'azote issue de la minéralisation est estimée à partir de coefficients obtenus par des études antérieures pour l'ensemble de la saison. Concernant le calcul du lessivage L à la fin de la saison, le paramètre ΔS (engrais résiduel du sol) peut être négligé en considérant que tout ce qui n'a pas été prélevé par la plante sera tôt ou tard lessivé.

Les bilans d'azote 15 permettent de raffiner les calculs précédents car ils ne prennent en compte que l'azote issu du fertilisant en excluant la part due à la minéralisation. L'équation (2.3) présente le bilan obtenu à partir des données d'azote 15 . Chaque partie du bilan est en fait une fraction de la quantité totale de fertilisant appliquée (F). L'azote issu de la minéralisation (M) n'intervient donc pas dans ce bilan et seul le lessivage attribuable à la fertilisation (L^*) est quantifié.

$$F = P^* + S^* + L^* \quad (2.3)$$

P^* : azote issu du fertilisant dans la plante (kg N ha^{-1})

S^* : azote issu du fertilisant dans le sol (kg N ha^{-1})

L^* : azote issu du fertilisant lessivé (kg N ha^{-1})

Les quantités d'azote issu du fertilisant contenues dans la plante sont calculées en multipliant les données de $\%N_{\text{récupéré-plante}}$ par la quantité d'azote total du fertilisant (F) (équation 2.4). La même opération est faite pour l'azote du sol.

$$P^* = \frac{\%N_{\text{récupéré-plante}}}{100} \cdot F$$

$$S^* = \frac{\%N_{\text{récupéré-sol}}}{100} \cdot F \quad (2.4)$$

Les quantités d'azote total du sol issu du fertilisant ($\% N_{\text{récupéré-sol}}$) sont calculées de la même manière que celles récupérées par la plante selon l'équation 2.5 :

$$\% N_{\text{récupéré-sol}} = \frac{100 S(b - b_0)}{F(a - b_0)} \quad (2.5)$$

S : N total dans le sol (kg N ha^{-1})

a : concentration en $\% \text{ }^{15}\text{N}/\text{N}_{\text{tot}}$ dans le fertilisant (%)

b : concentration en $\% \text{ }^{15}\text{N}/\text{N}_{\text{tot}}$ dans le sol au temps t

b_0 : concentration en $\% \text{ }^{15}\text{N}/\text{N}_{\text{tot}}$ initialement présente dans le sol dans le sol au temps t_0 , soit avant l'application d'engrais enrichis en azote 15 (%)

Le terme b est calculé en faisant d'abord la somme des quantités d'azote 15 en $\text{kg } ^{15}\text{N ha}^{-1}$ dans les quarante premiers centimètres du sol, où l'azote est utile à la plante (équation 2.6), puis en convertissant le terme $^{15}\text{N}_{\text{sol } [0-40]}$ en pourcentage selon l'équation 3 de l'annexe III.

$$^{15}\text{N}_{\text{sol } [0-40]} = \sum_0^{40 \text{ cm}} ^{15}\text{N}_{\text{sol}} \quad (2.6)$$

$^{15}\text{N}_{\text{sol}}$: azote 15 contenu dans le sol ($\text{kg } ^{15}\text{N ha}^{-1}$)

Le bilan d'azote proposé à l'équation 3.3 permet donc d'estimer les quantités de fertilisant qui ont été lessivées depuis le moment où l'application d'engrais a eu lieu sans tenir compte de la minéralisation. En jumelant l'équation 3.3 au bilan d'azote décrit par l'équation 3.2, il est possible d'en déduire la part lessivée due à la minéralisation. L'utilisation de l'azote 15 dans la réalisation de bilan d'azote permet donc d'apporter plus de précision par rapport au bilan décrit par l'équation 3.2.

L'excès isotopique (δ ‰) par rapport à l'air (référence) est calculé comme suit (Knowles et Blackburn, 1993) :

$$\delta ^{15}\text{N}_{\text{échantillon}} = \left(\frac{(^{15}\text{N}/^{14}\text{N})_{\text{échantillon}}}{(^{15}\text{N}/^{14}\text{N})_{\text{air}}} - 1 \right) \cdot 1000 \text{ ‰} \quad (2.7)$$

où $(^{15}\text{N}/^{14}\text{N})_{\text{air}} = 0.3663\%$ d'atomes (Junk et Svec, 1958)

Un bilan d'azote 15 peut aussi être établi pour vérifier la cohérence des données (éq. 2.8).

$$^{15}\text{N}_F = ^{15}\text{N}_P + \Delta ^{15}\text{N}_S + ^{15}\text{N}_L \quad (2.8)$$

$^{15}\text{N}_F$: azote 15 contenu dans le fertilisant ($\text{kg } ^{15}\text{N ha}^{-1}$)

$^{15}\text{N}_P$: azote 15 contenu dans la plante ($\text{kg } ^{15}\text{N ha}^{-1}$)

$\Delta ^{15}\text{N}_S$: différence d'azote 15 du sol entre t et t_0 , $t_0 = 5$ mai 2005 ($\text{kg } ^{15}\text{N ha}^{-1}$)

$^{15}\text{N}_L$: azote 15 contenu dans le fertilisant ($\text{kg } ^{15}\text{N ha}^{-1}$)

2.3 Matériels et méthodes

2.3.1 Pratiques culturales

Une parcelle de 40 m sur 26 m a été sélectionnée à l'intérieur d'un champ de pommes de terre (*Solanum tuberosum* L. cv. 'Goldrush') en 2005 sur un loam sableux de la série Bevin (podzol humo-ferrrique gléifié) à Saint-Ubalde (46°45'23''N ; 72°19'57''O) pour effectuer les essais isotopiques. Cette parcelle a elle-même été divisée en petites sections de 4 m par 4 m (annexe I) afin d'y prélever différents profils de sol au cours de la saison. La plantation a eu lieu le 25 mai 2005. Une application d'engrais de fertilisant non marqué de 160 kg N ha^{-1} a été effectuée à la machine le jour de la plantation, 5 cm en-dessous et de chaque côté du tubercule situé à 5 cm sous la surface du sol. Le fertilisant marqué à l'azote 15, a été appliqué manuellement sous forme liquide en bandes au centre du rang et à 5 cm de la surface du sol à la dose de 18 kg N ha^{-1} pour un enrichissement de 1.335% (soit $2.54 \text{ kg } ^{15}\text{N ha}^{-1}$). La quantité totale appliquée était donc de 178 kg N ha^{-1} , soit près de la recommandation d'engrais azotée de 175 kg N ha^{-1} pour la pomme de terre en sol sableux (CRAAQ, 2003). Un buttage de 30 cm a eu lieu le 6 juillet 2005. La récolte a eu lieu le 12 septembre 2005.

2.3.2 Echantillonnage

Des profils de sol ont été échantillonnés à l'aide d'un couteau à sol jusque 80 cm de profondeur puis stockés dans des boîtes en plastique fermées hermétiquement à cinq moments de l'année 2005-2006 : le 4 mai 2005 entre la fonte des neiges et la plantation, le 20 juillet 2005 après l'application d'engrais et le buttage, le 12 septembre juste avant la récolte, le 27 octobre avant le gel du sol) et le 5 mai 2006 après la fonte des neiges. Pour chaque échantillonnage, un profil de sol a été prélevé sur deux petites sections sélectionnées de manière aléatoire afin de constituer deux répétitions (annexe I). Deux

profils par section ont été prélevés le 20 juillet et le 12 septembre : l'un au centre du rang, l'autre dans l'entre-rang, afin de rendre compte de la variabilité spatiale imposée par la butte. Six échantillons ont été prélevés par profil jusqu'à 80 cm de profondeur : 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 cm.

Le 20 juillet 2005, huit plants complets de pomme de terre ont été prélevés sur les sections où l'échantillonnage du sol a été effectué. Les plants ont été réfrigérés puis séchés à 45°C avant analyse au laboratoire. Le 12 septembre 2005, seuls les tubercules ont été récoltés, le reste du plant ayant été laissé au champ.

Les pluies journalières ont été enregistrées du 22 novembre 2004 au 5 mai 2006 par une station météorologique située sur le site expérimental. La station était inopérante en hiver. La série climatique a donc été complétée par des observations rapportées à la station automatique de Donnacona (Environnement Canada) située à une trentaine de kilomètres au sud du site expérimental.

2.3.3 Analyses en laboratoire

Les plantes récoltées ont d'abord été séparées en tiges, feuilles, racines et tubercules. Une première partie de chaque échantillon de sol et de plante a été analysée pour obtenir les concentrations d'azote total (données du CNS Leco2000). La seconde partie a été séchée à 45°C pendant 48 h, puis broyée finement à < 149 micron. Ces échantillons ont été transférés dans des capsules d'étain de dimension 8 mm x 5 mm (cie Sercon Ltd.). Les capsules ont été fortement compressées avant d'être envoyées pour analyse isotopiques d'azote 15 par un analyseur élémentaire en ligne (PDZ Europa, Northwich, Cheshire England) au Stable Isotope Stable Facility Lab, UC Davis, CA, USA.

2.3.4 Modèles CENTURY et SUBSTOR

Le modèle CENTURY simule les flux de carbone, de nutriments et d'eau pour différents types d'écosystèmes (Parton, 1996). Le modèle intègre des données de sol (carbone, azote, phosphore, potassium, densité apparente et texture), des données climatiques (températures,

précipitations), des données concernant les précédents culturaux et des données d'aménagement (quantité de fertilisant et irrigation) s'il y a lieu. Par ailleurs, SUBSTOR (Simulate Underground Bulking Storage Organs) est un modèle de croissance pour la pomme de terre développé par l'université d'Hawaï et U.S.A.I.D. (Ritchie et al., 1996). Les modèles de croissances sont utilisés pour plusieurs raisons, notamment prédire les rendements, mesurer les impacts économiques et environnementaux de différents scénarios reliés au climat ou à l'aménagement et moduler les opérations de fertilisation et d'irrigation. Le modèle SUBSTOR modélise la croissance des différentes parties de la plante, tandis que le modèle CENTURY modélise les prélèvements azotés de la plante en fonction des résultats obtenus avec SUBSTOR.

Dans l'étude, les modèles CENTURY et SUBSTOR ont été utilisés à l'intérieur du logiciel DSSAT (Tsuji et al., 1994) afin de reconstituer la quantité d'azote total prélevé quotidiennement par la plante tout au long de sa croissance durant la saison 2005. Le calage du modèle et les résultats ont été fournis par Jérôme Goulet-Fortin.

2.4 Résultats

Les résultats sont présentés en cinq parties. La première partie présente les précipitations durant l'année 2005-2006 et l'influence qu'elles ont pu avoir sur le lessivage des nitrates du sol. La deuxième partie présente l'évolution des teneurs isotopiques d'azote 15 du sol au cours de la saison en fonction de la profondeur. La troisième partie s'intéresse au pourcentage de fertilisant retrouvé dans le sol et la plante afin d'évaluer l'efficacité du fertilisant. La quatrième partie porte sur les concentrations d'azote de la plante mesurée lors de l'étude dans l'évolution plus globale de la plante au cours de la saison réalisée conjointement par les modèles CENTURY et SUBSTOR-DSSAT. La cinquième partie présente le bilan d'azote issu du fertilisant et rend compte des difficultés rencontrées avec les échantillons de sol ainsi que des adaptations envisageables pour de futures études.

2.4.1 Suivi des précipitations de septembre 2004 à Mai 2006

Le déplacement de l'azote 15 du sol est relié à l'intensité des pluies ainsi qu'à leurs quantités cumulées. Les pluies journalières ont déjà été décrites au chapitre 1 (Fig. 1.1.) lors des analyses d'oxygène 18. Quatre événements pluvieux de forte intensité ont été enregistrés durant la saison 2005 : le 3 mai (81.4 mm), le 31 août (68 mm), le 17 Septembre (78 mm), le 26 Septembre (105 mm). Les pluies ont donc été plus fortes au début et à la fin de la saison par rapport à l'été. Ces événements pluvieux ont été identifiés au chapitre 2 comme responsables des déplacements majeurs de l'eau du sol et possiblement de celui des nitrates. La figure 2.1 présente les pluies mensuelles observées et les valeurs normales à la station météorologique de Donnacona. D'une manière générale, les pluies cumulées y sont supérieures aux normales sauf au cours de l'été (juin à août).

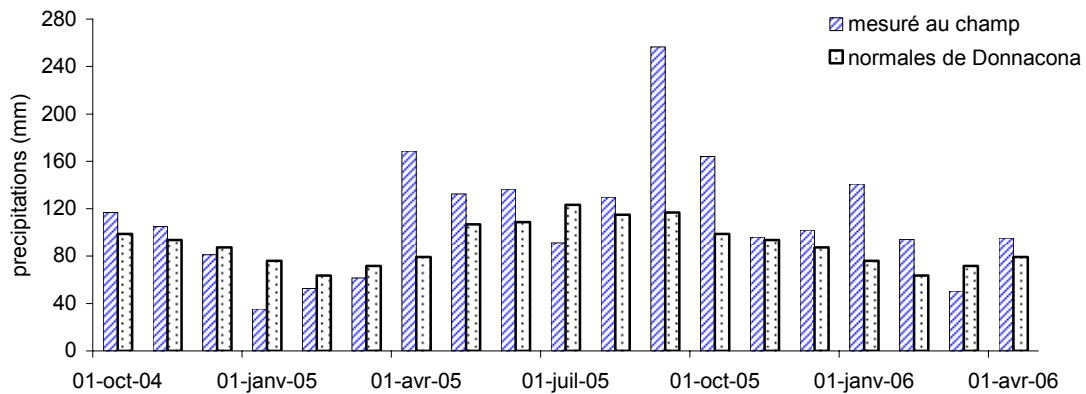


Figure 2.1 Comparaison des précipitations mensuelles observées avec les valeurs normales de la station Donnacona

2.4.2 Evolution des teneurs isotopiques d'azote 15 dans le sol au cours de la saison en fonction de la profondeur

Le suivi des teneurs d'azote 15 du sol au cours de la saison permet de retracer le déplacement du fertilisant azoté dans le sol. Les données brutes sont présentées au tableau 2.2.

Tableau 2.1. Données brutes du pourcentage atomique d'azote 15 par rapport à l'azote total dans les échantillons de sol à chaque profondeur et à différents moments de la saison. Chaque donnée est la moyenne entre deux échantillons prélevés à la même profondeur issus de deux profils différents.

% ¹⁵N au centre de la butte					
profondeur (cm)	04-mai-05	20-juil-05	12-sept-05	27-oct-05	05-mai-06
0-10	0.368	0.402	0.377	0.374	0.368
10-20	0.368	0.424	0.372	0.368	0.368
20-30	0.368	0.380	0.370	0.369	0.369
30-40	0.368	0.369	0.369	0.369	0.369
40-60	0.369	0.370	0.371	0.369	0.368
60-80	0.371	0.382	0.373	0.370	0.369
% ¹⁵N dans l'entre-rang					
profondeur (cm)		20-juil-05	12-sept-05		
0-10		0.371	0.385		
10-20		0.369	0.369		
20-30		0.369	0.369		
30-40		0.369	0.371		
40-60		0.375	0.374		
60-80		0.372	0.383		

Les teneurs isotopiques en azote 15 présentées dans le tableau 2.1 donnent des pourcentages atomiques naturels pour ce sol et reflètent une présence d'engrais qui diminue avec le temps. Dans le but de supprimer toute erreur systématique due à l'appareil de mesure, ces pourcentages sont exprimés au tableau 2.2 en termes d'excès isotopiques (δ ‰) par rapport à l'air (référence), selon la définition de Knowles et Blackburn (1993).

Tableau 2.2 Evolution des valeurs delta ^{15}N (‰) du sol.

$\delta^{15}\text{N}$ (‰) au centre de la butte					
profondeur (cm)	04-mai-05	20-juil-05	12-sept-05	27-oct-05	05-mai-06
0-10	4.5	96.3	30.0	21.1	5.2
10-20	5.1	158.4	16.7	5.6	4.8
20-30	5.0	36.9	10.0	6.4	6.3
30-40	5.1	7.4	6.7	7.2	6.6
40-60	7.8	9.3	11.8	8.1	5.3
60-80	13.8	42.8	18.3	10.4	6.1
$\delta^{15}\text{N}$ (‰) dans l'entre-rang					
profondeur (cm)		20-juil-05	12-sept-05		
0-10		13.6	52.0		
10-20		6.9	7.4		
20-30		6.4	6.5		
30-40		6.1	12.4		
40-60		22.6	19.8		
60-80		14.4	46.9		

Analyse de l'évolution de l'excès isotopique en azote 15 dans le sol au cours de l'année 2005-2006 :

Les conditions du sol préalables à la plantation et à l'enrichissement en azote 15 (4 mai 2005)

Le 4 mai 2005, les teneurs en azote 15 mesurées dans le sol (Tableau 2.1) correspondent aux concentrations naturelles, elles-mêmes proches de la teneur isotopique standard de l'air (0.366‰). L'excès isotopique ($\delta^{15}\text{N}$) par rapport à l'air (Tableau 2.2) présente en effet de très faibles valeurs qui varient sur l'ensemble du profil entre 4.5 et 13.8 ‰ en augmentant légèrement en profondeur. Cette augmentation en profondeur est probablement attribuable à des propriétés de texture et de teneur en matière organique légèrement différentes du sol à cette profondeur car on ne la retrouve pas le 5 mai 2006.

Les teneurs en azote 15 du sol après la plantation et le buttage, lorsque la plante a atteint son maximum foliaire (20 juillet 2005)

Le 20 juillet 2005, les teneurs en azote 15 du sol ont fortement augmenté par rapport au printemps, dû à l'enrichissement en ^{15}N deux mois plus tôt, le 25 mai (Tableau 2.2). Les plus fortes concentrations sont observées au centre de la butte, là où l'application a été effectuée. L'excès isotopique maximal de 158‰ est observé à 25 cm sous la surface du sol. En-dessous de la zone racinaire, à 30-40 cm de profondeur, les teneurs $\delta^{15}\text{N}$ sont minimales avec des valeurs autour de 7.4‰, comparables à celles du printemps. Mais elles augmentent à nouveau à partir de 40 cm pour atteindre 42.8‰ à 80 cm. Tandis que dans l'entre-rang les valeurs présentent une évolution comparable à celles du centre avec un décalage de 30 cm vers le bas, pour tenir compte de la présence de la butte. Ces données montrent que, deux mois après la plantation, l'engrais est resté concentré à l'endroit où il a été appliqué ; toutefois, en bas du profil, des valeurs plus élevées que celles observées dans les conditions initiales démontrent que l'engrais a partiellement été lessivé en profondeur. Cette période est donc caractérisée par une faible diffusion latérale de l'engrais dans le sol, ce qui est attribuable à la faible intensité des précipitations à ce moment. Ceci est confirmé par les résultats du chapitre 1 qui ont mis en évidence la faiblesse des précipitations et de la percolation en profondeur durant cette période.

Les teneurs en azote 15 du sol juste avant la récolte, après le défanage (12 septembre 2005)

Le 12 septembre 2005, les teneurs en azote 15 sont plus concentrées dans la couche supérieure de l'entre-rang qu'au sein de la butte, à l'inverse des observations du 20 juillet (Tableau 2.2). Les teneurs sont particulièrement fortes en surface de l'entre-rang (52.0‰) avec des valeurs minimales entre 10 et 30 cm. Au centre de la butte, les valeurs sont un peu enrichies en surface (30.0‰). Dans le reste du profil, elles sont comparables aux teneurs du printemps. Ainsi, l'engrais s'est bien réparti dans le sol durant cette période et a diffusé vers l'entre-rang en suivant le relief de la butte. D'une manière générale l'excès isotopique en azote 15 a diminué depuis le 20 juillet, ce qui témoigne qu'il y a eu des prélèvements par la plante et du lessivage relié à l'occurrence d'une pluie de forte intensité (68 mm) le 31 août. En particulier, la valeur 46.9‰ observée dans la couche 60-80 cm de l'entre-rang, qui

se situe en-dessous de la zone racinaire, est supérieure aux teneurs naturelles du sol observées en mai 2005, ce qui confirme la présence de lessivage du fertilisant en profondeur. Toutefois, la moyenne des valeurs entre l'entre-rang et le centre de la butte reste suffisamment élevée pour mettre en évidence des traces de fertilisant dans le sol au moment de la récolte. Ces résultats concordent avec ceux du chapitre 1, puisque les teneurs en ^{18}O et ^2H durant cette période ont révélé que la pluie de 68 mm du 31 août a influencé l'eau du profil de sol et par conséquent, qu'il y a eu du lessivage pendant cette période.

Les teneurs en azote 15 du sol après récolte, juste avant le gel du sol (27 octobre 2005)

Le 27 octobre 2005, plus d'un mois après la récolte et cinq mois après l'application de l'engrais, les valeurs isotopiques d'azote 15 sont pratiquement revenues aux teneurs naturelles du sol mis à part un léger excès isotopique dans la zone 0-10 cm (21.1‰) (Tableau 2.2). Les fortes pluies de l'automne (78 mm le 17 Septembre et 105 mm le 26 Septembre) sont responsables de la disparition presque totale de l'engrais du profil de sol. Les teneurs en ^{18}O et ^2H de l'eau du sol confirment cet important lessivage relié aux précipitations durant cette période.

Les teneurs en azote 15 du sol après l'hiver et avant la plantation suivante (5 mai 2006)

Le 5 mai 2006, il ne reste plus rien de l'engrais appliqué l'année précédente (Tableau 2.2). Les teneurs isotopiques d'azote 15 sont revenues aux valeurs initiales observées au printemps 2005. La fonte des neiges et les précipitations printanières ont lessivé ce qui pouvait rester dans le sol à l'automne.

