Université du Québec
INRS-Eau

# Évaluation des concentrations en nitrates du sol sous deux travaux de sol et culture de maïs

Par
Catherine Pomares

Mémoire présenté
pour l'obtention
du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)
en Sciences de l'eau

Jury d'évaluation

| | |
|---|---|
| Examinateur externe | Marc R. Laverdière<br>Département des sols et du génie de l'agroalimentaire<br>Université Laval |
| Examinateur interne | Pierre Lafrance<br>Université du Québec<br>INRS-Eau |
| Directeur de recherche | Olivier Banton<br>Université du Québec<br>INRS-Eau |

© droits réservés de Catherine Pomares, 2001

# Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier sincèrement mon directeur de recherche, M. Olivier Banton, pour le partage de ses connaissances, ses commentaires pertinents, son aide et son soutien qui m'ont permis de mener à bien ce travail. Je tiens aussi à exprimer une gratitude toute particulière à Mme Marie Larocque pour ses conseils judicieux et l'aide qu'elle a su m'apporter lors de la réalisation de cette recherche.

Ma reconnaissance va également au personnel de l'INRS-Eau et plus particulièrement au personnel de laboratoire pour leur sympathie et leur disponibilité. Ces remerciements s'adressent aussi aux membres de la Station expérimentale de Saint-Augustin-de-Desmaures.

Enfin, je voudrais exprimer ma plus profonde reconnaissance à ma famille et mes amis pour leur soutien et encouragements tout au long de mes études.

# Résumé

Le projet de maîtrise avait pour but de vérifier l'impact du travail primaire du sol sur la percolation des nitrates et sur l'évolution des paramètres physiques du sol au moyen de mesures de terrain et de la modélisation. Pour ce faire, un site sous culture de maïs a été soumis pendant trois saisons de croissance à deux modes de travail de sol: le labour et le semis direct. Des échantillons d'eau et de sol ont été prélevés puis analysés au laboratoire par électrode spécifique aux nitrates. Pour chaque année d'expérimentation, un échantillonnage de sol non remanié a été réalisé afin de mesurer les paramètres physiques du sol. Malgré l'absence d'une différenciation distincte entre les deux traitements, cette étude a montré que les quantités en nitrates sont plus importantes en labour aux premières profondeurs mais que leur migration hors du profil du sol se fait plus lentement qu'en semis direct. Ce résultat est associé à la minéralisation accrue des débris organiques en présence de travail du sol et à la conservation de l'état structural en son absence. De plus, l'analyse de l'évolution des nitrates en profondeur montre que les concentrations en nitrates dans l'eau sont plus élevées que la norme établie par santé Canada pour les deux modes de travail de sol. Même si une conductivité hydraulique supérieure est observée en semis direct, les trois années d'expérimentation n'ont pas été suffisantes pour montrer une différence significative du travail de sol sur les paramètres physiques du sol. Apparemment, l'absence d'écarts notables entre les deux traitements serait principalement provoquée par la grande variabilité des moyennes observées et par la stabilité structurale de la parcelle étudiée favorisée par son abandon durant de nombreuses années. Néanmoins, malgré l'impossibilité de simuler l'impact des deux modes de travail de sol, le modèle AgriFlux a permis de bien représenter la dynamique de l'azote rencontrée en moyenne sur le site expérimental.

# Table des matières

Remerciements ..... iii
Résumé ..... v
Table des matières ..... vii
Liste des tableaux ..... ix
Liste des figures ..... xi

1. INTRODUCTION ..... 1
1.1 Problématique ..... 1
1.2 Revue sommaire des travaux antérieurs ..... 3
1.2.1 Effet du travail du sol sur les concentrations en nitrates dans l'eau interstitielle et sur les contenus en nitrates du sol ..... 4
1.2.2 Effet du travail du sol sur la porosité et sur la conductivité hydraulique du sol 5
1.2.3 Modélisation ..... 7
1.3 Objectifs et approche méthodologique ..... 8

2. CONCEPTS THÉORIQUES ..... 11
2.1 Nutrition minérale ..... 11
2.1.1 Cycle de l'azote ..... 12
2.1.1.1 Azote atmosphérique ..... 13
2.1.1.2 Azote organique ..... 13
2.1.1.3 Azote minéral ..... 14
2.2 Cycle et état de l'eau dans le sol ..... 17
2.2.1 Cycle de l'eau ..... 17
2.2.2 L'eau du sol ..... 19
2.3 Le travail du sol ..... 21
2.3.1 Travail conventionnel ..... 21
2.3.2 Travail réduit ..... 22
2.3.3 Influence du travail réduit sur le cycle de l'azote ..... 23
2.4 Paramètres étudiés ..... 24
2.4.1 Nitrates dans l'eau interstitielle ..... 25
2.4.2 Nitrates dans le profil du sol ..... 25
2.4.3 Caractéristiques du sol ..... 25

3. MATÉRIEL ET MÉTHODE ..... 29
3.1 Description du site expérimental ..... 29
3.1.1 Localisation ..... 29
3.1.2 Pédologie ..... 30
3.1.3 Dispositif expérimental ..... 30
3.1.4 Pratiques culturales ..... 31
3.2 Échantillonnage ..... 33
3.2.1 Eau interstitielle ..... 33
3.2.2 Sol remanié ..... 35
3.2.3 Sol non remanié ..... 36
3.3 Analyses en laboratoire ..... 36
3.3.1 Teneur en nitrates de l'eau interstitielle ..... 36
3.3.2 Teneur en nitrates du sol ..... 37
3.3.3 Caractérisation des paramètres physiques ..... 37

3.4 Modélisation ..... 41
3.4.1 Le modèle AgriFlux ..... 41
3.4.2 Paramètres pour l'application du modèle AgriFlux ..... 43
3.5 Analyse statistique ..... 44

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION ..... 47
4.1 Concentrations en nitrates dans l'eau interstitielle ..... 47
4.1.1 Comparaison par traitement ..... 49
4.1.2 Comparaison par profondeur ..... 53
4.1.3 Comparaison par année ..... 55
4.2 Contenus en nitrates du sol ..... 55
4.2.1 Comparaison par traitement ..... 57
4.2.2 Comparaison par profondeur ..... 61
4.2.3 Comparaison par date ..... 63
4.3 Évolution des paramètres physiques ..... 63
4.3.1 Matière organique ..... 65
4.3.2 Porosité de drainage ..... 68
4.3.3 Capacité au champ ..... 72
4.3.4 Conductivité hydraulique ..... 76
4.4 Comparaison des concentrations et contenus en nitrates mesurés et simulés .... 80
4.4.1 Concentrations en nitrates dans l'eau interstitielle ..... 80
4.4.2 Contenus en nitrates du sol ..... 85

5. CONCLUSION ..... 89

BIBLIOGRAPHIE ..... 93

ANNEXES ..... 99
Annexe A
Concentrations en nitrates dans l'eau interstitielle ..... 101
Annexe B
Contenus en nitrates du sol ..... 113
Annexe C
Paramètres physiques ..... 117
Annexe D
Résultats statistiques ..... 125
Annexe E
Paramètres du modèle AgriFlux ..... 131

# Liste des tableaux

Tableau 1 : Fraction granulométrique du sol du site étudié..... 30
Tableau 2 : Calendrier des pratiques culturales..... 32
Tableau 3 : Moyennes mesurées pour les paramètres physiques du sol..... 64

# Liste des figures


Figure 1 : Cycle de l'azote (Ratel, 1992) ..... 12
Figure 2 : Cycle de l'eau (Laroche, 1996) ..... 18
Figure 3 : État de l'eau dans le sol (Thériault, 1995) ..... 20
Figure 4 : Localisation de la parcelle expérimentale (Trépanier, 1992) ..... 29
Figure 5 : Schéma de la parcelle expérimentale avec localisation des stations de bougies à quatre profondeurs ..... 31
Figure 6 : Description d'une bougie poreuse (Ballif et Muller, 1990) ..... 34
Figure 7 : Dispositif pour évaluer la conductivité hydraulique ..... 38
Figure 8 : Schéma descriptif de l'infiltromètre à charge constante de Côté ..... 39
Figure 9 : Cycle de l'eau utilisé dans HydriFlux (Larocque et Banton, 1995) ..... 42
Figure 10 : Cycle de l'azote utilisé dans NitriFlux (Larocque et Banton, 1995) ..... 43
Figure 11 : Comparaison des concentrations en nitrates dans l'eau interstitielle des deux modes de travail de sol a) à 30 cm et b) à 55 cm ..... 48
Figure 12 : Comparaison des concentrations en nitrates dans l'eau interstitielle des deux modes de travail de sol a) à 80 cm et à b) à 105 cm ..... 50
Figure 13 : Concentrations en nitrates dans l'eau interstitielle aux quatre profondeurs mesurées a) pour le labour et b) pour le semis direct ..... 52
Figure 14 : Évolution des concentrations en nitrates dans l'eau interstitielle pour les trois saisons de croissance ..... 54
Figure 15 : Comparaison des contenus en nitrates du sol des deux modes de travail de sol a) à 25 cm et b) à 50 cm ..... 56
Figure 16 : Comparaison des contenus en nitrates du sol des deux modes de travail de sol a) à 75 cm e b) à 100 cm ..... 58
Figure 17 : Contenus en nitrates du sol aux quatre profondeurs mesurées a) pour le labour et b) pour le semis direct ..... 60
Figure 18 : Évolution des contenus en nitrates du sol pour les trois saisons de croissance ..... 62
Figure 19 : Comparaison des pourcentages en matière organique des deux modes de travail de sol a) en surface, b) à 30 cm et c) à 70 cm ..... 66
Figure 20 : Comparaison des pourcentages en matière organique a) par profondeur et b) par année ..... 67
Figure 21 : Comparaison des porosités de drainage des deux modes de travail de sol a) en surface, b) à 30 cm et c) à 70 cm ..... 70
Figure 22 : Comparaison des porosités de drainage a) par profondeur et b) par année 71
Figure 23 : Comparaison des capacités au champ des deux modes de travail de sol a) en surface, b) à 30 cm et c) à 70 cm ..... 74
Figure 24 : Comparaison des capacités au champ a) par profondeur et b) par année. 75
Figure 25 : Comparaison des conductivités hydrauliques des deux modes de travail de sol a) en surface, b) à 30 cm et c) à 70 cm ..... 78
Figure 26 : Comparaison des conductivités hydrauliques a) par profondeur et b) par année ..... 79
Figure 27 : Comparaison des concentrations en nitrates mesurées et simulées a) à 30 cm et b) à 55 cm ..... 82
Figure 28 : Comparaison des concentrations en nitrates mesurées et simulées a) à 80 cm et b) à 105 cm ..... 83

Figure 29: Régression linéaire entre les concentrations en nitrates simulées et les concentrations en nitrates mesurées pour a) la totalité des mesures et b) sans les valeurs extrêmes ..... 84
Figure 30: Comparaison des contenus en nitrates mesurés et simulés a) à 30 cm, b) à 55 cm, c) à 80 cm et d) à 105 cm ..... 86
Figure 31: Régression linéaire entre les contenus en nitrates simulés et les contenus en nitrates mesurés pour a) la totalité des mesures et b) sans les valeurs extrêmes ..... 87

# 1. INTRODUCTION

## 1.1 Problématique

Depuis les années cinquante, grâce à l'amélioration génétique, la mécanisation et l'augmentation des intrants industriels, des progrès spectaculaires ont été réalisés dans le domaine de la production agricole végétale. L'agriculture québécoise, traditionnellement fondée sur l'industrie laitière et la rotation des cultures, a également connu un virage important. Au cours des années, les productions se sont transformées pour devenir intensives et hautement spécialisées. Les superficies utilisées en fourrages ont ainsi fait place progressivement aux grandes cultures qui se révélaient nettement plus rentables (Chagnon, 1996). Bien que cette transformation a permis de couvrir, voire de dépasser les besoins alimentaires, cette poussée du secteur agricole s'est répercutée durement sur l'environnement. Outre l'intensification et la spécialisation des productions animales et végétales, plusieurs activités agricoles telles que la monoculture, l'usage intensif de pesticides et d'engrais, la concentration des productions dans certaines régions, la gestion des fumiers et lisiers, le drainage des terres, le redressement des cours d'eau et le travail intensif du sol ont amplifié l'impact de l'agriculture sur l'environnement (CPVQ, 1996a).

De ce fait, l'agriculture contribue également à la modification de la qualité de l'eau. La pollution diffuse est la forme de pollution agricole la plus répandue et la plus importante. Par son intensité et sa complexité, elle constitue actuellement le type de pollution de l'eau le plus préoccupant au Québec. Traditionnellement, l'eau souterraine a toujours été considérée comme un symbole de fraîcheur, de pureté et de limpidité (Mc Cormack, 1996). Cependant, l'intensification des activités humaines des dernières décennies a non seulement détérioré la qualité des eaux de surface mais également occasionné une détérioration de la qualité des eaux des nappes souterraines.

Du fait que l'azote est l'un des facteurs les plus limitant pour la production végétale, la fertilisation azotée figure parmi les causes les plus importantes de pollution de l'eau reliées au domaine agricole. On estime qu'il est appliqué en moyenne 41 kg/ha d'azote excédant aux besoins (Paradis, 2000) et donc susceptibles d'être entraînés par les eaux qui gravitent dans le profil du sol. Malgré l'existence des programmes d'assainissement, diverses études font le constat que la contamination des eaux souterraines par les nitrates s'accroît dans les régions d'agriculture intensive du Québec (BAPE, 1999). Cette contamination préoccupe les intervenants en santé publique car les eaux souterraines constituent la source d'approvisionnement en eau potable du cinquième de la population québécoise, surtout en zones rurales. La norme réglementaire émise par santé Canada pour les nitrates est de 10 mg-N/L mais malheureusement aucun contrôle réglementaire n'est effectué pour vérifier la qualité de l'eau dans les puits privés puisque ceux-ci demeurent sous la responsabilité de chaque propriétaire. On estime à près de 34 % le nombre de puits alimentés par des eaux souterraines contaminées dans les régions du Québec (Dodier, 1996). Cette situation s'avère inquiétante car l'ingestion d'aliments ou d'eau contaminés par les nitrates peut entraîner la méthémoglobinémie et est soupçonnée de provoquer certaines formes de cancer (BAPE, 1999).

Malgré la mise en place d'une réglementation sur la réduction de la pollution d'origine agricole et de programmes d'aide et de formation, force est de constater qu'on n'atteint pas facilement les résultats escomptés. Des progrès ont été réalisés, mais des efforts importants restent à fournir pour rendre les pratiques agricoles et les technologies utilisées plus respectueuses de l'environnement (Lajoie, 1999). Parmi la panoplie de moyens envisagés, le travail simplifié du sol permet la diminution de la pollution des eaux de surface mais peut également conduire à la détérioration des eaux souterraines suite à l'augmentation de l'infiltration dans le profil du sol.

Contrairement aux eaux de surface pour lesquelles de nombreuses recherches ont été réalisées, les connaissances sur la qualité des eaux souterraines sont peu développées. Cette tendance s'explique d'une part, parce que la dégradation de la qualité est moins visible et d'autre part, parce que les effets de la pollution sont lents à se manifester dû

aux vitesses d'écoulement souvent lentes dans le profil du sol (De Marsily, 1997). Dans une optique où on évalue à 35 le nombre de pays qui seront en pénurie d'eau en 2025 (Margat, 1997), le Québec a l'avantage d'avoir d'abondantes ressources en eau douce et se doit de préserver la qualité d'une denrée qui sera de plus en plus prisée.

## 1.2 Revue sommaire des travaux antérieurs

Depuis quelques années, les techniques de travail du sol permettant de supprimer entièrement ou partiellement le labour classique rencontrent un intérêt croissant auprès des producteurs agricoles. Les pratiques culturales de conservation sont de plus en plus courantes pour des productions à grandes échelles telles que le maïs. La diminution des charges opérationnelles, la réduction de l'érosion ainsi que la conservation et parfois l'amélioration de la structure des sols, font que ces techniques sont de plus en plus employées. Par contre, certaines interrogations sont soulevées concernant l'amélioration des capacités filtrantes des sols qui risque, par le fait même, d'augmenter l'infiltration des pesticides et nutriments vers les eaux souterraines.

Afin de répondre à ces questions, de nombreux travaux de recherche ont été entrepris afin de comparer l'évolution des teneurs en nitrates ainsi que l'évolution des paramètres physiques des sols en présence et en absence de travail du sol. Également, de nombreuses études ont porté sur l'utilisation de la modélisation comme outil scientifique permettant d'accroître et d'acquérir de nouvelles connaissances sur les concepts impliqués dans la contamination des eaux souterraines.

La revue des travaux antérieurs porte sur l'effet des travaux primaires du sol sur la qualité du sol et des eaux, particulièrement en ce qui concerne les nitrates. Une brève section porte également sur la modélisation mais celle-ci n'étant pas l'étude principale de ce présent mémoire, cette partie survole la littérature concernant ce sujet.

### 1.2.1 Effet du travail du sol sur les concentrations en nitrates dans l'eau interstitielle et sur les contenus en nitrates du sol

Puisque la pollution par les nitrates est un phénomène commun au travail conventionnel et à sa simplification, les recherches portant sur les effets de ces deux modes de travail de sol sont souvent contradictoires. Par exemple, Patni et al. (1998), dans une expérience de quatre ans menée en Ontario sur un champ de sol loameux cultivé en maïs, ont obtenu des concentrations en nitrates plus élevées sous labour comparativement au semis direct à des profondeurs de 1.2, 1.8 et 4.6 m. Par contre, étant donné la variabilité très élevée des moyennes observées, ces résultats ne sont pas significatifs. Aussi, les faibles concentrations obtenues en semis direct pourraient provenir d'une disponibilité plus faible des nitrates en absence de travail du sol. Une étude de deux ans comparant l'eau retrouvée dans des drains à 1.2 m de profondeur (Weed et Kanwar, 1996), a également montré des concentrations généralement plus élevées pour un sol loameux suite à un travail du sol par chisel comparativement à celles obtenues pour un semis direct. Mais, ce résultat s'inverse à plusieurs reprises selon les rotations de culture et les conditions climatiques de la saison.

Outre les recherches sur les concentrations en nitrates retrouvées dans l'eau, d'autres études portant sur les contenus en nitrates du sol obtiennent sensiblement les mêmes résultats. Pour un sol loameux sous culture de maïs, du sol échantillonné pendant trois ans par Angle et al. (1993) montre des contenus moyens en nitrates de 13.6 mg N-$NO_3 kg^{-1}$ pour un travail conventionnel et de 10.9 mg N-$NO_3$ $kg^{-1}$ pour un semis direct à des profondeurs inférieures à 30 cm. Plus les fertilisations azotées sont élevées et plus la différence entre les deux traitements est notable. Une étude réalisée par Levanon et al. (1993) sur un loam limoneux présente également des contenus en nitrates plus élevés pour un labour comparativement à ceux obtenus pour un semis direct. Les auteurs expliquent ce résultat par la plus grande minéralisation de l'azote résultant de l'augmentation de l'activité microbienne qui fait suite au travail du sol.

Une expérience sur le terrain réalisée par Shipitalo et Edwards (1993) à l'aide de colonnes de sol a obtenu un taux d'infiltration 36% plus élevé en semis direct. Ce

résultat est attribué à l'écoulement préférentiel dans les macropores. Ce phénomène serait d'autant plus observable en saison de croissance et principalement après les premières averses de pluie qui font suite aux fertilisations. Même s'ils obtiennent une percolation des nitrates plus élevée au semis direct pendant la saison de croissance, ils n'observent par contre aucune différence entre les deux modes de travail de sol pour les percolations annuelles totales. De leur côté, Tan et al. (1998) obtiennent des concentrations moyennes de 33.7 kg N $ha^{-1}$ pour le semis direct et de 25.0 kg N $ha^{-1}$ pour le labour à une profondeur de 0.65 mètres pour un loam argileux sous culture de soja. De plus, en semis direct, l'infiltration de l'eau serait 45% plus élevée que pour un travail conventionnel et proviendrait du nombre plus important de macropores créé par l'activité des vers de terre. Aussi, les auteurs observent un diamètre moyen et une stabilité des agrégats plus élevés en semis direct.

D'un autre côté, Randall et Iragavarapu (1995) observent peu de différences pour les concentrations en nitrates retrouvées entre les deux modes de travail de sol après une expérience menée pendant onze ans sur un loam argileux qui se draine difficilement. Une expérience réalisée au Québec par Burgess et al. (1999) indique que le travail du sol aurait peu d'effets sur les contenus en nitrates retrouvés dans les sols sous nos conditions climatiques ou que la variabilité des résultats ne permet pas d'observer une différence entre les deux traitements.

## 1.2.2 Effet du travail du sol sur la porosité et sur la conductivité hydraulique du sol

Les processus de formation des pores semblent différer entre le travail conventionnel et le semis direct. Les pores peuvent être créés par le travail du sol lorsqu'il y a un labour et en absence de celui-ci, ils seraient principalement formés par des actions biologiques. Suite à cette différence de formation, la grosseur des pores, leur distribution, leur continuité ainsi que la conductivité hydraulique qui en découle devraient varier selon le mode de travail employé (Benjamin, 1993).

Drees et al. (1994) ont évalué les différences structurales de six paires de parcelles en labour et en semis direct d'un loam limoneux sous culture de maïs. Malgré une porosité totale plus faible, les parcelles en semis direct présentaient une grosseur moyenne de pores (0.18 - 0.26 mm diam.) plus élevée qu'en labour (0.12 - 0.17 mm diam.). Les passages fréquents de la machinerie agricole en labour et l'augmentation de l'activité biologique en son absence seraient responsables de ces différences. Par ailleurs, ces mêmes auteurs, tout comme VandenBygaart et al. (1999), ont observé en semis direct un nombre plus élevé de macropores horizontaux dans les 5 à 15 premiers centimètres du profil qui serait provoqué par l'absence de travail mécanique et par la succession des cycles de gel-dégel. VandenBygaart et al. (1999) ont également observé à mesure qu'augmente les années en semis direct, une diminution des pores de 30 à 100 µm de diamètre et une augmentation des pores de 100 à 500 µm de diamètre pour un loam limoneux. Suite à une expérience réalisée pendant cinq ans sur un sol sableux, Sauer et al. (1990) observent des grosseurs moyennes de pores à saturation de 1.34 (± 0.67) mm pour le semis direct et de 0.19 (± 0.18) mm pour le labour. Ils expliquent cette différence par le travail des racines qui produit des macropores demeurant intactes en absence de travail du sol.

Pour leur part, Heard et al. (1988) constatent une plus grande continuité des pores en semis direct à des profondeurs de 10, 20 et 30 cm pour un loam limoneux et un loam argileux soumis à une rotation de culture maïs-soja. Par contre, les auteurs y observent une plus faible conductivité hydraulique. Ce résultat serait provoqué par la plus grande densité de surface retrouvée en semis direct et par la porosité provoquée par le travail du sol et l'incorporation des résidus de culture. À l'opposé, dans une étude effectuée en Alberta sur un loam limoneux et un loam sableux, Azooz et Arshad (1996) ont évalué une conductivité hydraulique à saturation significativement plus élevée en semis direct (0.36 - 3.0 cm $h^{-1}$) comparativement à celle observée sous labour (0.26 - 1.06 cm $h^{-1}$). Les auteurs expliquent ce résultat par la diminution de la perturbation dans la continuité des pores suite à l'absence de travail du sol dans les horizons de surface. De même, Benjamin (1993) a constaté une conductivité hydraulique à saturation 30 à 180 % plus élevée en absence de travail du sol et l'associe au nombre plus élevé de macropores et à leur plus grande continuité .

L'impact du travail du sol sur la teneur en matière organique sera également étudié dans ce mémoire. Cependant, la littérature scientifique concernant cet impact sous nos conditions expérimentales est quasi inexistante. Ceci explique que la revue de ne prendra pas compte de cet aspect.

### 1.2.3 Modélisation

Étant donnée la complexité des phénomènes biochimiques et hydrodynamiques impliqués dans la transformation de l'azote et la migration des nitrates, l'utilisation d'un modèle mathématique permet de synthétiser un nombre important d'informations et ainsi d'évaluer rapidement les risques potentiels de contamination. Pour répondre à ce besoin, de nombreux modèles informatiques de simulation, présentant différents niveaux de complexité, ont été développés: Johnsson et al. (1987) (SOILN), Wagenet et Hutson (1989)(LEACHM), Hansen et al. (1991)(DAISY), etc. La plupart de ces modèles permettent de quantifier l'importance de la contamination souterraine. Par contre, par la nature et par le nombre de paramètres requis, ils demeurent des outils d'approche difficile d'utilisation. De plus, ces modèles représentent souvent que certains processus jugés influents et ne considèrent pas la variabilité spatiale des paramètres (Larocque et al., 1998).

De son côté, le modèle AgriFlux (Banton et Larocque, 1997) est un modèle mécaniste-stochastique alliant la représentation physique des processus de transformation et de transfert des contaminants et la variabilité ou l'incertitude sur les paramètres. L'avantage de son utilisation est qu'il présente un bon compromis entre une représentativité fiable du processus et une paramétrisation aisée du modèle. Comparativement, les modèles SOILN (Johnsson et al.,1987) et LEACHM (Wagenet et Hutson, 1989) qui ont l'avantage d'avoir une représentation la plus exacte possible de la réalité, ont comme inconvénients de nécessiter beaucoup de paramètres qui s'avèrent souvent difficile à mesurer et de ne pas permettre la prise en compte de la variabilité spatiale (modèles purement déterministes). De plus, dans le modèle AgriFlux, la représentativité des résultats est améliorée par l'intégration de la variabilité spatiale des

paramètres et par l'utilisation d'une courbe enveloppe des résultats journaliers autour de leur valeur moyenne (Banton et al., 1995). Des applications précédentes (Dupuy et al., 1997 ; Larocque et Banton, 1996 ; Larocque et Banton, 1995) ont montré que ce modèle donne une évaluation fiable de la percolation des nitrates et que son utilisation comme outil de gestion de la ressource eau est pertinente.

## 1.3 Objectifs et approche méthodologique

L'objectif de cette recherche est d'évaluer l'incidence de l'absence de travail de sol sur les paramètres physiques et sur les contenus en nitrates dans l'eau et dans le sol à partir de l'utilisation conjointe de données recueillies sur le terrain et de la modélisation. Plus spécifiquement, les objectifs sont les suivants :

1. Comparer l'impact de deux modes de travail de sol (labour et semis direct) sur les concentrations en nitrates dans l'eau et contenus en nitrates dans le profil du sol.

2. Comparer l'impact de deux modes de travail de sol (labour et semis direct) sur l'évolution des paramètres physiques du sol.

3. Simuler le devenir de l'azote dans ce sol et comparer les résultats aux valeurs mesurées.

Les travaux de recherche ont été réalisés du printemps 1998 à l'été 2000 sur une parcelle expérimentale cultivée en maïs-grain. Les pratiques culturales et les fertilisations effectuées sont celles recommandées pour cette culture en sol québécois. Deux modes de travail de sol, le labour et le semis direct, sont disposés en duplicata sur la parcelle. Les échantillons d'eau interstitielle sont prélevés par bougies poreuses. Des échantillonnages de sol destinés à l'analyse des nitrates ont aussi été réalisés. Pour chaque année d'expérimentation, un échantillonnage de sol non remanié a été réalisé afin de mesurer les paramètres physiques du sol. Une analyse de variance est

effectuée pour les contenus en nitrates du sol et pour les paramètres physiques à l'aide du logiciel statistique SAS.

Le modèle AgriFlux (Banton et Larocque, 1997) est utilisé afin de simuler la dynamique de l'azote avec une comparaison entre les concentrations en nitrates dans l'eau et les contenus en nitrates dans le sol simulés et mesurés. Les paramètres relatifs aux pratiques culturales (durée de la période de croissance, besoins des plantes, fertilisants, travaux de sol) sont estimés à partir d'informations disponibles. Les paramètres physiques du sol sont mesurés en laboratoire à partir d'échantillons prélevés sur le terrain. Les données climatiques proviennent d'Environnement Canada. Les paramètres relatifs au cycle de l'azote n'ont pas été mesurés et proviennent de la littérature ou d'applications similaires du modèle (Larocque et Banton, 1995 ; Larocque et Banton, 1996).

# 2. CONCEPTS THÉORIQUES

Dans cette section, des concepts théoriques qui permettront de mieux comprendre les résultats obtenus sont présentés. Tout d'abord, les processus impliqués dans le cycle de l'azote et de l'eau sont décrits. Puis, nous étudierons les deux modes de travail de sol réalisés dans le cadre de cette recherche ainsi que leur influence sur le cycle de l'azote. Nous terminerons par la présentation des paramètres étudiés à partir des échantillons d'eau et de sol.