2.4.3 Evaluation de l'efficacité du fertilisant par l'azote 15

Les résultats du calcul de l'efficacité du fertilisant azoté ($\%N_{\text{récupéré-plante}}$) sont présentés au tableau 2.3. Le paramètre P correspond à l'azote total contenu dans la plante, tandis que le paramètre c correspond au rapport isotopique en $\%^{15}\text{N}/N_{\text{tot}}$ contenu dans la plante L'azote total dans le fertilisant appliqué (F) était de 178 kg N ha^{-1} , le rapport isotopique en $\%$

$^{15}\text{N}/\text{N}_{\text{tot}}$ dans le fertilisant (a) était de 1.335% et la concentration initiale en % $^{15}\text{N}/\text{N}_{\text{tot}}$ dans le sol avant application d'engrais enrichis en azote 15 (b_0) montait à 0.369%. Des détails de calculs sont également présentés à l'annexe III.

Tableau 2.3 Calcul du pourcentage d'azote issu du fertilisant récupéré par la plante ($\text{N}_{\text{récupéré-plante}}$).

20-Jul-2005					
	plante totale	tubercules	feuilles	tiges	racines
P (kg N ha⁻¹)	132	16	80	25	10
c (%)	1.203	1.308	1.170	1.182	1.428
%$\text{N}_{\text{récupéré}}$ (%)	64	9	37	12	6
		12-Sep-05			
		tubercules			
P (kg N ha⁻¹)		134			
c (%)		0.972			
%$\text{N}_{\text{récupéré}}$ (%)		47			

Le 20 juillet 2005, le pourcentage d'azote issu du fertilisant et récupéré par la plante était de 64% (tableau 2.3), avec une concentration plus forte dans les feuilles que dans les tubercules. Le 12 septembre 2005, seuls les tubercules ont été récoltés. Leur pourcentage de récupération de fertilisant azoté a considérablement augmenté de 9% le 20 juillet à 47% à la récolte dû au transfert des nutriments des parties aériennes vers les tubercules durant la période de sénescence. Toutefois, comme cette valeur reste inférieure à celle mesurée dans l'ensemble de la plante le 20 juillet, une partie de l'azote est restée dans les parties aériennes tandis qu'une autre a probablement été lessivée. La partie des plants non récoltée (feuilles, tiges et racines) et laissée au champ constitue donc une quantité d'azote non négligeable qui peut potentiellement, après minéralisation, être réutilisée par la prochaine culture ou bien être lessivée.

Les mesures d'azote 15 dans les plantes ont permis d'évaluer le rendement du fertilisant azoté. Celui-ci était relativement élevé (64%) lorsque la plante a atteint son maximum de couverture foliaire. Ces résultats sont concordants avec ceux présentés par Tran et Giroux

(1991), où le maximum de récupération de l'azote par les pommes de terre était compris entre 63 et 76 %, dont 70 % se trouvait dans la partie foliaire de la plante. La majorité de l'azote s'est concentré dans les feuilles et les tiges jusqu'au maximum de couverture foliaire, alors que la situation s'est inversée ensuite au profit des tubercules.

2.4.4 Quantification de la minéralisation à partir des données d'azote 15 de la plante et liens avec l'évolution des prélèvements azotés de la plante au cours de la saison modélisé par CENTURY et SUBSTOR-DSSAT

Dans cette partie, il sera d'abord présenté les quantités d'azote issu de la minéralisation à partir des données de la précédente partie. Ces données seront ensuite comparées à l'évolution globale des prélèvements azotés au cours de la saison modélisé par CENTURY et SUBSTOR-DSSAT.

Les modèles CENTURY et SUBSTOR-DSSAT ont permis d'ajouter à la figure 2.2 les prélèvements azotés quotidiens de la plante au cours de la saison afin de situer les observations précédentes dans l'évolution globale des prélèvements azotés. Les données utilisées par ces modèles sont la quantité d'azote appliquée (178 kg N ha^{-1}) et les caractéristiques des plants, notamment leur biomasse et le rendement en fin de saison. Les données de sorties sont les prélèvements azotés quotidiens de la plante, ce qui inclut à la fois les quantités issues du fertilisant et celles provenant de la minéralisation ; ces résultats sont présentés à la figure 2.2 sous l'intitulé « N total simulé (plante) ».

Le 20 juillet 2005, le plant a consommé 64% du fertilisant appliqué, soit 114 kg N ha^{-1} , pour un contenu total en azote de 132 kg N ha^{-1} (tableau 2.3). La différence entre ces deux valeurs correspond à l'azote issu de la minéralisation prélevé par la plante : 22 kg N ha^{-1} ou 15% de la quantité d'azote total absorbé par la plante. De même, le 12 septembre, l'azote total contenu dans le tubercule était de 134 kg N ha^{-1} , dont 47% du fertilisant appliqué, soit 84 kg N ha^{-1} . La minéralisation a alors fourni 50 kg N ha^{-1} , soit 37.5% de la quantité d'azote total absorbé par le tubercule (figure 2.2). La quantité d'azote total contenu dans le tubercule (carré ouvert sur la figure 2.2) a considérablement augmenté entre le 20 juillet et

le 12 septembre. Plus intéressant est de voir l'augmentation de la part d'azote issu de la minéralisation en fin de saison.

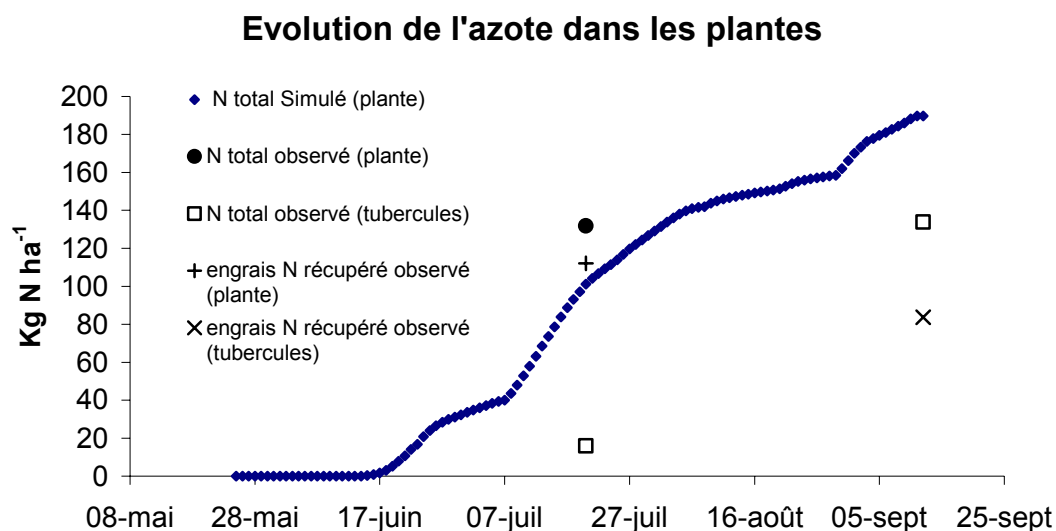


Figure 2.2 Observations d'azote total contenu dans la plante et le tubercule et observations d'azote issu du fertilisant récupérées par la plante et le tubercule (20 juillet et 12 septembre 2005) rattachées à l'évolution des prélèvements azotés de la plante au cours de la saison modélisée par CENTURY et SUBSTOR-DSSAT.

Sur la figure 2.2, les prélèvements azotés quotidiens simulés ne font qu'augmenter du début jusqu'à la fin de la saison. Toutefois, ces valeurs présentent plusieurs points d'inflexion qui permettent de distinguer 3 grandes périodes de prélèvement. Durant la première période correspondant aux trois semaines suivant la plantation (25 mai au 16 juin 2005), les prélèvements de la plante sont nuls, cette dernière puisant dans les réserves du planton mère. Durant la deuxième période (16 juin au 4 août 2005), les prélèvements azotés sont importants surtout jusqu'au 20 juillet 2005 lorsque la plante a atteint son maximum de couverture foliaire. Durant cette période, la plante consomme beaucoup d'azote pour développer ses parties aériennes. Un manque d'azote durant cette période serait dommageable pour les rendements finaux. La troisième et dernière période (4 août au 12 septembre 2005) montre une diminution de la vitesse d'absorption de l'azote par la plante.

La valeur d'azote total observée dans la plante le 20 juillet 2005 était supérieure à la valeur simulée. Les modèles sous-estiment donc légèrement les données observées. A l'inverse, les valeurs observées dans les tubercules se situent toujours en dessous des valeurs simulées car le reste de l'azote se situe dans les autres parties de la plante (feuilles, tiges, racines).

Entre la plantation et le 20 juillet, les données simulées révèlent que la plante a prélevé plus de la moitié (100 kg N ha^{-1}) de l'azote qu'elle renferme à la récolte (190 kg N ha^{-1}). A la récolte, les tubercules contiennent 134 kg N ha^{-1} issu du fertilisant d'après les données mesurées, alors que les données simulées révèlent que la plante contient au total 190 kg N ha^{-1} . La différence de 56 kg N ha^{-1} est attribuable aux résidus végétaux laissés sur le champ après la récolte. Au moment de la récolte, environ $1/3$ de l'azote total absorbé par la plante est donc abandonné au champ et présente une source d'azote ou de lessivage pour l'année suivante.

Jusqu'au 20 juillet, la minéralisation ne représente qu'une faible part des prélèvements azotés de la plante. En effet, l'azote total mesuré dans la plante est de 132 kg N ha^{-1} , dont 112 kg N ha^{-1} issu du fertilisant et par conséquent 20 kg N ha^{-1} issu de la minéralisation. L'engrais est très utile durant cette période où la plante prélève plus de la moitié de ses besoins azotés annuels. Après le 20 juillet, la part de l'azote issu de la minéralisation augmente. En effet, l'azote total mesuré dans le tubercule est de 134 kg N ha^{-1} , dont 84 kg N ha^{-1} sont issus du fertilisant et par conséquent 50 kg N ha^{-1} issu de la minéralisation, ce qui représente plus d'un tiers de l'azote prélevé par la plante à la récolte. Le fertilisant est donc moins utile à ce moment.

2.4.5 Bilan d'azote 15 et quantification du lessivage issu du fertilisant

Dans cette partie, le lessivage de l'azote issu du fertilisant a été calculé à partir de ces bilans en fin de saison. Par la suite, une analyse des difficultés de réaliser des bilans intermédiaires liés à la quantification de l'azote 15 du sol sera faite. Finalement, il sera exposé l'intérêt de faire des bilans d'azote 15 pour vérifier la cohérence des résultats et des hypothèses employées.

2.4.5.1 Estimation du lessivage de l'azote issu du fertilisant en fin de saison

Au moment de la récolte, l'équation 2.3 peut être simplifiée en supprimant le terme lié au sol (S^*) selon l'hypothèse que tout l'azote en excès dans le sol par rapport aux conditions initiales et qui n'a pas été prélevé par la plante sera lessivé entre l'automne et le printemps suivant (Bundy et Andraski, 2005). Cette dernière hypothèse est valable car les teneurs d'azote 15 mesurées au printemps 2006 étaient identiques aux valeurs initiales du printemps 2005 (tableau 2.1).

Cette simplification permet d'obtenir la quantité d'azote issu du fertilisant lessivée durant la saison en soustrayant les quantités prélevées par la plante de la quantité totale d'azote appliquée au champ. A la récolte, seuls les tubercules ont été récoltés. Ces derniers ont récupéré 47% de l'azote du fertilisant. Ceci signifie que 53% du fertilisant a été ou sera lessivé. Cela représente donc 94 kg ha⁻¹ parmi les 178 kg ha⁻¹ contenus dans le fertilisant appliqué au printemps 2005. La quantité de fertilisant lessivée est donc supérieure à celles prélevés par les tubercules en fin de saison. Toutefois, cette valeur de lessivage est légèrement surestimée car une partie restera jusqu'à la saison suivante dans les parties de la plante laissées au champ et ne sera libérée qu'après minéralisation (Webb et al., 1997; Gagnon et al., 2001). En effet, la minéralisation est favorisée par l'augmentation des températures durant l'été (Overrein, 1970; Henriksen et Breland, 1999; Prescott, 2005), mais elle est ralentie ou stoppée lorsque les températures diminuent.

2.4.5.2 Recommandations reliées aux bilans d'azote à l'intérieur de la saison

À l'intérieur de la saison, les bilans d'azote obtenus à partir des données d'azote 15 et de l'équation 2.3, permettrait de quantifier le lessivage qui a eu lieu entre chaque période d'échantillonnage et donc d'identifier des périodes où le lessivage du fertilisant se produit. La principale difficulté à surmonter pour réaliser ces bilans et de quantifier correctement l'azote du sol (S^*) en tenant compte du microrelief imposé par la butte de pomme de terre. Afin d'améliorer l'estimation de ce paramètre dans de futures études, un ensemble de recommandations sont proposées.

Recommandations à considérer dans l'estimation des quantités d'azote 15 du sol :

1. Le pourcentage d'azote issu du fertilisant retrouvé dans le sol est obtenu à partir de l'équation 2.5. Les quantités d'azote total montrent des valeurs très élevées (tableau 2.4) par rapport aux pourcentages d'azote 15 présentés au tableau 2.1. Plus la quantité d'azote 15 appliquée est faible et plus l'erreur sur la différence entre l'azote 15 appliqué et l'azote 15 déjà présent dans le sol au printemps augmente. En effet, la faiblesse de l'enrichissement (1.33%) dans le fertilisant appliqué est responsable en partie de la difficulté à distinguer les fluctuations de l'azote 15 du sol au cours de la saison par rapport aux teneurs initiales du printemps (0.37 %). Il serait donc préférable dans des études ultérieures d'utiliser un enrichissement plus important (par exemple 5%) afin de différencier plus clairement le fertilisant enrichi de l'abondance naturelle du sol.

Tableau 2.4 Quantités d'azote total contenu dans chaque échantillon de sol (kg N ha⁻¹)

profondeur (cm)	N total (kg ha ⁻¹)				
	04-mai-05	20-juil-05	12-sept-05	27-oct-05	05-mai-06
0-10	2029.79	1973.63	2722.00	2459.15	2163.72
10-20	2028.44	2348.20	2574.93	2500.38	1924.96
20-30	1388.16	2398.48	2471.66	2197.17	2131.95
30-40	878.47	1823.48	2070.20	608.96	1933.50
40-60	88.63	2094.09	685.79	508.31	693.44
60-80	84.69	33.54	69.19	83.75	109.78

2. La diffusion de l'azote 15 appliqué dans le sol au cours de la saison est la deuxième considération à avoir pour estimer correctement la quantité d'azote 15 totale du sol à chaque profondeur. Cette difficulté est rehaussée par la présence de la butte qui complique le travail d'échantillonnage et les calculs (Zebarth et Milburn, 2003). De multiples pistes doivent être explorées pour remédier à ce problème.
Dans l'étude, il n'y a que le profil du centre qui rende compte des teneurs contenues dans la butte (0-30 cm). En-dessous de 30 cm, il y a en revanche deux profils qui

rendent compte des teneurs en azote 15 : celui du centre et celui de l'entre-rang. L'estimation de la quantité d'azote 15 du sol en tenant compte de sa diffusion au cours de la saison se fait donc en considérant deux zones. La première zone correspond à l'intérieur de la butte (0-30 cm),. Le calcul se fait en appliquant un facteur de correction aux valeurs du profil unique pris au centre de la butte. La seconde zone est située sous la butte (30-80 cm) et il faut alors pondérer les valeurs prises au centre par celles prises dans l'entre-rang. Cette difficulté pourrait être contournée en utilisant uniquement les valeurs centrales et en les multipliant par 0.8 (valeur établie dans l'article présenté dans le chapitre 3). Toutefois cette relation avait été établie pour l'engrais total appliqué sous forme de granules et concernait l'ensemble de la saison. L'azote 15 a quant à lui été appliqué sous forme liquide et a peut-être diffusé différemment que les granules. Par ailleurs, dans le tableau 3.2 les teneurs en azote 15 du sol sont plus concentrées au centre de la butte qu'au début (jusqu'au 20 juillet), alors qu'à la fin de la saison (12 septembre) la situation s'inverse car les concentrations sont relativement plus importantes dans l'entre-rang. Ces considérations rendent difficile l'utilisation de la relation établie au chapitre 3 pour l'estimation de la quantité d'azote 15 du sol dans l'ensemble de la butte.

Une autre méthode utilisée par ailleurs serait de considérer le centre (zone où l'engrais a été appliqué) comme représentant 20% du champ (Dr. Martin Chantigny, communication personnelle). Ce qui impliquerait de faire une moyenne avec un échantillon au centre et quatre autres pris en dehors de la zone. Dans tous les cas, il conviendrait de multiplier l'échantillonnage à l'intérieur de la butte pour avoir une meilleure représentation de la teneur en azote 15 du sol en tenant compte de la diffusion de l'engrais au cours du temps.

3. Une autre préoccupation concerne la représentativité des échantillons à chaque profondeur compte-tenu du relief occasionné par la butte de pomme de terre (environ 30 cm). Dans l'étude présentée au chapitre 3, les échantillons de sol ont subi des facteurs de corrections afin de tenir compte de la discontinuité du sol due à la butte. Le même raisonnement peut-être appliqué dans la présente étude en

adaptant à la hauteur de la butte légèrement plus haute (30 cm au lieu de 25 cm dans l'étude présentée au chapitre 3). Ainsi, l'échantillon prélevé entre 0 et 10 cm au centre de la butte représente en fait 1/6 de la surface du champ, celui mesuré entre 10 et 20 cm, 1/2 de la surface du champ et celui mesuré entre 20 et 30 cm, 5/6 de la surface du champ. Ces fractions sont des facteurs de correction des échantillons mesurés dans la butte qui prennent en compte le relief de la butte. Toutefois ce sont des approximations qui peuvent entraîner des erreurs, il est donc important d'être vigilant dans le choix de ces paramètres, ou bien de les préciser par une étude approfondie de la microtopographie de la butte de pomme de terre.

4. Une dernière difficulté concerne la comparaison des valeurs d'azote ^{15}N dans la butte avec celles du printemps lorsque le relief est encore plat afin de calculer la différence $b-b_0$ de l'équation 2.5. Il faut pour cela opérer des corrections en tenant compte du microrelief occasionné par le buttage. Cette variation de relief est présentée à la figure 2.3, où les données du centre de la butte sont situées 15 cm au-dessus de la surface du sol au temps t_0 tandis que les données de l'entre-rang sont situées 15 cm en-dessous. Il est possible de comparer les valeurs prélevées dans la butte avec celles du printemps en corrigeant pour le relief. Toutefois, ces calculs n'ont pas donné de résultats concluants dans la présente étude. Cette variations de relief inter-saisonnière semble constituer une difficulté majeure dans la comparaison des données, c'est pourquoi il serait préférable dans des études ultérieures de calculer la différence $b-b_0$ de l'équation 2.5 en faisant la différence par rapport à un profil prélevé le même jour dans une zone témoin avec un relief et un traitement identiques mais sans enrichissement de ^{15}N , et non par rapport aux données du printemps.

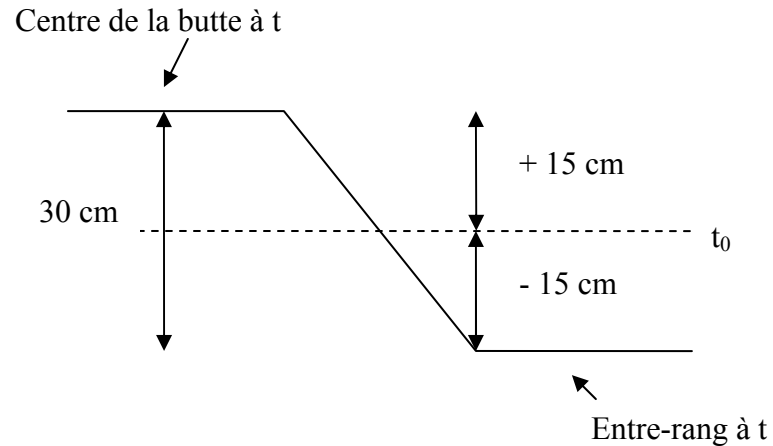


Figure 2.3 Schéma des variations de reliefs à t au centre de la butte et dans l'entre-rang par rapport à la situation à t_0 .

L'ensemble de ces recommandations liées à la concentration de l'enrichissement, la diffusion de l'engrais, la reconstitution du relief et la comparaison des données avec celles du printemps, permettraient d'estimer plus précisément les quantités d'azote 15 stockées dans le sol au cours de la saison et de calculer des bilans partiels d'azote proposés aux équations 2.4 et 2.5.

2.4.5.3 Importance de vérifier la cohérence des données par un bilan d'azote 15

Avant de faire le calcul du pourcentage de fertilisant récupéré par la plante (équation 2.1) et par le sol (équation 2.5) pour en déduire la proportion lessivée à partir de l'équation 2.3, il est important de vérifier la cohérence des données en effectuant un bilan d'azote 15 selon l'équation 2.8. En effet, le bilan d'azote 15 permet de vérifier que les quantités d'azote 15 retrouvées conjointement dans le sol et la plante sont inférieures ou égale à celles ajoutées dans le fertilisant.

Afin d'apporter un exemple de l'intérêt à réaliser des bilans d'azote 15 , la différence $\Delta^{15}\text{N}_s$ a été quantifiée dans le cadre de l'étude pour les profondeurs 0-40 cm (zone utile

pour la plante) et 40-80 cm (zone non accessible aux racines) entre le moment de la mesure et l'état initial du sol avant enrichissement (le 4 mai 2005). Le tableau 2.5 présente les données brutes d'azote ^{15}N exprimées en kg ha^{-1} . Elles ont été calculées à partir des concentrations d'azote total et des teneurs en azote ^{15}N mesurées à chaque profondeur selon les équations en annexe III. En-dessous, une somme est faite pour les zones 0-40 cm et 40-80 cm à chaque date. La différence $\Delta^{15}\text{N}_s$ est faite à chaque date par rapport aux valeurs initiales du 4 mai 2005. Cette dernière opération permet de mettre en évidence les quantités d'azote ^{15}N excédentaires dans le sol une fois le fertilisant isotopiquement enrichi appliqué.

Tableau 2.5 Quantités d'azote ^{15}N du sol au centre de la butte, somme sur les profondeurs 0-40 cm et 40-80 cm et différentielles à chaque date par rapport à t_0 , avec $t_0 = 4$ mai 2005.

Centre butte	quantité ^{15}N dans les sols (kg ha^{-1})				
Profondeur	04-mai-05	20-juil-05	12-sept-05	27-oct-05	05-mai-06
cm	$\text{kg } ^{15}\text{N ha}^{-1}$				
0-10	8.946	9.763	9.172	9.094	8.951
10-20	8.973	10.342	9.077	8.978	8.971
20-30	8.350	8.615	8.391	8.361	8.360
30-40	5.769	5.783	5.779	5.781	5.778
40-60	3.219	3.224	3.232	3.220	3.211
60-80	0.303	0.312	0.304	0.302	0.301

	04-mai-05	20-juil-05	12-sept-05	27-oct-05	05-mai-06
Couche de sol	$\text{kg } ^{15}\text{N ha}^{-1}$				
0-40 cm	32.04	34.50	32.42	32.21	32.06
40-80 cm	3.52	3.54	3.54	3.52	3.51

	04-mai-05	04-mai-05	04-mai-05	04-mai-05
	20-juil-05	12-sept-05	27-oct-05	05-mai-06
Couche de sol	Différence ($\Delta^{15}\text{N}_s$) $\text{kg } ^{15}\text{N ha}^{-1}$			
0-40 cm ($t-t_0$)	2.46	0.38	0.18	0.02
40-80 cm ($t-t_0$)	0.01	0.01	0.00	-0.01

La quantité d'azote ^{15}N appliquée ($^{15}\text{N}_F$) était de $2.54 \text{ kg } ^{15}\text{N ha}^{-1}$, la quantité d'azote ^{15}N prélevé par la plante ($^{15}\text{N}_p$) était de $1.63 \text{ kg } ^{15}\text{N ha}^{-1}$ le 20 juillet et de $1.39 \text{ kg } ^{15}\text{N ha}^{-1}$ le 12 septembre 2005. La quantité maximale $\Delta^{15}\text{N}_s$ possible serait donc de l'ordre de $1.15 \text{ kg } ^{15}\text{N ha}^{-1}$ en considérant un lessivage nul. Cette valeur serait inférieure s'il y a eu du lessivage. Or la valeur $2.46 \text{ kg } ^{15}\text{N ha}^{-1}$ obtenue entre le 20 juillet et le 4 mai 2005 est bien supérieure au maximum de 1.15 kg ha^{-1} escompté.

Cette valeur aberrante illustre l'ensemble des difficultés énoncées dans la partie précédente (2.4.5.2) et justifie la réalisation d'ajustements dans les futures campagnes d'échantillonnage afin d'obtenir notamment plus de précisions sur la diffusion de l'azote ^{15}N dans la butte au cours de la saison. La comparaison des teneurs en azote ^{15}N des profils par rapport à un profil témoin ayant subi les mêmes opérations mécaniques (buttage) mais sans application enrichie en azote ^{15}N plutôt qu'à un profil unique prélevé en début de saison, permettrait par ailleurs de contourner la difficulté du relief de la butte qui intervient après la plantation.

Le calcul du bilan d'azote ^{15}N (équation 2.8) est donc un exercice utile qui permet de vérifier si les données sont cohérentes avant de calculer les quantités d'azote issu du fertilisant récupérées dans le sol et d'en déduire les quantités lessivées d'azote issu du fertilisant (équation 2.3).

2.5 Conclusion

Le suivi des quantités d'azote ^{15}N ajoutées au sol au moment de la plantation ont donc permis d'atteindre les objectifs visés dans cette étude et d'apporter des précisions très intéressantes sur 1) la diffusion du fertilisant dans le sol au cours de la saison, 2) le rendement du fertilisant, 3) la minéralisation à l'intérieur des prélèvements globaux de la plante et finalement 4) la quantification du fertilisant lessivé. Concernant la diffusion de l'engrais, les résultats ont montré que l'engrais reste très concentré au centre de la butte durant la première moitié de la saison et qu'il diffuse ensuite. Toutefois, le faible lessivage de l'azote au début semble surtout associé aux pluies qui ont été plus faibles durant la

première partie de la saison. Il conviendrait donc de reconduire l'étude une année où cette période présente des pluies de plus forte intensité.

Par ailleurs, le rendement du fertilisant a été relativement élevé (63% à la mi-saison). Ce propos est à nuancer car la comparaison des données mesurées avec celles obtenues par les modèles CENTURY et SUBSTOR-DSSAT montrent que le tiers de l'azote prélevé par la plante est abandonné au champ et peut être potentiellement lessivé. En effet, les bilans d'azote calculés à la récolte montrent que le lessivage réel et potentiel (correspondant à l'azote contenu dans la plante abandonnée au champ) représentait 53% du fertilisant appliqué, ce qui est relativement élevé. Finalement, des ajustements sont nécessaires, notamment concernant la diffusion de l'azote, afin de mesurer plus précisément l'azote 15 dans le sol et pouvoir réaliser dans d'autres études des bilans d'azote à l'intérieur de la saison. Ceci permettrait d'identifier les périodes où le lessivage est plus important.

Au chapitre 2, nous avons soulevé des difficultés d'échantillonnage qui compliquent le calcul des bilans saisonniers de l'azote pour la culture de pomme de terre en raison de l'application de l'engrais en bandes et de la microtopographie imposée par le buttage. Le chapitre 3 porte sur un échantillonnage intensif du nitrate dans le profil de sol utilisable dans la pratique où l'engrais appliqué est généralement granulaire. Une méthode d'échantillonnage simplifiée mais représentative du profil de sol sera proposée pour faciliter la prise de décision sur la dose d'azote à appliquer au fractionnement lors du buttage et diagnostiquer le statut saisonnier du nitrate dans le sol.

Chapitre 3

3. Etablissement d'une relation pour l'échantillonnage de l'azote à partir d'un profil de sol unique dans la butte de pomme de terre

Ce chapitre se présente sous la forme d'un article en anglais, qui a été soumis à la revue scientifique *Communications in Soil Science and Plant Analysis*.

3.1 Résumé

Dans le sol, la distribution en profondeur des nitrates évolue au cours de la saison avec les apports d'engrais et les pratiques culturales propres à la production de pommes de terre (*Solanum tuberosum* L.). Le fertilisant appliqué en bande proche du planton au moment de la plantation diffuse dans le sol durant la saison. L'opération de buttage transforme la surface du sol et redistribue la double application azotée entre le centre de la butte et l'entre-rang. La procédure d'échantillonnage du sol requise pour quantifier l'accumulation des nitrates dans l'intégralité du volume de sol devient alors fastidieuse. L'objectif de l'étude était d'estimer l'accumulation des nitrates dans le volume de sol en entier à partir d'un seul profil échantillonné dans la butte de pomme de terre. Un échantillonnage intensif a été conduit dans les cinquante premiers centimètres du sol à quatre endroits de la butte dans des champs ayant reçu trois quantités différentes d'engrais azoté appliqué en deux fois avant le buttage. De nombreuses valeurs de concentrations de nitrate dans le profil de sol ont été obtenues en fonction du temps et des différentes quantités d'azoté appliquées. Les teneurs en nitrate du sol augmentent avec l'application de fertilisant et lors de la minéralisation de la matière organique et diminuent par les prélèvements de la plante et le lessivage. L'accumulation des nitrates moyennée sur l'ensemble de la saison dans les cinquante premiers centimètres du sol représente 78% de l'accumulation du centre de la butte par hectare ($r^2 = 0.90$). Un unique profil de sol au centre de la butte réduit

considérablement le temps et les coûts d'échantillonnage et fournis une estimation juste de l'accumulation des nitrates pour le profil 0-50 cm.

3.2 Article

Single-hole soil sampling for nitrogen in the potato hill

Peggy Macaigne¹, Léon-Etienne Parent², François Anctil¹

¹ Department of Civil Engineering, Université Laval (Québec, Canada); ² Department of Soils and Agrifood Engineering, Université Laval (Québec, Canada)

3.2.1 Abstract

The nitrate distribution in the soil profile varies with fertilization and tillage practices in the potato (*Solanum tuberosum* L.) production. The band applied fertilizers localized near the seed at planting must diffuse through the bulk soil during the growing season. The hilling operation transforms soil surface into an undulating field landscape and redistributes the split-applied nitrogen fertilizers between the hill and the inter-row. The soil sampling procedure during the growing season thus becomes extremely tedious when searching to quantify nitrate accumulation in the entire soil volume. The objective of this study was to assess seasonal nitrate accumulation in a soil volume from a single boring in the potato hill. An intensive sampling was conducted at four places in the 0 to 50 cm profile in potato fields receiving three rates of split applied N before hilling. Treatment and time effects provided a large range of nitrate concentrations throughout the soil profile. Nitrate content increased with N fertilization and organic matter mineralization and decreased as a result of plant uptake and nitrate leaching. Averaged across the season, nitrate accumulation in the 0-50 cm profile represented 78% of that accumulated in the center of the hill on a per ha

basis ($r^2 = 0.90$). A single boring in the center of the hill considerably reduced sampling time and cost and provided a fair estimate of seasonal nitrate accumulation in the 0-50 cm soil profile.

Keywords: N budget, potato hill, sampling of soil nitrate

3.2.2 Introduction

Nitrate accumulation in the soil provides an instantaneous information on N availability to the crop (Li et al., 2006), N lost to the environment (Mehdi and Madramootoo, 1999; Li et al., 2006) and fertilizer N recovery between the fall and the following spring (Guillard et al., 1995; Milburn et al., 1997; Li et al., 2003). In Quebec, intensive potato production was found to contribute substantially to nitrate pollution of groundwater (Giroux, 1995; Levallois et al., 1998; Gélinas and Rousseau, 2004). However, the sampling procedure required to monitor nitrate accumulation in the soil during the growing season may become extremely tedious in potato fields where the nitrate distribution profile varies with fertilization and tillage practices.

The band applied fertilizers that are localized near the seed at planting must diffuse through the bulk soil during the growing season. The hilling operation transforms soil surface into an undulating field landscape and redistributes the split-applied nitrogen fertilizers between the hill and the inter-row (Zebarth and Milburn, 2003). Crop uptake, organic matter mineralization and nitrate leaching also modify nitrate distribution in the soil profile during the growing season. Therefore, the assessment of nitrate accumulation by soil sampling is limited by the heterogeneity of nitrate distribution in a soil volume due in part to the peculiar cultural practices of the potato production.

Our objective was to compare a single soil sampling for nitrate in the center of the hill (0-0.5 m) to in the sampling of the entire soil volume during the growing season in fields receiving three different split-applied N rates.

3.2.3 Materials and methods

Potato (*Solanum tuberosum* L. cv. 'Goldrush') field studies were conducted in 2004 at St-Ubalde and St-Alban, Quebec, Canada (46°43'57''N, 74°04'04''W), on a Ivry loamy sand (humo-ferric podzol). At St-Ubalde, soil pH (0.01 CaCl₂) varied between 5.1 and 5.4, and C/N (CNS Leco2000) ratios ranged from 14 to 16. At St-Alban, soil pH (0.01 CaCl₂) was 4.7, and the C/N ratio was 21. The potato seed was planted 5 cm below soil surface, 30 cm apart on the row and 90.5 cm between rows. There were 16 rows, 30 m-long, per plot. The common N treatment at planting was 160 kg N ha⁻¹ applied in bands followed by three split-applied N rates (0, 45, and 90 kg N ha⁻¹) as 27.5-0-0. Planting occurred on May 15th, hilling (25 cm high) on June 26th (2 days after split broadcast N application on June 24th), top-kill on September 9th and harvest on September 29th. There were three sampling locations per plot.

Soil nitrate evolution before and after planting was monitored assuming symmetrical distribution of nitrate perpendicularly to row center (Figs. 3.1-3.2). The borehole in the center of the row represented one sixth of the soil volume and was sampled down to 90 cm to assess the seasonal evolution of soil nitrate concentration (Fig. 3.2). The first sampling was performed on May 5th to provide initial conditions. Thereafter, samples were collected weekly until harvest. Nitrate concentration was determined after extracting the soil with 0.01 M CaCl₂ (Dou et al., 1995; Bridgham et al., 1998), and quantified by ion chromatography (Dionex 4000i). Samples were also taken every two weeks in duplicate down to 50 cm at four places near and aside the seed (Figs. 3.1-3.2) using plastic tubes introduced into a metal core drill with a diameter of 22.9 mm. Soil cores were cut in laboratory into nine soil sections as follows: 0-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm, 15-20 cm, 20-25 cm, 25-30 cm, and 30-50 cm.

Soil bulk density was determined in duplicate using a 0.15 L cylinder during spring 2004. Bulk density (ρ) was related to depth (z in cm) as follows:

$$\rho = 0.0054z + 1.222; r^2 = 0.99 \quad (1.1)$$

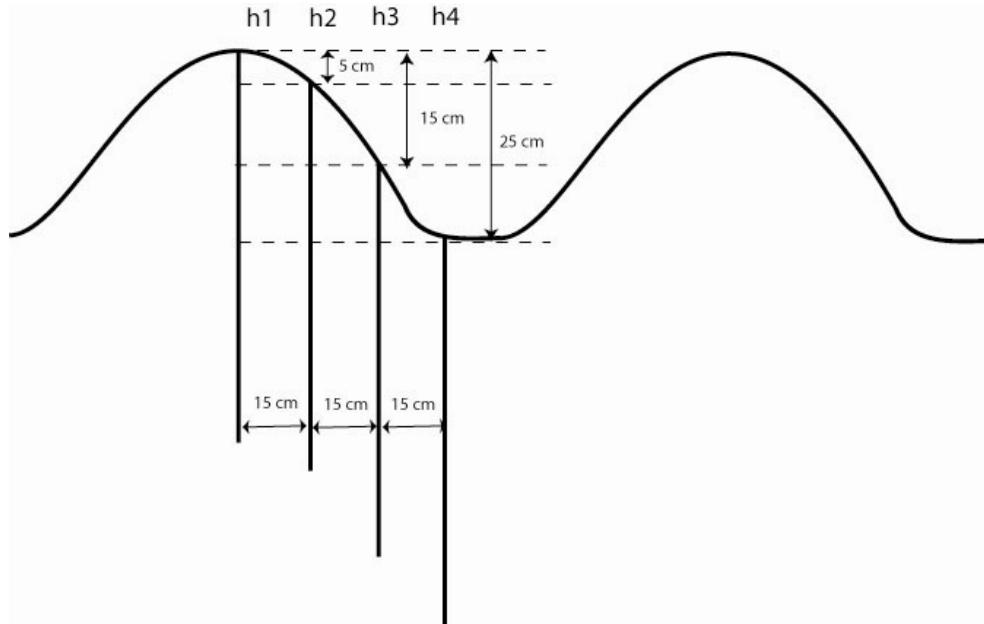


Figure 3.1 Cross section of a potato hill and position of the four boreholes (h).

h1: hole 1 located at center hill; h2: hole 2; h3: hole 3; h4: hole 4 located in the inter-row.

For each sample, nitrate concentration in $\text{mg NO}_3^- \text{-N kg}^{-1}$ was converted into $\text{kg NO}_3^- \text{-N ha}^{-1}$ as follows:

$$(\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}) = C \frac{14}{62} \rho z / 10 \quad (1.2)$$

where C is nitrate concentration in $\text{mg NO}_3^- \text{-N kg}^{-1}$; ρ is soil bulk density in g cm^{-3} ; z is soil depth considered in cm, 14 and 62 are molecular weights of N and NO_3 , respectively; and 10 is a conversion factor.

Nitrate content in each square in Fig. 3.2 was cumulated given that the center and inter-row boreholes accounted for 1/6 of the entire soil volume compared to 1/3 for intermediate samplings. Cumulated nitrate content across the entire 0 to 50 cm soil profile was computed as follows:

$$\frac{14}{62} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{50} C_{ij} \rho_{ij} \alpha_i z_{ij} \quad (1.3)$$

Where i is borehole number, j is thickness of the soil layer in the 0 to 50 cm section where reference zero varied with meso-topography (Fig. 3.2), z_{ij} is the height of soil layer, α_i is the proportion of soil volume occupied by a given soil volume at sampling place (1/6 or 1/3), and ρ_{ij} is a bulk density.

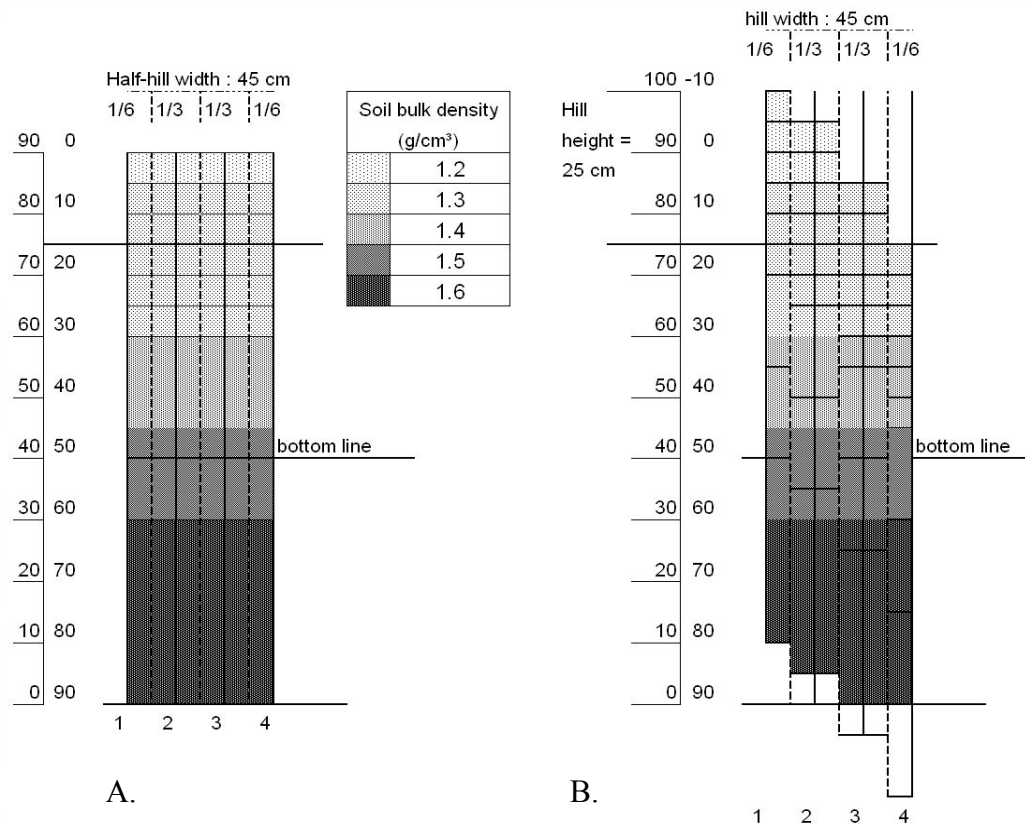


Figure 3.2 Soil sampling procedure (A: before hilling; B: after hilling).

Data were analyzed as repeated measures (Greenhouse-Geisser) of triplicate treatments (three split N rates) arranged in a completely random design. The effects of treatment, time, and their interaction on nitrate accumulation in the soils were tested using SPSS vs. 13.0. Nitrate accumulation in the entire soil was related to that in the center of the hill using soil samples collected after hilling.

3.2.4 Results and discussion

There were significant effects of treatments ($P < 0.05$) and soil layer ($P < 0.01$) on nitrate concentration in the 0-90 cm soil section. Nitrate concentration values were within the range presented by Zebarth et al. (2003) in New Brunswick (Fig. 3.3). In average across treatments and soil layers, nitrate evolution showed three main patterns during the growing season (Fig. 3.3). From May 5th to June 30th, nitrate concentration increased due to fertilization. Between June 30th and August 10th, intensive plant uptake reduced dramatically N concentration in the soil. Between August 10th to September 29th, nitrate concentration increased again as a result of organic matter mineralization. In September, there was a sudden drop in soil nitrate due to heavy rainfall leaving 121.5 mm of total precipitations on September 9th (Fig. 3.4). Consequently, there were large temporal variations in nitrate concentrations in the soil.

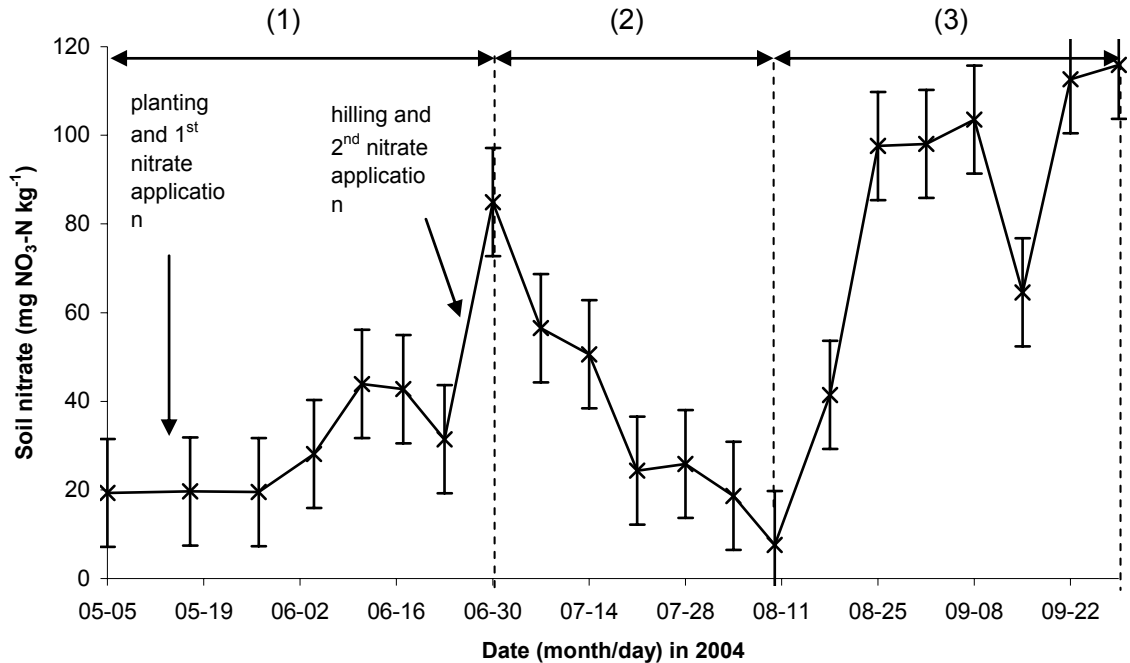


Figure 3.3 Evolution of soil nitrate in the center of the hill (hole 1). The confidence interval ($P = 0.05$) is 2 times the mean standard error.