## 2.1 Nutrition minérale

Pour sa croissance, la plante nécessite une certaine quantité d'éléments nutritifs essentiels tels que l'azote, le phosphore, le potassium et, dans une moindre mesure, le soufre, le calcium, le magnésium et d'autres oligo-éléments. Le rôle du sol est primordial dans la nutrition des plantes. Il doit contenir une quantité suffisante de tous ces éléments et ce, dans des proportions et sous des formes qu'elles peuvent assimiler. Suite à l'intensification de l'agriculture, la concentration de ces substances est souvent insuffisante pour l'obtention d'un rendement optimum. Pour pallier à cette situation, outre les engrais de ferme, l'utilisation d'engrais chimiques est couramment employée afin d'augmenter les réserves naturelles retrouvées dans le sol. Par contre, une application répétée, à trop fortes doses, peut conduire à leur accumulation.

L'azote figure parmi les intrants dont l'utilisation est la plus fortement répandue. Par ce fait, il est l'une des principales causes de la détérioration des eaux de surface et souterraines en milieu agricole. En effet, les nitrates étant peu retenus dans le sol, sont très susceptibles de migrer dans le profil de sol et d'être lessivés par la suite. Il s'avère donc important de bien comprendre l'ensemble des transformations qui affectent cet élément dans son cycle afin d'optimiser son utilisation et ainsi de minimiser les risques de pollution pour l'environnement.

## 2.1.1 Cycle de l'azote

L'azote est susceptible d'être rencontré sous trois formes: atmosphérique, organique et minéral. Son cycle est représenté à la figure 1.

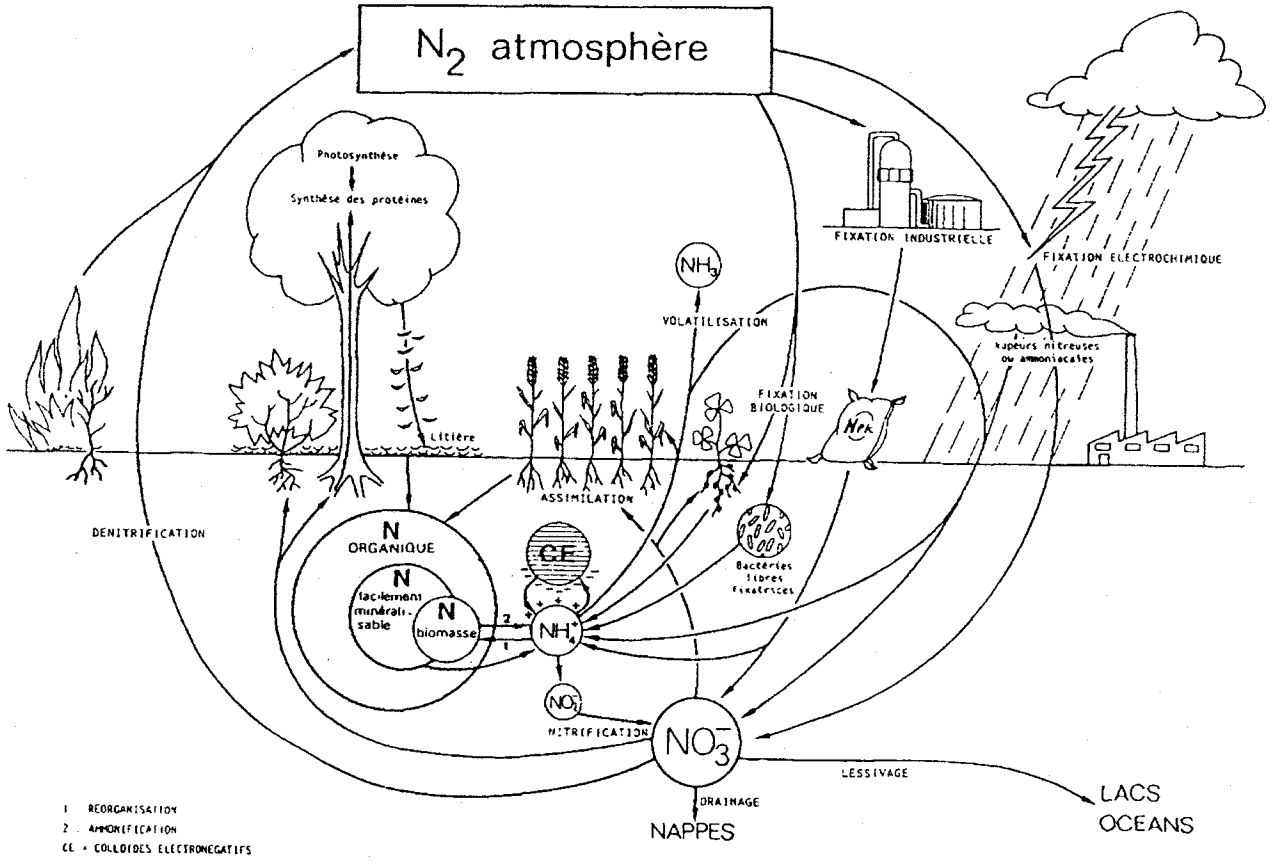



Figure 1 : Cycle de l'azote (Ratel, 1992)

### 2.1.1.1 Azote atmosphérique

L'azote gazeux est un élément très abondant qui occupe environ 78% de la composition de l'atmosphère. On appelle fixation de l'azote le processus par lequel l'azote atmosphérique est converti en composés assimilables par les organismes. Deux types de micro-organismes possèdent en commun un complexe enzymatique, la nitrogénase, qui leur permet de réduire l'azote gazeux en azote minéral qui servira à l'élaboration de l'azote organique suivant la réaction:

$$N_2 \rightarrow NH_4^+ \rightarrow Azote\ organique$$

Les premiers sont des bactéries aérobies du type *Azotobacter* sp. et *Beijrinkia* sp. ou anaérobies du genre *Clostridium* sp. Les autres sont des fixateurs symbiotiques comme le *Rhizobium* sp. ou le *Frankia* sp. qui s'associent à une légumineuse. Les quantités d'azote fixées par l'association légumineuse-rhizobium sont très dépendantes des conditions du milieu: concentration en nitrate, pH, humidité, souches de Rhizobium,... On estime qu'elles peuvent représenter un apport d'azote pour les plantes qui varie de quelques dizaines à plusieurs centaines de kilos par hectare (Recous et al., 1997).

### 2.1.1.2 Azote organique

L'azote organique est un constituant de la matière organique au même titre que le carbone. Certains sols peuvent contenir 3 à 5 tonnes d'azote par hectare essentiellement dans la couche labourée comprise entre 0 et 25-30 cm de profondeur (Recous et al., 1997). Par contre, cette source considérable d'azote ne peut être directement utilisée par les plantes. Elle doit d'abord subir une dégradation appelée minéralisation qui est le processus par lequel l'azote organique est transformé en azote minéral. Cette dégradation de la matière organique endogène et fraîche du sol est réalisée par les micro-organismes du sol.

### 2.1.1.3 Azote minéral

À l'exception des cas où elles sont associées avec des micro-organismes fixateurs d'azote, les plantes supérieures absorbent l'azote principalement sous forme minérale (forme nitrique et forme ammoniacale) et, très accessoirement, sous certaines formes organiques (acides aminés, vitamines) (Karam, 1998). C'est également sous forme minérale que cet élément est susceptible de provoquer la pollution des eaux. En effet, le lessivage et la percolation de l'azote concernent presque uniquement l'ion nitrate (Lafleuriel, 1990).

A) MINÉRALISATION

La séquence des réactions biologiques qui transforme l'azote organique en azote inorganique assimilable par les plantes est connue sous le terme général de minéralisation. En moyenne, le taux annuel de minéralisation de l'azote organique du sol est compris entre 0.7 à 2%, et sans doute plus puisque la fourniture d'azote par le sol peut varier de quelques dizaines à plus de 150 kg d'azote par hectare par an (Nicolardot et al. 1997).
La minéralisation se déroule en deux phases successives: l'ammonification et la nitrification.

L'ammonification est la transformation de l'azote organique par lyse enzymatique qui résulte en la production d'ammonium.

$$protéines \rightarrow peptides \rightarrow acides\ aminés \xrightarrow{désamination\ oxydative} NH_4^+$$

La nitrification est également une oxydation biologique produisant de l'azote nitrique à partir de l'azote ammoniacal. Cette transformation est réalisée par des bactéries chimio-autotrophes spécifiques.

La nitritation: l'ion ammonium est oxydé en ion nitrite par des bactéries du genre *Nitrosomonas* sp. :

$$NH_4^+ + 1.5O_2 \rightarrow NO_2^- + 2H^+ + H_2O + énergie$$

La nitratation: les nitrites sont oxydés en nitrates par des bactéries du genre *Nitrobacter* sp. :

$$NO_2^- + 0.5O_2 \rightarrow NO_3^- + énergie$$

L'enchaînement de la nitrification se fait de façon très rapide et la forme nitrite est pratiquement indécelable. L'énergie libérée lors de ce processus est utilisée par les micro-organismes pour leurs fonctions vitales.

B) IMMOBILISATION

L'immobilisation (ou organisation) est un processus parallèle mais opposé à la minéralisation. De nombreux micro-organismes du sol ont besoin de l'azote sous formes minérales pour satisfaire leurs besoins de renouvellement et de croissance. Ces organismes assimilent préférentiellement la forme ammoniacale à la forme nitrique et exercent vis-à-vis des plantes une concurrence vive. Lorsqu'il y a un apport de paille au sol, les résidus ont un rapport Carbone/Azote (C/N) élevé et la biomasse microbienne empruntera de l'azote du milieu pour combler ses besoins lors de la dégradation. Lorsque les processus d'immobilisation sont plus importants que les processus de minéralisation, la teneur du sol en azote minéral diminue.

C) DÉNITRIFICATION

La dénitrification est le processus par lequel l'azote nitrique est transformé en azote gazeux par des bactéries anaérobies:

$$NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2 + H_2O$$

La première étape, la réduction du nitrate en nitrite, ne nécessite pas une microflore spécifique. Par contre, la réduction du nitrite en azote gazeux est réalisée par un nombre restreint de bactéries telles que *Pseudomonas* sp., *Agrobacterium* sp., *Bacillus* sp.. La dénitrification intervient en milieu pauvre en oxygène et se produit lorsque ces bactéries utilisent le $NO_3^-$ au lieu de l'oxygène comme accepteur final d'électrons dans leur chaîne respiratoire. En sols cultivés bien drainés, les pertes d'azote par dénitrification sont généralement faibles.

Il existe un autre type de dénitrification: la chimio-dénitrification. Comme son nom l'indique, ce phénomène est chimique contrairement au précédent qui était biologique. La chimio-dénitrification ne contribue pas de façon significative à la production d'azote atmosphérique.

## D) VOLATILISATION

La volatilisation représente, comme la dénitrification, une perte d'azote par voie gazeuse.

$$NH_4^+ + OH^- \leftrightarrow NH_3 + H_2O$$

Cet équilibre dépend de facteurs climatiques et pédologiques tels que l'humidité, la température, le pH, les teneurs en argile et en matière organique (Karam, 1998). Les pertes d'azote lors de l'épandage d'engrais organique peuvent être importantes sous des conditions propices à la volatilisation. Il est donc recommandé de les enfouir rapidement afin de réduire ces pertes.

## E) LESSIVAGE ET PERCOLATION

La pollution diffuse d'origine agricole par les nitrates résulte de l'entraînement de cet ion qui, contrairement à l'azote ammoniacal retenu par le complexe argilo-humique, est

facilement entraîné avec l'eau. Cet entraînement se fait essentiellement par le ruissellement de l'eau à la surface du sol ou par son drainage profond qui correspond à une infiltration verticale dans le profil du sol. De nombreux facteurs sont susceptibles de le favoriser : précipitations, texture et structure du sol, perméabilité du sol, fertilisations, travail du sol, matière organique... (Nicolardot et al., 1997 ; Martin et Meynard, 1997).

## 2.2 Cycle et état de l'eau dans le sol

L'eau est un solvant puissant. Ce pouvoir lui confère la capacité de solubiliser plusieurs produits hydrophiles notamment les nitrates et certains pesticides. L'eau peut également transporter des matières en suspension. Selon les modalités de circulation de l'eau dans le sol, celle-ci peut ensuite rejoindre les nappes souterraines ou le réseau superficiel (Martin et Meynard, 1997). Ces deux processus sont responsables de la pollution diffuse d'origine agricole.

### 2.2.1 Cycle de l'eau

Le cycle de l'eau peut être décrit par un système fermé à quatre étapes (Figure 2).

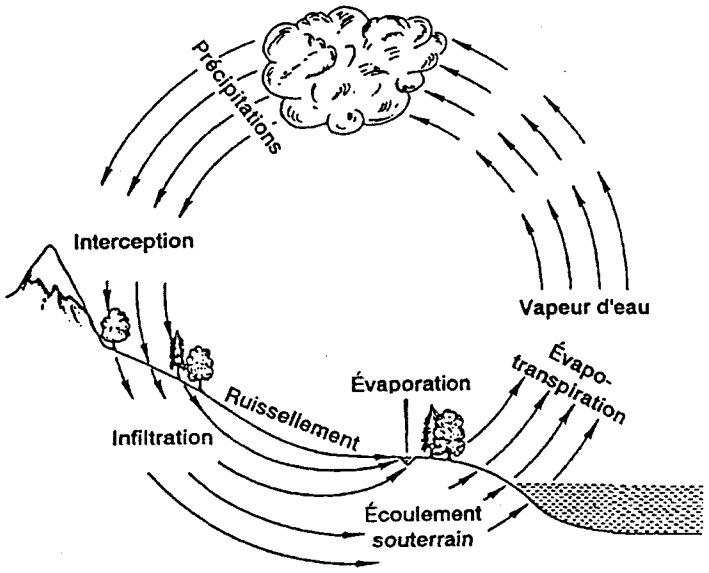



Figure 2 : Cycle de l'eau (Laroche, 1996)

## A) PRÉCIPITATIONS

Les précipitations totales dans la province de Québec s'élèvent entre 750 et 1500 mm par année (Chagnon, 1996). On estime à 60 % des précipitations totales annuelles qui tombent durant la saison de végétation. Pour une quantité mensuelle d'environ 85 mm à Montréal et 120 mm à Québec (Laroche, 1996).

## B) INTERCEPTION

C'est la partie des précipitations qui n'interagit pas avec le sol. Elle est faible à l'été mais forte durant l'hiver car pratiquement 100 % des précipitations sont sous forme de neige. En été, les précipitations interceptées sont principalement évaporées et retournent à l'atmosphère tandis qu'en hiver, il y a possibilité de retour au cycle hydrologique à la fonte des neiges.

C) RUISSELLEMENT

L'intensité du ruissellement est fonction de plusieurs facteurs : précipitations, type de sol, pente, compaction du sol... Les eaux de ruissellement s'écoulent sous l'effet des forces de gravitation vers les parties plus basses du relief. Souvent, elles rejoignent les cours d'eau et peuvent ainsi être perdues par évaporation. Le ruissellement occasionne les phénomènes d'érosion et de lessivage par l'entraînement des particules solides et dissoutes.

D) INFILTRATION

On estime à près de 8 % la proportion de l'eau qui percole à travers le profil du sol et qui contribue de cette façon au renouvellement des eaux souterraines (Banton, 1997). L'infiltration est susceptible de provoquer leur dégradation par l'entraînement de contaminants solubles.

## 2.2.2 L'eau du sol

On définit l'état de l'eau retrouvée dans le sol selon son contenu énergétique qu'on exprime en terme de pression ou de travail potentiel. Ses mouvements dans la matrice sont déterminés en fonction de la taille et de la distribution des pores. Le sens des flux hydriques et leur intensité sont occasionnés par les gradients de potentiel hydrique : l'eau va toujours du haut en bas pour les écoulements gravitaires, des fortes pressions vers les faibles pressions pour les écoulements sous pression, et des milieux à fort potentiel hydrique vers les milieux à faible potentiel hydrique dans le cas des milieux non saturés (Pagès et al.,1997). La figure 3 présente les trois différents états de l'eau dans le sol.

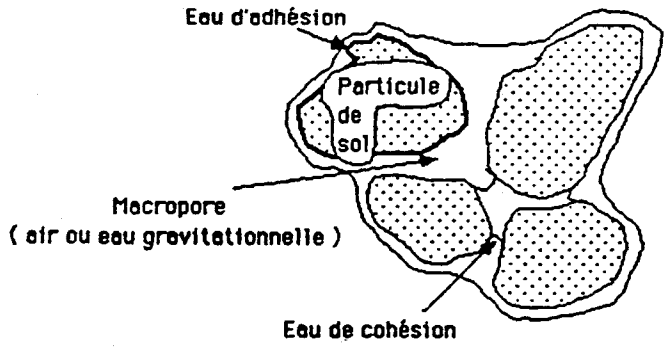



Figure 3 : État de l'eau dans le sol (Thériault, 1995)

## A) EAU GRAVITATIONNELLE

L'eau gravitationnelle est l'eau libre contenue dans les macropores et détenant une très faible tension. Elle se meut librement et s'écoule par gravité sous l'action de son propre poids par les canaux constitués de la succession des pores. Puisque cette eau est faiblement liée et s'écoule rapidement, elle est la principale responsable de l'entraînement de l'azote dans le profil du sol.

## B) EAU CAPILLAIRE

C'est la principale source d'eau pour la croissance des végétaux. Elle est retrouvée dans les micropores et est retenue par l'attraction mutuelle des molécules. Son mouvement est lent et se fait d'une région où la tension est faible (pellicule d'eau plus épaisse) vers une région où la tension est élevée (pellicule d'eau plus mince).

C) EAU D'ADHÉSION

L'eau d'adhésion est retenue sous forme de films très minces autour des particules minérales. Cette eau, trop énergiquement retenue, ne peut être absorbée et est donc inutilisable par les plantes.

## 2.3 Le travail du sol

La fertilité à long terme du sol et particulièrement le maintien de ses propriétés physiques et chimiques exigent plusieurs interventions mécaniques. Traité correctement, un sol fertile est apte à une production durable. Par contre, un travail du sol puissant et intensif, des techniques culturales inadaptées et de nombreux passages de machinerie réalisés dans de mauvaises conditions d'humidité tendent à détruire sa structure. Afin de pallier à cette situation, la simplification du travail du sol est souvent évoquée comme un moyen efficace pour améliorer la conservation des sols et pour limiter certaines formes de pollution telles le lessivage et l'érosion de particules solides, d'engrais et de pesticides.

### 2.3.1 Travail conventionnel

Au Québec, les pratiques conventionnelles impliquent habituellement un travail primaire par labour à l'automne à l'aide d'une charrue à versoirs, suivi de pratiques culturales secondaires réalisées au printemps pour la préparation du lit de semences (Thériault, 1995). Une caractéristique importante du travail primaire est l'intensité du travail qui a pour but le retournement et l'ameublissement de toute la couche arable par le labour. Cette opération fait souvent suite à un apport de fumier et permet l'enfouissement des résidus de culture. Elle permet également l'homogénéisation, dans la couche labourée, des matières organiques et éléments fertilisants apportés. Généralement, par lui-même mais aussi par le travail superficiel qui l'accompagne, le labour est une technique

onéreuse consommatrice de temps et d'énergie. Le travail secondaire réalisé au printemps cherche à niveler le sol pour le préparer superficiellement au semis. Habituellement, les façons secondaires n'occasionnent pas de problèmes particuliers lorsqu'elles sont réalisées dans des conditions d'humidité appropriées.

Cette pratique conventionnelle de travail du sol produit plusieurs effets positifs : l'incorporation des résidus, des amendements et des fertilisants, l'éclatement des mottes d'argile par l'action du gel-dégel, la destruction des adventices, l'augmentation du contact entre la semence et les éléments structuraux, la fragmentation et l'accroissement de la porosité qui favorisent un réchauffement plus rapide au printemps. Par contre, des inconvénients majeurs y sont également associés : la création d'une semelle de labour, la diminution de matière organique, l'augmentation de la susceptibilité au ruissellement et à l'érosion, des coûts d'opérations élevés, la dégradation de la structure (Drees et al., 1994 ; Laverdière, 1995).

### 2.3.2 Travail réduit

Plusieurs techniques de réduction de travail de sol peuvent être identifiées : suppression d'opérations superflues, utilisation en un seul passage d'outils combinés multifonctions, utilisation de semoirs pouvant opérer sans préparation... Toutes ces techniques ont pour but de laisser en surface une couverture plus importante de résidus et de réduire l'intensité du travail. On parle généralement de travail de conservation quand au moins 30 % de la surface du sol est, après le semis ou la plantation, recouverte par des résidus organiques (Sturny, 1993).

Par définition, le semis direct est un semis sans aucun travail du sol ou encore lorsqu'une bande étroite de sol seulement est travaillée à l'aide de coutres montés à l'avant du semoir. Un semoir spécial, généralement lourd et ayant des socs à triples disques, est requis pour pouvoir déposer la semence dans les restes de la culture précédente. La particularité de cette pratique culturale est que le sol et les éléments minéraux ne sont pas mélangés dans la couche arable et qu'il y a absence de

fragmentation des horizons superficiels. L'augmentation de la quantité de débris retrouvée en surface est généralement considérée comme étant un atout important dans la prévention ou la limitation de l'érosion éolienne et hydrique des sols. Également, elle engendre une augmentation de la stabilité structurale par la présence accrue de matières organiques et par une augmentation de l'activité de la microfaune (Karam, 1998). Par contre, les résidus laissés en surface contribuent à réduire l'évaporation de l'eau et impliquent que la structure comporte suffisamment de pores grossiers pour permettre l'assèchement du sol. Les pertes de rendement peuvent être importantes si la prolifération des mauvaises herbes est mal contrôlée.

Liés à la pratique du semis direct, les avantages se situent au niveau du contrôle de l'érosion, de l'augmentation en matière organique en surface du sol, de la conservation et de l'amélioration de la structure des sols et des faibles coûts d'utilisation. Cependant, cette pratique culturale implique que le sol soit bien drainé, qu'il présente un bon pH et une bonne fertilité, que les rotations de cultures soient réfléchies, que les adventices soient bien contrôlées et ceci afin d'obtenir un rendement égal à celui obtenu par la méthode conventionnelle.

### 2.3.3 Influence du travail réduit sur le cycle de l'azote

Les techniques réduites de travail du sol provoquent des changements dans les propriétés physiques et physico-chimiques des sols. Ces changements peuvent avoir des répercussions sur le fonctionnement des microorganismes associés aux transformations de l'azote.

La réduction du travail du sol (ex : semis direct) augmente les quantités de matière organique retrouvées en surface (Lal et al., 1994). Cette accumulation aura pour effet de modifier les contenus en azote et en carbone principalement dans les premiers centimètres du profil. En plus de conserver les débris organiques sur les horizons supérieurs, le semis direct a comme conséquence d'augmenter les quantités en ralentissant la minéralisation du stock initial. Par contre, la diminution des vitesses de

transformation de l'azote organique peut être compensée par l'augmentation de la taille du stock potentiellement minéralisable et expliquer les faibles variations d'azote souvent retrouvées pour l'ensemble du profil (Germon et al., 1991). Pour sa part, le labour conduit habituellement à une plus grande minéralisation de la matière organique par son mélange dans la couche arable du sol.

La présence de résidus en surface en travail réduit provoque une moindre évaporation et une plus forte humidité des horizons supérieurs. On observe souvent également une augmentation de la masse volumique apparente (Heard et al., 1988). Ces deux paramètres combinés peuvent modifier l'état d'aération du sol et les capacités oxydantes de la microflore. Cette situation s'accompagne généralement d'une température plus basse et d'une capacité de réchauffement plus lente au printemps (Guérif, 1991). De telles variations peuvent modifier le fonctionnement des microorganismes les plus sensibles à la température, notamment ceux responsables de la nitrification. La limitation des transferts d'oxygène favorise l'anaérobiose et peut également accroître la dénitrification.

L'absence de travail du sol et l'accumulation de la matière organique en semis direct peut conduire à une plus forte population microbienne en surface du sol. Cette situation risque entre autres d'augmenter le phénomène d'immobilisation de l'azote.

## 2.4 Paramètres étudiés

Afin d'évaluer le taux d'infiltration des nitrates, les paramètres qui ont été étudiés sont la concentration en nitrates dans l'eau et le contenu en nitrates du sol à diverses profondeurs du profil. Pour les paramètres physiques du sol, la texture, la porosité, la conductivité hydraulique, la porosité de drainage, la capacité au champ et la matière organique ont été déterminées. Ainsi, l'influence de ces paramètres sur l'infiltration des nitrates selon le travail du sol pourra être étudiée.

### 2.4.1 Nitrates dans l'eau interstitielle

La solution du sol qui gravite dans le profil a été récupérée à l'aide de bougies poreuses. La description d'un tel dispositif se retrouve dans une autre section de ce travail. C'est l'eau gravitationnelle, faiblement liée et se mouvant par les macropores, qui est principalement échantillonnée par cette méthode. Également, une petite partie de l'eau capillaire qui se déplace par la succion peut être intégrée aux échantillons prélevés. Ainsi, l'analyse de cette eau permet d'évaluer les concentrations en nitrates pouvant potentiellement contaminer les eaux souterraines. Cette méthode d'échantillonnage présente l'inconvénient d'être directement influencée par les conditions climatiques car l'absence de précipitations empêche le prélèvement d'eau et limite l'information disponible.

### 2.4.2 Nitrates dans le profil du sol

Des échantillons de sol ont été prélevés afin d'analyser leur contenu en nitrates. Cette mesure n'est pas similaire ou remplaçable par des prélèvements de solution du sol par bougies poreuses car elle prend compte de l'ensemble de la solution du sol et non plus seulement de celle la plus mobile. Son analyse intègre donc tous les types d'eau. Il n'y a pas d'identité entre les deux mesures (Lafleuriel, 1990). Son principal inconvénient provient du fait que cette méthode informe sur le risque potentiel de contamination et non pas sur les concentrations en nitrates sortant réellement du profil du sol.

### 2.4.3 Caractéristiques du sol

Le travail du sol a la capacité de modifier les propriétés physiques, chimiques et biologiques d'un sol. Ce sont les propriétés physiques qui sont principalement responsables de l'érosion et de l'infiltration de l'eau (Drees et al., 1994 ; VandenBygaart et al., 1999). L'aptitude d'un sol à laisser migrer l'eau et la vitesse à laquelle elle se

déplacera d'un point à un autre dépend de sa conductivité hydraulique, qui elle dépend des propriétés texturales du sol, de sa structure (continuité des pores, masse volumique apparente et morphologie des pores conducteurs du sol) et de sa teneur en eau (Pagès et al., 1997).

L'état structural d'un sol est une des propriétés les plus importantes car il joue sur de nombreuses caractéristiques physiques. La structure peut se définir comme étant le mode d'assemblage des particules minérales primaires (sable, limon et argile) et organiques, en particules secondaires plus grosses (agrégats) de formes et de tailles différentes en combinaison avec les espaces lacunaires (pores) entre elles (Laverdière, 1995). Son étude est cependant très complexe et s'évalue souvent à partir d'autres paramètres physiques tels que la porosité et le taux de matière organique.

## A) TEXTURE

Trois groupes de minéraux primaires forment la texture d'un sol: sable, limon et argile. La texture dépend des proportions relatives de chacun d'entre eux et ses propriétés sont statiques c'est-à-dire qu'elles n'évoluent pas dans le temps. Les sols sont regroupés en 13 classes texturales selon leurs pourcentages de sable, limon et argile. La texture joue un rôle important sur les caractéristiques chimiques (capacité d'échange cationique, pouvoir tampon) et physiques (drainage, aération, réchauffement, rétention en eau) des sols.

## B) POROSITÉ

Les agrégats qui forment la structure d'un sol sont séparés entre eux par des plans de faiblesse. Conséquemment à cette organisation, il y a présence de vides appelés pores, occupés par de l'air et par de l'eau. L'ensemble de ces vides forme la macroporosité du sol. Dans les sols minéraux, sa valeur oscille entre 30 et 60 % (Laverdière, 1995). Sa mesure est un bon indice de l'état de la structure puisque la gestion de la relation air-

eau du sol va dépendre de la quantité et de la nature des pores présents (Duval et al. 1993).

L'étude de la porosité d'un sol permet de comparer l'impact des travaux de sol sur son développement et sur son origine. En effet, les processus de formation des pores diffèrent entre le labour et le semis direct. Suite au labour, la porosité provient principalement du réarrangement des particules solides. En absence de travail mécanique, elle provient plutôt de l'activité biologique comme l'action des racines et des vers de terres et comme les processus annuels de gel-dégel. Par contre, l'évaluation de la porosité totale d'un sol ne permet pas de déterminer avec précision les mouvements de la solution du sol car cette propriété s'associe avec d'autres facteurs (diamètre, continuité, etc.). Mais son étude, combinée à celle de la porosité de drainage et à celle de la capacité au champ, permet de pallier à cet inconvénient.