Nitrate accumulation in the center of the hill across locations (St-Ubalde and St-Alban) was closely related to that in the entire soil volume down to 50 cm (Fig. 3.5). Nitrate accumulation in the entire soil volume was 78% of nitrate accumulation in the center of the hill (0-50 cm). A similar value of 80% was obtained for the 0-30 cm profile (data not shown). A single borehole thus sufficed to approximate nitrate accumulation in the entire soil volume, hence reducing sampling time and costs.

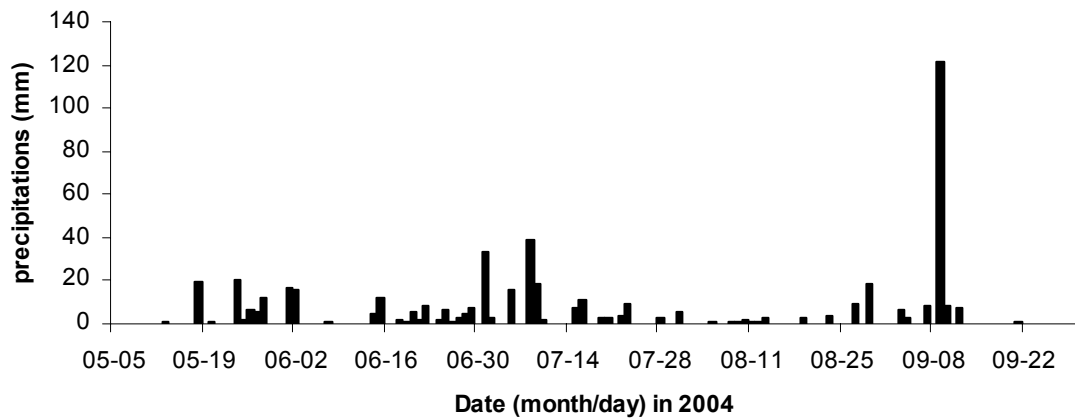


Figure 3.4 Daily precipitations (mm) from May 5th to September 29th

This finding will be useful for the N management of potato fields at minimum sampling cost. The conversion equation using a single boring operation will facilitate the assessment of nitrate accumulation and the calculation a seasonal N budget where the potato received banded N at planting and the remainder of added N as split application before hilling.

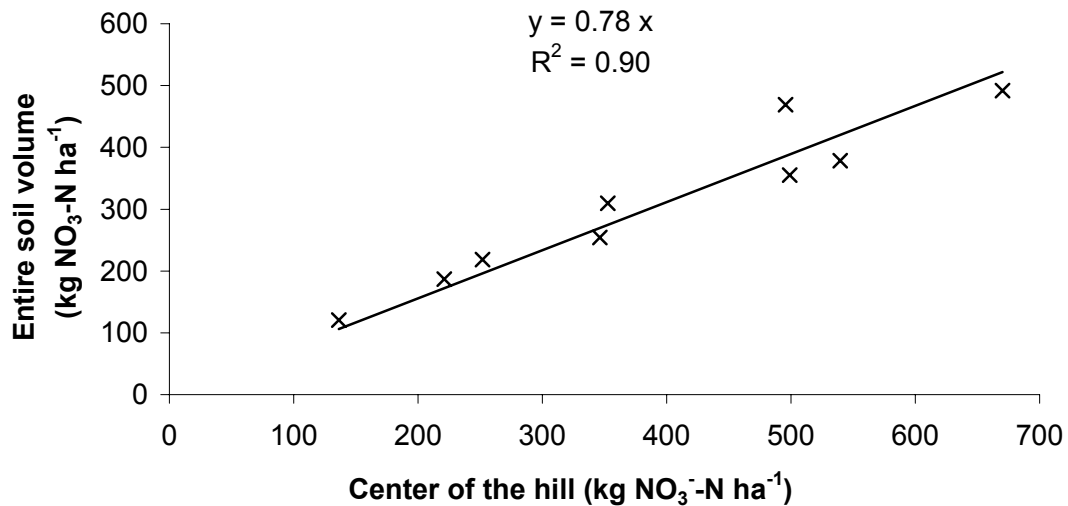


Figure 3.5 Relationship between nitrate concentration in center hill and in the entire soil for the 0-50 cm profile at St-Ubalde and St-Alban, Quebec.

3.2.5 Conclusion

A single borehole down to 30 or 50 cm in the center of the potato hill sufficed to monitor nitrate accumulation in potato soils during the growing season. First, the weight of the control soil volume per ha must be determined for an average value for soil density. Thereafter nitrate concentration in that the control section is multiplied by 0.78 (0-50 cm) or 0.80 (0-30 cm) to approximate N accumulation in kg ha^{-1} of the entire soil volume.

Acknowledgements

This research was supported by Cultures H. Dolbec Inc , Ferme Daniel Bolduc (1980) Inc. and the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (CRDPJ 305166-03).

3.2.6 References

- Bridgham, S. D., Updegraff, K. and Pastor, J., 1998. Carbon, nitrogen, and phosphorus mineralization in northern wetlands. *Ecology* 79 (5), 1545-1561.
- Dou, Z., Fox, R. H. and Toth, J. D., 1995. Seasonal soil nitrate dynamics in corn as affected by tillage and nitrogen-source. *Soil Science Society of America Journal* 59 (3), 858-864.
- Gélinas, P. and Rousseau, N. 2004. Étude sur la qualité de l'eau potable dans sept bassins versants en surplus de fumier et impacts potentiels sur la santé, Environnement Québec, Institut national de santé publique, Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation, Ministère de la santé et des services sociaux.
- Giroux, I. 1995. Contamination de l'eau souterraine par les pesticides et les nitrates dans les régions de culture de pomme de terre campagne d'échantillonnage 1991-1992-1993, Ministère de l'Environnement et de la Faune, Direction des écosystèmes aquatiques.
- Guillard, K., Griffin, G. F., Allinson, D. W., Rafey, M. M., Yamartino, W. R. and Pietrzyk, S. W., 1995. Nitrogen-utilization of selected cropping systems in the US-Northeast.1. Dry-matter yield, N-uptake, apparent N-recovery, and N-Use efficiency. *Agronomy Journal* 87 (2), 193-199.
- Levallois, P., Theriault, M., Rouffignat, J., Tessier, S., Landry, R., Ayotte, P., Girard, M., Gingras, S., Gauvin, D. and Chiasson, C., 1998. Groundwater contamination by nitrates associated with intensive potato culture in Quebec. *Science of The Total Environment* 217 (1-2), 91-101.

- Li, H., Parent, L. E. and Karam, A., 2006. Simulation modeling of soil and plant nitrogen use in a potato cropping system in the humid and cool environment. *Agriculture Ecosystems & Environment* 115 (1-4), 248-260.
- Li, H., Parent, L. E., Karam, A. and Tremblay, C., 2003. Efficiency of soil and fertilizer nitrogen of a sod-potato system in the humid, acid and cool environment. *Plant and Soil* 251 (1), 23-36.
- Mehdi, B. and Madramootoo, C. A., 1999. Soil nitrate distribution under grain and silage corn using three tillage practices on a loamy sand in southwestern Quebec. *Soil & Tillage Research* 51 (1-2), 81-90.
- Milburn, P., MacLeod, J. A. and Sanderson, B., 1997. Control of fall nitrate leaching from early harvested potatoes on Prince Edward Island. *Canadian Agricultural Engineering* 39 (4), 263-271.
- Zebarth, B. J. and Milburn, P. H., 2003. Spatial and temporal distribution of soil inorganic nitrogen concentration in potato hills. *Canadian Journal of Soil Science* 83 (2), 183-195.

Conclusion générale

L'ensemble des travaux présentés dans cette thèse a permis d'apporter des éclairages nouveaux sur le dynamisme de l'eau et de l'azote dans le sol de cultures de pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.).

Notre principal objectif était d'étudier l'évolution des nitrates dans un sol cultivé en pommes de terre à l'aide de suivis saisonniers et du traçage isotopique de l'oxygène 18, du deutérium et de l'azote 15.

Les observations pédologiques et de la teneur en eau du sol ont permis de distinguer deux zones à l'intérieur du sol aux propriétés très différentes : la couche supérieure arable de texture loam sableux enrichie en matière organique et une couche sous-jacente de texture plus sableuse et de faible teneur en matière organique. La teneur en eau était systématiquement plus élevée dans la couche arable. Le temps de parcours des événements de recharge intenses lors de précipitations ou de la fonte des neiges, a été évalué par décompte des isotopes stables de l'eau pendant quatre à huit semaines (chapitre 1). La relative uniformité des observations isotopiques au sein de la couche sous-jacente suggère un temps de parcours plus rapide, favorable au lessivage, bien que ce phénomène n'ait pu être quantifié formellement. En 2005, la différence entre les teneurs en eau des deux couches de sol a été plus marquée en été qu'au printemps ou à l'automne. D'une part, la comparaison des signatures isotopiques en ^{18}O et ^2H des précipitations avec celles de l'eau du sol a montré que l'eau porale de la couche arable n'a pratiquement pas été renouvelée au cours de l'été 2005, compte tenu de la faible intensité des précipitations observées et des importants prélèvements en eau par les pommes de terre. De plus, la pomme de terre semblait consommer préférentiellement les précipitations les plus récentes. En été, l'évaporation était également plus active dans l'ensemble du profil comme l'indiquaient les rapports deutérium/oxygène 18. La couche arable, profonde de 30 à 40 cm est remaniée en cours de saison lors du buttage des plants. À ce moment, la couche arable se retrouve surdéveloppée (60 cm environ) au centre de la butte et amincie dans l'entre-rang. Cela a pour conséquence d'accélérer préférentiellement le lessivage vertical des nitrates dans l'entre-rang par rapport au centre compte-tenu du fait que l'eau percole moins rapidement

dans la couche arable que dans la couche sous-jacente. La différence d'épaisseur de la couche arable entre le centre de la butte et l'entre-rang semble même être un facteur plus important sur la vitesse du lessivage en profondeur que la différence d'élévation en tant que telle créée par la butte d'après les observations effectuées dans cette étude. C'est-à-dire le fait que la couche arable, où la circulation est plus lente, soit plus mince dans l'entre-rang qu'au centre de la butte serait un facteur important contribuant à l'accélération du lessivage vers la profondeur dans l'entre-rang et au maintien d'une teneur en eau élevée au centre de la butte au profit du développement de la pomme de terre. Il serait intéressant d'investiguer plus loin cette hypothèse dans une étude ultérieure. L'analyse des données d' ^{18}O et de ^2H a également permis d'établir un modèle perceptuel sur la percolation des précipitations dans le sol. Ce modèle se divise en deux périodes où le mécanisme de percolation est différent : 1) de la plantation à la récolte et 2) de la récolte à la plantation.

L'analyse des données d'azote 15 (chapitre 2) a révélé que l'engrais restait essentiellement concentré au centre de la butte durant la première moitié du développement de la plante, c'est-à-dire jusqu'au maximum de surface foliaire le 20 juillet 2005. Au même moment, les prélèvements en azote par la plante provenaient essentiellement de l'engrais. La pomme de terre se montre d'ailleurs très efficace à exploiter l'engrais (68% de récupération du fertilisant par la plante). Peu de pertes par lessivage ont été observées jusqu'au maximum de surface foliaire. L'absence de pluies intenses tout au long de l'été 2005 (chapitre 1, figure 1.1 et chapitre 2, figure 2.1) n'a pas favorisé le renouvellement de l'eau porale du sol. Les données climatiques révèlent toutefois que des précipitations intenses peuvent survenir en juin et juillet, ce qui aurait sans doute pour conséquence le lessivage d'une partie de l'engrais. Durant la période de sénescence, l'évolution des teneurs en azote 15, révèle une diffusion importante de l'engrais, tant latéralement que verticalement, ce qui se traduit par une concentration relativement importante en surface de l'entre-rang. La pomme de terre continue d'absorber l'engrais azoté mais ses besoins diminuent progressivement au cours de la saison. La minéralisation fournit alors 38% de l'azote prélevé, soit plus de deux fois la quantité prélevée au cours de la première période. Le lessivage a eu lieu essentiellement après le maximum de surface foliaire à cause de l'occurrence de pluies de forte intensité. Les fortes pluies de l'automne ont d'ailleurs lessivé presque entièrement le

reste de l'azote présent dans le sol d'après les données d'azote 15 du 27 octobre 2005, ce qui confirme les résultats du chapitre 1. Après la fonte des neiges du printemps 2006, il ne restait aucune trace de l'azote 15 injecté un an plus tôt. De multiples difficultés liées à la butte compliquent la réalisation de bilans d'azote 15 à la mi-saison. Un modèle incluant divers paramètres est suggéré en annexe IV afin de prendre en considération l'ensemble de ces difficultés dans l'estimation de la quantité d'azote du sol. Il resterait à calibrer et à valider ce modèle. Ce modèle est une piste qu'il serait profitable d'explorer et d'ajuster par la suite pour estimer les quantités d'azote 15 du sol au cours de la saison en prenant compte du relief de la butte.

Dans une approche simplifiée pour établir rapidement un diagnostic de terrain, le troisième chapitre s'est intéressé à établir une relation entre le N-NO₃ prélevé au centre et celui contenu dans l'ensemble de la butte de pomme de terre afin de simplifier l'échantillonnage du sol tout en préservant une valeur de la teneur en N-NO₃ du sol juste. Deux relations affines robustes de pente 0.8 et 0.78 ont été obtenues entre les teneurs en azote du centre et celles de la butte en entier concernant les trente et cinquante premiers centimètres du sol, respectivement. La thèse a permis de dégager plusieurs idées pour de futures recherches sur le lessivage utilisant l'azote 15, l'oxygène 18 et le deutérium.

Visions pour de futures études

Il conviendrait d'abord d'apporter des améliorations à l'échantillonnage du sol en vue de réaliser des bilans d'azote 15 car ils permettraient de quantifier la contribution de l'engrais au lessivage. Afin de réaliser ces bilans, il faudrait estimer l'augmentation d'azote 15 dans le sol en utilisant un enrichissement de 5% en azote 15 afin d'obtenir un signal plus fort. Par ailleurs, il serait préférable d'appliquer l'engrais enrichi sous la même forme que celle du producteur afin d'uniformiser la diffusion. L'augmentation de la quantité d'azote 15 par rapport aux teneurs initiales du sol ne devrait plus être calculée par différenciation avec les concentrations du printemps mais plutôt avec les concentrations d'un profil témoin n'ayant subi que les pratiques agricoles classiques sans enrichissement.

Concernant la quantification de l'impact du lessivage des nitrates vers la nappe phréatique, des études ultérieures avec l'azote 15, l'oxygène 18 et le deutérium pourraient associer des mesures prélevées au champ à des mesures prélevées dans la nappe phréatique reliée au champ. Toutefois, ce travail devrait s'étendre sur plusieurs années pour deux raisons : soit les transferts à la nappe sont lents et cela peut prendre plusieurs années avant de retrouver le signal dans la nappe, soit la vitesse de transfert à la nappe est très rapide mais le signal ne se distingue pas de celui de la nappe et il est peut s'avérer alors difficile de distinguer une source claire.

Il serait aussi important d'évaluer l'impact sur le rendement et le lessivage de différentes quantités d'engrais azoté chaque année associé aux études isotopiques afin de déterminer une quantité d'azote optimum compte tenu des conditions climatiques locales observées. L'étude concernant l'azote 15 a en effet été faite à partir de quantités (178 kg N ha^{-1}) inférieures aux quantités souvent appliquées par le producteur (250 kg N ha^{-1}). Toutefois, le producteur reste persuadé qu'un excès d'engrais azoté permet de compenser un manque d'eau et d'obtenir un bon rendement, alors que ce ne serait pas possible avec une application azotée plus faible. Il serait important de vérifier cette hypothèse et de notamment quantifier précisément les pertes par lessivage et de les associer aux éventuels gains de rendement pour chacune des différentes applications azotées afin de comparer l'intérêt d'un gain de rendement par rapport aux quantités perdues dans l'environnement et les répercussions néfastes qui en découlent.

Par ailleurs, dans la présente étude, l'application d'azote 15 n'a été faite qu'à la plantation afin de simplifier l'étude alors que le producteur sépare son application en deux temps. Afin d'évaluer l'impact d'une application en deux temps sur la répartition de l'azote dans le sol et le lessivage et le rendement de pomme de terre, il serait intéressant dans une étude ultérieure de poursuivre un mode d'application unique dans une parcelle et de l'associer à un mode d'application proche de celui du producteur en y ajoutant une deuxième application à la volée d'engrais enrichis en azote 15 juste avant le buttage. Dans le cas par exemple d'une application de 160 kg N ha^{-1} à la plantation dans une première parcelle et de $160 + 90 \text{ kg N ha}^{-1}$ à la plantation et au buttage dans une seconde parcelle, cela permettrait de comparer la répartition de l'azote 15 dans la butte occasionnée par la première application d'engrais faite à la plantation à celle occasionnée par la seconde application afin

de vérifier la remarque précédente faite au sujet de la relation produite dans le chapitre 3. Compte tenu de la difficulté à estimer le lessivage, il pourrait aussi être utile d'associer les études d'estimation du lessivage à grandeur de la parcelle avec des données plus locales de lessivage obtenues par des lysimètres ou bien des plaques drainantes.

Une des conclusions de l'étude, révélée par l'analyse des données concernant l'oxygène 18 et le deutérium, affirme que l'eau issue des faibles précipitations de l'été aurait été prélevée préférentiellement par la plante compte tenu du plus faible pF de cette eau dans le sol par rapport à l'eau résiduelle du printemps. Il serait intéressant de vérifier cette hypothèse à partir de mesures en ^{18}O et D de l'eau contenue dans la plante pour vérifier si cette signature coïncide avec celles des pluies de l'été.

L'étude a aussi mis en avant une évolution des prélèvements azotés au cours de la saison à partir de deux sources distinctes : le fertilisant et la minéralisation. En début de saison les prélèvements azotés de la plante proviennent essentiellement du fertilisant. Au cours de la saison les prélèvements azotés issus de l'azote minéralisé augmentent tandis que ceux issus du fertilisant diminuent. Il serait intéressant d'adapter les quantités et le type de fertilisant à cette dernière observation. Par exemple, les granules ne sont peut-être pas le meilleur mode d'application si l'azote qu'elles contiennent n'est pas suffisamment libéré en début de saison au moment où la plante en a le plus besoin et si au contraire elles continuent à libérer beaucoup d'azote à la fin de la saison alors qu'elles en ont moins besoin. Des recherches devraient s'intéresser à trouver de nouveaux modes de fertilisation, qui privilégient un apport direct et disponible d'azote en début de saison jusqu'au maximum de couverture foliaire et un apport indirect via la minéralisation ensuite.

Bibliographie

- Baertschi, P., 1976. Absolute O-18 content of standard mean ocean water. *Earth and Planetary Science Letters* 31 (3), 341-344.
- Barnes, C. J. and Allison, G. B., 1988. Tracing of water-movement in the unsaturated zone using stable isotopes of hydrogen and oxygen. *Journal of Hydrology* 100 (1-3), 143-176.
- Barnes, C. J. and Turner, J. V., 2000. Isotopic exchange in soil water. In: *Isotope tracers in catchment hydrology*. C. Kendall and J. J. McDonnell, 137-163.
- Barraclough, D., Geens, E. L., Davies, G. P. and Maggs, J. M., 1985. Fate of fertilizer nitrogen -3. The use of single and double labeled N-15 ammonium-nitrate to study nitrogen uptake by ryegrass. *Journal of Soil Science* 36 (4), 593-603.
- Bélangier, G., Walsh, J. R., Richards, J. E., Milburn, P. H. and Ziadi, N., 2000. Yield response of two potato cultivars to supplemental irrigation and N fertilization in New Brunswick. *American Journal of Potato Research* 77 (1), 11-21.
- Bélangier, G., Walsh, J. R., Richards, J. E., Milburn, P. H. and Ziadi, N., 2001. Predicting nitrogen fertilizer requirements of potatoes in Atlantic Canada with soil nitrate determinations. *Canadian Journal of Soil Science* 81 (5), 535-544.
- Bélangier, G., Walsh, J. R., Richards, J. E., Milburn, P. H. and Ziadi, N., 2002. Nitrogen fertilization and irrigation affects tuber characteristics of two potato cultivars. *American Journal of Potato Research* 79 (4), 269-279.
- Bergstrom, L. and Kirchmann, H., 2004. Leaching and crop uptake of nitrogen from nitrogen-15-labeled green manures and ammonium nitrate. *Journal of Environmental Quality* 33 (5), 1786-1792.
- Brady, N. C., 1974. *The nature and properties of soils*. New York, Macmillan Publishing Co.
- Bundy, L. G. and Andraski, T. W., 2005. Recovery of fertilizer nitrogen in crop residues and cover crops on an irrigated sandy soil. *Soil Science Society of America Journal* 69 (3), 640-648.
- Chantigny, M. H., Angers, D. A., Morvan, T. and Pomar, C., 2004. Dynamics of pig slurry nitrogen in soil and plant as determined with N-15. *Soil Science Society of America Journal* 68 (2), 637-643.
- Collins, H. P., Delgado, J. A., Alva, A. K. and Follett, R. E., 2007. Use of nitrogen-15 isotopic techniques to estimate nitrogen cycling from a mustard cover crop to potatoes. *Agronomy Journal* 99 (1), 27-35.
- CRAAQ, 2003. *Guide de référence en fertilisation*. 1^{ère} édition. Centre de références en agroalimentaire du Québec. In: Québec, Canada.
- Craig, H., 1961. Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters. *Science* 133 (346), 1833-1834.
- Dansgaard, W., 1964. Stable Isotopes In Precipitation. *Tellus* 16 (4), 436-468.
- Durieux, R. P., Brown, H. J., Stewart, E. J., Zhao, J. Q., Jokela, W. E. and Magdoff, F. R., 1995. Implications of nitrogen management strategies for nitrate leaching potential - roles of nitrogen-source and fertilizer recommendation system. *Agronomy Journal* 87 (5), 884-887.

- Gagnon, B., Lalande, R. and Fahmy, S. H., 2001. Organic matter and aggregation in a degraded potato soil as affected by raw and composted pulp residue. *Biology and Fertility of Soils* 34 (6), 441-447.
- Gardiner, D. T. and Miller, R. W., 2004. *Soils in our environment* 9th ed. S. Helba. NJ, USA 641p.
- Gasser, M. O. 2000. Transformation et transfert de l'azote dans les sols sableux cultivés en pomme de terre (*Solanum Tuberosum* L.). Sainte Foy Qc Canada, Université Laval. Ph.D.
- Gasser, M. O., Laverdiere, M. R., Lagace, R. and Caron, J., 2002. Impact of potato-cereal rotations and slurry applications on nitrate leaching and nitrogen balance in sandy soils. *Canadian Journal of Soil Science* 82 (4), 469-479.
- Groffman, P. M., Altabet, M. A., Bohlke, J. K., Butterbach-Bahl, K., David, M. B., Firestone, M. K., Giblin, A. E., Kana, T. M., Nielsen, L. P. and Voytek, M. A., 2006. Methods for measuring denitrification: Diverse approaches to a difficult problem. *Ecological Applications* 16 (6), 2091-2122.
- Hageman, R., Nief, G. and Roth, E., 1970. Absolute isotopic scale for deuterium analysis of natural waters. Absolute D/H ratio for SMOW. *Tellus* 22, 712-715.
- Hauck, 1994. Practical Considerations in the Use of Nitrogen Tracers in Agricultural and Environmental Research. (pp. 907-950) In: *Methods of soil analysis. Part 2. Microbiological and Biochemical Properties*. Madison, Wis, USA, Soil Science Society of America, 1121p.
- Haverkort, A. J. and MacKerron, D. K. L., 2000. Management of nitrogen and water in potato production.
- Henriksen, T. M. and Breland, T. A., 1999. Decomposition of crop residues in the field: evaluation of a simulation model developed from microcosm studies. *Soil Biology & Biochemistry* 31 (10), 1423-1434.
- Jickells, T., 2005. External inputs as a contributor to eutrophication problems. *Journal Of Sea Research* 54 (1), 58-69.
- Junk, G. and Svec, H. J., 1958. The absolute abundance of the nitrogen isotopes in the atmosphere and compressed gas from various sources. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 14 (3), 234-243.
- Kendall, C., 2000. Tracing nitrogen sources and cycling in catchments. (pp. 519-576) In: *Isotope tracers in catchment hydrology*. C. Kendall and J. J. McDonnell, Elsevier.
- Kengni, L., Vauchaud, G., Thony, J. L., Laty, R., Garino, B., Casabianca, H., Jame, P. and Viscogliosi, R., 1994. Field-measurements of water and nitrogen losses under irrigated maize. *Journal of Hydrology* 162 (1-2), 23-46.
- Knowles, R. and Blackburn, T. H., 1993. *Nitrogen isotope techniques*. R. Knowles and T. H. Blackburn, Academic Press, San Diego, 311p.
- Li, H., Parent, L. E. and Karam, A., 2006. Simulation modeling of soil and plant nitrogen use in a potato cropping system in the humid and cool environment. *Agriculture Ecosystems & Environment* 115 (1-4), 248-260.
- Li, H., Parent, L. E., Karam, A. and Tremblay, C., 2003. Efficiency of soil and fertilizer nitrogen of a sod-potato system in the humid, acid and cool environment. *Plant and Soil* 251 (1), 23-36.
- Liang, B. C. and Mackenzie, A. F., 1994. Changes of soil nitrate-nitrogen and denitrification as affected by nitrogen-fertilizer on 2 Quebec soils. *Journal of Environmental Quality* 23 (3), 521-525.

- McCray, J. E., Kirkland, S. L., Siegrist, R. L. and Thyne, G. D., 2005. Model parameters for simulating fate and transport of on-site wastewater nutrients. *Ground Water* 43 (4), 628-639.
- Milburn, P. and Richards, J. E., 1994. Nitrate concentration of subsurface drainage water from a corn field in southern new-brunswick. *Canadian Agricultural Engineering* 36 (2), 69-78.
- Milburn, P., Richards, J. E., Gartley, C., Pollock, T., Oneill, H. and Bailey, H., 1990. Nitrate leaching from systematically tiled potato fields in New-Brunswick, Canada. *Journal of Environmental Quality* 19 (3), 448-454.
- Morvan, T., Leterme, P., Arsene, G. G. and Mary, B., 1997. Nitrogen transformations after the spreading of pig slurry on bare soil and ryegrass using N-15-labelled ammonium. *European Journal of Agronomy* 7 (1-3), 181-188.
- O.M.S., 1998. Directives OMS de qualité pour l'eau de boisson. Additif au Volume 1: Recommendations et Additif au Volume 2: Critères d'hygiène et documentation d'appui. 2nd édition, 8-10.
- Oenema, O., van Liere, L. and Schoumans, O., 2005. Effects of lowering nitrogen and phosphorus surpluses in agriculture on the quality of groundwater and surface water in the Netherlands. *Journal of Hydrology* 304 (1-4), 289-301.
- Overrein, L. N., 1970. Immobilization and mineralization of tracer nitrogen in forest raw humus. 2. Effect of temperature and incubation time on interchange of urea-N-15, ammonium-N-15, and nitrate-N-15 under waterlogged conditions. *Plant and Soil* 32 (1), 207-&.
- Parton, W. J., 1996. The CENTURY model. In: Evaluation of soil organic matter models using existing long-term datasets. D. S. Powlson, P. Smith and J. U. Smith. Berlin, Germany, Springer-Verlag, 283-293.
- Prescott, C. E., 2005. Decomposition and mineralization of nutrients. In: Ecological Studies. Nutrient Acquisition by plants. An ecological perspective. 181. B. H. Berlin, Germany.
- Prunty, L., Bell, J. S. and Mulvaney, R. L., 2000. Fertilizer N-15 presence in lysimeter drainage water. *Journal of Environmental Engineering-ASCE* 126 (5), 439-445.
- Ritchie, J. T., Griffin, T. S. and Johnson, B. S., 1996. SUBSTOR: A functional model of potato growth, development and yield. (pp.401-435). In: Modelling and parameterization of the soil-plant-atmosphere system. P. Kabat, B. Marshall, B. J. v. d. Broek, J. Vos and H. V. Keulen. Wageningen, the Netherlands.
- Rozanski, K., Araguas-Araguas, L. and Gonfiantini, R., 1993. Isotopic patterns in modern global precipitation. In: Climate change in continental isotopic records. Geophysical Monograph 78. P.K. Swart, K.C. Lohmann, J. McKenzie and S. Savin. Washington, D.C, American Geophysical Union, 1-36.
- Ruckauf, U., Augustin, J., Russow, R. and Merbach, W., 2004. Nitrate removal from drained and reflooded fen soils affected by soil N transformation processes and plant uptake. *Soil Biology & Biochemistry* 36 (1), 77-90.
- Saffigna, P. G., Keeney, D. R. and Tanner, C. B., 1977. Nitrogen, Chloride, And Water-Balance With Irrigated Russet Burbank Potatoes In A Sandy Soil. *Agronomy Journal* 69 (2), 251-257.
- Schindler, D. W., Dillon, P. J. and Schreier, H., 2006. A review of anthropogenic sources of nitrogen and their effects on Canadian aquatic ecosystems. *Biogeochemistry* 79 (1-2), 25-44.

- Smolders, A. J. P., Lamers, L. P. M., Lucassen, E., Van der Velde, G. and Roelofs, J. G. M., 2006. Internal eutrophication: How it works and what to do about it - a review. *Chemistry and Ecology* 22 (2), 93-111.
- Snapp, S. S. and Fortuna, A. M., 2003. Predicting nitrogen availability in irrigated potato systems. *Horttechnology* 13 (4), 598-604.
- Sogbedji, J. M., van Es, H. M., Yang, C. L., Geohring, L. D. and Magdoff, F. R., 2000. Nitrate leaching and nitrogen budget as affected by maize nitrogen rate and soil type. *Journal of Environmental Quality* 29 (6), 1813-1820.
- Stevens, W. B., Hoeft, R. G. and Mulvaney, R. L., 2005. Fate of nitrogen-15 in a long-term nitrogen rate study: I. Interactions with soil nitrogen. *Agronomy Journal* 97 (4), 1037-1045.
- Super, M., Heese, H. D., Mackenzie, D., Dempster, W. S., Duplessis, J. and Ferreira, J. J., 1981. An epidemiological-study of well-water nitrates in a group of South-West-african namibian infants. *Water Research* 15 (11), 1265-1270.
- Tran, T. S. and Giroux, M., 1991. Effects of N rates and harvest dates on the efficiency of N-15-labeled fertilizer on early harvested potatoes (*Solanum-Tuberosum*.L). *Canadian Journal of Soil Science* 71 (4), 519-532.
- Tran, T. S. and Giroux, M., 1998. Fate of N-15-labelled fertilizer applied to corn grown on different soil types. *Canadian Journal of Soil Science* 78 (4), 597-605.
- Tsuji, G. Y., Uehara, G. and Balas, S., 1994. DSSAT: a Decision Support System for Agrotechnology Transfer. Vol. 3. USA, University of Hawaii.
- Wang, H. L., Magesan, G. N. and Bolan, N. S., 2004. An overview of the environmental effects of land application of farm effluents. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 47 (4), 389-403.
- Webb, J., SylvesterBradley, R. and Seeney, F. M., 1997. The effects of site and season on the fate of nitrogen residues from root crops grown on sandy soils. *Journal of Agricultural Science* 128, 445-460.
- Yadav, S. N., 1997. Formulation and estimation of nitrate-nitrogen leaching from corn cultivation. *Journal of Environmental Quality* 26 (3), 808-814.
- Yurtsever, Y. and Gat, J. R., 1981. Atmospheric waters. Stable Isotope Hydrology: Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle. J. R. Gat and R. Gonfiantini, In: *Technical Reports Series* 210, Vienna, 103-142.
- Zebarth, B. J., Tai, G., Tarn, R., de Jong, H. and Milburn, P. H., 2004a. Nitrogen use efficiency characteristics of commercial potato cultivars. *Canadian Journal of Plant Science* 84 (2), 589-598.
- Zebarth, B. J., Leclerc, Y., Moreau, G. and Botha, E., 2004b. Rate and timing of nitrogen fertilization of Russet Burbank potato: Yield and processing quality. *Canadian Journal of Plant Science* 84 (3), 855-863.
- Zebarth, B. J. and Milburn, P. H., 2003. Spatial and temporal distribution of soil inorganic nitrogen concentration in potato hills. *Canadian Journal of Soil Science* 83 (2), 183-195.
- Zimmerman, U. and Ehhalt, D., 1967. Soil-water movement and evapotranspiration: changes in the isotopic composition of the water. (pp. 567-585). In: *Proceedings of the IAEA Symposium on Isotopes in Hydrology*, IAEA, Münnich, K.O.

Annexes

A.I Plan Expérimental des parcelles isotopiques

Les profils de sols ont été prélevés au centre de chacune des petites zones prédéterminées de manière aléatoire (Fig.1) à cinq moments de l'année : le 20 juillet 2005 (profils 1.a et 1.b centre et entre-rang), le 12 septembre 2005 (profils 2.a et 2.b au centre et dans l'entre-rang), le 27 octobre 2005 (profils 3.a et 3.b) et le 5 mai 2006. Les deux profils du 4 mai 2005 révèlent les conditions initiales du sol avant la plantation et l'application de ^{15}N . Ils ont été creusés à proximité de ce site expérimental.

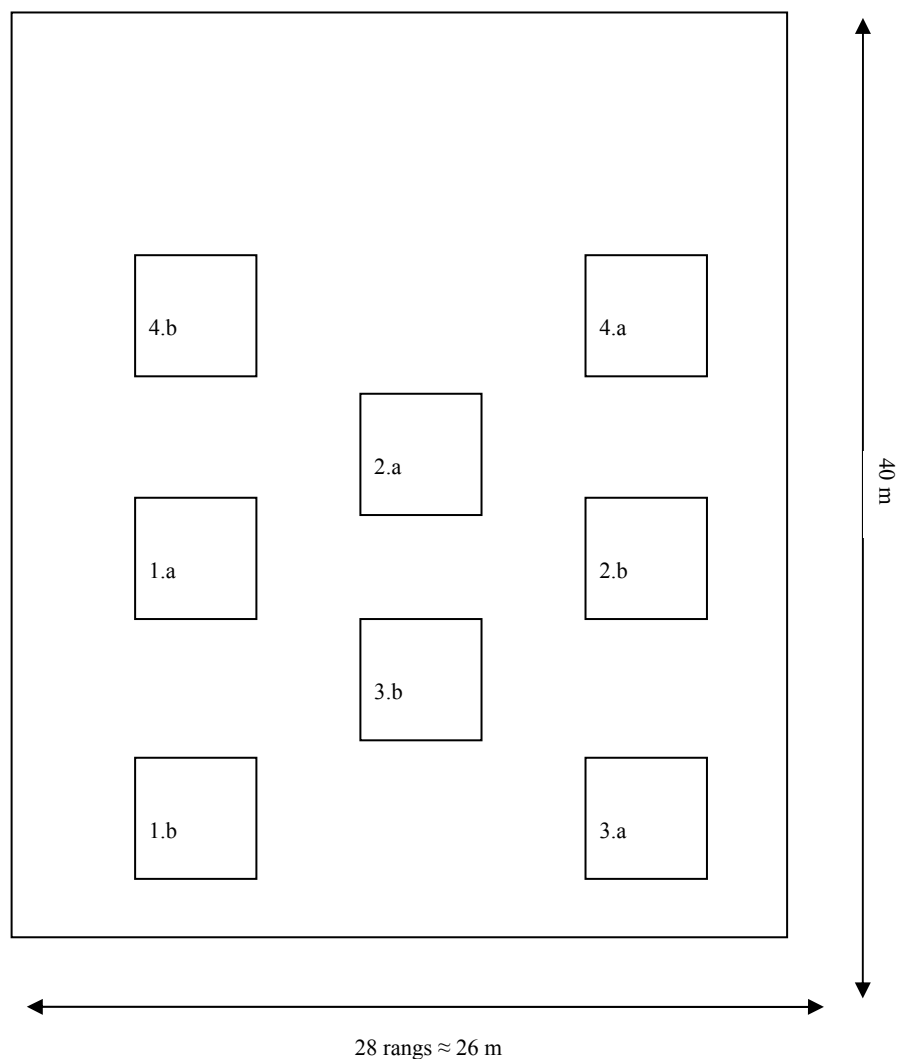
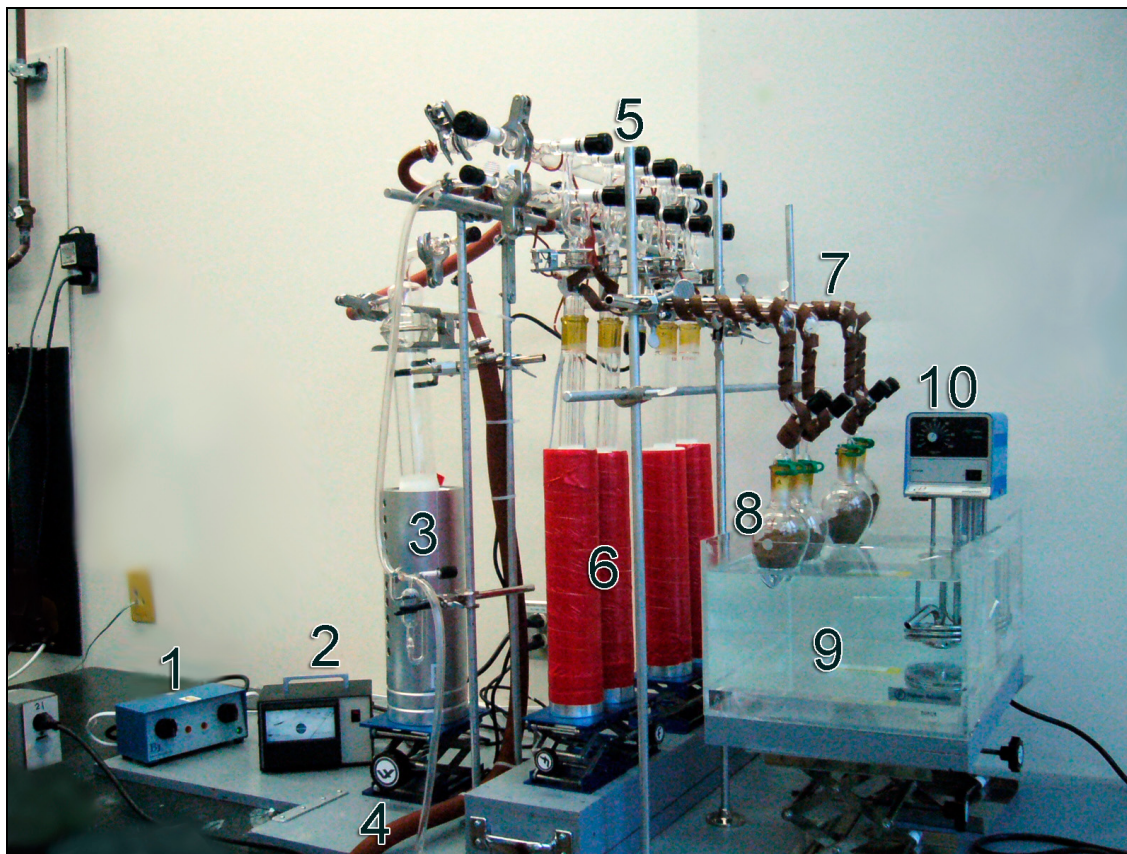


Figure A.I.1 Disposition des zones de prélèvements des sols à l'intérieur du champ.

A.II Descriptif de la ligne de distillation sous vide et protocole expérimental

Avant la mesure des teneurs isotopiques des échantillons d'eau du sol au spectromètre de masse, il a été nécessaire de construire une ligne de cryodistillation sous vide afin d'extraire l'eau du sol tout en évitant une contamination atmosphérique. Ce montage s'est inspiré de celui du laboratoire d'hydrogéologie de l'université Paris XI. Toutefois, sa structure a dû être repensée en fonction des pièces disponibles chez les fournisseurs et il a fallu des ajustements auprès d'un verrier professionnel. Cette ligne permet d'extraire l'eau de quatre échantillons de sol à la fois. La photographie 1 présente l'ensemble du montage.



Photographie 1. Ligne de cryodistillation sous vide

1. Thermostat pour les rubans chauffants, 2. Sonde à vide reliée au montage, 3. Piège à froid pour améliorer le vide, 4. Raccord vers la pompe à vide, 5. Rampe de distribution 5 places, 6. Pièges à froid pour condenser l'eau, 7. Rubans chauffants, 8. Ampoules de sol, 9. Bac d'eau, 10. Moteur chauffant.

Ligne de distillation sous vide :

Description des différentes parties du montage

Les éléments spécifiques au vide :

1. Verrerie appropriée au vide (Kontes).
2. Pompe à vide primaire.
3. Sonde à vide.
4. Graisse à vide Apiezon H pour les jonctions mobiles.
5. Joints toriques pour les jonctions en verre fixes.
6. Vernis Vacseal à appliquer sur les zones soupçonnées de fuite.

Les éléments spécifiques au froid :

1. Piège d'azote liquide pour condenser l'échantillon d'eau distillée en bas du tube et éviter les pertes à d'autres endroits du montage.
2. Piège d'azote liquide positionné entre la pompe primaire et le montage pour améliorer le vide.
3. Bain refroidissant constitué d'un mélange d'acide chlorhydrique et de glace carbonique (« nuggets », Praxair) dans un récipient thermos (Deware) afin de geler le sol avant de faire le vide sur cette partie.

Autres éléments :

1. 4 pièges (tubes en verre) et bouchons en caoutchouc (en dehors du montage).
2. 4 ampoules pour placer les échantillons de sol et bouchons en caoutchouc (pour transport en dehors du montage).
3. Laine de quartz (chimiquement inerte) à positionner entre le reste du montage et l'ampoule de sol à chaque expérience pour éviter que des poussières de sol ne contaminent le montage.
4. 2 rubans chauffants enroulés autour des lignes de distillation pour éviter la condensation des échantillons sur les parois ; ils sont reliés à un régulateur de chaleur (température maintenue à 90°C pendant l'expérience).