## C) POROSITÉ DE DRAINAGE ET CAPACITÉ AU CHAMP

L'eau pouvant s'écouler dans le profil du sol sous l'effet seul de la gravité caractérise la porosité de drainage. Son analyse donne un indice de la macroporosité du sol. La capacité au champ est atteinte lorsque cette eau gravitationnelle est complètement drainée et qu'il ne reste plus que l'eau de cohésion facilement accessible par les plantes. La capacité au champ dépend de la porosité du sol et plus spécifiquement, elle est un indice de sa microporosité.

## D) CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE

La conductivité hydraulique est l'indice de la vitesse du déplacement de l'eau à travers un corps poreux. Elle constitue le paramètre clé de l'écoulement souterrain représenté par la loi de Darcy. Son évaluation indique le degré de perméabilité à l'eau du terrain (Banton et Bangoy, 1997). Ce paramètre est primordial puisqu'il sert à mesurer la

vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol et permet d'apporter des connaissances sur la continuité des pores et sur la caractérisation de l'état structural.

## E) MATIÈRE ORGANIQUE

En général, la matière organique retrouvée dans les sols agricoles provient soit des résidus de culture soit des épandages de déjections animales. Dans le sol, ces débris subissent sans cesse des transformations telles que la minéralisation et l'humification. Au cours de la minéralisation, les éléments qui constituent la matière organique fraîche retournent progressivement dans le milieu grâce au travail des populations microbiennes et constituent ainsi une source d'éléments minéraux. À partir des molécules simplifiées obtenues par la minéralisation, l'humification consiste à construire de nouvelles molécules polymérisées. Bien que la matière organique ne représente qu'une petite fraction dans le sol, de 2 à 6 % en général, elle joue un rôle d'une grande importance sur le potentiel de fertilité et sur la conservation des sols (Blackburn, 1994). En effet, elle exerce son action sur les propriétés chimiques (capacité d'échange cationique, source d'azote, fixation d'éléments chimiques), physiques (stabilité structurale, perméabilité, rétention en eau, agrégation, aération) et biologiques (stimulation et entretien de la microflore, croissance et résistance des plantes) du sol (Laverdière, 1995).

La matière organique contribue entre autres aux liaisons entre les particules minérales. Par ce fait, elle joue un rôle important dans la structure du sol et a donc a un impact sur la stabilité structurale et sur la pénétration de l'eau. En labour, les quantités de matière organique retrouvées sont généralement plus faibles qu'en semis direct. Une plus grande aération du sol et son mélange dans le profil augmentent sa susceptibilité à la minéralisation. Également, en raison du labour pouvant parfois atteindre 25 cm, les teneurs en matière organique peuvent sembler plus faibles en labour conventionnel que celles mesurées en semis direct suite à une dilution de la matière organique sur une profondeur supérieure à celle échantillonnée.

# 3. MATÉRIEL ET MÉTHODE

## 3.1 Description du site expérimental

### 3.1.1 Localisation

Les travaux de recherche ont été réalisés sur une parcelle située à 25 km au sud-ouest de la ville de Québec et à environ 5 km du village de St-Augustin-de-Desmaures (Figure 4). Le site est voisin de la ferme expérimentale de malherbologie appartenant à l'Université Laval.

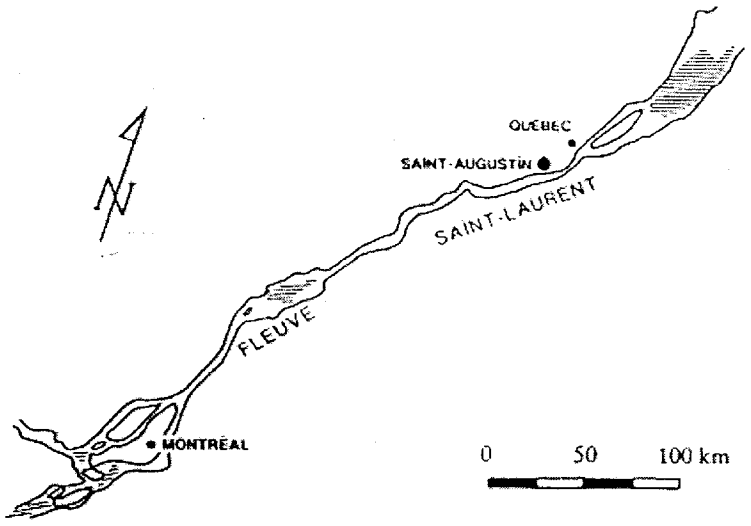



Figure 4 : Localisation de la parcelle expérimentale (Trépanier, 1992)

### 3.1.2 Pédologie

Le sol de la parcelle appartient à la série Platon et au groupe gleysol lithique (d'après Baril, 1974 dans Chapdelaine, 1992). Il repose sur un schiste argileux et gréseux friable (d'après Clark et al., 1973 dans Chapdelaine, 1992). C'est un sol non pierreux de pente faible. Des analyses réalisées par Nemati et al. (2001) sur les trente premiers centimètres du sol, permettent de déterminer que ce sol appartient à la classe texturale de loam limoneux (Tableau 1).

Tableau 1 : Fraction granulométrique du sol du site étudié

| Couche (cm) | Sable (%) | Limon (%) | Argile (%) |
|---|---|---|---|
| 0-2.5 | 26.6 | 57.1 | 16.3 |
| 2.5-5 | 21.4 | 60.3 | 18.3 |
| 5-7.5 | 17.5 | 62.1 | 20.4 |
| 7.5-10 | 14.3 | 61.5 | 24.1 |
| 10-12.5 | 13.3 | 60.9 | 25.7 |
| 12.5-15 | 13.5 | 61.2 | 25.4 |
| 15-17.5 | 9.7 | 64.0 | 26.3 |
| 17.5-20 | 9.7 | 64.5 | 25.7 |
| 20-25 | 8.1 | 67.5 | 24.5 |
| 25-30 | 6.8 | 71.1 | 22.1 |
| Moyenne | 14.1 | 63.0 | 22.9 |

### 3.1.3 Dispositif expérimental

La parcelle étudiée a une dimension d'environ 50 m par 20 m et est confinée entre le Chemin du Roy du côté sud et un terrasse alluviale du côté nord. En 1991, douze stations de quatre bougies poreuses situées à 30, 55, 80 et 105 cm de profondeur ont été installées sur le site. Deux modes de travail de sol, un labour et un semis direct, ont été implantés en duplicata en 1998 selon une configuration présentée à la figure 5.

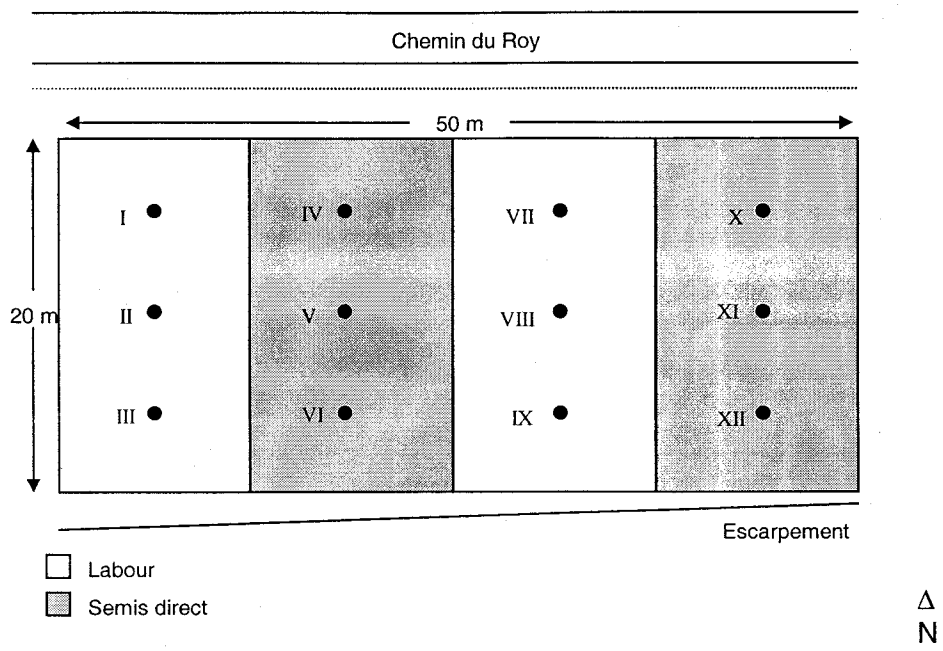



Figure 5 : Schéma de la parcelle expérimentale avec localisation des stations de bougies à quatre profondeurs

### 3.1.4 Pratiques culturales

Le site expérimental était en jachère avant d'être utilisé pour une première étude à l'été 1991 (Chapdelaine, 1992). Puis, à nouveau, aucune pratique culturale n'a été effectuée de 1991 à 1998, année de départ de cette recherche. Puisque l'été 1991 fait déjà l'objet d'un mémoire (Chapdelaine, 1992), les descriptions tiennent compte exclusivement des années 1998, 1999 et 2000. Le tableau 2 présente le calendrier des opérations réalisées pendant ces trois années d'expérimentation. Il est à noter que les travaux de sol sont effectués seulement sur le traitement « labour ».

Tableau 2 : Calendrier des pratiques culturales

| | Date | Type | Dose |
|---|---|---|---|
| Travail du sol | 1998-06-09 | Labour | |
| | 1998-11-04 | Labour | |
| | 1999-05-17 | Hersage | |
| | 1999-11-15 | Labour | |
| | 2000-06-05 | Hersage | |
| | 2000-10-26 | Labour | |
| Semis | 1998-06-10 | Maïs-grain (2375 UTM) | |
| | 1999-05-21 | Maïs-grain (3500 UTM) | |
| | 2000-06-07 | Maïs-grain (3500 UTM) | |
| Fertlisation | 1998-06-10 | 10-30-20 (bande) | 420 kg/ha |
| | 1998-07-27 | 27-0-0 (bande) | 290 kg/ha |
| | 1999-05-21 | 5-20-20 (à la volée) | 107 kg/ha |
| | 1999-05-21 | 15-22-22 (bande) | 223 kg/ha |
| | 1999-06-22 | 27-0-0 (bande) | 360 kg/ha |
| | 2000-06-07 | 10-20-30 (bande) | 300 kg/ha |
| | 2000-07-05 | 27-0-0 (bande) | 320 kg/ha |
| Herbicide | 1998-05-18 | Glyphosate | 1.78 kg m.a./ha |
| | 1998-06-22 | Métolachlore | 2.16 kg m.a./ha |
| | 1998-06-22 | Atrazine | 1.13 kg m.a./ha |
| | 1999-06-05 | Métolachlore | 2.16 kg m.a./ha |
| | 1999-06-05 | Atrazine | 1.13 kg m.a./ha |
| | 1999-06-05 | Glyphosate | 0.9 kg m.a./ha |
| | 2000-06-09 | Glyphosate | - |
| | 2000-06-29 | Glyphosate | 0.9 kg m.a./ha |
| Fauche | 1998-05-28 | | |
| | 1998-10-27 | | |
| | 1999-11-10 | | |
| | 2000-10-25 | | |

L'abandon de la parcelle pendant plusieurs années a favorisé l'établissement d'une prairie de graminées non ensemencées. Au printemps 1998, l'utilisation d'un désherbant et un labour ont été nécessaires afin d'implanter le dispositif expérimental de cette recherche. Pour les années subséquentes, les pratiques conventionnelles de travail du sol employées au Québec étaient respectées : un labour à l'automne pour enfouir les résidus de culture et un hersage au printemps pour la préparation du lit de

semence. Les travaux sont exécutés en duplicata pour prendre en considération la variabilité spatiale du sol. Pour faciliter le travail de la machinerie, la préparation du lit de semence ainsi que le semis sont orientés nord-sud. Afin d'éviter d'endommager la tubulure enfouie dans le sol, le labour était exécuté par un motoculteur à une profondeur de 20 cm. L'utilisation de désherbants fut requis pour éviter l'invasion d'adventices. À l'automne, la fauche du maïs a été réalisée au même moment pour les deux traitements à la différence que dans les parcelles en semis direct, les parties inférieures des plants demeurent sur place tandis que dans les parcelles travaillées, ils sont enfouis par le labour.

En 1998, le maïs cultivé était un cultivar typiquement utilisé dans cette région du Québec. Tandis que la variété de maïs utilisée en 1999 et 2000 était, pour les fins de recherche, un maïs transgénique ayant des besoins en azote et en eau plus élevés nécessitant par ailleurs un nombre important d'unités thermiques (3500 UTM). Les fertilisations effectuées sont celles recommandées pour la culture de maïs-grain en sol québécois (indépendamment de la spécificité des besoins du maïs transgénique). Ces recommandations varient de 120 à 170 kg N/ha selon la zone climatique, dont 20 à 50 kg N/ha en bande au semis (CPVQ, 1996b). Pour les rangées où se situent les stations d'échantillonnage, le semis et les applications d'engrais sont réalisés manuellement en respectant les doses prescrites. Les quantités totales d'azote appliquées sur les cultures de maïs de 1998, 1999 et 2000 sont respectivement de 120.3 kg N/ha, 136 kg N/ha et 116,4 kg N/ha.

# 3.2 Échantillonnage

## 3.2.1 Eau interstitielle

Des bougies poreuses installées en 1991 sur la parcelle en douze stations et à quatre profondeurs (30, 55, 80 et 105 cm) permettent l'échantillonnage d'eau interstitielle. Ces

bougies (modèle 1920) sont fabriquées par Soil Moisture Equipment corp. à Santa Barbara en Californie (Gauthier, 1991) (Figure 6).

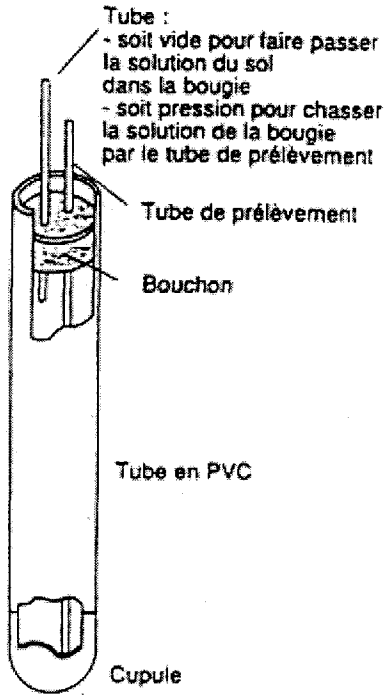



Figure 6 : Description d'une bougie poreuse (Ballif et Muller, 1990)

Pour ne pas gêner les façons culturales et éviter qu'elles se retrouvent sous une zone compactée, les bougies poreuses ont été installées à 1.20 m au sud des lieux de collecte. De plus, afin d'éviter les écoulements préférentiels, elles ont été placées à $45^0$ et sous un élément de sol n'ayant pas été remanié.

Pour récupérer l'eau du sol, il suffit de créer une succion durant quelques heures qui permet à la solution de migrer par diffusion à l'intérieur de la bougie poreuse et ce, jusqu'au rétablissement de l'équilibre entre les deux milieux. Pour le prélèvement, une pression est appliquée à l'intérieur de la bougie et la solution s'écoule par le tube de prélèvement.

Une dépression d'environ 60 KPa a été jugée suffisante pour créer une différence de tension (Trépanier, 1992). Les échantillonnages d'eau interstitielle ont été effectués après des précipitations importantes (susceptibles de favoriser l'infiltration et le lessivage), avec une fréquence minimale bimensuelle. La solution du sol est récupérée dans des contenants en HDPE (Nalgene Compagny) de 100 mL et placée dans une glacière afin d'éviter les variations de teneur en azote minéral. Pour quelques campagnes d'échantillonnages, la solution récupérée était également utilisée pour l'analyse des pesticides et les contenants devaient être préalablement rincés à l'acétone puis plusieurs fois à l'eau distillée. La plupart du temps, les échantillons étaient conservés en chambre froide et analysés dans les 24 heures suivant leur récolte. Le cas échéant, ils étaient immédiatement congelés à -18$^0$C pour être décongelés dans un bain-marie le jour de l'analyse.

### 3.2.2 Sol remanié

Des échantillonnages de sol destinés à évaluer les contenus en nitrates du sol ont aussi été réalisés. Pour cela, quatre échantillons distribués aléatoirement dans les inter-rangs de chaque sous-parcelle ont été prélevés à quatre profondeurs (25, 50, 75 et 100 cm), deux fois en 1998, cinq fois en 1999 et à trois reprises en 2000. Ces profondeurs d'échantillonnages ont été déterminées afin de correspondre aux profondeurs d'échantillonnages d'eau interstitielle (30, 55, 80 et 105 cm).

Une tarière a permis l'échantillonnage de sol qui était ensuite conservé dans un sac fermé hermétiquement puis placé dans une glacière pour le préserver de la chaleur externe. Comme pour les échantillons d'eau, le sol a été placé en chambre froide pour l'analyse immédiate ou congelé le cas échéant. Selon Lafleuriel (1990), une conservation au réfrigérateur est valable pour une durée n'excèdent pas 48 heures. La congélation permet une conservation plus longue mais elle n'est fiable qu'à condition que la congélation et la décongélation soient rapides.

### 3.2.3 Sol non remanié

Pour chaque année d'expérimentation, un échantillonnage de sol non remanié a été réalisé à l'aide d'un préleveur à douilles au milieu de la saison de croissance afin d'évaluer la variation des paramètres physiques induite par les deux modes de travail de sol. Encore une fois, quatre échantillons ont été prélevés aléatoirement dans les inter-rangs de chaque sous-parcelle à trois profondeurs différentes : en surface (0 à 6 cm), à 30 cm et à 70 cm. Afin de conserver la structure de l'échantillon intacte, le sol demeurait dans le cylindre ayant permis son prélèvement tout au long des analyses en laboratoire.

## 3.3 Analyses en laboratoire

### 3.3.1 Teneur en nitrates de l'eau interstitielle

Les concentrations en nitrates sont déterminées par méthode potentiométrique à l'aide d'électrodes spécifiques (Cole Parmer 27502-31; Orion Research 97-07). Cette méthode est jugée excellente par Page (1982) lorsqu'un niveau de haute précision n'est pas requis.

L'analyse des échantillons nécessite un minimum de 25 mL de solution du sol. Afin d'éviter les variations ioniques, tel qu'indiqué dans le manuel d'utilisation (Orion Research, 1996), 1 mL (50 :1) de solution d'ions ISA (Ionic Strength Ajustor) est ajouté à la solution pour ajuster la force ionique. Une agitation magnétique constante doit être maintenue lors de l'analyse. L'utilisation de standard à concentrations définies en nitrates permet de tracer une courbe de calibration. Les concentrations sont obtenues par cette courbe. Une seule mesure des échantillons d'eau a été évaluée lors de l'analyse. Pour deux échantillonnages de l'année 2000 (18 et 21 août), les concentrations en nitrates sont déterminées par méthode colorimétrique à l'hydrazine (Eaton et al., 1995).

### 3.3.2 Teneur en nitrates du sol

Pour les échantillons de sol, une extraction 2:1 (50 mL d'eau distillée pour 25 g de sol humide) et une agitation mécanique d'une heure sont requis pour remettre les nitrates du sol en solution. Comme pour les nitrates dans l'eau, 1 mL (50 :1) de solution d'ions ISA (Ionic Strength Ajustor) est ajouté à la solution pour en ajuster la force ionique . Les échantillons doivent ensuite être centrifugés pendant 10 minutes à 3000 RPM et l'analyse est réalisée une seule fois à l'aide d'une électrode spécifique aux nitrates dans le liquide surnageant et par colorimétrie pour une date d'échantillonnage de l'année 2000 (4 août).

Parallèlement, la teneur en eau des échantillons de sol est déterminée en les plaçant à l'étuve à $105^0$C pendant une période d'environ 24 heures et en soustrayant ce poids au poids humide de départ. Par cette méthode, il ne reste dans le sol que l'eau de constitution des éléments solides (Chanzy et al., 1997).

### 3.3.3 Caractérisation des paramètres physiques

A) CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE

Pour déterminer la conductivité hydraulique de la parcelle à l'étude, l'expérience de Darcy a été recréée en laboratoire en utilisant un dispositif expérimental (Figure 7).

Les échantillons de sol non remaniés doivent être en tout temps à saturation pendant la durée de cette expérience. Pour ce faire, l'alimentation en eau doit être suffisamment élevée pour permettre l'évacuation d'un débit s'échappant du dispositif et créer de cette façon une charge constante. La vitesse d'écoulement est calculée en mesurant le volume d'eau ($V$) recueilli après un certain laps de temps ($\Delta t$). La hauteur de sol ($\Delta L$) présente à l'intérieur du cylindre doit être mesurée après tassement.

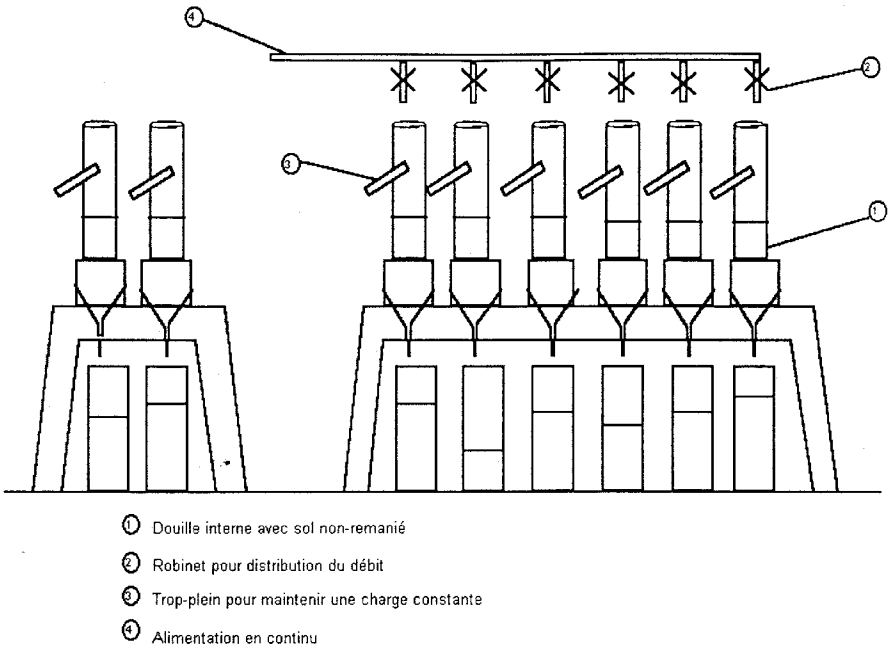



Figure 7 : Dispositif pour évaluer la conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique est par la suite déterminée par l'équation de Darcy qui s'exprime de la façon suivante :

$$Ksat = \frac{V}{\Delta t} \times \frac{\Delta L}{\Delta H} \times \frac{1}{A}$$

où : Ksat = conductivité hydraulique saturée (cm/s)
V = volume d'eau écoulée (mL)
Δt = temps nécessaire à l'écoulement de V (s)
ΔL = hauteur de sol dans la douille après tassement (cm)
ΔH = hauteur d'eau (charge) totale (cm)
A = surface de la douille ($cm^2$)

À des fins de comparaison, une caractérisation sommaire de la conductivité hydraulique a été effectuée au champ à 30 cm pour une parcelle en labour en 1999 à l'aide de l'infiltromètre à charge constante de Côté (Figure 8). Cet appareil détermine le débit qui s'infiltre au travers d'une surface de sol dont la géométrie est connue (Banton et al., 1991). Il suffit de creuser un trou de 10 à 15 cm de diamètre et de profondeur désirée

puis d'y insérer l'infiltromètre. En s'assurant que le cylindre est alimenté en eau de façon constante (charge constante) à partir du réservoir, on mesure les volumes percolés dans le sol en fonction du temps.

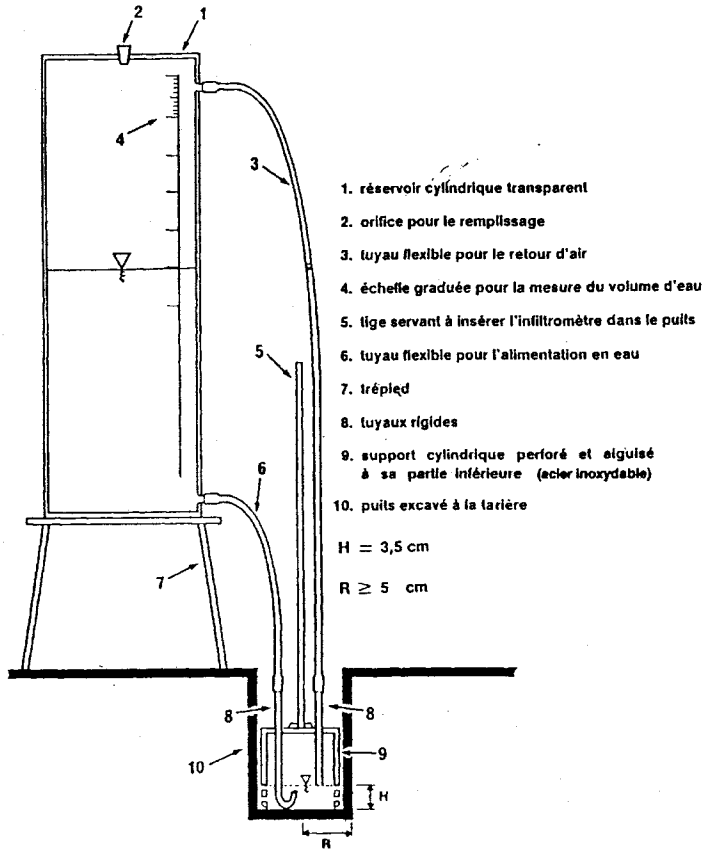



Figure 8 : Schéma descriptif de l'infiltromètre à charge constante de Côté (Banton et al., 1991)

## B) POROSITÉ DE DRAINAGE

Deux méthodes d'analyses ont été utilisées pour l'obtention de la porosité de drainage des échantillons. En 1998, les cylindres ont été déposés à saturation sur un tamis jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'eau s'écoulant par gravité et protégés par un plastique pour s'assurer qu'il n'y ait pas d'évaporation en surface. Pour 1999 et 2000, la porosité de drainage est obtenue à l'aide d'une table de tension (Nemati et al., 2000). Les

cylindres installés sur des billes de verre sont soumis à une tension de 150 centimètres pendant plusieurs heures.

$$Porosité\ de\ drainage\left(m^3 / m^3\right) = \frac{poids\ saturé(g) - poids\ ressuyé(g)}{volume\ de\ sol\ dans\ le\ cylindre(cm^3)}$$

## C) MASSE VOLUMIQUE APPARENTE SÈCHE, CAPACITÉ AU CHAMP ET POROSITÉ

Le poids sec des échantillons de sol est obtenu en plaçant les douilles à l'étuve pendant une période d'au moins 24 heures à 105$^0$C. La masse volumique apparente sèche, la capacité au champ et la porosité du sol sont calculées à partir des équations suivantes :

$$Masse\ volumique\ apparente\ sèche\left(g / cm^3\right) = \frac{poids\ \sec(g)}{volume\ de\ sol\ dans\ la\ douille(cm^3)}$$

$$Capacité\ au\ champ\left(m^3 / m^3\right) = \frac{poids\ ressuyé(g) - poids\ \sec(g)}{volume\ de\ sol\ dans\ la\ douille(cm^3)}$$

$$Porosité\left(m^3 / m^3\right) = \frac{poids\ saturé(g) - poids\ \sec(g)}{volume\ de\ sol\ dans\ la\ douille(cm^3)}$$

## D) MATIÈRE ORGANIQUE

La détermination de la quantité de matière organique retrouvée dans le sol est obtenue par perte au feu. La méthode consiste à prendre 20 g de sol sec et à le placer dans un four à 375$^0$C pendant 16 heures. Après ce laps de temps, on ne retrouve plus que la matière minérale du sol (cendres). Ainsi, le pourcentage de matière organique peut être calculé :

$$Matiere\ organique(\%) = \frac{poids\ sol\ \sec(g) - poids\ des\ cendres(g)}{poids\ sol\ \sec(g)} \times 100$$

Il est à noter que les échantillons de sol n'ont pas été tamisés à 2 mm avant leur analyse.