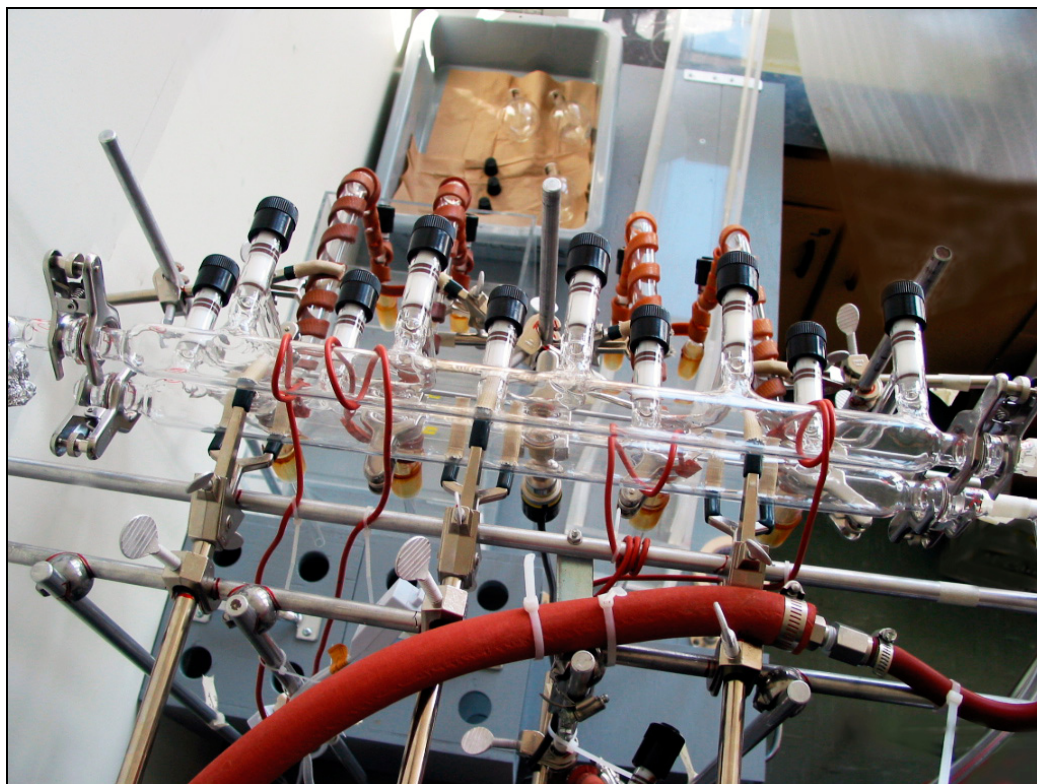
5. Bain d'eau à 60°C (bac et moteur chauffant) pour submerger les ampoules de sol et effectuer la distillation.
6. Azote gazeux introduit à la fin de l'expérience pour protéger une contamination par l'atmosphère de l'échantillon obtenu.
7. Four à 105 °C pour sécher le sol après distillation
8. Divers élévateurs pour chaque piège à froid ainsi que pour le bain chauffant

Les pièces ont été sélectionnées individuellement chez différents fournisseurs :

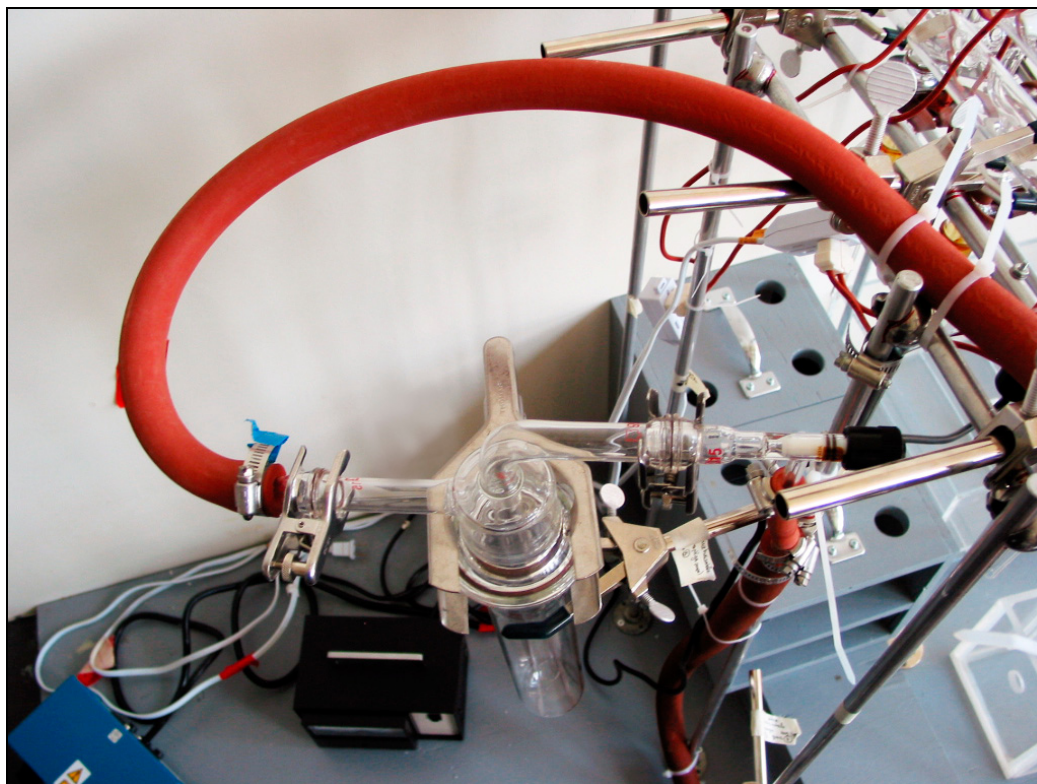
- *Fisher Scientific*.
- *Kontes* pour toute la verrerie (par l'intermédiaire de Fisher).
- *Spi Supplies* pour la graisse à vide « Apiezon H » et le vernis « Vacseal ».
- *Praxair* pour la glace carbonique, l'azote gazeux et liquide.

Des ajustements ont ensuite été faits par François Dion (département de chimie, U. Laval), verrier de laboratoire professionnel, sur chacune des quatre lignes, notamment au niveau des pièges à froid pour pouvoir les relier au manifold et au niveau des ampoules de sol (soudure d'une jonction pour diminuer les fuites et éviter la condensation).

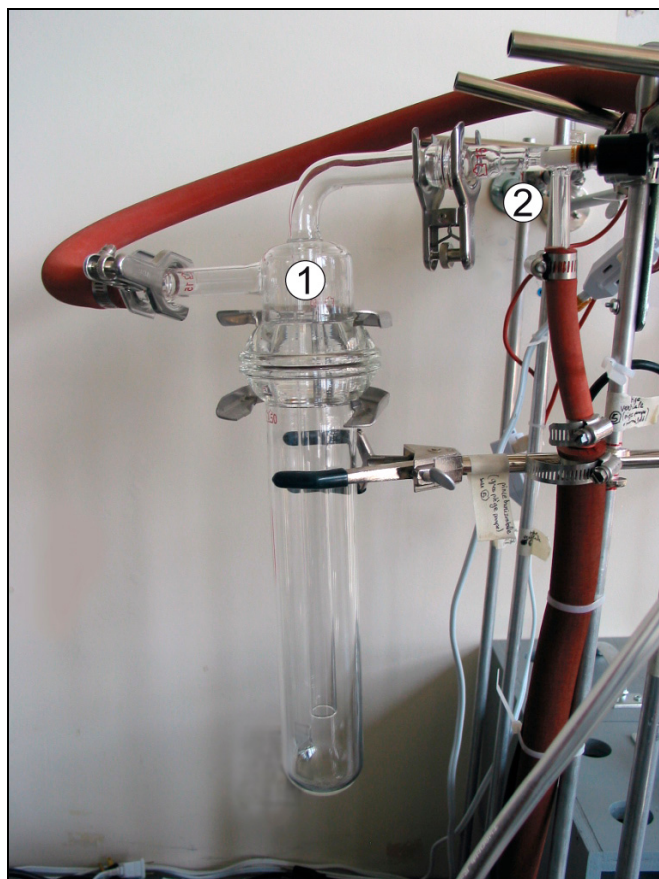
Les photographies suivantes (2 à 10) présentent des détails du montage.



Photographie 2. Rampe de distribution (vue de dessus).



Photographie 3. Raccord en caoutchouc entre le piège à froid relié à la pompe à vide et la rampe de distribution (vue de dessus).



Photographie 4. Détails sur le piège à froid relié à la pompe à vide

1. Piège à froid relié à la rampe de distribution et à la pompe à vide, 2. Robinet relié à la pompe à vide.



Photographie 5. Rubans chauffants (vue de dessus).



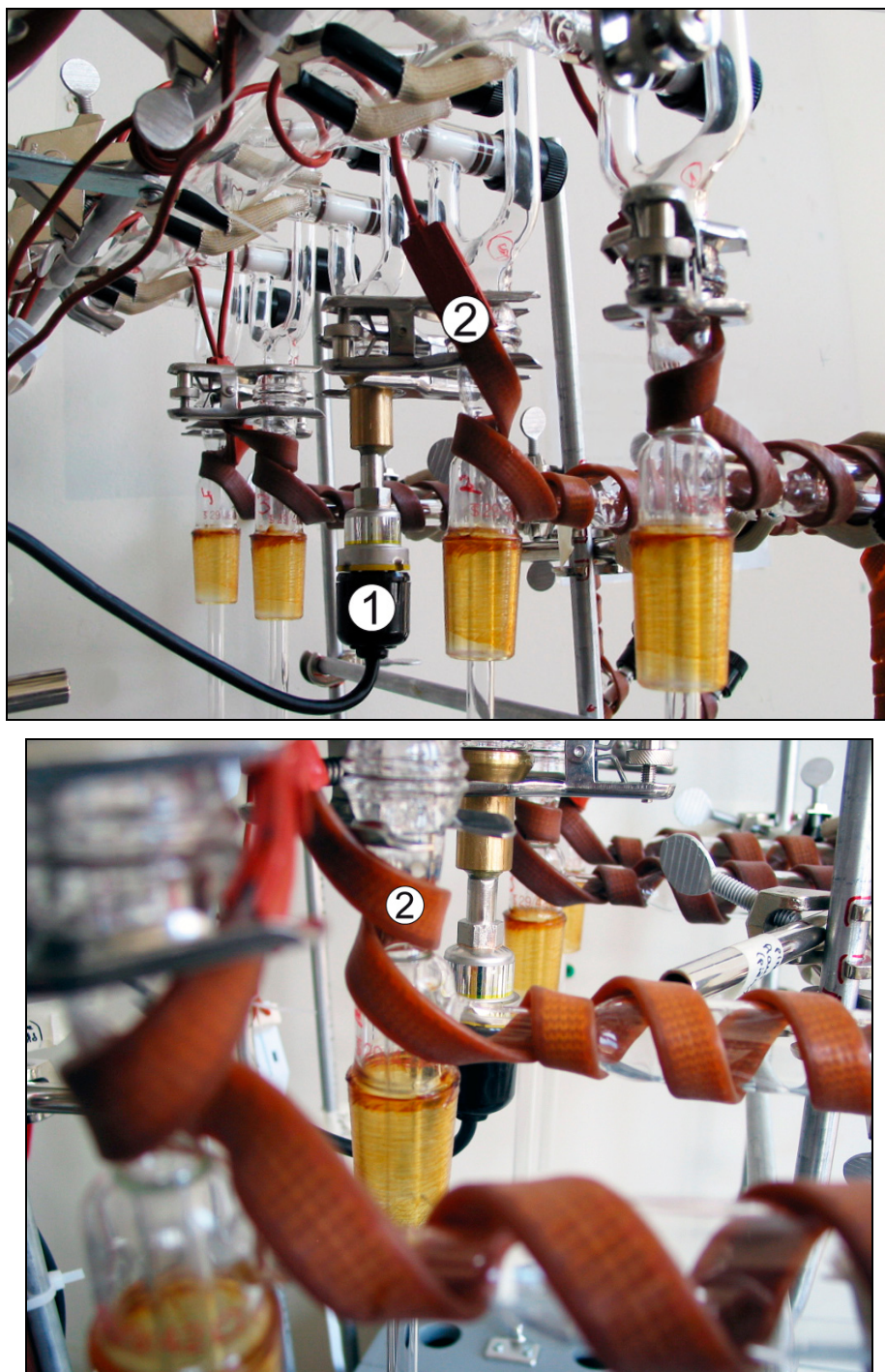
Photographie 6. Détail des extrémités de la rampe de distribution

1. arrivée du gaz d'azote N_2 , 2. arrivée de la pompe à vide.



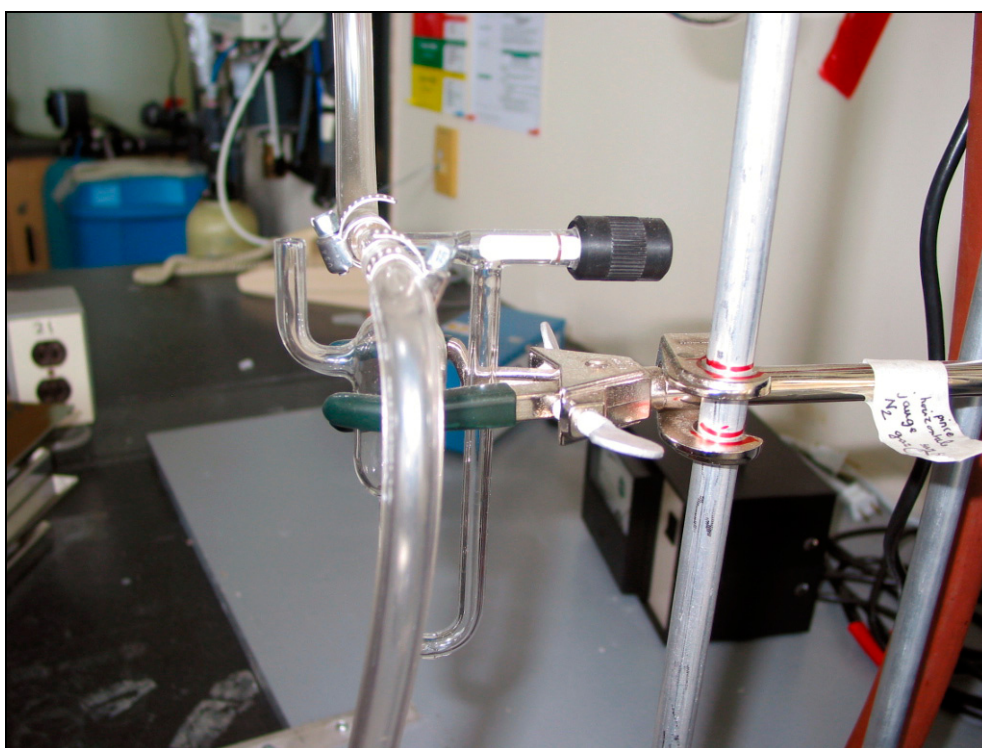
Photographie 7. Détail des extrémités de la rampe de distribution

3. Robinet permettant d'ouvrir le montage sur l'air extérieur pour casser le vide.

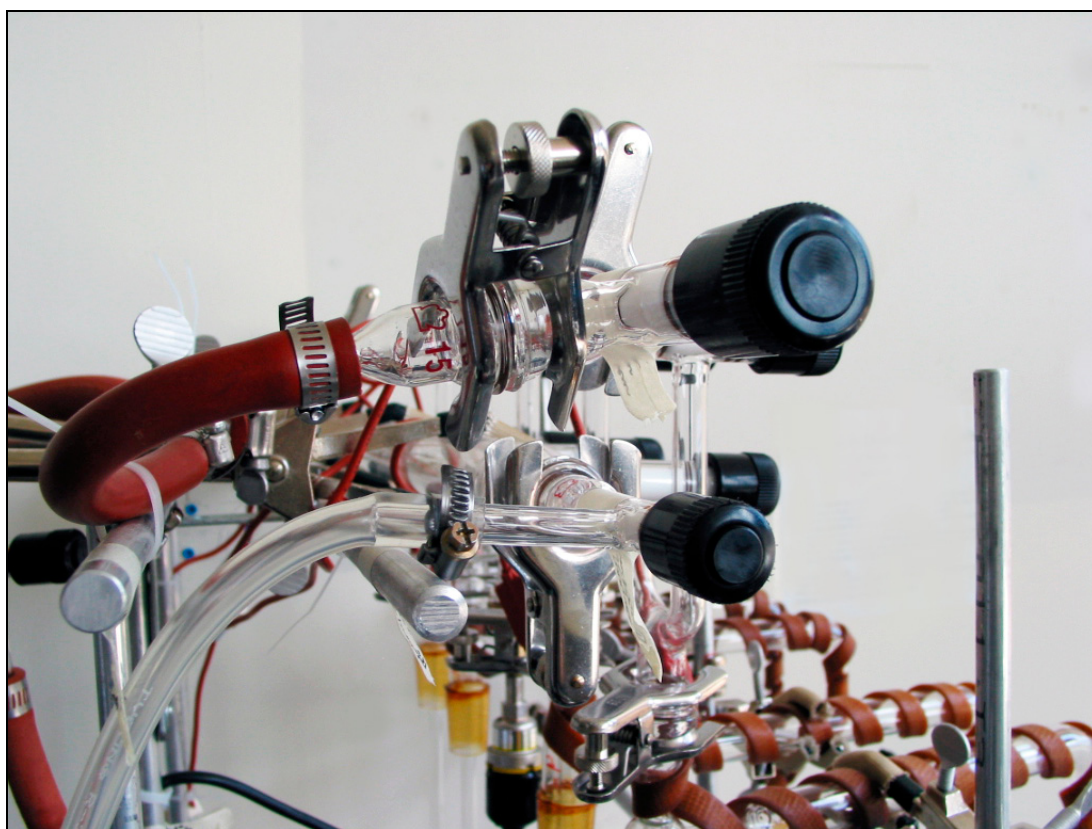


Photographie 8. Détails sur les rubans chauffant et la sonde à vide

1. Raccord de la sonde à vide au montage, 2. Le ruban chauffant remonte sur la partie haute du montage pour éviter que l'eau ne condense dans cette zone.



Photographie 9. Robinet permettant de réguler le flux de gaz N_2 sur le montage et d'éviter la surpression.



Photographie 10. Détail sur l'assemblage des pièces du montage

Les pièces sont reliées entre-elles par des joints toriques et des pinces.

Protocole Expérimental de la cryodistillation sous vide de l'eau du sol

La figure 1 est un schéma du montage qui permet de rendre compte de l'assemblage du montage. L'expérience consiste à faire une cryodistillation sous vide. L'objectif est d'extraire toute l'eau du sol sans contaminer la signature isotopique de l'eau du sol par l'air atmosphérique.

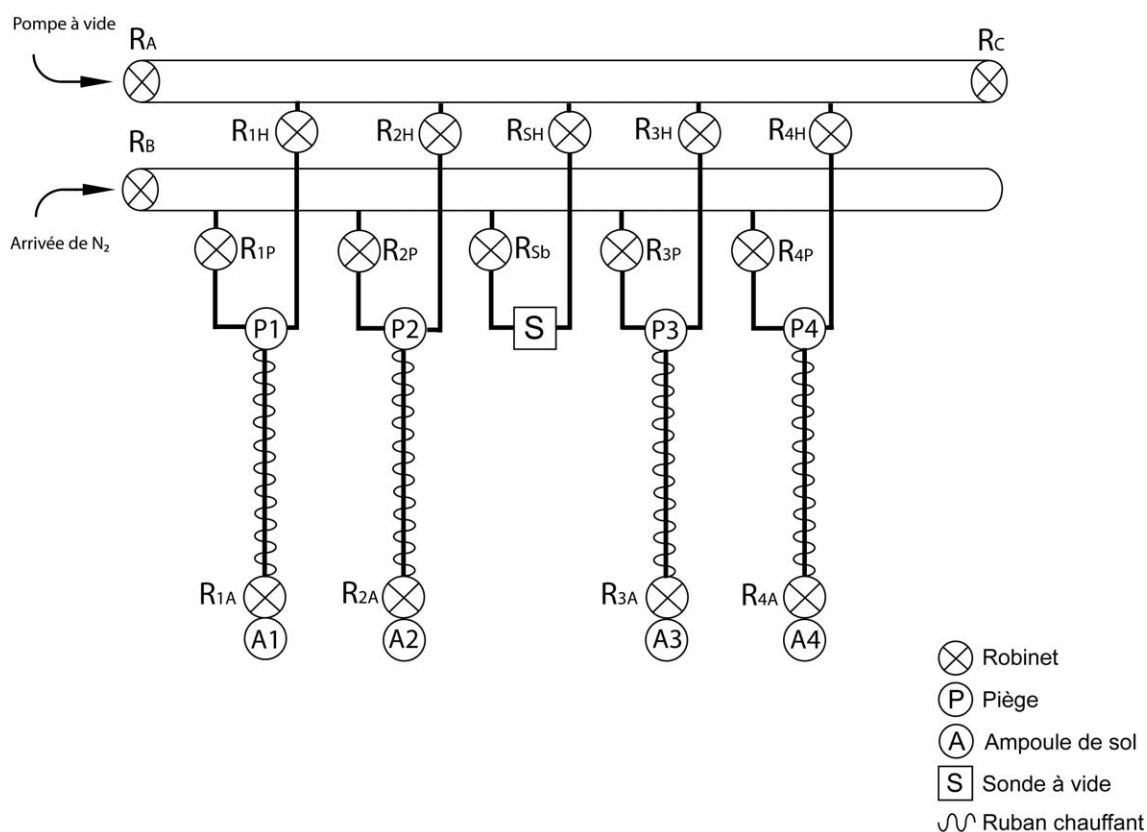


Figure A.II.1 Schéma représentatif de la ligne de distillation sous vide (vue de dessus).

Préparation du vide sur la ligne

Les robinets R_A , R_B , R_C , $R_{(1-4)H}$, $R_{(1-4)P}$ et $R_{(1-4)A}$ sont fermés. La pompe à vide est en marche. La sonde à vide est allumée. On ouvre le robinet R_A afin de faire le vide sur le montage jusqu'aux robinets R_H . Un contenant isotherme d'azote liquide est positionné à mi-hauteur du piège à froid relié à la pompe pour améliorer le vide (3 sur photographie1).

Préparation des pièges à eau et des échantillons de sol

Chaque tube en verre est pesé. Puis, après les avoir graissés, ils sont positionnés au niveau de P1 à P4. A chaque fois, dès que le tube est fixé, il faut avant de le lâcher, ouvrir le robinet R_H correspondant pour faire venir le vide et faire tenir le tube. Les ampoules en verre sont pesées, puis environ 100 g de sol y sont introduits dans chaque. L'ensemble est à nouveau pesé. Chaque ampoule de sol peut ensuite être positionnée sur le montage au niveau d'A1 à A4. Pour cela, un morceau de fibre de quartz est d'abord introduit entre l'ampoule et le reste du montage pour éviter les projections de sol à l'intérieur du montage. Puis de la graisse à vide et une pince en plastique vert sont ajoutés pour fixer chaque ampoule au montage.