# 3.4 Modélisation

## 3.4.1 Le modèle AgriFlux

Le logiciel AgriFlux 2.0 (Banton et Larocque, 1997) est un modèle mathématique permettant de simuler les pertes d'eau, de nitrates et de pesticides dans l'environnement. Son utilisation à l'avantage d'offrir une alternative pratique entre les modèles nécessitant un grand nombre de paramètres souvent difficilement mesurables et les modèles empiriques répondant à des besoins spécifiques. Par ailleurs, AgriFlux est un modèle mécaniste-stochastique alliant la représentation physique des processus de transformation et de transfert des contaminants et la variabilité ou l'incertitude sur les paramètres. L'approche Monte Carlo est utilisée afin de générer un grand nombre de simulations d'un même scénario. AgriFlux 2.0 est composé de trois modules principaux, soit le module HydriFlux, qui simule le transport de l'eau dans le sol (précipitations, ruissellement, infiltration, prélèvement d'eau par la culture, évaporation, percolation et drainage), le modèle NitriFlux, qui simule le cycle et le transport de l'azote (amendements, ruissellement, minéralisation, immobilisation, nitrification, dénitrification, prélèvement d'azote par la culture, drainage et lessivage) et le module PestiFlux qui simule les transformations des pesticides et de leurs sous-produits (application, volatilisation, ruissellement, adsorption et désorption lente et rapide, biodégradation, hydrolyse, drainage et lessivage) (Banton et Larocque, 1997). Pour cette recherche, seuls les modules HydriFlux et NitriFlux sont employés.

Comme représenté à la figure 9, le module HydriFlux discrétise le profil du sol en horizons ou couches de caractéristiques différentes. Chaque couche est gérée comme un réservoir et l'écoulement vers une couche inférieure a lieu lorsque le contenu en eau excède le contenu en eau résiduel. Le point de flétrissement sert de limite inférieure pour le prélèvement par les plantes et l'évaporation. Le module HydriFlux est essentiel à toutes les simulations car les contaminants migrent avec l'eau.

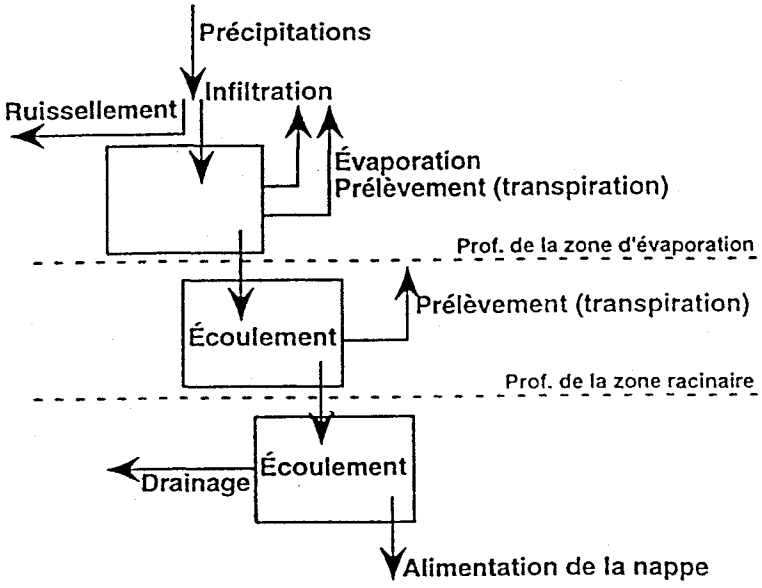



Figure 9 : Cycle de l'eau utilisé dans HydriFlux (Larocque et Banton, 1995)

Le module NitriFlux représente les phénomènes régissant le cycle de l'azote (Figure 10). Les réservoirs de chaque couche du sol contiennent les formes organiques (litière, fèces et humus) et inorganiques (ammonium et nitrates) de l'azote. Seuls les nitrates sont considérés comme pouvant migrer avec l'eau et ainsi pouvant être transférés vers les couches inférieures via les flux d'eau générés par le module HydriFlux. Les processus biogéochimiques représentés dépendent des apports extérieurs (fertilisation, incorporation des résidus de récolte) et des pertes (prélèvement par les plantes, lessivage) à la culture.

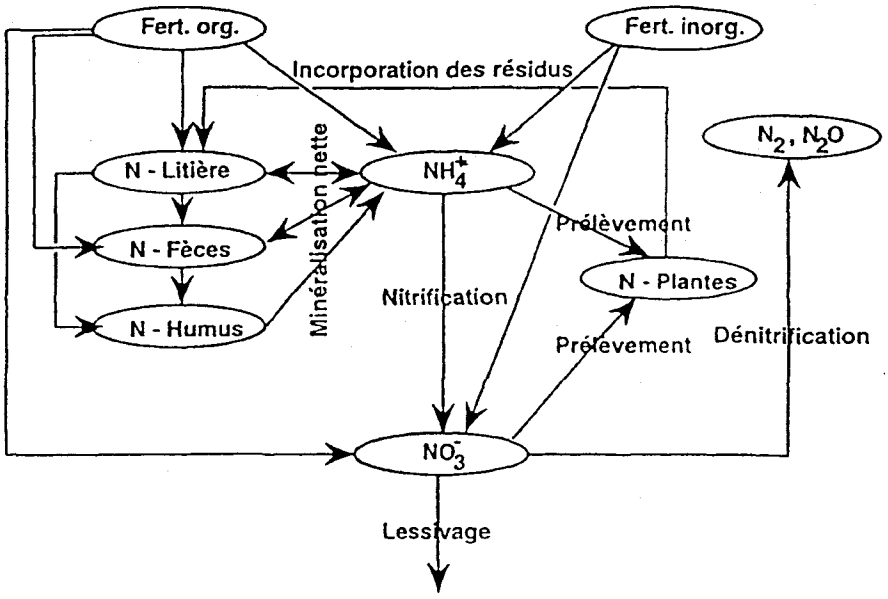



Figure 10 : Cycle de l'azote utilisé dans NitriFlux (Larocque et Banton, 1995)

## 3.4.2 Paramètres pour l'application du modèle AgriFlux

Les valeurs d'entrées utilisées dans le modèle AgriFlux se retrouvent à l'annexe E.

Pour permettre au système de tendre vers un certain équilibre, les simulations sont effectuées sur une période comprise entre le 1er octobre 1988 et le 31 décembre 2000. Les pratiques culturales réalisées en 1991 sont entrées dans le modèle mais seules les saisons 1998, 1999 et 2000 sont comparées aux résultats obtenus sur le terrain. Un nombre de 100 simulations de Monte Carlo a été jugé suffisant pour bien représenter les moyennes et écarts types des résultats. Les données climatiques proviennent de la station de l'aéroport de Québec (Environnement Canada) située à environ 15 km du site.

Le profil du sol est divisé en cinq couches (15, 30, 55, 80 et 105 cm) afin de correspondre le plus possible aux profondeurs des échantillons d'eau (30, 55, 80 et 105

cm), de sol (25, 50, 75 et cm) et de sol non remanié (Surface, 30 et 70 cm). Dû à l'absence d'une différenciation distincte entre les deux modes de travail de sol et entre les années d'expérimentation, les paramètres physiques utilisés sont une moyenne des deux traitements et trois années d'expérimentation (masse volumique apparente, conductivité hydraulique, porosité et matière organique) ou proviennent de Rawls et Brakensiek (1989) (capacité au champ et point de flétrissement).

Les dates relatives aux cycles culturaux respectent le calendrier cultural suivi. Le maïs cultivé en 1998 est un cultivar typiquement utilisé dans la région de Québec. Ses besoins en eau et en azote proviennent de relevés de travaux de la littérature (Larocque et Banton, 1995). En 1999 et 2000, la variété de maïs utilisée avait des besoins en azote plus élevés. Des digestions à l'acide ont permis de déterminer la quantité d'azote total retrouvée dans les plants et ainsi d'obtenir leurs besoins azotés. Les besoins en eau sont déterminés proportionnellement à cette valeur.

Les fertilisations respectent les dates et quantités appliquées sur la parcelle. Les contenus en $NH_4^+$ et $NO_3^-$ des engrais sont obtenus du fabricant. Deux fertilisations organiques représentent les retournements de prairies de 1991 et de 1998.

Les paramètres relatifs au cycle de l'azote n'ont pas été mesurés et proviennent d'applications similaires du modèle (Larocque et Banton, 1996 ; Larocque et Banton, 1995). Les contenus en azote du réservoir humus sont calculés à partir de la densité et des quantités en matière organique du sol.

## 3.5 Analyse statistique

Des analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel SAS pour Windows version 6.12. Pour cette étude, la méthode choisie est l'analyse de variance ou ANOVA. L'analyse de la variance a pour but de comparer les moyennes de plusieurs populations supposées normales et de même variance, à partir d'échantillons aléatoires, simples et indépendants les uns des autres (Dagnelie, 1992). Lorsqu'il existe des différences

importantes entre les moyennes des populations, ce qui est souvent le cas lorsqu'il y a seulement deux répétitions, on doit s'attendre à ce qu'il en soit de même pour les échantillons.

Trois comparaisons différentes ont été réalisées pour les contenus en nitrates du sol et pour les paramètres physiques. Tout d'abord, nous avons comparé l'effet des deux modes de travail de sol. Par la suite, nous avons analysé leur évolution dans une même saison pour les contenus en nitrates du sol et sur trois ans pour les paramètres physiques. Puis, nous avons observé les différences par profondeur.

Le niveau de signification des tests a été fixé à 5%. L'annexe D présente les résultats obtenus.

# 4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les trois années d'étude ont tout d'abord permis de mesurer la percolation des nitrates et les changements aux caractéristiques physiques du sol induits par les deux pratiques culturales. La durée de la recherche échelonnée sur trois saisons de croissance permet d'observer leur évolution temporelle. Également, la répartition des échantillonnages en profondeur dresse un portrait du profil du sol sur toute la zone racinaire.

L'utilisation du modèle AgriFlux dans ce travail permet une comparaison entre les concentrations en nitrates dans l'eau et les contenus en nitrates du sol mesurés et simulés et éventuellement permet de résoudre certaines ambiguïtés quant à l'interprétation des résultats.

## 4.1 Concentrations en nitrates dans l'eau interstitielle

Par les bougies poreuses installées sur la parcelle expérimentale, 48 échantillons d'eau (12 stations, 4 profondeurs) peuvent potentiellement être prélevés pour évaluer les concentrations en nitrates de la solution du sol. Toutes les valeurs recueillies lors des trois années d'échantillonnage se retrouvent à l'annexe A. En 1998, les trois premières dates échantillonnées n'ont pas été retenues pour les analyses. Une défectuosité de l'électrode spécifique aux nitrates est responsable des concentrations élevées anormalement retrouvées. Dans cette section, les graphiques des résultats présentent les moyennes et écarts types mesurés en mg N/L (mg $N\text{-}NO_3^-$/L) pour la durée de l'expérience. Afin d'obtenir des moyennes représentatives de la réalité, seules les dates ayant un minimum de trois échantillons d'eau par profondeur et par type de travail du sol, donc ayant la moitié de leurs échantillons potentiels, ont été conservées. L'absence d'échantillonnage durant les périodes hivernales et de faibles précipitations provoquent à l'occasion certaines discontinuités dans les courbes des graphiques des résultats.

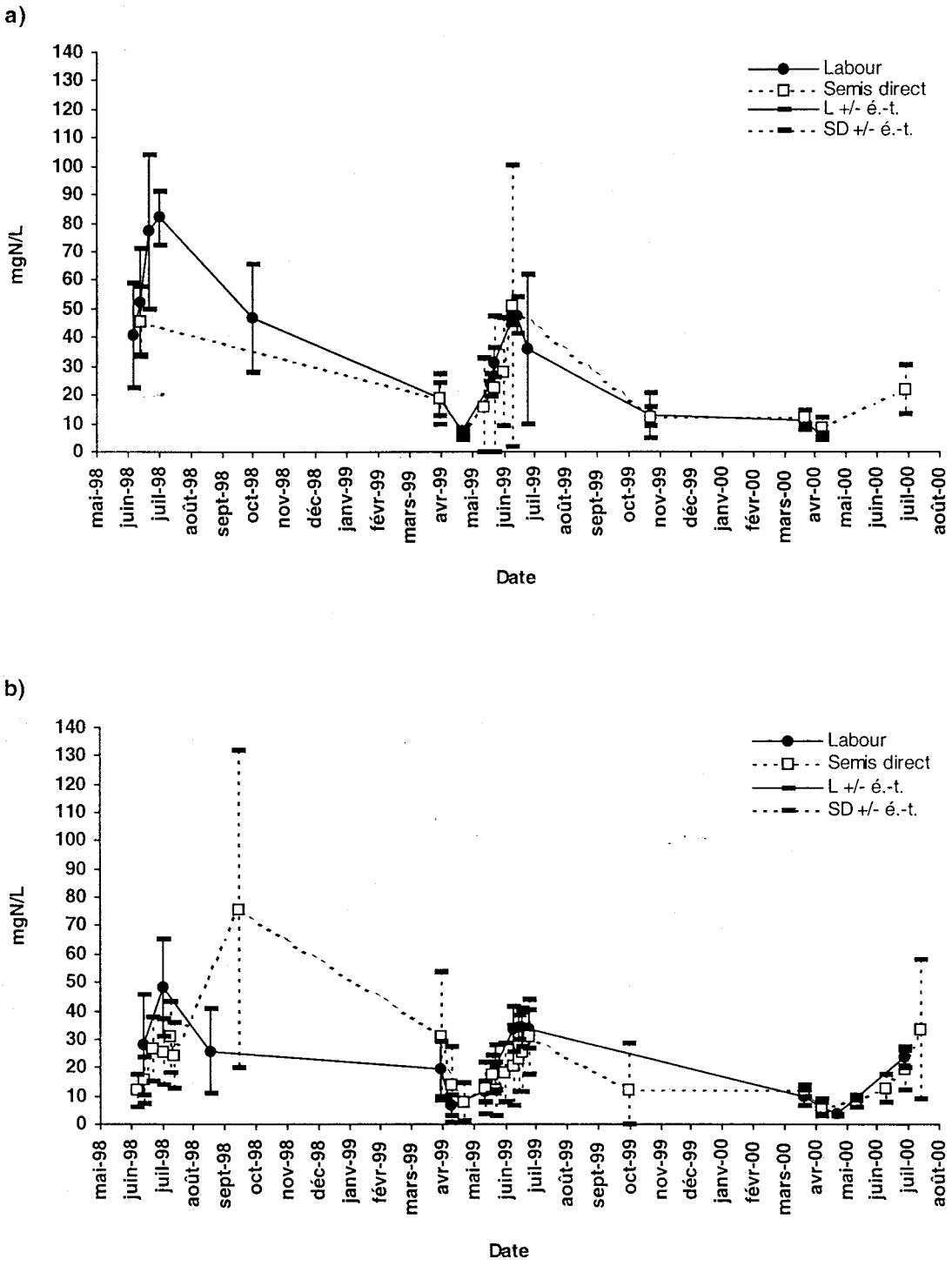



Figure 11 : Comparaison des concentrations en nitrates dans l'eau interstitielle des deux modes de travail de sol a) à 30 cm et b) à 55 cm

### 4.1.1 Comparaison par traitement

Les figures 11 et 12 comparent les moyennes et écarts types des concentrations en nitrates de l'eau interstitielle pour les deux traitements à chaque profondeur analysée. Les saisons estivales 1998 et 1999 ont été particulièrement sèches et il fut impossible d'obtenir suffisamment d'eau lors de certains échantillonnages. On remarque que peu de valeurs sont disponibles sur de grandes périodes diminuant ainsi l'information pour la comparaison. Aussi, l'enveloppe définie par les écarts types est élevée et rend d'autant plus difficile l'observation des différences entre les travaux de sol. Cette grande variabilité peut provenir de l'hétérogénéité structurale du sol qui provoque à certains endroits des écoulements rapides (Addiscott, 1990). Ces écoulements préférentiels se produisent au travers de fentes et au travers de trous de vers de terre et de racines. Également, la présence d'une grande continuité entre les pores, et principalement entre les macropores, favorise une infiltration rapide. Ainsi, les concentrations retrouvées en profondeurs proviennent soit des écoulements lents au travers de la matrice du sol, soit des écoulements rapides. Également, cette variabilité peut être reliée aux faibles précipitations mesurées. Le nombre réduit d'échantillons diminuant la représentativité des mesures pour plusieurs périodes de la saison de croissance.

Peu d'écarts de concentrations sont observés entre les deux traitements. Mais malgré tout, il est possible de constater quelques distinctions. À 30 cm, on note des concentrations supérieures pour le labour en 1998. Par contre, on observe peu de différences entre les traitements pour les années 1999 et 2000. À 55 cm, les concentrations en nitrates demeurent légèrement plus élevées au labour pour les trois années d'expérimentation. On remarque une exception à l'automne 1998 mais elle présente une très grande variabilité. Apparemment, l'enfouissement de la matière organique fraîche provenant de la prairie de graminées conduit à une minéralisation accrue de l'azote et provoque des concentrations plus élevées pour le labour aux premiers centimètres du profil. En semis direct, la non incorporation des débris organiques diminue leur disponibilité à la minéralisation. Aussi, la présence de résidus

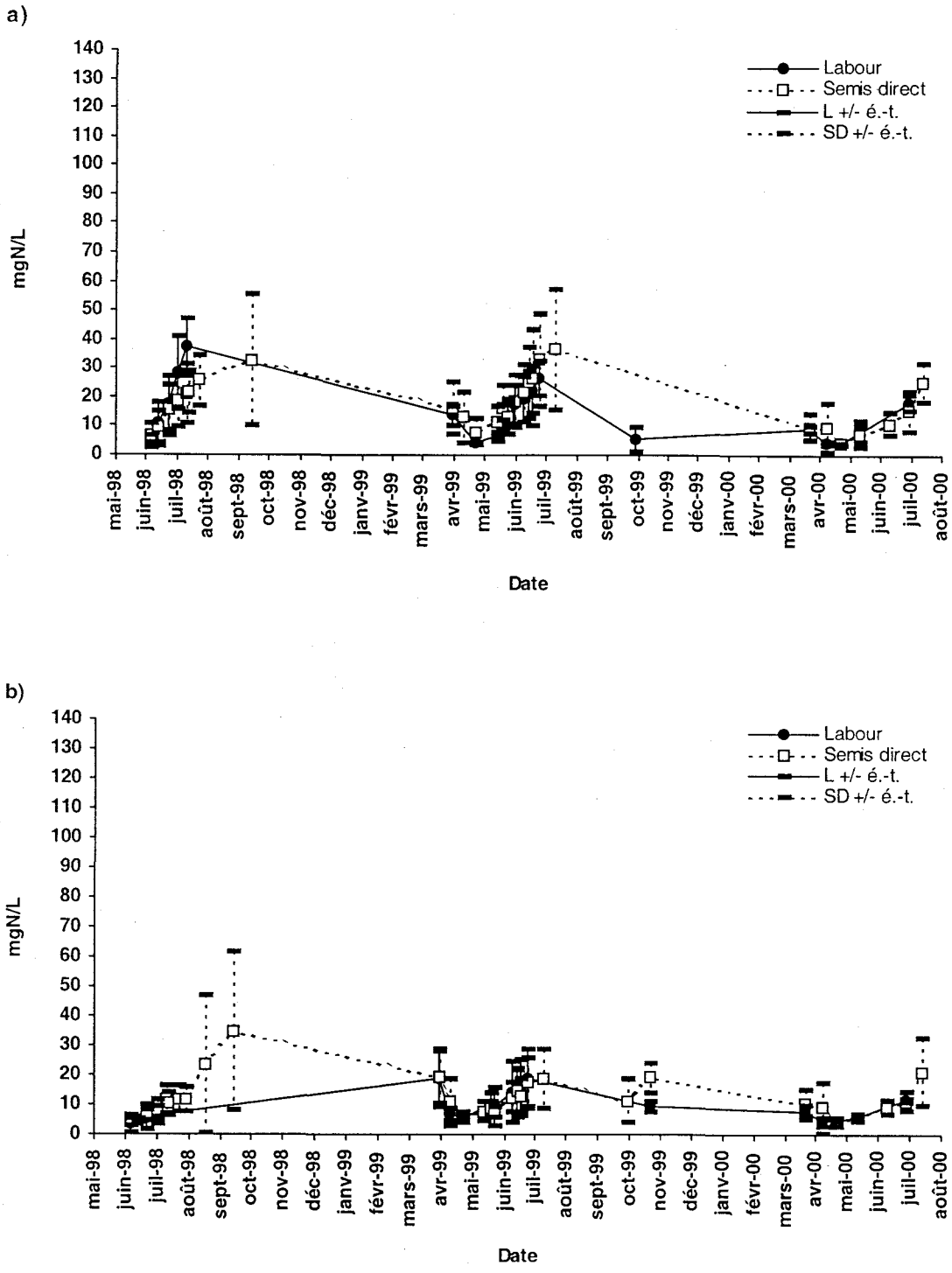



Figure 12 : Comparaison des concentrations en nitrates dans l'eau interstitielle des deux modes de travail de sol a) à 80 cm et à b) à 105 cm

en surface augmente l'humidité et favorise le ralentissement de la minéralisation des horizons supérieurs.

En plus de la variabilité élevée, deux hypothèses peuvent être amenées pour expliquer l'absence d'une différence distincte entre les deux traitements. Premièrement, selon Germon et al. (1994), le semis direct provoque souvent peu de variations en azote car la diminution des vitesses de minéralisation est compensée par l'augmentation des quantités potentiellement minéralisables. Deuxièmement, d'après Taureau et Mary (1995), l'incorporation de résidus végétaux riches en carbone provoque une immobilisation accrue de l'azote minéral par les micro-organismes et diminue les quantités retrouvées dans la solution du sol.

Pour les échantillonnages d'eau provenant des profondeurs inférieures (Figure 12), les concentrations en nitrates semblent légèrement plus élevées pour le semis direct. L'absence de travail du sol semble avoir facilité les mouvements verticaux de l'eau. La porosité provoquée par les racines et les écoulements préférentiels dans les macropores ont été maintenus par l'absence de travail mécanique et conduisent à une augmentation de l'infiltration dans le profil du sol. En effet, le nombre d'échantillons d'eau recueillis pour les trois années d'expérimentation est de 30 % supérieur pour le semis direct (530 échantillons) que pour le labour (372 échantillons).

L'augmentation des concentrations en nitrates provoquée par la minéralisation accrue des fertilisants organiques en travail conventionnel semble donc affecter principalement les premiers horizons du profil. En profondeur, la conservation de la porosité contribue principalement aux différences observées entre les deux traitements. Si la tendance est maintenue, la solution du sol s'échappant de la zone racinaire et pouvant potentiellement contaminer les eaux souterraines serait autant ou sinon plus concentrée en nitrates en absence qu'en présence de travail du sol.

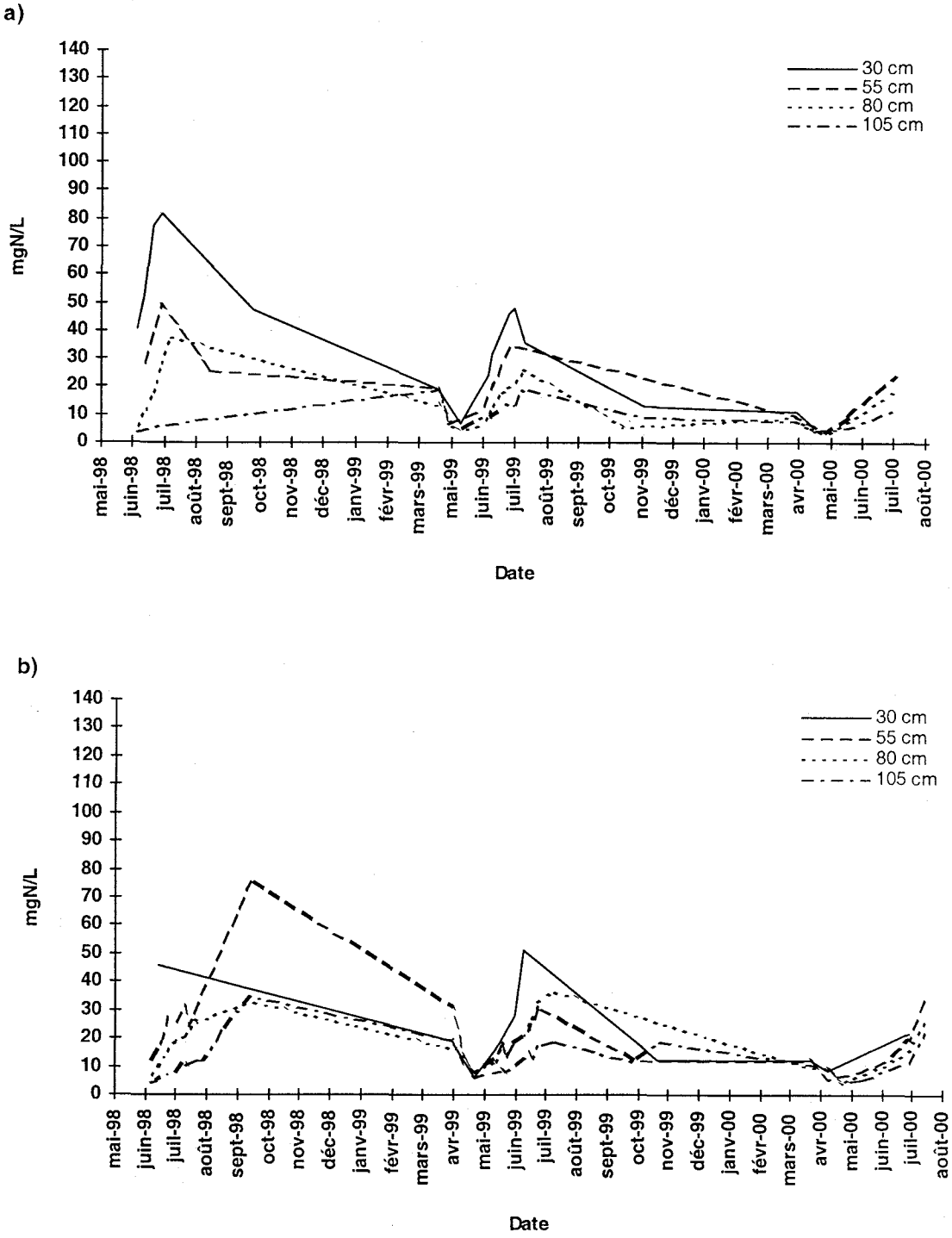



Figure 13 : Concentrations en nitrates dans l'eau interstitielle aux quatre profondeurs mesurées a) pour le labour et b) pour le semis direct

### 4.1.2 Comparaison par profondeur

À l'exception encore une fois d'une valeur extrême de l'automne 1998 à 55 cm en semis direct, on observe en général sur la figure 13 une atténuation des quantités en nitrates avec la profondeur. Les concentrations moyennes diminuent pendant la saison de croissance sur toute la période à l'étude de 36.0 mg N/L (30 cm) à 9.6 mg N/L (105 cm) pour le labour et de 22.7 mg N/L (30 cm) à 12.3 mg N/L (105 cm) pour le semis direct. Également, la percolation des nitrates vers les horizons inférieurs est visible par le décalage dans le temps des pics de concentrations. Ceux-ci atteignent leur valeur maximale suite au premier épandage d'engrais au semis lorsque la plante ne peut utiliser immédiatement cette source d'éléments nutritifs. Par la suite, on observe une croissance soutenue des concentrations en début de saison suite à la reprise de la minéralisation et aux apports de fertilisants sur la culture, puis une diminution suite aux prélèvements d'eau et de nitrates par les plants.

Malgré la diminution des concentrations en nitrates avec l'augmentation de la profondeur, les concentrations retrouvées à 105 cm pour les deux modes de travail de sol sont à plusieurs reprises supérieures aux normes établies par santé Canada (10 mg N/L) concernant la qualité des eaux de consommation. Plus de 39 % des échantillons d'eau analysés dépassaient cette norme. Plus précisément, respectivement 29.7 % et 44.7 % pour le labour et le semis direct. Ce résultat suggère que même en respectant les recommandations provinciales de fertilisations, les risques de pollution diffuse agricole demeurent présents.