Gel des échantillons de sol

Dans deux contenants isothermes, de la glace carbonique en petits morceaux est mélangée à de l'alcool (ou bien de l'acétone) pour obtenir un mélange liquide épais. Chaque contenant isotherme est ensuite positionné sur un élévateur situé en dessous de deux ampoules de sol. Les ampoules de sol sont progressivement gelées 2 par 2 en remontant chacun des contenants isothermes lentement (pendant $\frac{1}{4}$ d'heure environ). De la carboglace est ensuite rajoutée pour recouvrir complètement les échantillons puis on attend $\frac{1}{2}$ heure. Pendant ce temps, de l'eau distillée est rajoutée dans le bac, qui est mis à chauffer jusqu'à 50°C.

Préparation du vide dans les ampoules de sol

Les robinets $R_{(1-4)A}$ vont pouvoir être ouverts doucement pour éviter les projections de poussières. Une fois que la jauge à vide est redescendue au minimum, les robinets $R_{(1-4)A}$ sont refermés. Les robinets $R_{(1-4)H}$ sont refermés et la jauge peut être éteinte car le vide est

satisfaisant. Les pots de glace et le contenant isotherme d'azote liquide pour améliorer le vide peuvent maintenant être descendus et retirés.

Préparation des pièges à froid

Avant que les ampoules de sol ne se réchauffent, un piège à froid est préparé environ un cm sous chaque tube (P1 à P4) grâce à de l'azote liquide dans des contenants isothermes. Il faut ensuite veiller à ce que les contenants soient remplis d'azote liquide jusqu'en haut.

Début de l'extraction de l'eau

Une fois que les pots sont réchauffés et les tubes sont froids, le bac d'eau chaude est glissé sous les pots. Puis il est remonté progressivement à l'aide des deux élévateurs qui le soutiennent. Les robinets $R_{(1-4)A}$ peuvent maintenant être ouverts très doucement. Avant d'immerger les ampoules de sol dans l'eau chaude, il faut s'assurer que la glace a disparue. Le bac d'eau chaude continue d'être remonté jusqu'au niveau des pinces en plastique vert. Pendant ce temps, les rubans chauffants sont allumés à une température d'environ 85-90 °C (thermostat 9) pour éviter toute condensation à l'intérieur des conduits en verre.

Préparation pour la nuit

De l'eau chaude est rajoutée dans le bac chauffant, que l'on couvre. Chacun des quatre petits contenants isothermes sont remplacés par deux gros, remplis à bord d'azote liquide. Ces pots sont ensuite remontés par les élévateurs jusqu'en haut des tubes, puis ils sont couverts pour limiter les pertes d'azote. Ce dispositif peut être laissé jusqu'à 12h.

Le lendemain matin, piège de l'eau en bas du tube

Il faut remettre de l'eau dans le bac pour compenser la perte évaporée et allumer la jauge à vide. Un contenant isotherme d'azote liquide pour améliorer le vide est rajouté entre la pompe et le montage (photographies 1 et 4). Les robinets $R_{(1-4)A}$ sont refermés et le lien chauffant est arrêté pour éviter la vaporisation. Les deux gros contenants isothermes d'azote liquide sont retirés des tubes (P1 à P4), que l'on laisse réchauffer. De l'eau chaude servir à accélérer la fonte de la glace contenue dans les tubes. Pour regeler l'eau à nouveau

au fond du tube, il faut préparer à nouveau les quatre contenants isothermes d'azote liquide en bas de chaque tube.

Dégazage

Une fois que toute l'eau est piégée au fond des tubes, le cordon chauffant peut être remis en marche et les robinets $R_{(1-4)A}$ ouverts. Les robinets $R_{(1-4)H}$ sont ensuite ouverts en procédant 2 à 2. La jauge à vide doit indiquer une pression inférieure à celle de l'atmosphère sinon il y a eu des fuites pendant l'expérience. Il faut attendre que la jauge baisse jusqu'au minimum. Les robinets R_A , $R_{(1-4)A}$ puis $R_{(1-4)H}$ sont refermés. Le bac chauffant et le ruban chauffant sont éteints.

Récupération de l'eau sous atmosphère d'azote

Les pièges d'azote liquide sont maintenus sous les tubes P1 à P4. Il faut ouvrir le robinet R_B pour que l'azote gazeux soit introduit dans le montage. Les robinets $R_{(1-4)P}$ sont ouverts un à un et refermés aussitôt après le bruit indiquant que l'azote s'est introduit. Le robinet R_B est ensuite refermé, tandis que le robinet R_C est ouvert pour casser le vide sur le montage. Les tubes sont récupérés rapidement un à un en ouvrant les robinets $R_{(1-4)H}$, puis les tubes sont rebouchés avec des bouchons en caoutchouc. Il faut attendre que les tubes soient dégelés pour transvaser l'eau dans des contenants remplis à raz bord (2 à 7 ml). Les robinets $R_{(1-4)A}$ sont ouverts doucement pour éviter les projections de sol, puis les ampoules de sol sont retirées du montage. Elles sont ensuite pesées puis mises à l'étuvage à 105°C pendant 24H à la suite de quoi elles seront repesées à nouveau. Les robinets $R_{(1-4)A}$ et $R_{(1-4)H}$ sont ensuite refermés.

Données requises

Pour chaque échantillon :

Ampoules de sol :

A/ « nom de l'échantillon »

Masse de l'ampoule + sol =

Masse ampoule =

Masse après extraction =

Masse après étuvage =

Tubes correspondant :

1/ « nom de l'échantillon »

Masse du tube rempli d'eau (fin d'expérience) =

Masse du tube vide =

A.III Calculs concernant les données d'azote 15 (chapitre 3)

Conversions

N_{tot} [%] \rightarrow N_{tot} [kg ha⁻¹] :

$$N_{\text{tot}} = \frac{N_{\text{tot}} \%}{100} \times \rho \times 1000 \times h \times 10000 \quad (\text{A.III.1})$$

- N_{tot} : Masse totale d'azote par hectare dans le sol [kg N ha⁻¹]
- N_{tot} % : pourcentage massique d'azote dans le sol (données CNS) [mg/kg]
- ρ : masse volumique apparente [kg dm⁻³]
- 1000 = facteur de conversion [kg dm⁻³] \rightarrow [kg m⁻³]
- h : hauteur de sol [m]
- 10000 = facteur de conversion [m²] \rightarrow [ha]

$\%^{15}\text{N}/N_{\text{tot}}$ [%] \rightarrow $^{15}\text{N}_{\text{tot}}$ [kg ha⁻¹] :

$$m_{^{15}\text{N}_{\text{tot}}} = m_{N_{\text{tot}}} \cdot \frac{\%^{15}\text{N}/N_{\text{tot}} \cdot 15}{\%^{15}\text{N}/N_{\text{tot}} + (100 - \%^{15}\text{N}/N_{\text{tot}}) \cdot 14} \quad (\text{A.III.2})$$

- $m_{^{15}\text{N}_{\text{tot}}}$: masse d'azote 15 par hectare [kg ¹⁵N ha⁻¹]
- $m_{N_{\text{tot}}}$: masse totale d'azote par hectare [kg N ha⁻¹]
- $\%^{15}\text{N}/N_{\text{tot}} = \frac{^{15}\text{N}}{^{15}\text{N} + ^{14}\text{N}} \cdot 100$: pourcentage d'azote 15 par rapport à l'azote marqué
(donnée du laboratoire américain)

$^{15}\text{N}_{\text{tot}}$ [kg ha⁻¹] \rightarrow $\%^{15}\text{N}/N_{\text{tot}}$:

$$\%^{15}\text{N} / \text{N}_{\text{tot}} = \frac{1400}{15 \cdot \frac{m_{\text{N}_{\text{tot}}}}{m^{15}\text{N}_{\text{tot}}} - 1} \quad (\text{A.III.3})$$

Étapes de calculs de l'équation 2.2 (chap.2) :

L'équation 2.5 a été présentée au chapitre 2 pour calculer le pourcentage d'azote issu du fertilisant récupéré par la plante. Les détails du calcul sont présentés ci-après.

Calcul de F

$$F = \text{N}_{\text{engrais non marqué}} + \text{N}_{\text{engrais marqué}} \quad (\text{A.III.4})$$

- F : N_{tot} appliqué dans l'engrais [kg ha^{-1}]
- $\text{N}_{\text{engrais non marqué}}$: quantité d'azote non marquée par l'azote 15 [kg ha^{-1}] = 160 kg ha^{-1}
- $\text{N}_{\text{engrais marqué}}$: quantité d'azote marquée NH_4NO_3 par l'azote 15 [kg ha^{-1}]

Une application de 600 g de $\text{N}_{\text{engrais marqué}}$ a eu lieu sur 8 parcelles de $4\text{m} \times 4 \times 0.915\text{m}$ (soit une surface totale de 117.12m^2)

$$\text{N}_{\text{engrais marqué}} = \frac{m_{\text{N}_{\text{tot}}}}{1000 \cdot 117.12} \cdot 10000 = 18.01 \text{ kg ha}^{-1} \quad (\text{A.III.5})$$

- $m_{\text{N}_{\text{tot}}/\text{NO}_3\text{NH}_4}$: masse totale d'azote N dans NH_4NO_3 [g]

$$m_{\text{N}_{\text{tot}}/\text{NO}_3\text{NH}_4} = 2 \cdot \frac{m_{\text{NH}_4\text{NO}_3}}{M_{\text{NH}_4\text{NO}_3}} \cdot M_{\text{N}_{\text{tot}}} \quad (\text{A.III.6})$$

- $M_{\text{N}_{\text{tot}}}$: masse molaire de l'azote total (azote marqué avec 10% de ^{15}N + 90% d'azote normal) [g mol^{-1}]

$$M_{\text{N}_{\text{tot}}} = (0.9 \cdot 14 + 0.1 \cdot 15) = 14.1 \text{ g mol}^{-1} \quad (\text{A.III.7})$$

- $M_{\text{NH}_4\text{NO}_3}$: masse molaire de la molécule NH_4NO_3 [g mol^{-1}]

$$M_{\text{NH}_4\text{NO}_3} = 2 \cdot M_{\text{N}_{\text{tot}}} + 4 + 3 \cdot 16 = 80.2 \text{ g mol}^{-1} \quad (\text{A.III.8})$$

• $m_{\text{NH}_4\text{NO}_3}$: masse de la molécule NH_4NO_3 , $m_{\text{NH}_4\text{NO}_3} = 600\text{g}$

$$m_{\text{N}_{\text{tot}}} = \mathbf{210.97 \text{ g}}$$

Calcul de la masse totale d'azote appliquée par hectare :

$$F = 160 + 18.01 = \mathbf{178.01 \text{ kg ha}^{-1}}$$

Calcul de a

$$a = \frac{n^{15}\text{N}}{n\text{N}_{\text{tot}}} \quad (\text{A.III.9})$$

- a : %¹⁵N/N_{tot} (dans l'engrais) [%]
- n¹⁵N : nombre de moles d'azote ¹⁵N dans l'engrais
- nN_{tot} : nombre de moles d'azote dans l'engrais

$$n\text{N}_{\text{tot}} = n^{15}\text{N} + n^{14}\text{N} \quad (\text{A.III.10})$$

$$n^{15}\text{N} = \frac{m^*_{\text{NH}_4\text{NO}_3}}{S} \cdot \frac{2 \cdot 0.1}{M^*_{\text{NH}_4\text{NO}_3}} \quad (\text{A.III.11})$$

$$n^{14}\text{N} = \frac{m^*_{\text{NH}_4\text{NO}_3}}{S} \cdot \frac{2 \cdot 0.9}{M^*_{\text{NH}_4\text{NO}_3}} + \frac{160 \cdot 2}{80 \cdot 10} \quad (\text{A.III.12})$$

- n¹⁴N : nombre de moles d'azote ¹⁴N dans l'engrais
- S : surface des parcelles où l'engrais enrichi a été appliqué [ha]
- m^{*}_{NH₄NO₃} : masse de l'engrais NH_4NO_3 marqué [kg]

- $M_{\text{NH}_4\text{NO}_3}^*$: masse molaire de NH_4NO_3 marqué [g mol^{-1}]
- $\frac{160 \cdot 2}{80 \cdot 10}$: calcul de l'azote 14 dans l'azote non marqué

Calcul de b

b : % ^{15}N (dans le sol) [%]

Ce facteur résulte d'une double moyenne :

- 1) La moyenne de % ^{15}N du sol par profondeur (2 profils)
- 2) La moyenne des valeurs de 1) sur l'ensemble du profil pondéré par la profondeur pour ne donner qu'une seule valeur par jour d'échantillonnage

Calcul de c

c : % ^{15}N (dans la plante) [%]

Etapas du calcul :

- 1) conversion de N_{tot} en kg ha^{-1} à partir des données du CNS pour chaque partie de la plante (équation 1).
- 2) Conversion de % ^{15}N en kg ha^{-1} pour chaque partie de la plante (équation 2).
- 3) Somme de $^{15}\text{N}_{\text{tot}}$ en kg ha^{-1} pour l'ensemble de la plante à chaque date.
- 4) Conversion de $^{15}\text{N}_{\text{tot}}$ [kg ha^{-1}] → % ^{15}N pour l'ensemble de la plante
- 5) Moyenne de % ^{15}N sur 10 plants (2 sur les 12 prélevés n'ont pas de valeurs CNS pour la tubercule).

Calcul de P

$$P = \frac{\% N_{\text{tot-moy-plant}}}{100} \cdot BS \cdot NBH \quad (\text{A.III.13})$$

- P : azote total contenu dans les plants [kg ha^{-1}]
- % $N_{\text{tot-moy-plant}}$: moyenne sur 10 plants de l'azote total
- BS : biomasse sèche [kg]
- NBH : nombre de plants par hectare

$$NBH = \frac{100 \text{ m}}{E_{\text{plants}}} \times \frac{100 \text{ m}}{E_{\text{rangs}}} \quad (\text{A.III.14})$$

- E_{plants} : Espacement entre les plants sur chaque rang = 0.35m
- E_{rangs} : Espacement entre les rangs = 0.915m

Soit un nombre total d'environ **31226** plants par hectare

A.IV Modèle d'estimation des teneurs en azote 15 du sol après l'opération de buttage

Etapas de calcul :

1. Exprimer les teneurs en azote 15 (^{15}N) en kg N ha^{-1}
2. Séparation entre les données prélevées au centre de la butte et celles prélevées dans l'entre-rang.
3. Appliquer une correction de relief (zone représentative) pour les échantillons prélevés à l'intérieur de la butte, au centre.

Par exemple, pour une butte de 30 cm de hauteur :

$$\begin{aligned} {}^{15}\text{N}_{\text{sol [0-10]}} &= {}^{15}\text{N}_{\text{sol [0-10]mesuré}} * \mathbf{1/6} \\ {}^{15}\text{N}_{\text{sol [10-20]}} &= {}^{15}\text{N}_{\text{sol [10-20]mesuré}} * \mathbf{1/2} \\ {}^{15}\text{N}_{\text{sol [20-30]}} &= {}^{15}\text{N}_{\text{sol [20-30]mesuré}} * \mathbf{5/6} \end{aligned}$$

4. Appliquer une correction γ de diffusion du ^{15}N dans le sol de la butte.
5. Dans le cas d'un échantillonnage double au centre et dans l'entre-rang sous la butte, il convient d'appliquer un coefficient α modérateur de l'influence des teneurs en azote 15 entre le centre de la butte et l'entre-rang pour pouvoir assembler les données de l'entre-rang à celles du centre.

Exemple : Calcul de la somme des quantités d'azote 15 du sol sur les profondeurs de sol [0-40 cm] et [40-80 cm] avec les formules suivantes :

$$\begin{aligned} [0-40 \text{ cm}] : & \sum_0^{30} {}^{15}\text{N}_c + \alpha {}^{15}\text{N}_{c[30-40 \text{ cm}]} + (1-\alpha) {}^{15}\text{N}_{\text{er}[0-10 \text{ cm}]} \\ [40-80 \text{ cm}] : & \alpha \sum_{40}^{80} {}^{15}\text{N}_c + (1-\alpha) \left(\sum_{10}^{40} {}^{15}\text{N}_{\text{er}} + 0.5 {}^{15}\text{N}_{\text{er}[40-60 \text{ cm}]} \right) \end{aligned}$$

${}^{15}\text{N}_c$: quantité d'azote 15 du sol au centre de la butte (kg N ha^{-1})

${}^{15}\text{N}_{\text{er}}$: quantité d'azote 15 du sol dans l'entre-rang (kg N ha^{-1})

Tableau 3.13.2 Exemple d'application du modèle (étapes 1 à 3) avec les données d'azote 15 dans le sol de l'étude

Couche de sol	¹⁵ N dans les sols au centre de la butte				
	04-mai-05	20-juil-05	12-sept-05	27-oct-05	05-mai-06
cm	kg ¹⁵N ha⁻¹				
0-10	5,861	6,396	6,010	5,958	5,865
10-20	7,032	6,483	7,113	7,035	7,030
20-30	7,710	6,364	7,748	7,720	7,719
30-40	5,769	5,783	5,779	5,781	5,778
40-60	3,219	3,224	3,232	3,220	3,211
60-80	0,303	0,312	0,304	0,302	0,301

	04-mai-05	20-juil-05	12-sept-05	27-oct-05	05-mai-06
	kg ¹⁵N ha⁻¹				
0-40	26,37	25,03	26,65	26,49	26,39
40-80	3,52	3,54	3,54	3,52	3,51

	20-juil-05 04-mai-05	12-sept-05 04-mai-05	27-oct-05 04-mai-05	05-mai-06 04-mai-05
	kg ¹⁵N ha⁻¹			
0-40 (t-t ₀)	-1,35	0,28	0,12	0,02
40-80 (t-t ₀)	0,01	0,01	0,00	-0,01

	quantité ¹⁵ N dans les sols dans l'entre-rang			
	20-juil-05	12-sept-05		
	kg ¹⁵N ha⁻¹			
0-10	9,758	10,128		
10-20	11,046	11,052		
20-30	7,104	7,104		
30-40	2,863	2,881		
40-60	0,610	0,609		

	20-juil-05	12-sept-05		
	kg ¹⁵N ha⁻¹			
0-10	9,76	10,13		
10-50	21,32	21,34		

	20-juil-05 04-mai-05	12-sept-05 04-mai-05		
	Différence Δ¹⁵N (kg ¹⁵N ha⁻¹)			
0-10 cm (t-t ₀)	1,75	10,13		
10-50 cm (t-t ₀)	17,80	17,82		

Tableau A.IV.3.3 Estimation des quantités d'azote ^{15}N du sol par assemblage des données issues du centre de la butte avec celles de l'entre-rang (étapes 4 et 5)

Couche de sol cm	^{15}N entre le centre et l'entre-rang				
	04-mai-05	20-juil-05	12-sept-05	27-oct-05	05-mai-06
	kg $^{15}\text{N ha}^{-1}$				
0-40	26,37	25,42	27,52	26,49	26,39
40-80	3,52	5,31	7,10	3,52	3,51

	20-juil-05 04-mai-05	12-sept-05 04-mai-05	27-oct-05 04-mai-05	05-mai-06 04-mai-05
	Différence $\Delta^{15}\text{N}$ (kg $^{15}\text{N ha}^{-1}$)			
0-40 (t-t ₀)	-0,95	1,15	0,12	0,02
40-80 (t-t ₀)	1,79	3,58	0,00	-0,01

Le calcul a été fait à partir du tableau et du protocole précédents et des valeurs suivantes pour les différents paramètres :

$$\alpha = 0.9 \text{ le 20 juillet et } 0.8 \text{ le 12 septembre}$$

$$\gamma = 0.8$$

A. V Données météorologiques mesurées au champ et à la station de Donnacona

Tableau A.V.0.1 Normales mensuelles à la station météorologique de Donnacona (Environnement Canada) concernant les pluies et les précipitations

	Normales mensuelles à Donnacona	
	pluie (mm)	Precipitations (mm)
octobre	97.8	98.7
novembre	70.1	93.7
décembre	27.6	87.4
janvier	19.2	76.2
février	12.2	63.6
mars	36.4	71.8
avril	68.7	79.3
mai	106.5	106.7
juin	108.7	108.7
juillet	123.3	123.3
août	114.8	114.8
septembre	116.9	116.9

Tableau A.V.0.2 Données mensuelles mesurées au Plateau Ste Anne et complétées par des données mesurées à la station météorologique de Donnacona (Environnement Canada) concernant les pluies

	données mensuelles Plateau Ste-Anne et Donnacona Precipitations (mm)
2004-10-15	116.80
2004-11-15	105.00
2004-12-15	81.20
2005-01-15	35.40
2005-02-15	52.60
2005-03-15	61.50
2005-04-15	168.50
2005-05-15	132.50
2005-06-15	136.40
2005-07-15	91.30
2005-08-15	129.70
2005-09-15	256.60
2005-10-15	163.90
2005-11-15	96.00
2005-12-15	102.00
2006-01-15	140.80
2006-02-15	94.20
2006-03-15	50.40
2006-04-15	95.10

A.VI Données isotopiques concernant l'¹⁸O et le ²H mesurées dans la pluie, la neige et le sol

Tableau A.VI.1 Données isotopiques ¹⁸O et ²H, issue de la pluie (St-Ubalde) et du couvert neigeux (Plateau Ste Anne)

	date	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	Précision $\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	Précision $\delta^2\text{H}$ (‰)
pluie	06-oct-04	-10.01		-59.31	
	20-oct-04	-11.08	0.10	-70.88	
	03-nov-04	-9.05	0.03	-52.91	0.1
	17-nov-04	-9.58		-80.31	
	11-avr-05	-10.31		-62.49	1
	25-avr-05	-8.97	0.09	-55.15	
	09-mai-05	-12.91	0.14	-86.38	0.3
	23-mai-05	-9.08	0.14	-58.77	
	06-juin-05	-7.46		-48.79	
	20-juin-05	-6.13	0.01	-39.50	
	04-juil-05	-7.24		-49.53	
	18-juil-05	-7.60		-45.24	
	01-août-05	-9.30		-61.12	
	15-août-05	-6.17		-36.83	
	29-août-05	-10.81		-71.29	
	12-sept-05	-9.60	0.08	-61.74	
	26-sept-05	-7.94	0.06	-50.65	
	10-oct-05	-17.82	0.09	-128.12	
24-oct-05	-17.73		-126.84	0.1	
13-avr-06	-13.02		-86.41		
27-avr-06	-11.61	0.15	-83.83	0.3	
couvert neigeux	16-mars-06	-14.85	0.10	-100.60	
	16-mars-06	-16.18		-110.53	
	16-mars-06	-16.68	0.06	-114.69	
	15-mars-05	-19.66		-143.17	0.2
	15-mars-05	-17.23	0.03	-124.08	0.2