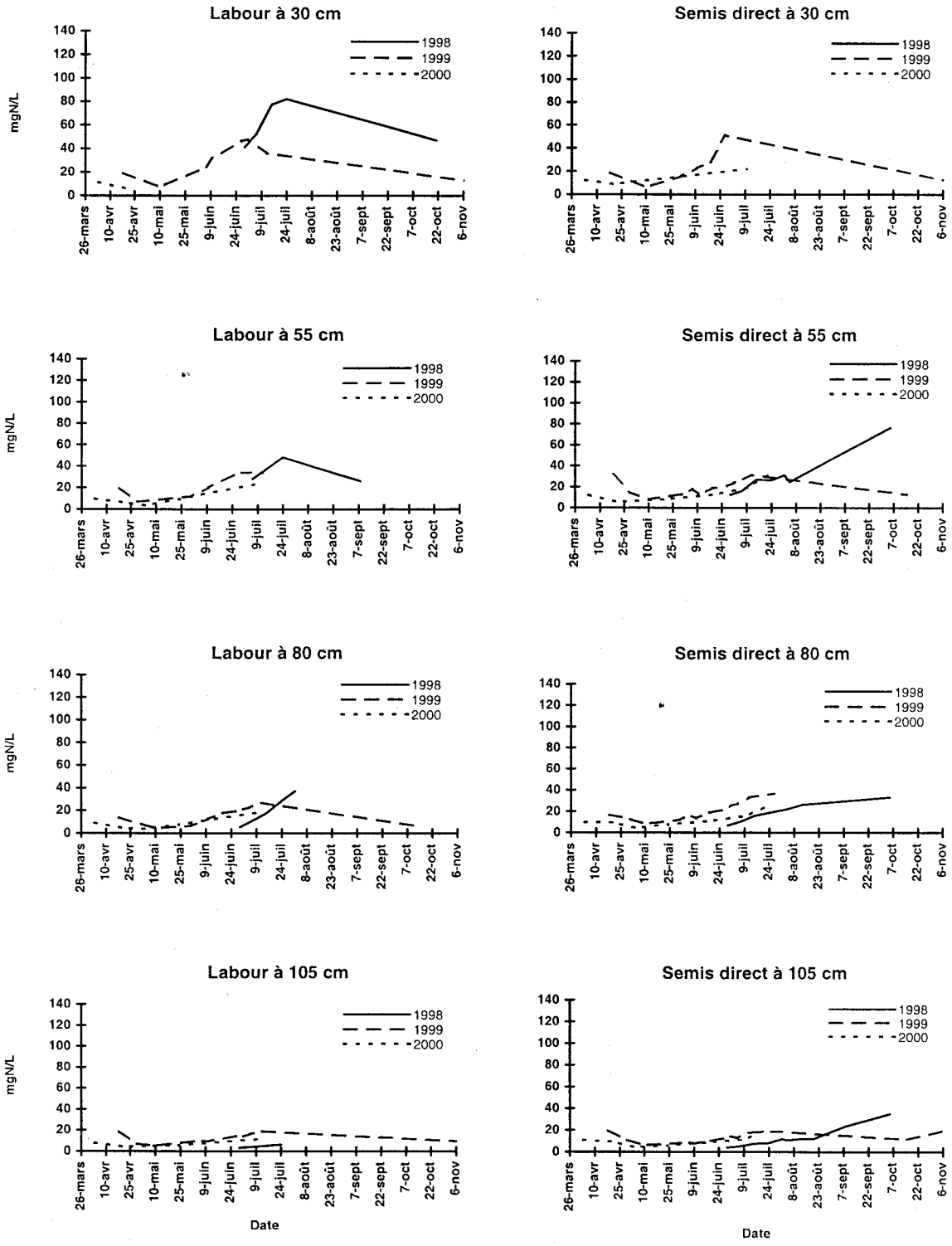



Figure 14 : Évolution des concentrations en nitrates dans l'eau interstitielle pour les trois saisons de croissance

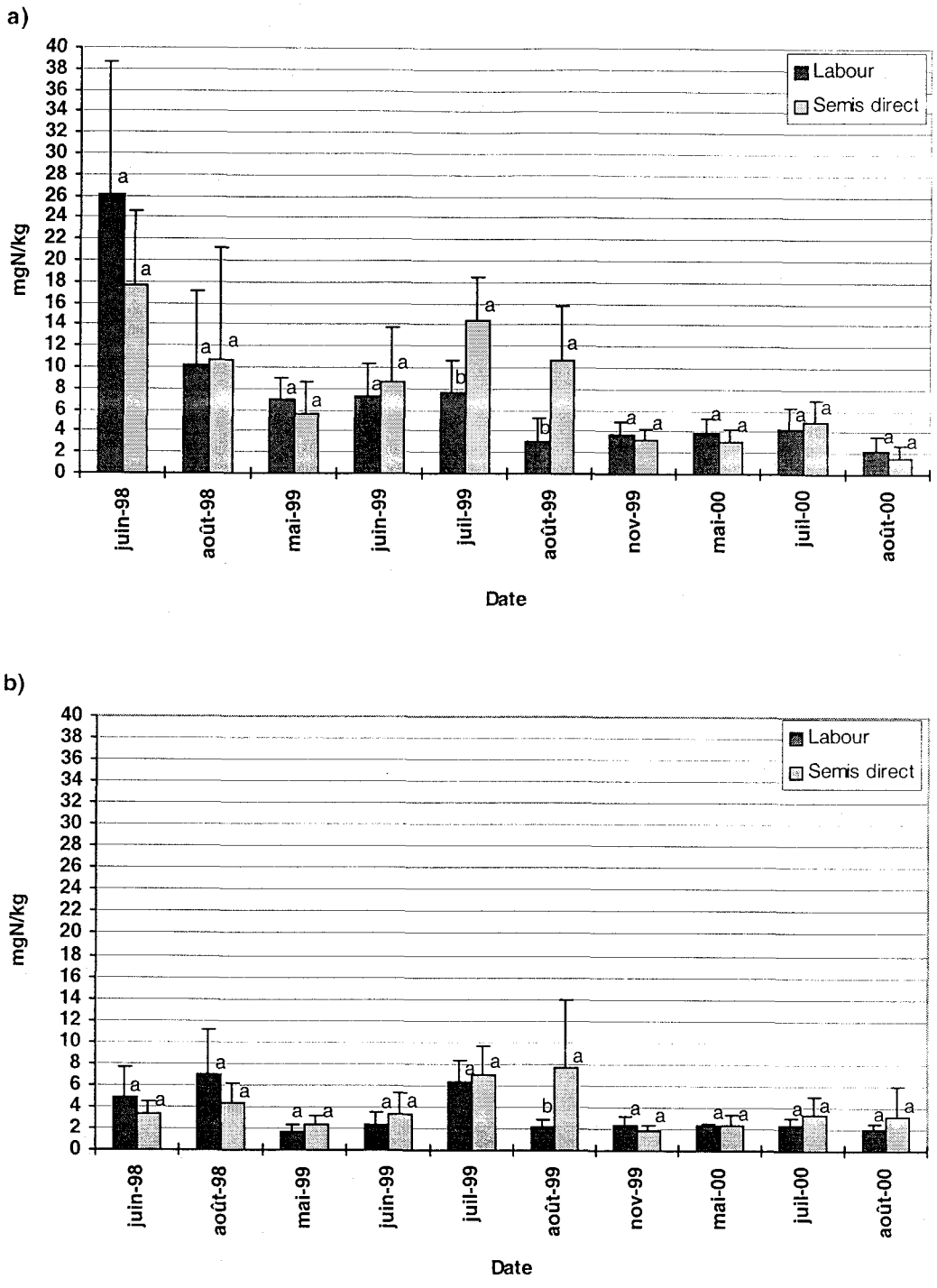
### 4.1.3 Comparaison par année

Le décalage des saisons de croissance des trois années d'expérimentation rend difficile leur comparaison (Figure 14). En effet, les semis et fertilisations n'ont pas été effectués aux mêmes dates. Malgré tout, on remarque que les pics de concentrations en nitrates diminuent avec les années. La prairie de graminées présente en 1998 amena une quantité importante de matière organique comparativement aux autres années. Aussi, les apports en azote provenant des fertilisations suivent les recommandations émises par le Conseil des Productions Végétales du Québec (CPVQ, 1996b) pour un maïs retrouvé normalement dans cette région. Le cultivar utilisé en 1999 et 2000 était, pour des fins de recherche, un maïs transgénique ayant des besoins élevés en azote et en eau. Ces besoins, non comblés par la fertilisation, pourraient expliquer la diminution des concentrations résiduelles retrouvées dans le sol.

Une exception demeure pour le labour à 105 cm. La deuxième fertilisation de la saison 1998 a été réalisée le 27 juillet. L'absence d'échantillons d'eau ne nous permet pas d'observer l'augmentation des concentrations en nitrates qui fait suite à cette fertilisation.

## 4.2 Contenus en nitrates du sol

Dix campagnes d'échantillonnage de sol ont été réparties sur les trois saisons d'expérimentation. Pour chacune d'entre elles, 64 échantillons de sol ont pu être recueillis (4 parcelles, 4 trous, 4 profondeurs) puis analysés. Les résultats sont présentés à l'annexe B à la fin de ce document. Suite à une défectuosité de l'électrode utilisée pour l'analyse des nitrates, la première date d'échantillons de sol de l'année 1998 n'a pas été retenue pour les analyses. Les graphiques suivants illustrent les contenus en nitrates en mg N/kg (mg $N\text{-}NO_3^-$/kg) de sol. Les histogrammes représentent les moyennes et les barres représentent les écarts types calculés. Les résultats des analyses statistiques se retrouvent à l'annexe D.




Note : Les histogrammes représentent les moyennes et les barres représentent les écarts types.
Les traitements qui ne sont pas indiqués avec la même lettre sont significativement différents à P≤0.05.

Figure 15 : Comparaison des contenus en nitrates du sol des deux modes de travail de sol a) à 25 cm et b) à 50 cm

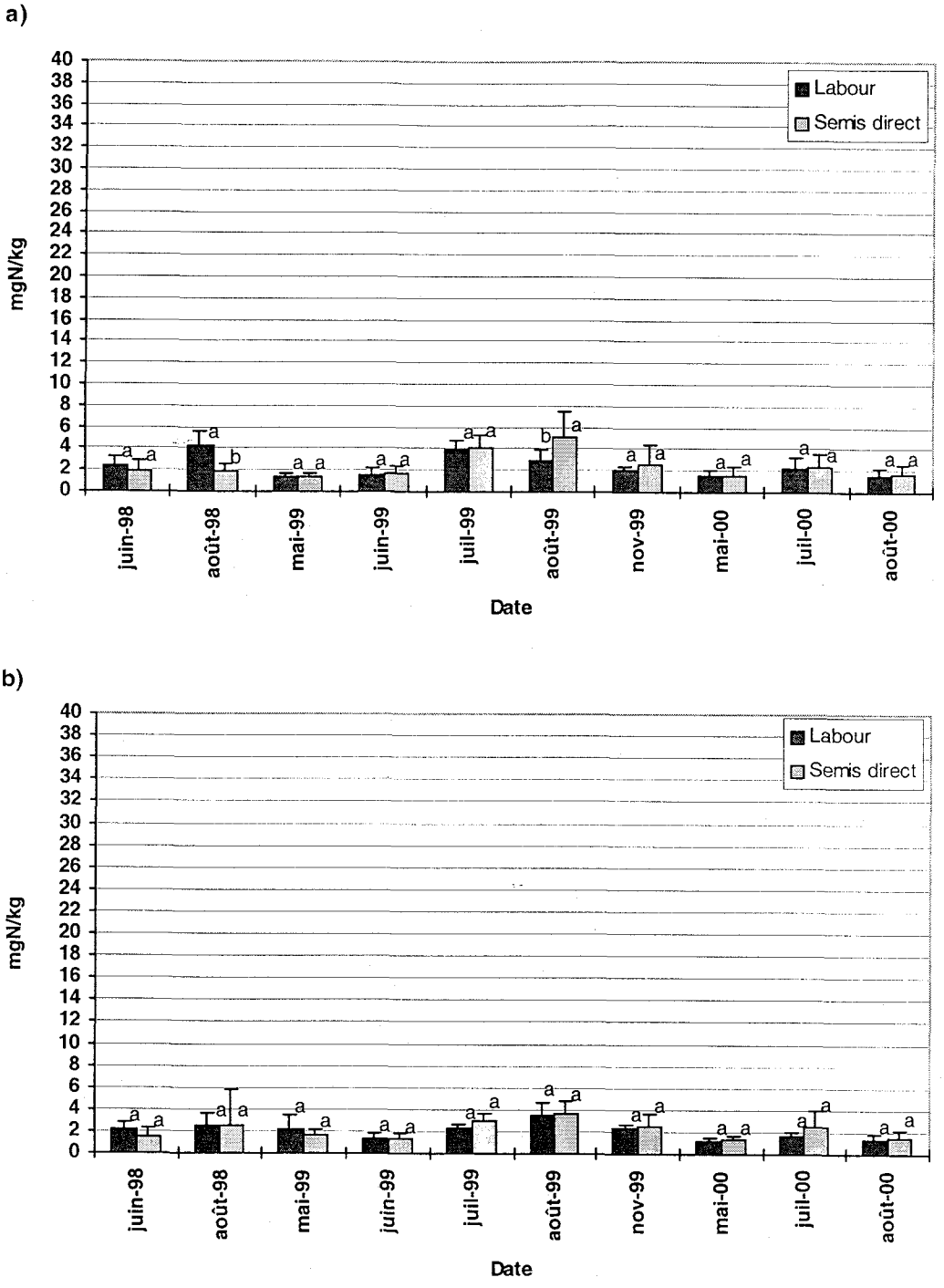
On remarque une diminution de la variabilité comparativement à celle retrouvée pour les concentrations en nitrates de l'eau interstitielle prélevée à l'aide de bougies poreuses. Cette différence peut s'expliquer par l'augmentation du nombre d'échantillons mesurés pour le sol (8) comparativement à ceux mesurés pour la solution du sol (entre 3 et 6). L'écart type d'une population diminue avec l'augmentation des mesures disponibles. Par ailleurs, il est reconnu que la méthode d'échantillonnage par bougies poreuses est susceptible d'être grandement affectée par l'hétérogénéité structurale et ainsi de présenter plus de variabilité.

### 4.2.1 Comparaison par traitement

Les figures 15 et 16 comparent les contenus en nitrates dans le sol aux quatre profondeurs pour les deux modes de travail de sol. Malgré une diminution des écarts types, on observe peu d'écarts entre les deux traitements. Un nombre de huit échantillons de sol est peut-être insuffisant pour observer des différences. Selon Lafleuriel (1990), en effectuant une dizaine de sondages pour une mesure, il est illusoire d'attendre une précision supérieure à 25 % (avec un seuil de risque de 5 %). Aussi, trois saisons de croissance ne sont peut-être pas suffisants pour permettre une différenciation distincte des deux modes de travail de sol.

Indépendamment des profondeurs, les contenus en nitrates sont généralement plus élevés pour le labour en 1998. L'abandon du site à l'étude pendant plusieurs années a amené une quantité considérable de matière organique pouvant potentiellement être minéralisée. Le travail du sol facilite cette transformation en augmentant la surface de contact entre les micro-organismes et les débris.

En 1999, on observe généralement des contenus en nitrates plus élevés en semis direct. Les deux traitements se différencient significativement ($p$ = 0.05) suite à la deuxième fertilisation réalisée au stade 4 à 6 feuilles du maïs (22 juin 1999) pour trois



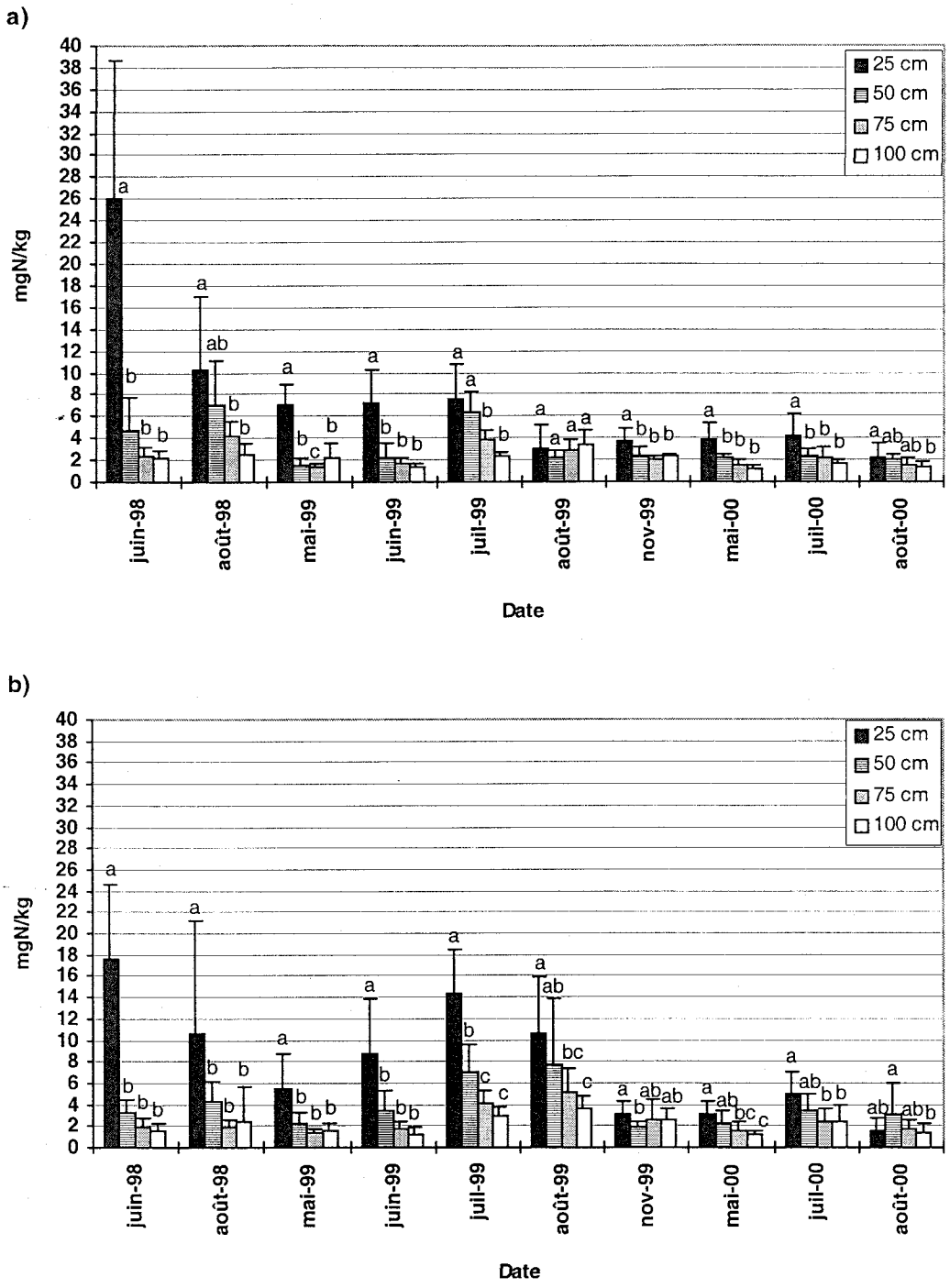

Note : Les histogrammes représentent les moyennes et les barres représentent les écarts types.
Les traitements qui ne sont pas indiqués avec la même lettre sont significativement différents à P≤0.05.

Figure 16 : Comparaison des contenus en nitrates du sol des deux modes de travail de sol a) à 75 cm et b) à 100 cm

des quatre profondeurs analysées (25, 50 et 75 cm). L'ajout de fertilisant permet d'observer plus aisément la vitesse de percolation des nitrates. Aussi, les contenus élevés retrouvés en 1999 en semis direct pourraient résulter de l'accumulation de matière organique en surface. En travail réduit, on observe une diminution des vitesses de minéralisation de la matière organique suite aux changements de l'état d'aération, de température et d'humidité des sols. Tandis qu'en labour la minéralisation semble s'être principalement réalisée pendant la saison 1998, en semis direct la transformation de l'azote organique en azote minéral semble se prolonger sur deux saisons de croissance.

Contrairement aux résultats attendus, on observe très peu de différence entre les deux traitements pour la troisième année d'expérimentation. Également, on remarque une diminution des contenus en nitrates principalement à une profondeur de 25 cm. La diminution des quantités initiales de matière organique et l'utilisation d'un maïs transgénique ayant des besoins élevés en nitrates pendant deux années consécutives, résultent à une accumulation moindre dans le profil du sol et pourrait expliquer ces deux situations.

Par ailleurs, pour les concentrations en nitrates dans l'eau et pour les contenus en nitrates du sol, l'absence d'une différentiation distincte entre les deux traitements pourrait être reliée aux prélèvements des éléments minéraux par les mauvaises herbes. Malgré le soin particulier qui a été porté au désherbage, une inspection visuelle a permis de constater que le nombre d'adventices était nettement supérieur dans le cas du semis direct. Cette situation est également observée par Cure (1991) et par Frédéric et al. (1999) qui notent une augmentation de l'infestation et de la composition des espèces d'adventices en techniques culturales simplifiées. L'utilisation de l'azote minéral pour répondre à leurs besoins a pu diminuer les quantités de nitrates qui auraient dû normalement être observées. Également, un comptage réalisé à l'été 1999 sur les rangs de culture présente une moyenne de 116 plants de maïs pour le labour et de 66 plants pour le semis direct. La germination est donc de 43 % moins élevée en absence de travail du sol. Plusieurs hypothèses peuvent être amenées pour expliquer cette situation. Selon Caneill et Bodet (1991), en absence de retournement des horizons superficiels, l'irrégularité de surface, l'importance et l'état des résidus de récolte jouent



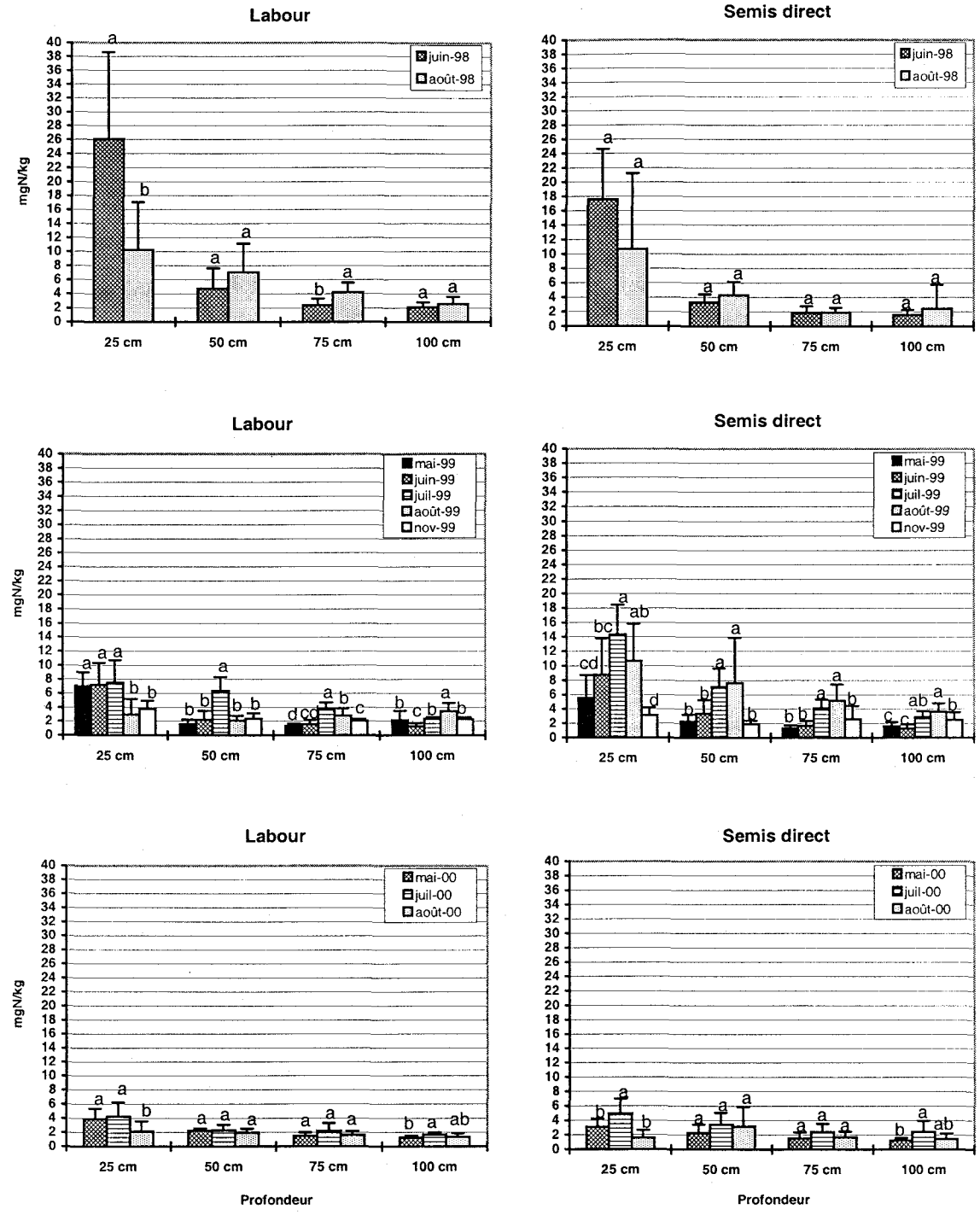

Note : Les histogrammes représentent les moyennes et les barres représentent les écarts types.
Les traitements qui ne sont pas indiqués avec la même lettre sont significativement différents à P≤0.05.

Figure 17 : Contenus en nitrates du sol aux quatre profondeurs mesurées a) pour le labour et b) pour le semis direct

fortement sur la profondeur de semis, le recouvrement de la graine et le contact terre-graine. Guérif (1991) observe une plus grande compacité de la couche supérieure en semis direct et bien qu'elle soit fissurée ou percée de galerie de lombrics, elle induit un enracinement moins important en semis que sur labour. Les débris laissés en surface ont pu également entraver la germination du maïs et finalement, le nombre important d'adventices en semis direct a pu mener une compétition vive aux plantules. Toutes ces situations pourraient expliquer le rendement moins élevé observé pour les parcelles en semis direct. De ce fait, les quantités d'azote mesurées peuvent être anormalement élevées suite à la diminution des prélèvements par les plants de maïs. Ces conditions défavorables sont fréquentes lors des premières années qui suivent le passage du labour conventionnel au semis direct et habituellement, la situation tend à s'ajuster avec le temps.

### 4.2.2 Comparaison par profondeur

La figure 17 permet de comparer les contenus en nitrates entre les quatre profondeurs analysées. Leur atténuation dans le profil du sol est généralement bien visible pour les trois années et les deux modes de travail de sol. On remarque une démarcation des quantités retrouvées à 25 cm comparativement aux autres profondeurs pour lesquelles les écarts sont moins flagrants. D'ailleurs, statistiquement, les différences s'observent principalement entre les premières et secondes profondeur et, dans une moindre mesure, entre les autres. Les contenus en nitrates retrouvés à 25 cm pour le premier échantillonnage (juin 1998) sont beaucoup plus élevés que pour les années subséquentes. Cette observation se remarque pour les deux modes de travail de sol mais est plus notable pour le labour. Les quantités de matière organique augmentent les contenus en azote minéral du premier horizon et suite au retournement de la prairie de graminées, d'autant plus pour la première année. Aussi, le prélèvement du maïs utilisé en 1998 est moindre comparativement au prélèvement du maïs transgénique des années 1999 et 2000.




Note : Les histogrammes représentent les moyennes et les barres représentent les écarts types.
Les traitements qui ne sont pas indiqués avec la même lettre sont significativement différents à P≤0.05.

Figure 18 : Évolution des contenus en nitrates du sol pour les trois saisons de croissance

### 4.2.3 Comparaison par date

Du fait des échantillonnages répartis tout au long de la saison de croissance, l'été 1999 permet de bien observer l'évolution des contenus en nitrates (Figure 18). On remarque l'entraînement des nitrates vers les profondeurs par le décalage des pics qui se situent principalement en juillet pour les premiers horizons et en août à 100 cm. On observe une augmentation des quantités jusqu'au mois de juillet, sans doute causée par la reprise de la minéralisation au printemps et les apports de fertilisants sur la culture. Puis, une diminution qui fait suite aux prélèvements par les plants en réponse à leurs besoins pour la croissance.

Par ailleurs, les contenus retrouvés diminuent nettement avec les années. Indépendamment des travaux de sol et des profondeurs, les moyennes calculées sont de 6.4 mgN/kg en 1998, 3.9 mgN/kg en 1999 et 2.3 mgN/kg en 2000. Pourtant, les quantités d'azote apportées par les fertilisations minérales demeurent relativement constantes pour les trois saisons à l'étude (120.3 kgN/ha en 1998, 136 kgN/ha en 1999 et 116.4 kgN/ha en 2000). L'apport de la matière organique comme source de nitrates est considérable et se remarque principalement par les quantités élevées rencontrées en 1998. La non prise en compte des besoins accrus en azote du maïs transgénique (évalués à 193 kgN/ha) semé en 1999 et 2000 a également diminué les contenus en nitrates pouvant potentiellement se retrouver dans le profil du sol.

## 4.3 Évolution des paramètres physiques

Le tableau 3 présente les moyennes et écarts types de tous les paramètres physiques évalués. Les valeurs présentées dans cette section se rapportent à ce tableau. L'ensemble des valeurs mesurées se retrouve à l'annexe C et les résultats statistiques à l'annexe D. L'analyse de la porosité de drainage et de la capacité au champ facilite l'évaluation de la porosité du sol car la mesure de celle-ci ne permet pas

## Tableau 3 : Moyennes mesurées pour les paramètres physiques du sol

| Paramètres physiques | Traitements | Année 1998 | | | Année 1999 | | | Année 2000 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Surface | 30 cm | 70 cm | Surface | 30 cm | 70 cm | Surface | 30 cm | 70 cm |
| Capacité au champ (m3/m3) | Labour | 0.479 (0.029) | 0.502 (0.141) | 0.398 (0.023) | 0.430 (0.020) | 0.394 (0.030) | 0.345 (0.075) | 0.411 (0.056) | 0.307 (0.017) | 0.228 (0.178) |
| | Semis direct | 0.493 (0.033) | 0.462 (0.045) | 0.414 (0.055) | 0.441 (0.031) | 0.345 (0.055) | 0.322 (0.038) | 0.403 (0.037) | 0.333 (0.024) | 0.304 (0.024) |
| Masse volumique | Labour | 0.953 (0.146) | 1.232 (0.202) | 1.221 (0.026) | 1.034 (0.106) | 1.113 (0.083) | 1.248 (0.137) | 1.069 (0.111) | 1.054 (0.126) | 1.331 (0.095) |
| *apparente sèche (g/cm3)* | Semis direct | 0.968 (0.041) | 1.159 (0.079) | 1.329 (0.096) | 1.044 (0.067) | 1.243 (0.102) | 1.169 (0.105) | 1.072 (0.121) | 1.068 (0.092) | 1.350 (0.072) |
| Matière organique (%) | Labour | 6.685 (1.514) | 2.485 (0.644) | 2.212 (1.142) | 7.020 (0.460) | 3.030 (0.737) | 2.214 (0.429) | 8.417 (1.034) | 5.530 (1.105) | 3.143 (1.037) |
| | Semis direct | 6.257 (0.896) | 2.665 (0.398) | 1.717 (0.156) | 7.150 (0.585) | 2.664 (0.587) | 2.227 (0.529) | 7.980 (0.994) | 5.206 (1.384) | 3.667 (1.811) |
| Porosité (m3/m3) | Labour | 0.575 (0.024) | 0.604 (0.167) | 0.497 (0.021) | 0.599 (0.022) | 0.534 (0.035) | 0.513 (0.046) | 0.585 (0.044) | 0.556 (0.025) | 0.454 (0.158) |
| | Semis direct | 0.596 (0.045) | 0.566 (0.049) | 0.520 (0.057) | 0.587 (0.029) | 0.518 (0.065) | 0.475 (0.041) | 0.591 (0.045) | 0.598 (0.028) | 0.490 (0.040) |
| Porosité de drainage (m3/m3) | Labour | 0.096 (0.013) | 0.103 (0.047) | 0.099 (0.018) | 0.169 (0.031) | 0.140 (0.042) | 0.154 (0.030) | 0.174 (0.073) | 0.249 (0.030) | 0.226 (0.045) |
| | Semis direct | 0.082 (0.040) | 0.104 (0.035) | 0.106 (0.030) | 0.146 (0.029) | 0.173 (0.073) | 0.153 (0.026) | 0.188 (0.045) | 0.265 (0.030) | 0.187 (0.040) |
| Conductivité hydraulique (cm/h) | Labour | 50.190 (27.794) | 15.815 (23.045) | 8.319 (6.198) | 13.570 (15.319) | 4.026 (3.344) | 2.760 (2.099) | 3.616 (4.358) | 30.179 (16.357) | 8.498 (17.096) |
| | Semis direct | 75.062 (19.290) | 24.392 (26.851) | 5.919 (6.255) | 36.133 (30.216) | 6.400 (5.613) | 5.683 (5.073) | 2.973 (2.957) | 32.394 (12.019) | 2.948 (4.111) |

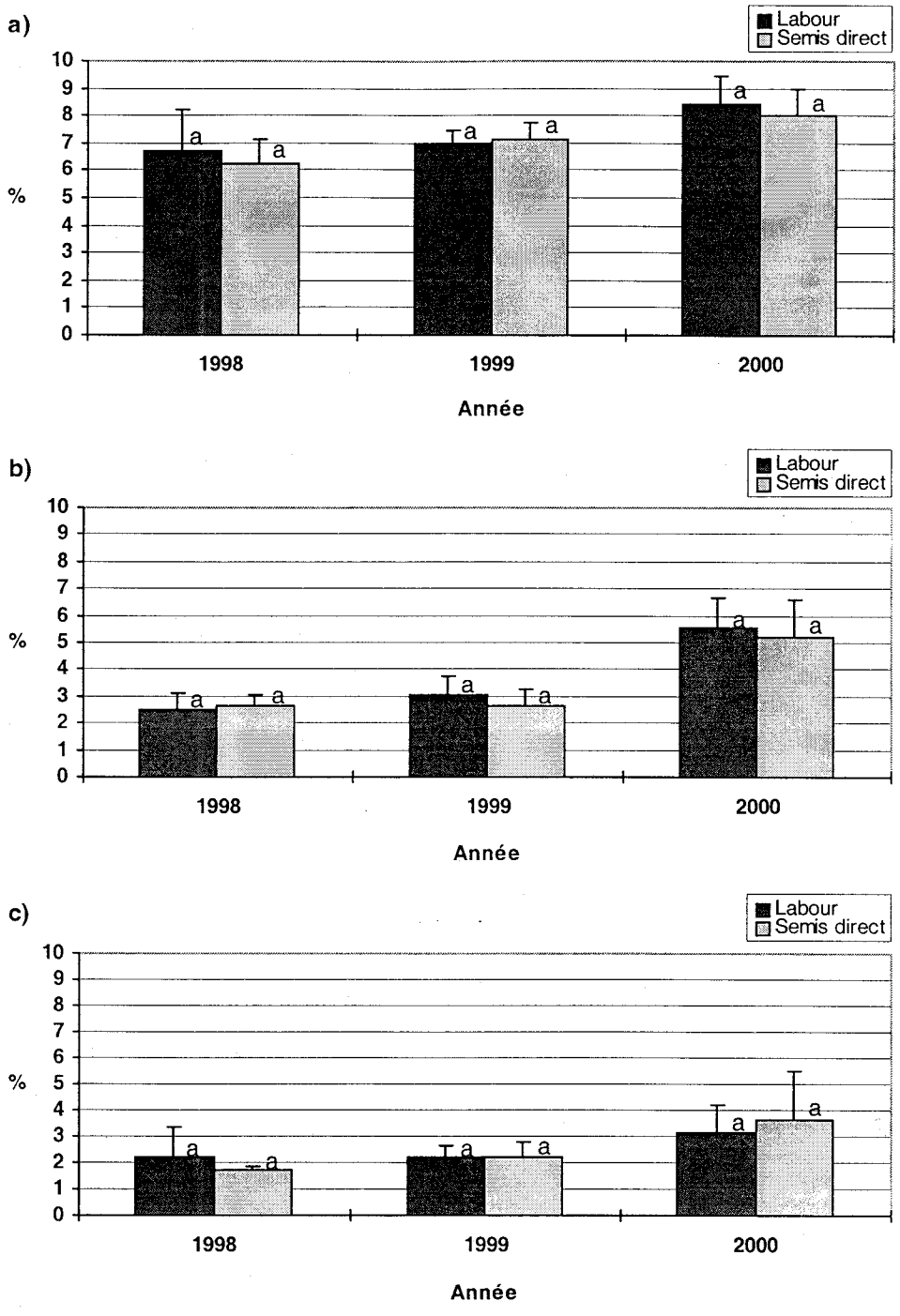
Note: La valeur fournie dans chaque case est la valeur moyenne et la valeur entre parenthèses est l'écart type.

de déterminer la dimension et la distribution des pores. Les résultats obtenus pour la matière organique et la conductivité hydraulique seront également discutés.

### 4.3.1 Matière organique

On observe aucune différence notable dans les pourcentages en matière organique entre les deux modes de travail de sol et ce, pour les trois profondeurs et les trois années étudiées (Figure 19). En fait, les quantités de débris organiques laissées par les cultures sont identiques pour les deux traitements. La différence provient du fait qu'en labour, ces débris sont mélangés sur une profondeur de 20 cm tandis qu'en semis direct, ils demeurent en surface. Le travail du sol augmente les vitesses de minéralisation de l'azote organique en azote minéral et devrait ainsi diminuer les quantités de matière organique retrouvées. Puisque le labour ne dépassait pas les 20 premiers centimètres du sol, des variations entre les deux modes de travail de sol devraient s'observer principalement au niveau de la première profondeur prélevée. Par contre, la minéralisation de la matière organique est un phénomène observable à long terme et les effets peuvent ne pas être perçus après seulement trois saisons de croissance. Deux autres hypothèses peuvent également expliquer l'absence de quantités plus élevées en semis direct.

Pour les parcelles en semis direct, les reliquats de culture demeurés en surface empêchaient les échantillonnages de sol à cette profondeur. Ceux-ci ont dû être effectués en retirant la majeure partie des débris afin d'obtenir une quantité suffisante de sol à l'intérieur des cylindres pour parvenir à exécuter les analyses. Les pourcentages obtenus en surface ne tiennent pas compte de ces débris. Aussi, les échantillonnages de sol ont dû être réalisés entre les rangs de maïs. Puisque qu'en semis direct, contrairement au labour, le pied du plant demeure sur place et n'est pas retourné dans le sol, la majeure partie des reliquats de la culture précédente se retrouve dans le rang lui-même. Les échantillons de sol prélevés ne permettent pas de les évaluer.

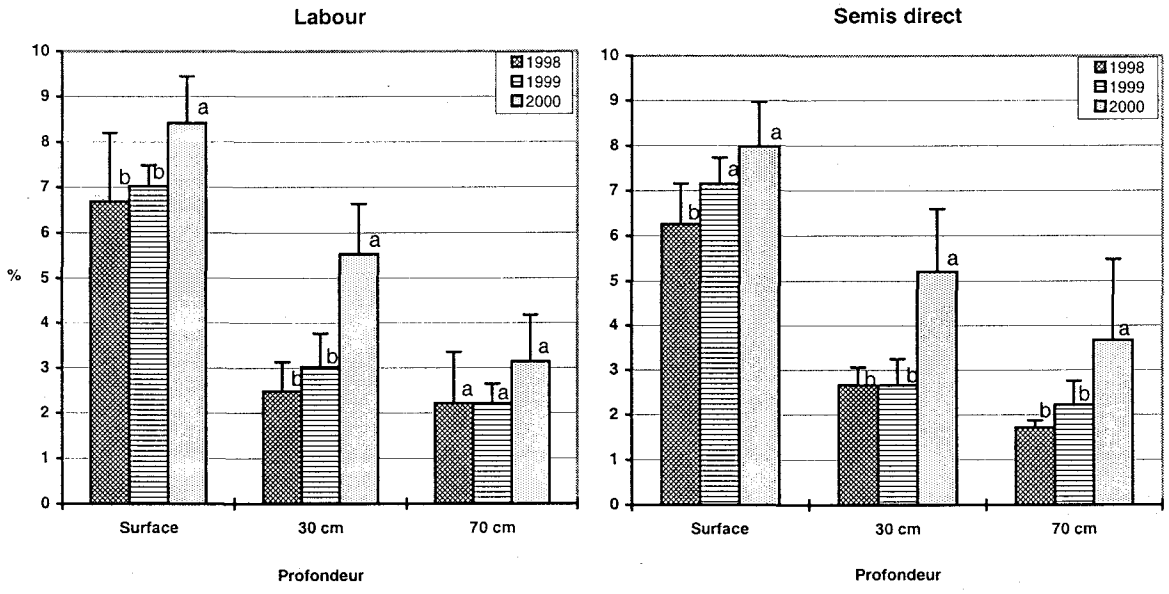



Note : Les histogrammes représentent les moyennes et les barres représentent les écarts types.
Les traitements qui ne sont pas indiqués avec la même lettre sont significativement différents à P≤0.05.

Figure 19 : Comparaison des pourcentages en matière organique des deux modes de travail de sol a) en surface, b) à 30 cm et c) à 70 cm

a)

b)




Note : Les histogrammes représentent les moyennes et les barres représentent les écarts types.
Les traitements qui ne sont pas indiqués avec la même lettre sont significativement différents à P≤0.05.

Figure 20 : Comparaison des pourcentages en matière organique
a) par profondeur et b) par année

On observe une diminution marquée des pourcentages en matière organique avec la profondeur (Figure 20a). Les quantités sont très élevées en surface et diminuent rapidement. Par contre, les écarts entre la deuxième et troisième profondeur sont moins drastiques. À 70 cm, les quantités retrouvées demeurent toujours importantes. Elles sont en moyenne de 2.5 %. Pourtant, on considère habituellement qu'à une profondeur de 1 m, le pourcentage de matière organique devrait se situer à près de 1 %. L'abandon de la parcelle expérimentale pendant plusieurs années au profit d'une prairie de graminées aurait avantagé son maintien. Ces cultures favorisent la conservation des sols comparativement à des pratiques culturales plus exigeantes telles que la monoculture de maïs.

Les pourcentages en matière organique augmentent en général avec les années (Figure 20b). Sans égard pour les traitements et les profondeurs, les valeurs calculées sont de 3.7 % en 1998, 4.1 % en 1999 et 5.7 % en 2000. Les reliquats de culture ajoutés aux quantités déjà présentes ne peuvent expliquer seuls une telle augmentation. Ce résultat suggère qu'on ne mesure probablement pas seulement la matière organique du sol mais également des résidus non encore humifiés. Par ailleurs, l'augmentation des pourcentages laisse présager un accroissement des quantités de matière organique potentiellement minéralisables et pouvant être transformées en nitrates.

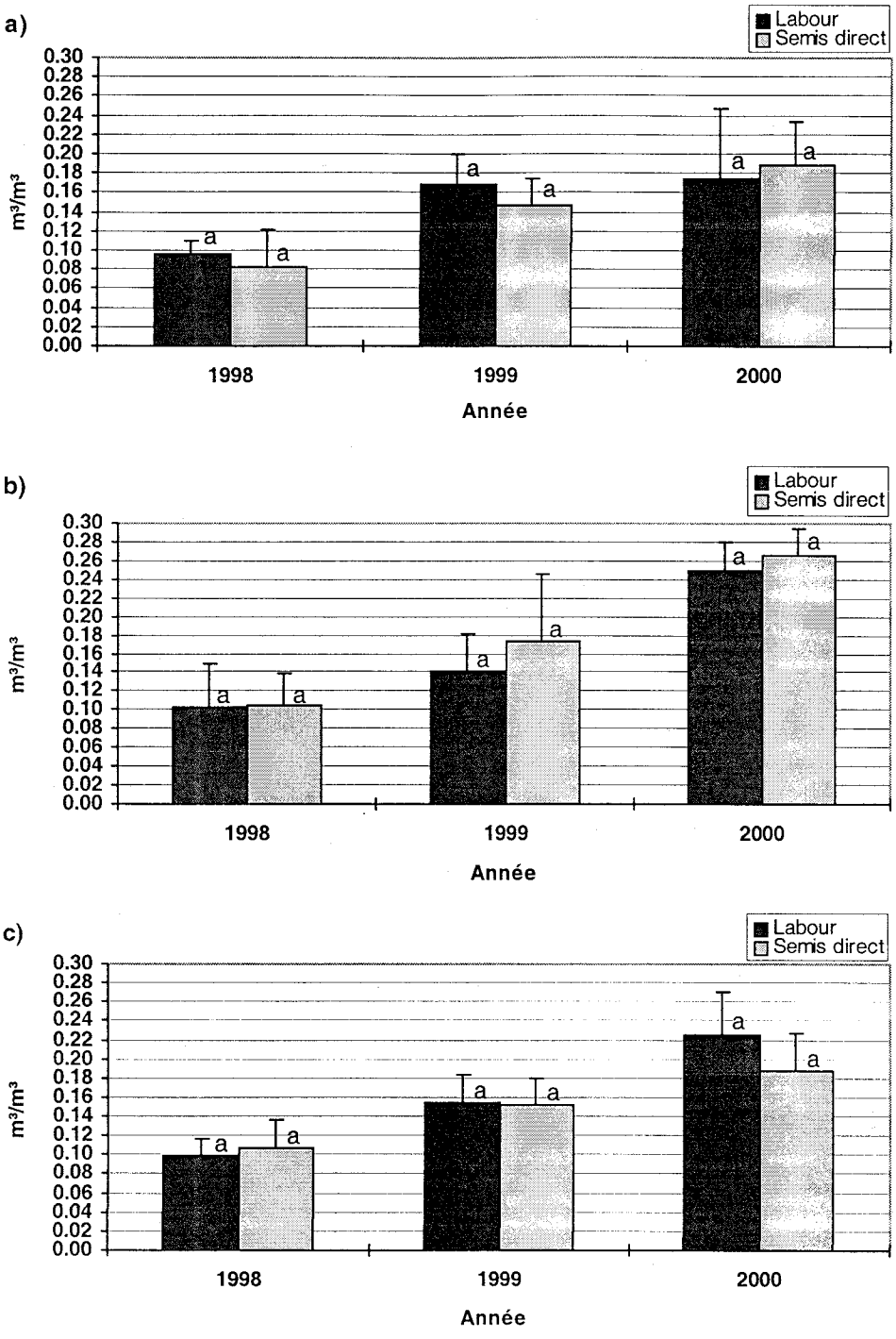
## 4.3.2 Porosité de drainage

Les figures 21 et 22 présentent les graphiques des moyennes et écarts types de la porosité de drainage comparés en fonction des traitements, des profondeurs et des années. On n'observe aucune différence entre les deux modes de travail de sol après trois années d'expérimentation (Figure 21). L'ensemble des moyennes calculées sont identiques pour les deux traitements : 0.157 $m^3/m^3$ pour le labour et 0.156 $m^3/m^3$ pour le semis direct. La transformation de l'état initial du sol par son travail semble ne pas avoir modifié sa capacité d'écoulement de l'eau sous l'effet seul de la gravité. En dépit des résultats attendus, on n'observe aucune différence entre les deux traitements en surface. L'absence de travaux de terrain pendant plusieurs années a probablement

facilité l'agrégation du sol et la création de macropores. VandenBygaart et al. (1999) observent un accroissement des pores d'un diamètre > 500 µm après six années de semis direct. À l'opposé, l'effet du travail du sol sur la diminution des pores d'un tel diamètre peut ne pas être visible après seulement trois saisons de labour. L'éclatement des agrégats et la restructuration de l'espace lacunaire des premiers horizons n'ont pas encore modifié l'infiltration au travers des macropores.

La porosité de drainage demeure pratiquement identique entre les profondeurs (Figure 22a). Il n'y a donc apparemment pas de modifications dans le nombre de macropores rencontrés en surface et à une profondeur de 70 cm. L'activité des organismes vivants, la succession des cycles de gel-dégel et les mécanismes de fissuration par retrait et gonflement peuvent compléter l'action des processus biologiques de formation des pores. L'absence de travail du sol est reconnue pour favoriser le maintien uniforme des propriétés physiques du sol sur toute la profondeur (Heard et al., 1988). Dans le cas des parcelles étudiées, la porosité de drainage s'est également conservée après trois saisons de labour car le sol était bien structuré au départ.

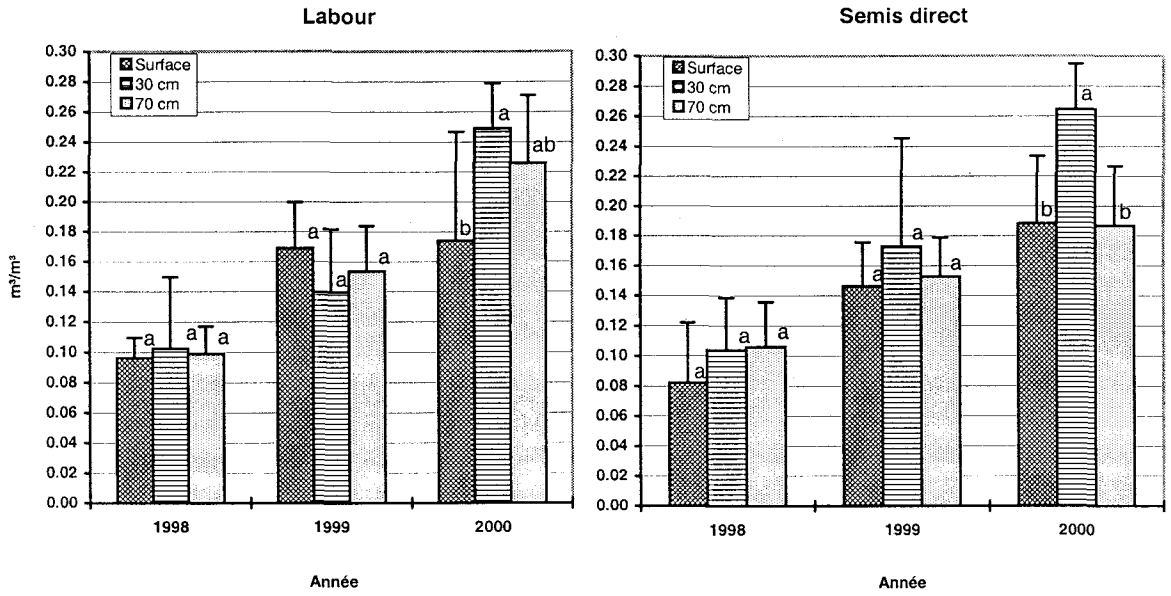
On remarque une augmentation marquée de la porosité de drainage entre les trois années d'expérimentation (Figure 22b). Sous culture de maïs, le sol subit fortement l'action des racines. La succession des cultures sur la parcelle produit une porosité racinaire qui s'accroît au fil des saisons de croissance.



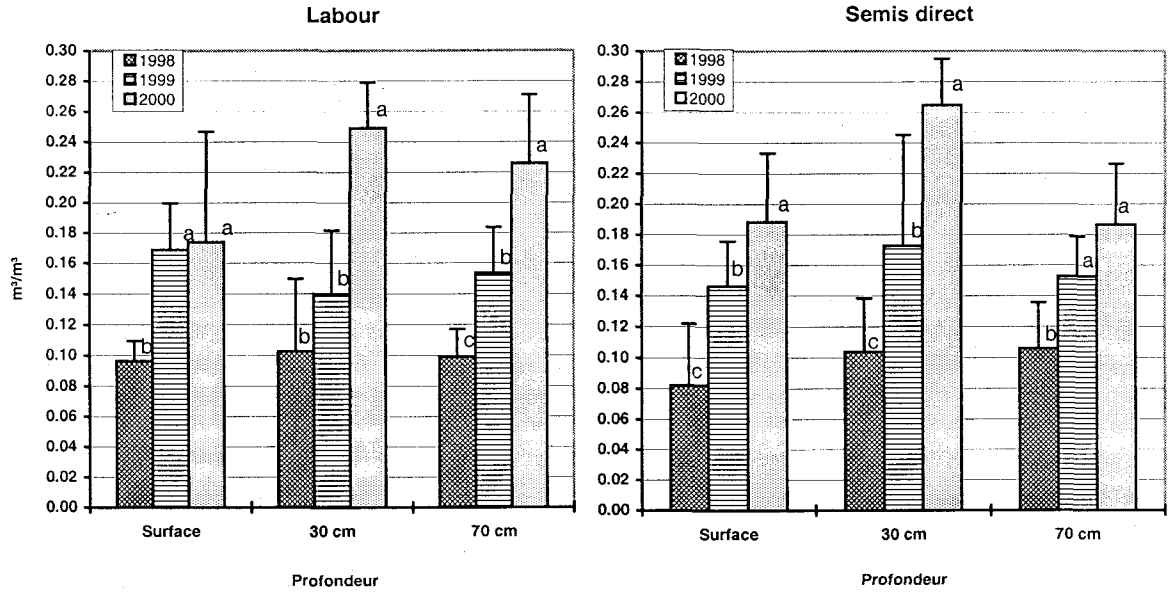

Note : Les histogrammes représentent les moyennes et les barres représentent les écarts types.
Les traitements qui ne sont pas indiqués avec la même lettre sont significativement différents à P≤0.05.

Figure 21 : Comparaison des porosités de drainage des deux modes de travail de sol a) en surface, b) à 30 cm et c) à 70 cm

a)




b)




Note : Les histogrammes représentent les moyennes et les barres représentent les écarts types.
Les traitements qui ne sont pas indiqués avec la même lettre sont significativement différents à P≤0.05.

Figure 22 : Comparaison des porosités de drainage a) par profondeur et b) par année

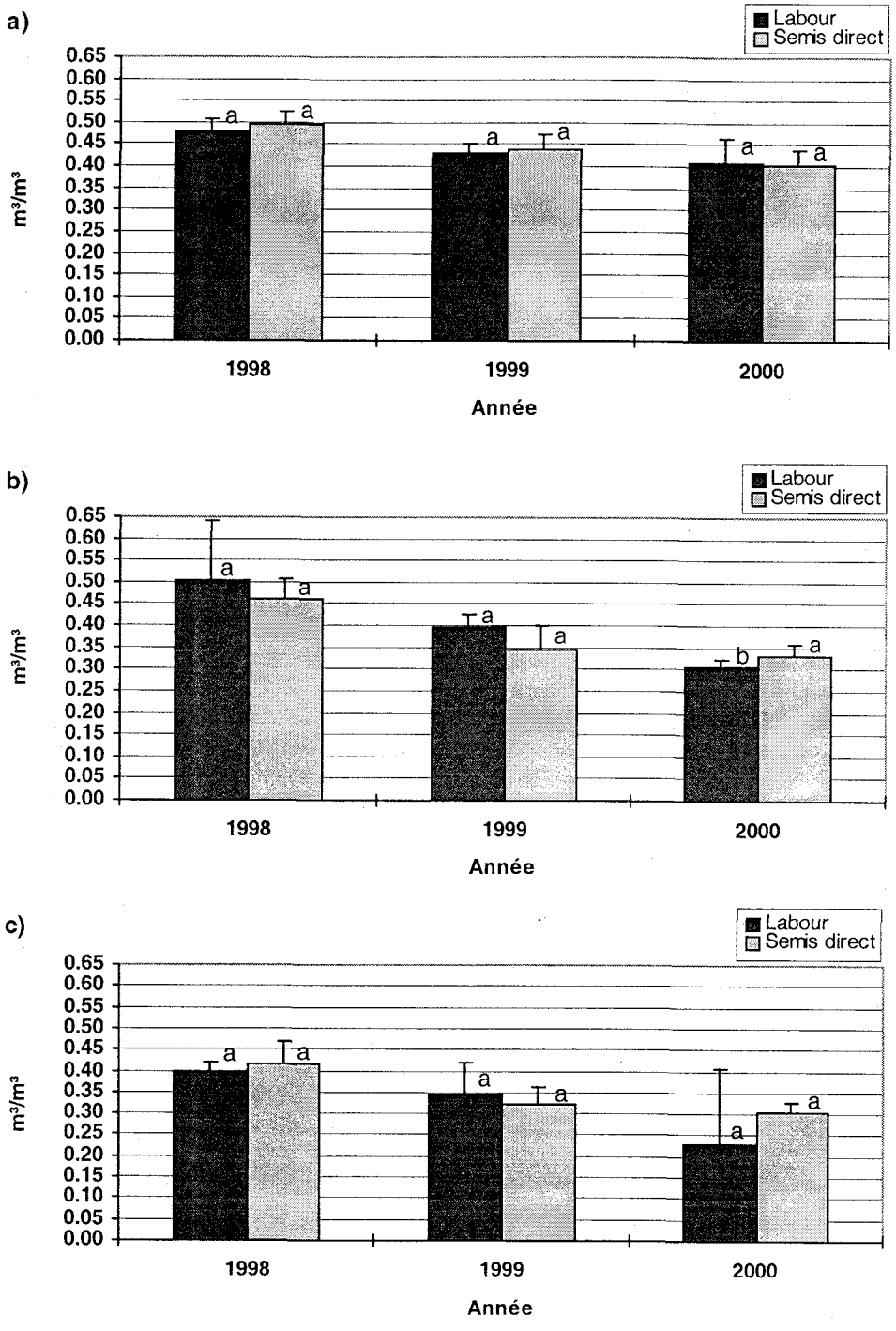
### 4.3.3 Capacité au champ

Il n'y a pratiquement aucune différence significative entre les deux traitements pour la capacité au champ (Figure 23). Les valeurs moyennes sont de 0.388 $m^3/m^3$ pour le labour et de 0.391 $m^3/m^3$ pour le semis direct. En surface, les valeurs sont identiques pour les deux modes de travail de sol. La capacité au champ représente principalement la microporosité du sol. Selon les résultats attendus, elle devrait augmenter avec le labour suite à la destruction des horizons de surface et à la fragmentation des agrégats. Au tableau 3, on remarque également aucune différence entre les deux modes de travail de sol pour la porosité en surface (labour : 0.586 $m^3/m^3$ et semis direct : 0.591 $m^3/m^3$) et pour la porosité moyenne sur toutes les profondeurs (labour : 0.546 $m^3/m^3$ et semis direct : 0.549 $m^3/m^3$). Apparemment, comme pour la porosité de drainage, trois saisons de croissance semblent être insuffisantes pour observer un écart entre les traitements.