Tableau A.VI.2 Données isotopiques ^{18}O et ^2H dans l'eau du sol et teneurs en eau du sol (θ)
(Plateau Ste Anne)

	profondeur (cm)	teneur en oxygène 18 (‰)	précision oxygène 18 (‰)	teneur en deutérium (‰)	précision deutérium (‰)	teneur en eau mesurée θ (% cm^3/cm^3)
04-mai-05	0-5	-12.81		-98.13		29
	5-10	-12.74		-96.64		30
	10-15	-11.92		-87.34	0.03	31
	15-20	-11.21	0.03	-82.07	0.08	31
	20-25	-12.98		-97.86		30
	25-30	-13.02		-100.83		31
	30-40	-13.58		-95.49		30
	40-60	-12.76		-99.27	0.14	14
	60-80	-13.04	0.01	-94.89		15
interne 20-juil-05	0-5	-9.17	0.03	-81.71		25
	5-10	-9.31		-83.34		26
	10-15	-9.42	0.11	-80.13		25
	15-20	-9.57		-75.58		26
	20-25	-9.04		-74.79	0.04	26
	25-30	-8.85		-73.07		25
	30-40	-10.00	0.01	-76.73		29
	40-60	-8.84		-76.36	0.22	8
	60-80	-7.46		-60.67	0.15	3
externe 20-juil-05	0-5	-9.45		-78.96	0.73	24
	5-10	-9.49		-79.35		27
	10-15	-8.76	0.03	-74.17		26
	15-20	-9.16		-82.93		26
	20-25	-10.23		-77.84		26
	25-30	-10.41	0.04	-76.32		21
	30-40	-6.85		-72.38		3
	40-60	-6.54		-66.88		2
	60-80	-9.63		-76.32		5
interne 12-sept-05	0-5	-7.55		-74.78		14
	5-10	-9.37		-74.84		21
	10-15	-9.27		-73.97		24
	15-20	-9.01		-75.06		26
	20-25	-9.25	0.02	-71.57	1.31	27
	25-30	-8.99	0.05	-74.29		28
	30-40	-9.20		-73.07		27
	40-60	-9.86		-76.52		24
	60-80	-9.87		-69.84		5
externe 12-sept-05	0-5	-8.38	0.04	-73.01		23
	5-10	-11.10		-77.78		26

	10-15	-11.46		-79.02		25
	15-20	-11.31		-78.27		25
	20-25	-10.98	0.03	-77.12	1.15	25
	25-30	-9.63	0.01	-79.15		15
	30-40	-8.89		-67.39		4
	40-60	-9.43		-72.10	0.12	5
	60-80	-9.28		-67.59		5
interne 27-oct-05	0-5	-19.56		-151.36		29
	5-10	-16.85		-130.15		29
	10-15 y	-13.55	0.02	-108.80	0.48	28
	15-20 y	-10.32	0.10	-73.98		28
	20-25 y	-8.80		-56.25		36
	25-30 y	-7.70	0.03	-55.62		36
	30-40	-7.69	0.01	-57.40		16
	40-60	-7.98	0.05	-60.74		15
	60-80	-7.57	0.08	-56.43		10
externe 27-oct-05	0-5	-20.14		-159.30		28
	5-10	-17.03	0.05	-124.01		29
	10-15	-13.92		-98.36		29
	15-20	-10.35		-73.75		30
	20-25	-10.66		-53.87		38
	25-30	-7.88		-61.40		23
	30-40	-7.62		-60.47		15
	40-60	-8.04		-59.13		13
	60-80	-8.35		-57.45		13
interne 05-mai-06	0-5	-7.40	0.01	-59.84		29
	5-10	-10.52	0.01	-81.76		28
	10-15	-12.49		-98.80		30
	15-20	-13.81	0.03	-100.87		30
	20-25	-15.34		-108.91		30
	25-30	-15.38	0.04	-116.36	0.02	31
	30-40 y	-15.27		-115.15		31
	40-60	-14.79		-95.46		23
	60-80	-13.87		-83.35		19

A.VII Données isotopiques concernant le ^{15}N mesurées dans le sol et la plante concernant le ^{15}N

Tableau A.VII.1 Données isotopiques ^{15}N dans le sol et teneurs en eau du sol (θ) (Plateau Ste Anne)

Prof. (cm)	Date	masse sol échant. (g)	masse cup étain vide (g)	masse cup+sol (g)	masse sol (g)	masse N_{tot} (10^{-6} g)	^{15}N (% $^{15}\text{N}/\text{N}_{\text{tot}}$)	N_{tot} (%kg/kg)
0-10	04-mai-05	0.0282	0.0177	0.0452	0.0275	42.2	0.3680	0.1535
10-20	04-mai-05	0.0294	0.0180	0.0467	0.0287	42.6	0.3682	0.1483
20-30	04-mai-05	0.0394	0.0171	0.0567	0.0396	23.4	0.3684	0.0591
30-40	04-mai-05	0.0447	0.0174	0.0614	0.0440	6.1	0.3678	0.0138
40-60	04-mai-05	0.0471	0.0175	0.0634	0.0459	1.1	0.3710	0.0025
60-80	04-mai-05	0.0481	0.0178	0.0657	0.0479	1.2	0.3729	0.0025
0-10	04-mai-05	0.0298	0.0175	0.0485	0.0310	51.5	0.3680	0.1661
10-20	04-mai-05	0.0297	0.0180	0.0483	0.0303	49.3	0.3682	0.1628
20-30	04-mai-05	0.0299	0.0177	0.0468	0.0291	43.2	0.3679	0.1484
30-40	04-mai-05	0.0350	0.0174	0.0534	0.0360	41.1	0.3685	0.1143
40-60	04-mai-05	0.0465	0.0174	0.0644	0.0470	1.8	0.3673	0.0038
60-80	04-mai-05	0.0497	0.0176	0.0673	0.0497	1.6	0.3698	0.0032
0-10	20-juil-05	0.0337	0.0180	0.0526	0.0346	42.0	0.3905	0.1212
10-20	20-juil-05	0.0272	0.0176	0.0459	0.0283	48.4	0.4305	0.1711
20-30	20-juil-05	0.0276	0.0173	0.0446	0.0273	45.2	0.3821	0.1655
30-40	20-juil-05	0.0473	0.0180	0.0652	0.0472	4.1	0.3682	0.0086
40-60	20-juil-05	0.0479	0.0179	0.0654	0.0475	3.6	0.3694	0.0076
60-80	20-juil-05	0.0502	0.0171	0.0663	0.0492	0.8	0.3775	0.0016
0-10	20-juil-05	0.0288	0.0176	0.0452	0.0276	45.5	0.3724	0.1650
10-20	20-juil-05	0.0288	0.0179	0.0460	0.0281	51.9	0.3690	0.1848
20-30	20-juil-05	0.0302	0.0176	0.0476	0.0300	53.5	0.3689	0.1784
30-40	20-juil-05	0.0401	0.0173	0.0569	0.0396	22.4	0.3685	0.0565
40-60	20-juil-05	0.0481	0.0178	0.0658	0.0480	0.9	0.3809	0.0019
60-80	20-juil-05	0.0474	0.0173	0.0660	0.0487	0.4	0.3758	0.0009
0-10	20-juil-05	0.0259	0.0176	0.0441	0.0265	50.2	0.4127	0.1896
10-20	20-juil-05	0.0251	0.0177	0.0452	0.0275	52.0	0.4181	0.1891
20-30	20-juil-05	0.0255	0.0177	0.0433	0.0256	49.4	0.3775	0.1930
30-40	20-juil-05	0.0268	0.0176	0.0441	0.0265	68.2	0.3698	0.2572
40-60	20-juil-05	0.0342	0.0173	0.0517	0.0344	48.0	0.3700	0.1395
60-80	20-juil-05	0.0503	0.0172	0.0678	0.0506	0.3	0.3865	0.0006

0-10	20-juil-05	0.0266	0.0176	0.0443	0.0267	61.7	0.3702	0.2311
10-20	20-juil-05	0.0258	0.0177	0.0440	0.0263	70.5	0.3687	0.2681
20-30	20-juil-05	0.0364	0.0172	0.0516	0.0344	29.8	0.3684	0.0866
30-40	20-juil-05	0.0359	0.0174	0.0532	0.0358	42.9	0.3686	0.1200
40-60	20-juil-05	0.0477	0.0179	0.0644	0.0465	7.3	0.3682	0.0158
60-80	20-juil-05	0.0500	0.0315	0.0820	0.0505	4.3	0.3673	0.0086
0-10	12-sept-05	0.0279	0.0176	0.0458	0.0282	55.4	0.3781	0.1965
10-20	12-sept-05	0.0283	0.0175	0.0457	0.0282	48.1	0.3716	0.1704
20-30	12-sept-05	0.0287	0.0178	0.0469	0.0291	43.8	0.3703	0.1504
30-40	12-sept-05	0.0294	0.0175	0.0472	0.0297	51.1	0.3688	0.1721
40-60	12-sept-05	0.0415	0.0175	0.0596	0.0421	19.0	0.3693	0.0451
60-80	12-sept-05	0.0505	0.0178	0.0692	0.0514	1.6	0.3699	0.0032
0-10	12-sept-05	0.0282	0.0178	0.0448	0.0270	43.4	0.3732	0.1608
10-20	12-sept-05	0.0290	0.0177	0.0467	0.0290	52.0	0.3690	0.1793
20-30	12-sept-05	0.0377	0.0175	0.0540	0.0365	29.9	0.3682	0.0819
30-40	12-sept-05	0.0499	0.0311	0.0801	0.0490	0.9	0.3726	0.0019
40-60	12-sept-05	0.0494	0.0309	0.0802	0.0493	1.1	0.3729	0.0022
60-80	12-sept-05	0.0511	0.0311	0.0827	0.0516	0.4	0.3827	0.0007
0-10	12-sept-05	0.0264	0.0169	0.0460	0.0291	67.6	0.3765	0.2322
10-20	12-sept-05	0.0255	0.0178	0.0435	0.0257	57.7	0.3732	0.2245
20-30	12-sept-05	0.0241	0.0174	0.0413	0.0239	52.3	0.3696	0.2190
30-40	12-sept-05	0.0322	0.0176	0.0490	0.0314	40.7	0.3687	0.1297
40-60	12-sept-05	0.0392	0.0174	0.0570	0.0396	1.2	0.3719	0.0031
60-80	12-sept-05	0.0514	0.0314	0.0832	0.0518	0.8	0.3761	0.0015
0-10	12-sept-05	0.0253	0.0176	0.0441	0.0265	57.2	0.3975	0.2159
10-20	12-sept-05	0.0263	0.0177	0.0448	0.0271	61.1	0.3690	0.2255
20-30	12-sept-05	0.0295	0.0175	0.0477	0.0302	57.6	0.3691	0.1909
30-40	12-sept-05	0.0452	0.0306	0.0766	0.0460	15.2	0.3691	0.0331
40-60	12-sept-05	0.0499	0.0304	0.0840	0.0536	0.8	0.3742	0.0014
60-80	12-sept-05	0.0511	0.0308	0.0817	0.0509	0.7	0.3842	0.0015
0-10	27-oct-05	0.0298	0.0173	0.0483	0.031	48.6	0.3680	0.1567
10-20	27-oct-05	0.0298	0.0175	0.0490	0.032	50.6	0.3680	0.1608
20-30	27-oct-05	0.0328	0.0177	0.0502	0.033	37.5	0.3686	0.1153
30-40	27-oct-05	0.0424	0.0174	0.0593	0.042	11.9	0.3674	0.0285
40-60	27-oct-05	0.0453	0.0314	0.0759	0.045	7.0	0.3670	0.0157
60-80	27-oct-05	0.0482	0.0312	0.0791	0.048	2.2	0.3662	0.0047
0-10	27-oct-05	0.0267	0.0179	0.0467	0.029	66.4	0.3801	0.2305
10-20	27-oct-05	0.0265	0.0176	0.0453	0.028	61.7	0.3686	0.2227
20-30	27-oct-05	0.0274	0.0175	0.0459	0.028	60.5	0.3687	0.2131
30-40	27-oct-05	0.0409	0.0176	0.0593	0.042	25.1	0.3705	0.0603
40-60	27-oct-05	0.0453	0.0321	0.0782	0.046	9.2	0.3716	0.0200

60-80	27-oct-05	0.0517	0.0314	0.0837	0.052	0.5	0.3740	0.0009
0-10	05-mai-06	0.0296	0.0181	0.0492	0.031	55.1	0.3684	0.1770
10-20	05-mai-06	0.0286	0.0176	0.0457	0.028	46.7	0.3681	0.1660
20-30	05-mai-06	0.0293	0.0173	0.0475	0.030	54.1	0.3688	0.1792
30-40	05-mai-06	0.0313	0.0176	0.0483	0.031	39.0	0.3688	0.1269
40-60	05-mai-06	0.0454	0.0306	0.0745	0.044	9.9	0.3684	0.0226
60-80	05-mai-06	0.0468	0.0314	0.0805	0.049	2.4	0.3662	0.0048
0-10	05-mai-06	0.0299	0.0172	0.0486	0.031	51.4	0.3680	0.1637
10-20	05-mai-06	0.0324	0.0172	0.0498	0.033	42.1	0.3680	0.1292
20-30	05-mai-06	0.0326	0.0178	0.0512	0.033	46.6	0.3684	0.1395
30-40	05-mai-06	0.0294	0.0173	0.0482	0.031	47.9	0.3686	0.1550
40-60	05-mai-06	0.0463	0.0314	0.0782	0.047	12.2	0.3681	0.0261
60-80	05-mai-06	0.0494	0.0312	0.0821	0.051	1.3	0.3709	0.0025

Tableau A.VII.2 Données isotopiques ^{15}N dans la plante et masse de l'échantillon (Plateau Ste Anne)

Code	Date	masse échant. (g)	masse cup étain vide (g)	masse cup+sol (g)	masse sol (g)	masse N_{tot} (10^{-6} g)	^{15}N ($\%^{15}\text{N}/N_{\text{tot}}$)	N_{tot} ($\% \text{kg}/\text{kg}$)
Feuille	20-juil-05	0.0015	0.0174	0.0204	0.003	224.8	1.1317	7.4944
tige	20-juil-05	0.0021	0.0170	0.0209	0.004	187.3	1.1577	4.8020
racines	20-juil-05	0.0045	0.0175	0.0243	0.007	168.6	1.5202	2.4794
tubercules	20-juil-05	0.0048	0.0174	0.0224	0.005	110.6	1.3705	2.2120
Feuille	20-juil-05	0.0016	0.0173	0.0229	0.0056	398.5	1.0127	7.1162
tige	20-juil-05	0.0021	0.0176	0.0230	0.0054	289.6	0.9408	5.3638
racines	20-juil-05	0.0039	0.0175	0.0237	0.0062	171.5	0.9981	2.7663
tubercules	20-juil-05	0.0047	0.0170	0.0247	0.0077	151.5	1.2031	1.9669
Feuille	20-juil-05	0.0015	0.0173	0.0228	0.0055	408.7	1.1802	7.4308
tige	20-juil-05	0.0019	0.0173	0.0257	0.0084	483.9	1.1828	5.7607
racines	20-juil-05	0.0042	0.0174	0.0222	0.0048	121.9	1.3190	2.5388
tubercules	-	-	-	-	-	-	-	-
Feuille	20-juil-05	0.0016	0.0178	0.0247	0.0069	497.9	1.3652	7.2164
tige	20-juil-05	0.0022	0.0176	0.0222	0.0046	206.7	1.3332	4.4929
racines	20-juil-05	0.0048	0.0176	0.0229	0.0053	114.7	1.6993	2.1649
tubercules	20-juil-05	0.0051	0.0174	0.0249	0.0075	159.5	1.4667	2.1269
Feuille	20-juil-05	0.0015	0.0174	0.0224	0.005	362.3	1.2107	7.2464
tige	20-juil-05	0.0020	0.0177	0.0235	0.0058	318.5	1.2538	5.4915
racines	20-juil-05	0.0036	0.0177	0.0234	0.0057	173.4	1.3476	3.0417
tubercules	-	-	-	-	-	-	-	-
Feuille	20-juil-05	0.0016	0.0178	0.0212	0.0034	242.9	0.9824	7.1427
tige	20-juil-05	0.0021	0.0174	0.0217	0.0043	220.4	0.9624	5.1246
racines	20-juil-05	0.0045	0.0174	0.0239	0.0065	148.8	1.2023	2.2893
tubercules	20-juil-05	0.0051	0.0174	0.0246	0.0072	158.3	1.1789	2.1986
Feuille	20-juil-05	0.0016	0.0172	0.0204	0.0032	205.8	0.9574	6.4318
tige	20-juil-05	0.0022	0.0177	0.0203	0.0026	138.1	1.0291	5.3127
racines	20-juil-05	0.0044	0.0178	0.0228	0.005	126.8	1.4361	2.5361
tubercules	20-juil-05	0.0049	0.0178	0.0240	0.0062	140.9	1.1811	2.2725
Feuille	20-juil-05	0.0016	0.0175	0.0204	0.0029	194.9	0.9605	6.7208
tige	20-juil-05	0.0021	0.0171	0.0206	0.0035	171.4	0.9553	4.8977
racines	20-juil-05	0.0044	0.0174	0.0222	0.0048	114.5	1.2865	2.3849

tubercules	20-juil-05	0.0053	0.0173	0.0241	0.0068	136.2	1.1554	2.0029
Feuille	20-juil-05	0.0017	0.0174	0.0205	0.0031	200.8	1.8333	6.4766
tige	20-juil-05	0.0021	0.0178	0.0205	0.0027	133.3	1.7800	4.9356
racines	20-juil-05	0.0041	0.0171	0.2160	0.1989	122.1	1.8581	0.0614
tubercules	20-juil-05	0.0041	0.0172	0.0212	0.004	101.6	1.9279	2.5390
Feuille	20-juil-05	0.0017	0.0178	0.0211	0.0033	207.8	1.0542	6.2975
tige	20-juil-05	0.0027	0.0171	0.0204	0.0033	115.7	1.0898	3.5045
racines	20-juil-05	0.0046	0.0169	0.0223	0.0054	124.3	1.5292	2.3025
tubercules	20-juil-05	0.0055	0.0178	0.0234	0.0056	106.4	1.2279	1.9000
Feuille	20-juil-05	0.0016	0.0172	0.0206	0.0034	228.9	1.0794	6.7337
tige	20-juil-05	0.0025	0.0173	0.0212	0.0039	159.0	1.1292	4.0771
racines	20-juil-05	0.0054	0.0178	0.0233	0.0055	118.4	1.3670	2.1520
tubercules	20-juil-05	0.0052	0.0175	0.0239	0.0064	133.9	1.1569	2.0922
Feuille	20-juil-05	0.0016	0.0172	0.0201	0.0029	193.7	1.2697	6.6785
tige	20-juil-05	0.0021	0.0174	0.0207	0.0033	165.6	1.3699	5.0176
racines	20-juil-05	0.0046	0.0172	0.0223	0.0051	123.1	1.5726	2.4145
tubercules	20-juil-05	0.0051	0.0175	0.0235	0.006	113.6	1.2151	1.8929
tubercules	12-sept-05	0.0055	0.0173	0.0235	0.0062	131.5	0.7936	2.1211
tubercules	12-sept-05	0.0052	0.0169	0.0229	0.006	121.9	0.9967	2.0324
tubercules	12-sept-05	0.0054	0.0177	0.0248	0.0071	140.5	0.8864	1.9785
tubercules	12-sept-05	0.0044	0.0176	0.0228	0.0052	124.9	0.9986	2.4026
tubercules	12-sept-05	0.0047	0.0174	0.0236	0.0062	142.3	0.9302	2.2947
tubercules	12-sept-05	0.0060	0.0172	0.0240	0.0068	114.2	0.7818	1.6790
tubercules	12-sept-05	0.0045	0.0176	0.0226	0.005	116.6	1.0777	2.3313
tubercules	12-sept-05	0.0048	0.0178	0.0233	0.0055	117.8	1.2689	2.1411
tubercules	12-sept-05	0.0045	0.0170	0.0224	0.0054	127.9	1.0373	2.3689
tubercules	12-sept-05	0.0047	0.0175	0.0218	0.0043	93.3	0.9023	2.1686
tubercules	12-sept-05	0.0055	0.0177	0.0230	0.0053	101.0	1.0046	1.9061
tubercules	12-sept-05	0.0043	0.0175	0.0225	0.005	132.1	0.9901	2.6421
tiges+feuill	13-juil-05	0.0040	0.0174	0.0210	0.0036	230.7	0.3673	6.4094
tiges+feuill	20-juil-05	0.0040	0.0176	0.0210	0.0034	189.5	0.3688	5.5733
tiges+feuill	20-juil-05	0.0040	0.0173	0.0211	0.0038	238.5	0.3675	6.2766
tiges+feuill	13-juil-05	0.0040	0.0174	0.0214	0.004	255.8	0.3669	6.3961
racines	13-juil-05	0.0050	0.0172	0.0220	0.0048	160.2	0.3674	3.3375
racines	20-juil-05	0.0050	0.0177	0.0217	0.004	108.8	0.3681	2.7198
tubercule	20-juil-05	0.0060	0.0175	0.0222	0.0047	103.4	0.3675	2.2003
tubercule	13-juil-05	0.0060	0.0171	0.0220	0.0049	130.3	0.3671	2.6595