À la figure 24a, on note, pour les deux modes de travail de sol, une diminution significative de la capacité au champ avec la profondeur. Au labour, puisqu'on n'observe aucun écart pour la porosité de drainage en surface, ce résultat ne peut être associé au travail du sol qui pulvérise la couche arable en fragmentant les agrégats et en altérant la structure des pores des horizons supérieurs. Pour le semis direct, la seule cause de variation d'état physique à court terme est la structuration naturelle sous l'effet des racines et les variations climatiques et d'humidité. Puisque la travail du sol semble ne pas modifier la microporosité retrouvée en surface et que le semis direct ne provoque aucune modification majeure à court terme dans les porosités, la diminution de la capacité au champ avec la profondeur semble donc illustrer les conditions initiales retrouvées dans le sol. Le même phénomène est rencontré pour la masse volumique apparente sèche du sol. Celle-ci augmente significativement avec la profondeur pour les deux traitements (Annexe C). De plus, la porosité totale est significativement supérieure en surface pour les deux modes de travail de sol comparativement aux autres horizons.

Contrairement à la porosité de drainage, la capacité au champ diminue significativement avec les années pour les deux modes de travail de sol (Figure 24b). Par contre, on

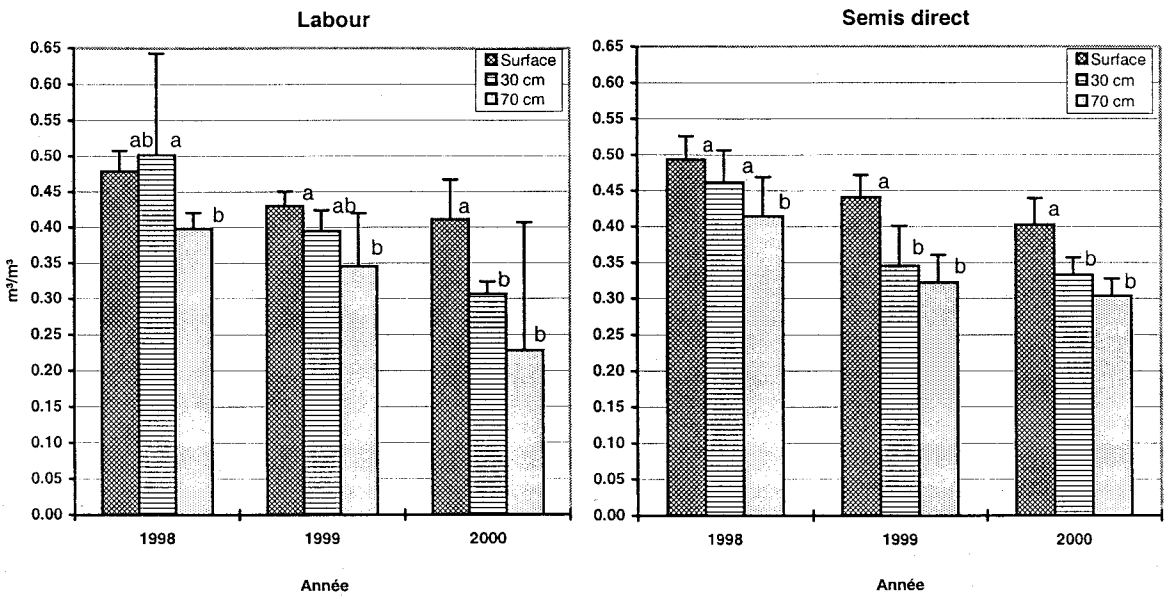
n'observe aucun changement pour la porosité totale avec l'avancement des années. L'évaluation de la porosité de drainage et de la capacité au champ semble donc bien représenter l'évolution de la porosité dans un sol. L'utilisation de la parcelle expérimentale par une monoculture de maïs augmente la macroporosité provoquée par les racines mais diminue celle occupée par les micropores. Ceci semble également indiquer que d'autres propriétés du sol (structure, matière organique, occupation, etc.) ont plus d'effets sur la porosité que le travail du sol.



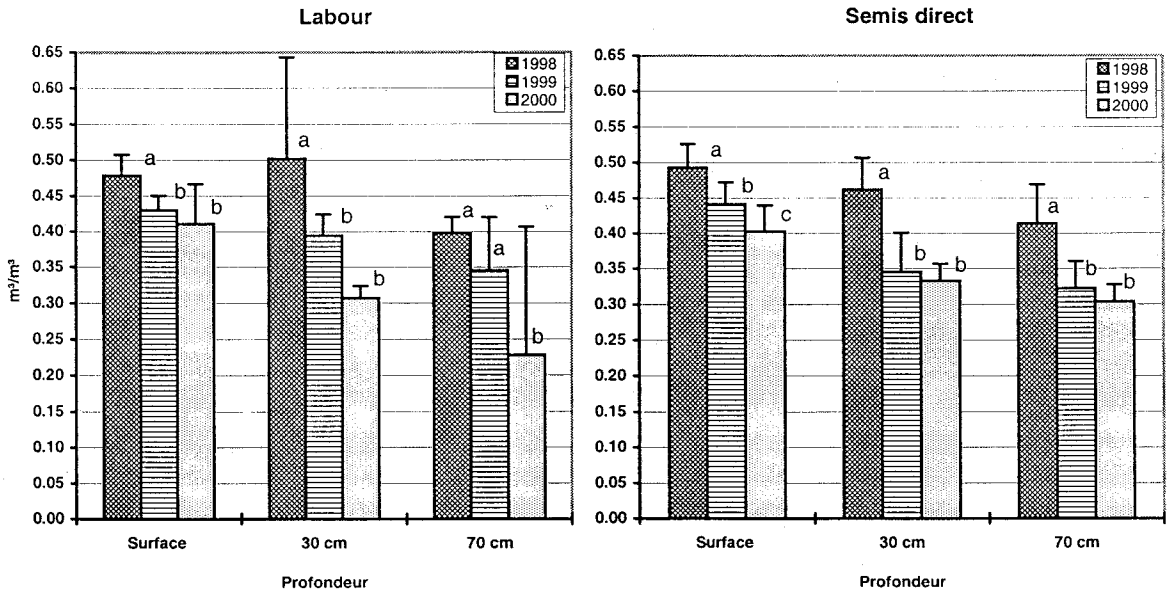

Note : Les histogrammes représentent les moyennes et les barres représentent les écarts types.
Les traitements qui ne sont pas indiqués avec la même lettre sont significativement différents à P≤0.05.

Figure 23 : Comparaison des capacités au champ des deux modes de travail de sol a) en surface, b) à 30 cm et c) à 70 cm

a)




b)




Note : Les histogrammes représentent les moyennes et les barres représentent les écarts types.
Les traitements qui ne sont pas indiqués avec la même lettre sont significativement différents à P≤0.05.

Figure 24 : Comparaison des capacités au champ a) par profondeur et b) par année

### 4.3.4 Conductivité hydraulique

Sans être significatives, on observe des différences de conductivité hydraulique entre les deux modes de travail de sol (Figure 25). Mais cette différence est plus faible que la variabilité intrinsèque entre les parcelles. Les moyennes calculées en surface et à 30 cm sont respectivement de 38.06 cm/h et de 21.06 cm/h pour les horizons non travaillés et de 22.46 cm/h et de 16.67 cm/h pour les horizons travaillés. Même s'ils ne sont pas observés par les valeurs de porosité, porosité de drainage et capacité au champ, ces résultats reflètent des variations d'états structuraux entre les traitements. Par contre, cette différence n'est pas retrouvée à 70 cm. À cette profondeur, on n'observe habituellement aucune tendance provoquée par le travail du sol.

Au semis direct, l'absence de perturbation des horizons supérieurs et la conservation des pores et de leur continuité favorisent les mouvements de l'eau. Drees et al. (1994) observent une porosité totale plus faible mais une grosseur moyenne des pores plus élevée en semis direct. Ces auteurs remarquent que quelques macropores comptent pour très peu dans la porosité totale mais contribuent à plus de 70 % de l'infiltration de l'eau et que la grosseur des agrégats est deux à trois fois plus élevée.

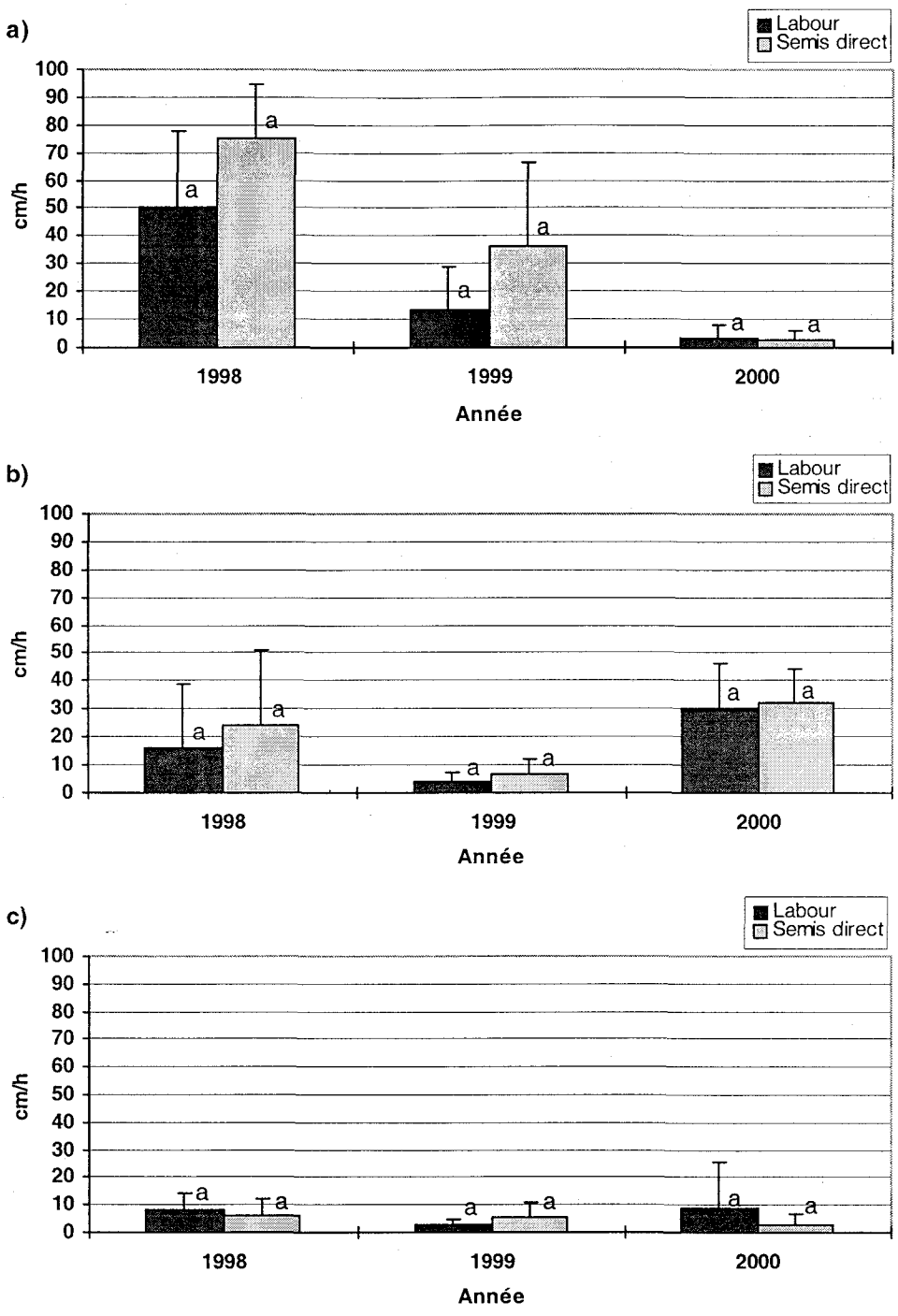
Également, des études récentes (VandenBygaart, 1999) ont conclu que la présence permanente des macropores créés par les vers de terre en semis direct contribue de façon majeure à l'infiltration de l'eau durant les périodes de précipitations abondantes.

La conductivité hydraulique plus faible du labour provient probablement de la destruction des agrégats et de la continuité des pores et d'une diminution de leur grosseur. Le travail du sol est sans aucun doute un facteur important qui provoque la fragmentation et qui altère la structure d'un sol.

D'autre part, les conductivités hydrauliques obtenues sont élevées pour un loam limoneux et ce, pour les deux modes de travail de sol. À partir du tableau 3, on observe des moyennes allant de 2.97 à 75.06 cm/h en surface, de 4.03 à 32.39 cm/h à 30 cm et de 2.76 à 8.50 cm/h à 70 cm. Comparativement, Azooz et Arshad (1996) obtiennent

pour un même sol des valeurs moyennes de 0.47 à 1.02 cm/h pour le labour et de 0.89 à 2.76 cm/h pour le semis direct à une profondeur de 0-20 cm. À une profondeur de 30 cm, Pikul et al. (1990) observent des conductivités hydrauliques de 2.28 cm/h pour un travail du sol effectué par un chisel et de 0.93 cm/h pour un semis direct. Afin de restreindre la probabilité que nos résultats proviennent d'artefacts d'échantillonnage et d'analyses en laboratoire, l'infiltromètre de Côté fut utilisé sur la parcelle en 1999 pour évaluer la conductivité hydraulique du traitement labour à 30 cm. Les valeurs calculées en laboratoire et sur le terrain sont respectivement de 4.03 cm/h (Tableau 3) et de 3.66 cm/h (Annexe C). L'absence d'une différenciation distincte des moyennes obtenues par ces deux méthodes de mesure a permis de constater que l'écoulement se fait effectivement de façon très rapide dans ce sol et d'autres analyses sur le terrain n'ont pas été jugées nécessaires. La variabilité très élevée mesurée pour ce paramètre confirme également la présence d'écoulements préférentiels sur cette parcelle. L'absence de pratiques agricoles pendant plusieurs années antérieures à cette recherche a favorisé sa structuration et la création d'agrégats et de porosité qui provoquent ainsi une infiltration rapide.

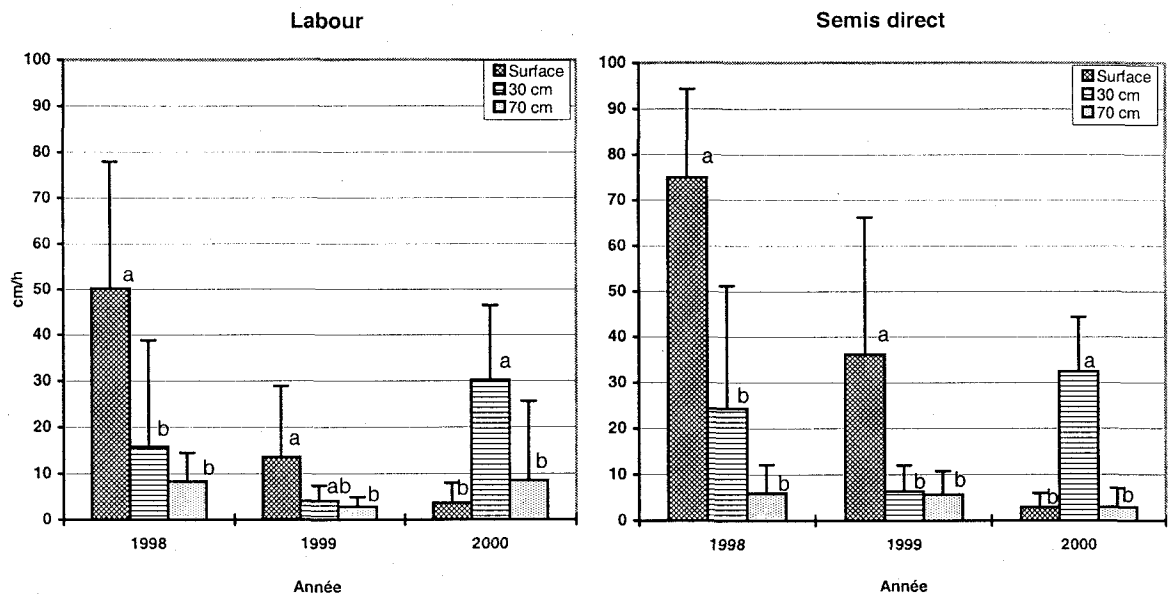
Les comparaisons en fonction des profondeurs et des années donnent les mêmes tendances que pour la capacité au champ (Figures 24 et 26). Pour ces deux paramètres, on observe en général une diminution des valeurs avec la profondeur et dans le temps. Ce résultat suggère que non seulement la macroporosité mais également que la microporosité contribuent de façon majeure à l'écoulement dans un sol. On constate une exception pour les conductivités hydrauliques à 30 cm pour l'année 2000. L'hypothèse voulant que ce résultat provienne de l'évolution de la structure du sol ne peut être maintenue car l'exception se retrouve pour les deux traitements. Par contre, les mesures peuvent facilement être biaisées par quelques échantillonnages réalisés près de fentes de retraits. De plus, la grande variabilité observée pour ce paramètre suggère que les conditions physiques du sol ne sont pas uniformes.



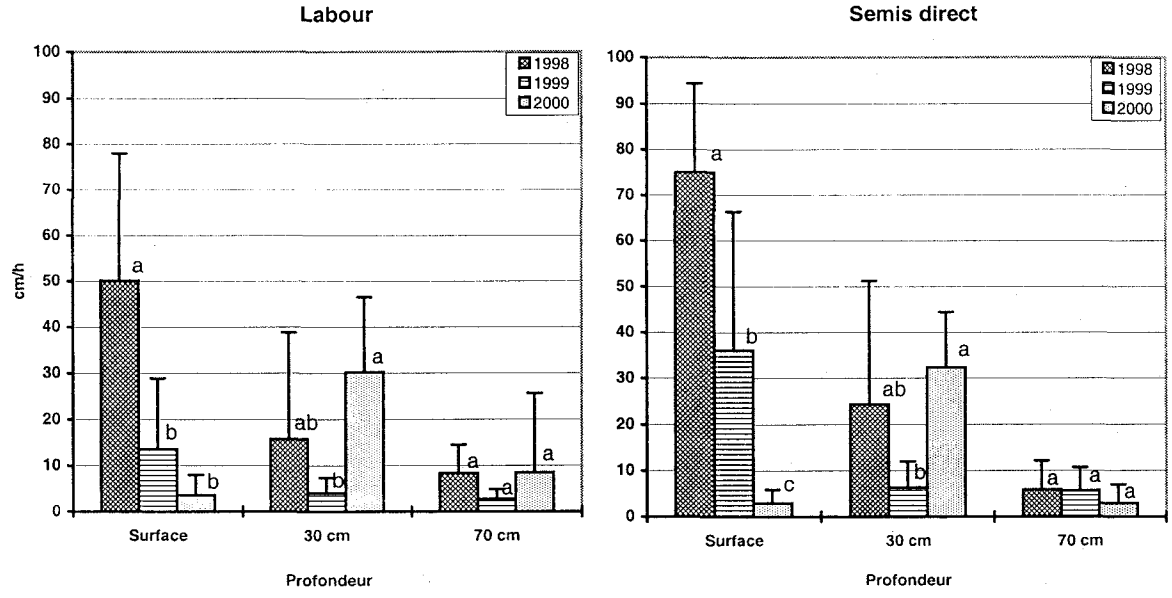

Note : Les histogrammes représentent les moyennes et les barres représentent les écarts types.
Les traitements qui ne sont pas indiqués avec la même lettre sont significativement différents à P≤0.05.

Figure 25 : Comparaison des conductivités hydrauliques des deux modes de travail de sol a) en surface, b) à 30 cm et c) à 70 cm

a)




b)




Note : Les histogrammes représentent les moyennes et les barres représentent les écarts types.
Les traitements qui ne sont pas indiqués avec la même lettre sont significativement différents à P≤0.05.

Figure 26 : Comparaison des conductivités hydrauliques a) par profondeur et b) par année

## 4.4 Comparaison des concentrations et contenus en nitrates mesurés et simulés

En raison de l'absence d'une différence significative entre les paramètres physiques des deux modes de travail de sol, un seul profil de sol a été simulé avec AgriFlux utilisant la moyenne des paramètres physiques. La comparaison des moyennes mesurées et simulées s'échelonne de juin 1998 à août 2000 pour les concentrations en nitrates dans l'eau et pour les contenus en nitrates du sol. Seules les dates ayant plus de la moitié de leurs échantillons d'eau potentiels ont été conservées pour la comparaison.

### 4.4.1 Concentrations en nitrates dans l'eau interstitielle

Les figures 27 et 28 présentent les moyennes et écarts types des concentrations en nitrates mesurées et simulées à 30, 55, 80 et 105 cm. De façon générale, les courbes simulées par AgriFlux représentent relativement bien les moyennes obtenues sur le terrain. Cependant, quelques périodes montrent une concordance plus faible. À 30 cm, les concentrations simulées sont généralement surestimées comparativement aux mesures tandis qu'à 55 et 80 cm, elles sont souvent légèrement sous-estimées. AgriFlux semble minéraliser plus rapidement que dans la réalité la matière organique du sol. Ainsi, les concentrations produites par le modèle à la première profondeur sont élevées et l'utilisation des nitrates par la culture diminue les moyennes rencontrées aux suivantes. À une profondeur de 105 cm, les moyennes simulées sont légèrement supérieures aux mesures pour l'été 1998 et pour l'automne 1999. Aux autres périodes, elles sont bien reproduites par le modèle.

Les pics annuels de concentrations et leur atténuation avec l'avancement de la saison de croissance suivent un intervalle de temps similaire à celui rencontré sur le terrain. L'atténuation des concentrations en nitrates avec les années est également bien reproduite par le modèle. Les besoins azotés et hydriques du cultivar de maïs semé en 1999 et en 2000 mesurés à partir des plants, semblent donc bien représenter la réalité.

Les courbes enveloppes mesurées sur le terrain se retrouvent légèrement à l'extérieur de celles définies par AgriFlux et à certaines périodes, les écarts types observés dépassent largement ceux simulés. Cette situation s'observe principalement à l'automne 1998. La variabilité plus importante est peut-être reliée à la faible quantité d'échantillons potentiellement mesurables. Par comparaison, les concentrations mesurées par AgriFlux sont au nombre de 100 tandis que celles échantillonnées sur le terrain sont au maximum de 12 (traitements confondus). La représentativité des mesures est ainsi diminuée par le nombre réduit d'échantillons et d'autant plus en périodes de faibles précipitations. Cette différence de variabilité peut aussi être attribuée à la non prise en compte dans la modélisation des écoulements préférentiels induits par la structure du sol. Les coefficients de variation calculés pour la conductivité hydraulique (plus de 200 % pour certaines mesures) démontrent que des écoulements rapides au travers de fentes de retraits ou de trous de racines et de vers peuvent en effet avoir lieu dans ce sol.

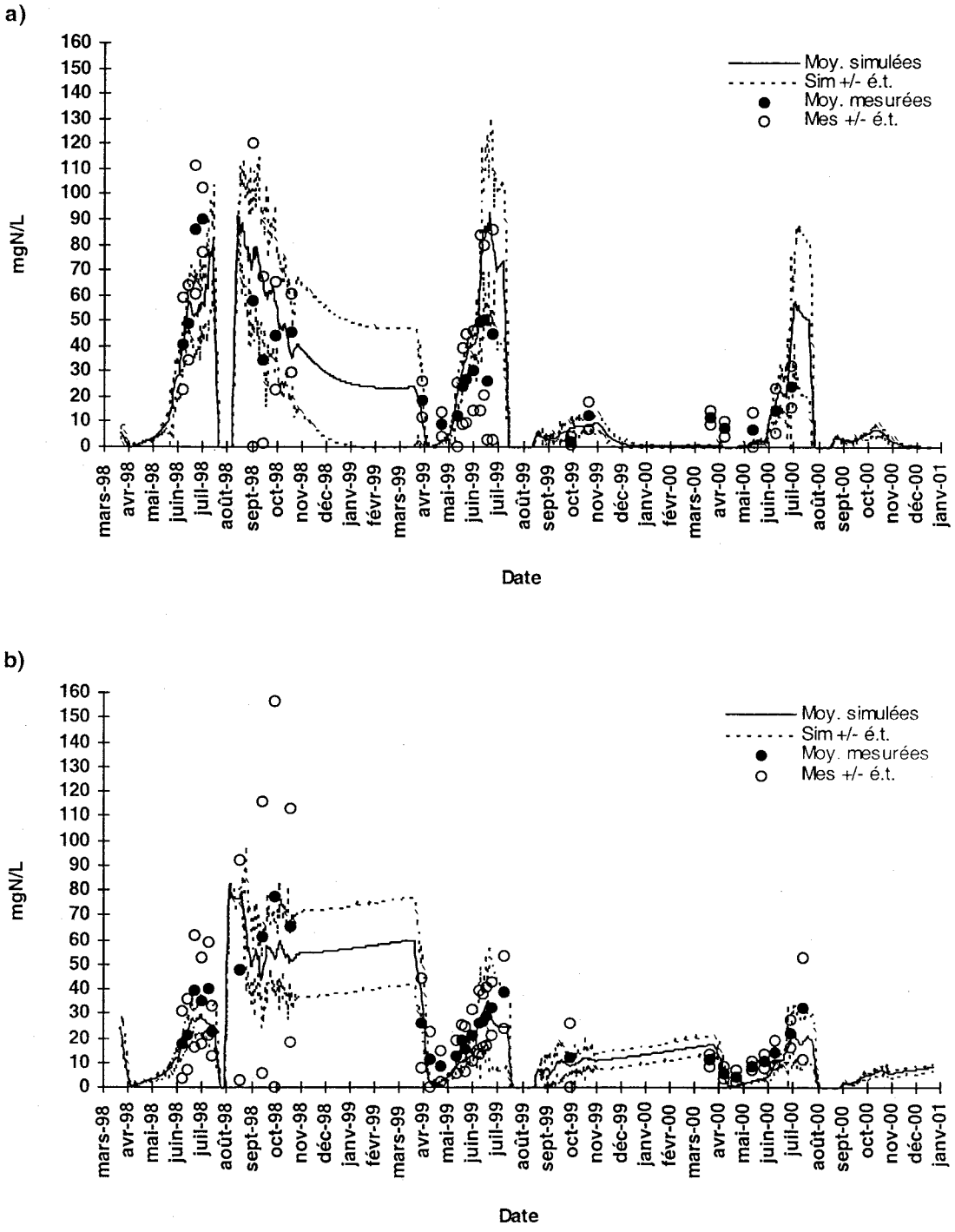



Figure 27 : Comparaison des concentrations en nitrates mesurées et simulées a) à 30 cm et b) à 55 cm

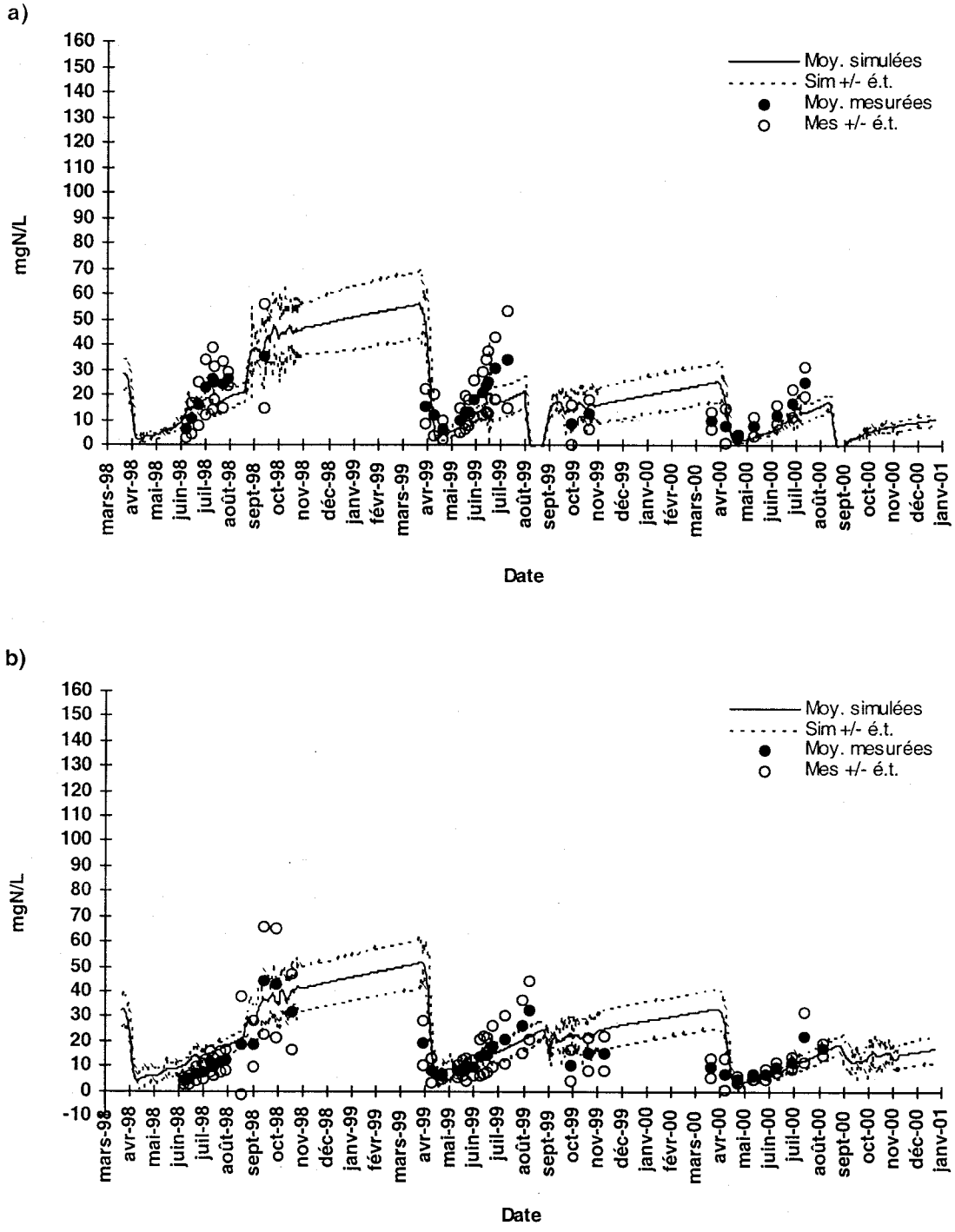



Figure 28 : Comparaison des concentrations en nitrates mesurées et simulées a) à 80 cm et b) à 105 cm

La figure 29 présente les concentrations en nitrates simulées en fonction des concentrations en nitrates mesurées. Dans la comparaison, toutes les valeurs obtenues sur le terrain sont utilisées sans considération pour les dates, profondeurs et traitements. La pente de la droite (0.80) et le coefficient de détermination (0.48) indiquent qu'il existe une grande dispersion autour de la droite de régression. Par contre, en soustrayant quatre valeurs élevées mesurées et une simulée qui donnent un poids important à la régression, on obtient une pente très proche de la valeur de 1 (0.97) avec un coefficient de détermination de 0.59. De plus, l'ordonnée à l'origine est relativement proche de la valeur de 0 (1.81).

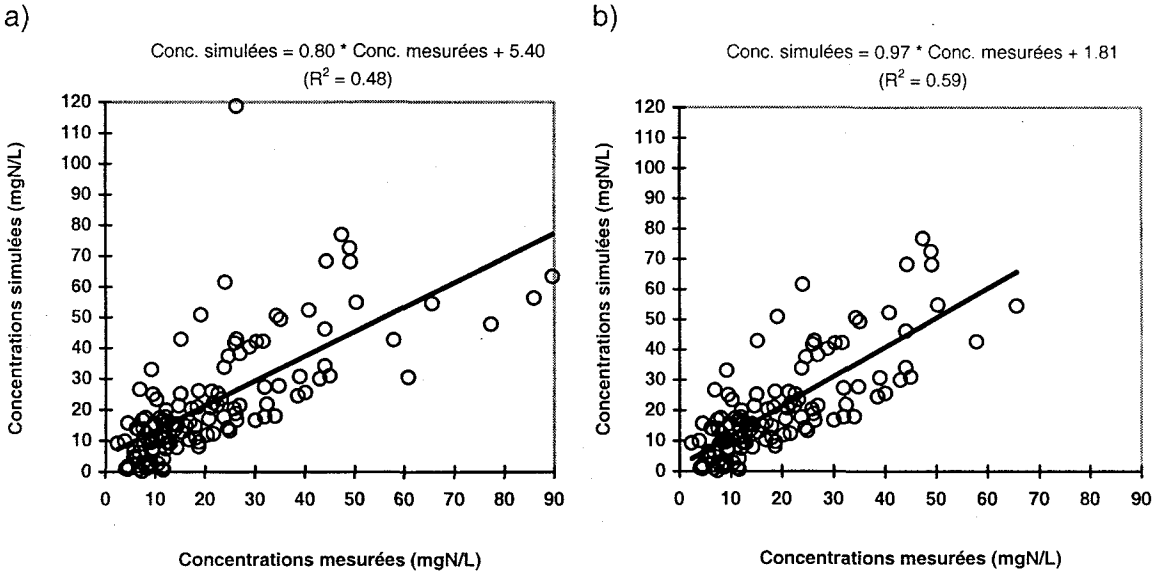



Figure 29: Régression linéaire entre les concentrations en nitrates simulées et les concentrations en nitrates mesurées pour a) la totalité des mesures et b) sans les valeurs extrêmes

AgriFlux calcule des concentrations moyennes en nitrates. Contrairement aux valeurs obtenues sur le terrain, la possibilité d'obtenir des concentrations extrêmes est beaucoup plus faible. Par ailleurs, suite aux résultats observés pour les paramètres physiques du sol, la parcelle à l'étude présente une structuration favorisant les écoulements préférentiels qui contribuent à l'étalement des résultats. On remarque

aussi que le modèle a généré dans un cas une valeur beaucoup plus élevée à celle mesurée. Puisque AgriFlux utilise une approche stochastique de type Monte Carlo, il y a autant de résultats probables qu'il y a de simulations. La présence de périodes de faibles précipitations et les conditions physiques du sol de la parcelle étudiée semblent être la principale cause de la dispersion élevée observée.

### 4.4.2 Contenus en nitrates du sol

La figure 30 présente les contenus en nitrates mesurés et simulés dans le sol. Les simulations ont été effectuées à des profondeurs de 30, 55, 80 et 105 cm et les échantillons de sol ont été prélevés, à plus ou moins 5 cm, à des profondeurs de 25, 50, 75 et 100 cm. À l'exception de certaines périodes, les courbes simulées représentent relativement bien les valeurs mesurées. L'absence d'échantillonnage à l'automne 1998 ne nous permet pas d'observer les pics de contenus en nitrates simulés par le modèle. Au départ de l'expérience, les contenus initiaux en nitrates du sol sont sous-estimés par AgriFlux pour les premières profondeurs. À l'été 1999, le modèle sous-évalue l'augmentation des quantités provoquée par la reprise de la minéralisation et par les apports de fertilisants sur la culture. Ce résultat s'observe principalement à une profondeur de 50 cm. À l'exception de ces deux dernières périodes, les écarts types calculés se situent généralement dans la courbe enveloppe définie par le modèle. Comme pour les concentrations retrouvées dans l'eau interstitielle, les pics et atténuations des contenus en nitrates des saisons sont bien reproduits par le modèle et respectent l'intervalle de temps des valeurs mesurées.

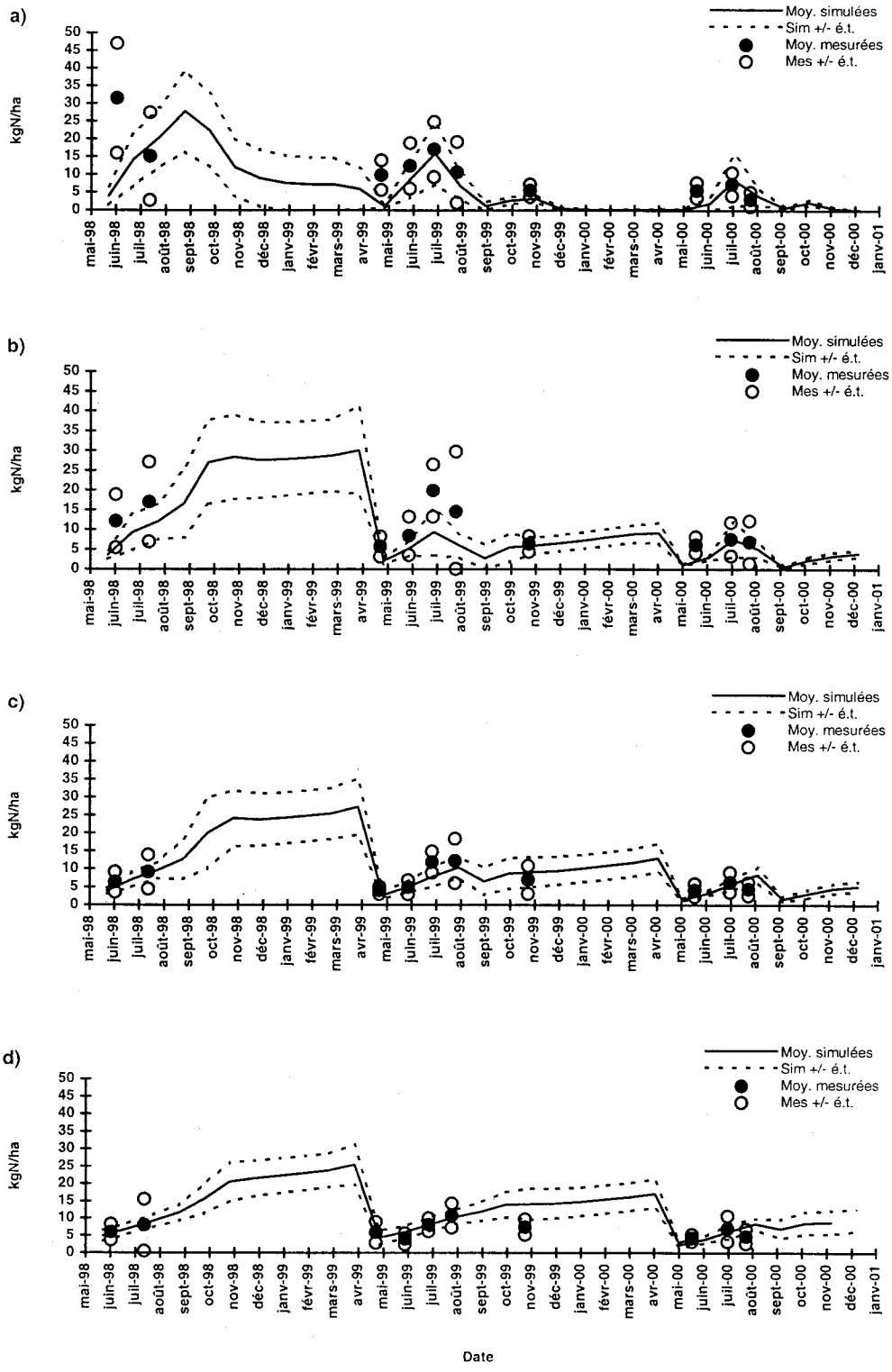



Figure 30 : Comparaison des contenus en nitrates mesurés et simulés a) à 30 cm, b) à 55 cm, c) à 80 cm et d) à 105 cm

La régression linéaire réalisée entre les valeurs mesurées et simulées démontre que les contenus en nitrates du sol (Figure 31) sont moins bien représentés par AgriFlux que les concentrations en nitrates dans l'eau. La pente de la droite calculée (0.61) est loin de la valeur de 1 et la dispersion est élevée (0.36). De la même façon que pour l'eau interstitielle, en enlevant quatre valeurs élevées obtenues sur le terrain qui donnent un poids important à la régression, les résultats conservent un certain écart autour de la pente de 1 (0.89) mais avec une dispersion plus faible (0.56) et avec une ordonnée à l'origine très près de la valeur de 0 (0.13).

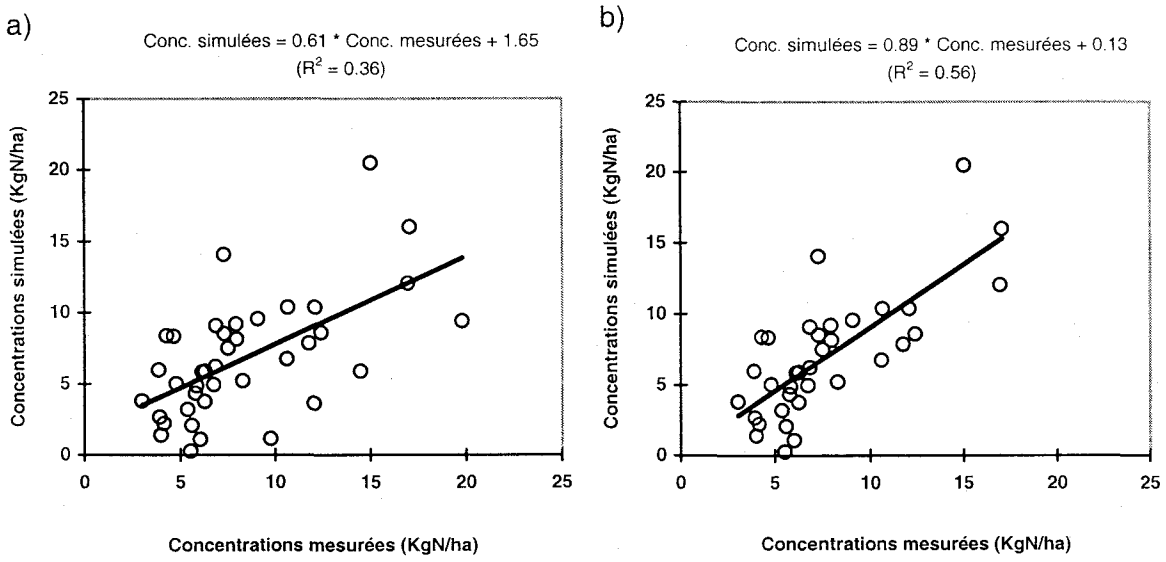



Figure 31: Régression linéaire entre les contenus en nitrates simulés et les contenus en nitrates mesurés pour a) la totalité des mesures et b) sans les valeurs extrêmes

Les résultats obtenus semblent provenir de la faible quantité de dates d'échantillonnages réalisées pour les contenus en nitrates du sol. Le nombre réduit de valeurs augmentant le poids relatif de chacune d'entre elles.

# 5. CONCLUSION

Cette étude a permis d'évaluer la percolation des nitrates et l'évolution des paramètres physiques du sol sur une parcelle expérimentale soumise à deux modes de travail de sol (un labour et un semis direct) à l'aide de données prélevées sur le terrain et de la modélisation.

Les résultats montrent des quantités en nitrates plus élevées dans les premières profondeurs pour les parcelles en labour suite à l'augmentation de la minéralisation des débris organiques enfouis. Par contre, l'absence de travail des horizons supérieurs en semis direct augmente les vitesses de percolation des nitrates dans le profil. Cette augmentation est le résultat de la conservation de la continuité des pores qui se manifeste par une infiltration plus rapide de la solution du sol.

Toutefois, peu d'écarts sont constatés entre les deux traitements pour les concentrations en nitrates mesurées dans l'eau interstitielle et pour les contenus en nitrates du sol. Dans la littérature on associe à plusieurs reprises ce résultat à la grande variabilité des moyennes calculées qui diminuent la représentativité des mesures. Cette situation est principalement observée pour les échantillonnages d'eau qui sont grandement influencés par l'hétérogénéité structurale.

Aussi, les effets ont pu ne pas être perçus par le nombre, la représentativité ou la fréquence des échantillonnages. L'absence d'une différentiation distincte entre les deux traitements peut aussi être directement reliée aux conditions culturales qui prévalent en semis direct. Également, dans cette étude, l'utilisation d'un maïs transgénique pour deux des trois saisons d'expérimentation a également affecté les résultats par la diminution des concentrations pouvant s'accumuler dans le profil du sol.

Peu d'écarts sont également constatés entre les paramètres physiques du sol des deux traitements. D'autres années d'expérimentation sont peut-être requises pour observer

une évolution sur cette parcelle. Malgré tout, les conductivités hydrauliques plus élevées mesurées en semis direct indiquent encore une fois une infiltration accrue en absence de travail du sol. De même, l'analyse de la conductivité hydraulique démontre que l'infiltration est de toute façon très rapide dans ce sol. La mise en jachère de la parcelle étudiée durant de nombreuses années a probablement favorisé sa structuration.

Considérant l'absence d'une différence significative entre les paramètres physiques des deux modes de travail de sol, une seule application du modèle AgriFlux a été réalisée. Les courbes simulées par AgriFlux correspondent relativement bien aux valeurs mesurées. Les concentrations et contenus en nitrates calculés par le modèle mènent aux mêmes conclusions que celles observées sur le terrain. En effet, pour les valeurs simulées et mesurées on obtient une diminution des quantités en nitrates avec la profondeur et dans le temps. Ce résultat indique que la matière organique provenant de la prairie de graminées est une source d'azote organique à ne pas négliger. Par contre, la comparaison des deux méthodes montre une grande dispersion. Cette situation est apparemment reliée au nombre réduit d'échantillons mesurés et à la non simulation des écoulements préférentiels induits par la structure du sol. Malgré cela, la similitude des résultats obtenus permet d'envisager l'utilisation de la modélisation comme outil de gestion prévisionnel.

En conclusion, le semis direct, par la conservation de l'état structural, favorise l'infiltration de l'eau dans le profil du sol et augmente ainsi les possibilités d'entraînement des nitrates vers les eaux souterraines. Par contre, la minéralisation plus élevée des débris organiques en labour augmente les quantités en nitrates et peut résulter à une percolation identique qu'en semis direct si le sol présente une bonne structuration. Aussi, les concentrations en nitrates supérieures à la norme établie par Santé Canada mesurées à une profondeur de 105 cm suggèrent que la solution du sol peut potentiellement contaminer les eaux souterraines pour les deux modes de travail de sol et ce, même en suivant les recommandations provinciales de fertilisation.

D'autres années d'échantillonnage sont nécessaires pour mettre en place une différenciation plus nette entre les deux modes de travail de sol et pour permettre une simulation distincte de leurs impacts. Entre autre, une fréquence d'échantillonnage plus élevée de sol destiné à l'analyse des nitrates permettrait d'augmenter la représentativité des mesures.

# BIBLIOGRAPHIE


ADDISCOTT, T.M. (1990). Measurement of nitrate leaching : a review of methods. Nitrates-Agriculture-Eau. International Symposium. 7-8 novembre 1990. Paris - La Défense. INRA Éditions. pp. 157-168.

ANGLE, J.S., GROSS, C.M., HILL, R.L., MCINTOSH, M.S. (1993). Soil nitrate concentrations under corn as affected by tillage, manure, and fertilizer applications. J. Environ. Qual. 22 : 141-147.

AZOOZ, R.H., ARSHAD, M.A. (1996). Soil infiltration and hydraulic conductivity under long-term no-tillage and conventional tillage systems. Can. J. Soil Sci. 76: 143-152.

BALLIF, J.L., MULLER, J.C. (1990). Les bougies poreuses et les lysimètres. Perspectives agricoles. Nitrates : Pour concilier agriculture performante et qualité des eaux. Tiré-à-part des n$^0$144 et 145. pp. 24-33.

BANTON, O. (1997). Comment gérer les ressources d'eau souterraine du Québec. Symposium sur la gestion de l'eau au Québec. Recueil de texte des conférenciers Volume 1. INRS-Eau. 10-11-12 décembre 1997. Montréal. pp. 49-68.

BANTON, O., BANGOY, L.M. (1997). Hydrogéologie, multiscience environnementale des eaux souterraines. Presses de l'Université du Québec. Québec. 460 p.

BANTON, O., LAROCQUE, M. (1997). AgriFlux 2.0 : Logiciel d'évaluation des pertes environnementales de nitrates et pesticides agricoles. Manuel d'utilisation. Rapport scientifique INRS-Eau. Ste-Foy, Qc.

BANTON, O., LAROCQUE, M., CORMIER, M. (1995). Modélisation du transport des nitrates dans la zone non saturée pour l'évaluation de la contamination des eaux souterraines. Hydrogéologie, N$^0$4 : 23-30.

BANTON, O., CÔTÉ, D., TRUDELLE, M. (1991). Détermination au champ de la conductivité hydraulique saturée à l'aide de l'infiltromètre à charge constante de Côté : théorie et approximations mathématiques. Can. J. Soil Sci. 71 : 119-126.

BENJAMIN, J.G. (1993). Tillage effects on near-surface soil hydraulic properties. Soil Tillage Res. 26: 277-288.

BLACKBURN, M. (1994). Sciences du sol. Notes de cours SLS-12503. Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation. Département des sols. Université Laval.

Bureau d'Audiences Publiques sur l'Environnement (BAPE). (1999). La problématique de la pollution agricole, ses impacts sur la santé des cours d'eau et sur la santé humaine. Consultation publique sur la gestion de l'eau au Québec. Mémoire #202.

BURGESS, M.S., MEHUYS, G.R., MADRAMOOTOO, C.A. (1999). Tillage and crop residue effects on soil nitrate under three years of corn (*Zea mays* L.) on land previously in corn and forage crops. Can. J. Soil Sci. 79 : 217-220.

CANEILL, J., BODET, J.M. (1991). Simplification du travail du sol et rendement des cultures. Conséquences sur les systèmes de culture. Perspectives Agricoles. N$^0$ 161 : 54-62.

CHAGNON, M. (1996). Échange de préoccupations et objectifs de concertation, Volet agricole. CPVQ. 2$^e$ colloque sur la gestion de l'eau en milieu rural. Stratégies de gestion : vers une vision commune. Québec, 10 - 11 septembre 1996. pp. 9-17.

CHANZY, A., BERTUZZI, P., BRUCKLER, L., GAUDU, J.-C. (1997). Mesure de la teneur en eau et du potentiel hydrique dans le sol. L'eau dans l'espace rural. Production végétale et qualité de l'eau. INRA Editions ($H_20$). Paris. pp. 143-145.

CHAPDELAINE, M.-C. (1992). Contamination des eaux souterraines par les nitrates. Mémoire de maîtrise. Université du Québec, INRS-Eau. Québec. 81 p.

Conseil des Productions Végétales du Québec (CPVQ). (1996a). 2$^e$ colloque sur la gestion de l'eau en milieu rural. Stratégies de gestion : vers une vision commune. Québec, 10 - 11 septembre 1996.

Conseil des Productions Végétales du Québec (CPVQ). (1996b). Grilles de référence en fertilisation. 2$^e$ édition.

CURE, B. (1991). *Simplification du travail du sol et évolution du parasitisme.* Perspectives Agricoles. N$^0$ 161 : pp. 46-53.

DAGNELIE. (1992). Analyse de la variance. Page consultée le 20 avril 2000. http://www.ulg.ac.be/pedaexpe/cours/glossaire/anavaria.html.

DE MARSILY, G. (1997). Le défi du développement durable. Symposium sur la gestion de l'eau au Québec. Recueil de texte des conférenciers. Volume 1. INRS-Eau. 10-11-12 décembre 1997. Montréal, Québec. pp. 103-107.

DODIER, G. (1996). Échanges de préoccupations et objectifs de concertation, Volet municipal. CPVQ. 2$^e$ colloque sur la gestion de l'eau en milieu rural. Stratégies de gestion : vers une vision commune. Québec, 10 - 11 septembre 1996. pp. 19-25.

DREES, L.R., KARATHANASIS, A.D., WILDING, L.P., BLEVINS, R.L. (1994). Micromorphological characteristics of long-term no-till and conventionally tilled soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 58 : 508-517.

DUPUY, A., BANTON, O., RAZACK, M. (1997). Contamination nitratée des eaux souterraines d'un bassin versant agricole hétérogène, I- Évaluation des apports à la nappe (modèle AgriFlux). Rev. Sci. Eau. 10(1) : 23-40.

DUVAL, M., ANGERS, D.A., LAVERDIÈRE, M.R. (1993). Revue de quelques facteurs régissant l'état et la stabilité de la structure du sol. Agrosol VI (2).

EATON, A.D., CLESCERI, L.S., GREENBERG, A.E. (1995). Automated hydrazine reduction method. 4500-NO3-H. Standard methods for the examination of water and wastewater. 19th edition. 4 : 90-91.

FRÉDÉRIC, J.-R., GRANVAL, P., BLANCHET, J. (1999). Les plus du non labour. Perspectives Agricoles. N$^0$ 250 : 32-34.

GAUTHIER, J. (1991). Mise en place des lysimètres à succion, parcelle B, Saint-Augustin. Document technique.

GERMON, J.C., TAUREAU, J.C., THOMAS, J.M. (1991). Effets des méthodes simplifiées de travail du sol sur les transformations de l'azote et leurs conséquences sur le lessivage des nitrates. Colloque : Simplification du travail du sol, Paris (France), 16 mai 1991. Les Colloques n$^0$65. INRA Éditions. pp.125-154.

GUÉRIF, J. (1991). Simplification du travail du sol et évolution du milieu physique et chimique. Perspectives Agricoles. N$^0$161 : 39-46.

HANSEN, S., JENSEN, H.E., NIELSEN, N.E., SVENDSEN, H. (1991). Simulation of nitrogen dynamics and biomass production in winter wheat using the Danish simulation model DAISY. Fert. Res. 27 : 245-259.

HEARD, J.R., KLADIVKO, E.J., MANNERING, J.V. (1988). Soil macroporosity, hydraulic conductivity and air permeability of silty soils under long-term conservation tillage in Indiana. Soil Tillage Res. 11 :1-18.

JOHNSSON, H., BERGSTRÖM, L., JANSSON, P-E., PAUSTIAN, K. (1987). Simulated nitrogen dynamics and losses in a layered agricultural soil. Agric. Ecosystems Environ. 18 : 333-356.

KARAM, A. (1998). Sciences environnementales du sol. Notes de cours SLS-18766. Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation. Département des sols et du génie agroalimentaire. Université Laval.

LAFLEURIEL, P. (1990). La mesure de l'azote minéral dans le sol. Perspectives agricoles. Nitrates : Pour concilier agriculture performante et qualité des eaux. Tiré-à-part des n$^0$144 et 145. pp. 18-23.

LAJOIE, M. (1999). L'agriculture et ses multiples usages de l'eau. Document de soutien à l'atelier de travail de la Comission du 2 juin 1999 à Québec. Bureau d'Audiences Publiques sur l'Environnement.

LAL, R., MAHBOUBI, A.A., FAUSEY, N.R. (1994). Long-term tillage and rotation effects on properties of a central Ohio soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 58 : 517-522.

LAROCHE, R. (1996). Problématique : état des connaissances, Notions d'hydrologie. CPVQ. 2e colloque sur la gestion de l'eau en milieu rural. Stratégies de gestion : vers une vision commune. Québec, 10 - 11 septembre 1996. pp. 27-35.

LAROCQUE, M., BANTON, O. (1996). Using field data and simulation modeling to determine nitrogen cycle parameters. Soil Sci. Soc. Am. J. 60 : 1840-1845.

LAROCQUE, M., BANTON, O. (1995). Gestion de la contamination des eaux souterraines par les fertilisants agricoles : application du modèle AgriFlux. Rev. Sci. Eau. 8(1) : 3-21.

LAROCQUE, M., BANTON, O., LAFRANCE, P. (1998). Simulation par le modèle AgriFlux du devenir de l'atrazine et du dééthylatrazine dans un sol du Québec sous maïs sucré. Rev. Sci. Eau. 11 : 191-208.

LAVERDIÈRE, M.R. (1995). Conservation des sols et du milieu. Notes de cours SLS-19937. Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation. Département des sols. Université Laval.

LEVANON, D., CODLING, E.E., MEISINGER, J.J., STARR, J.L. (1993). Mobility of agrochemicals through soil from two tillage systems. J. Environ. Qual. 22 :155-161.

MARGAT, J. (1997). L'eau dans le monde : Ressources et problèmes. Symposium sur la gestion de l'eau au Québec. Recueil de texte des conférenciers. Volume 1. INRS-Eau. 10-11-12 décembre 1997. Montréal. Québec. pp. 29-39.

MARTIN, P., MEYNARD, J.-M. (1997). Systèmes de culture, érosion et pollution des eaux par l'ion nitrate. L'eau dans l'espace rural. Production végétale et qualité de l'eau. INRA Éditions ($H_20$). Paris. pp. 303-322.

McCORMACK, R. (1996). Problématique : état des connaissances, Eaux souterraines. CPVQ. 2e colloque sur la gestion de l'eau en milieu rural. Stratégies de gestion : vers une vision commune. Québec, 10 - 11 septembre 1996. pp. 51-53.

NEMATI, M.R., BANTON, O., CARON, J., DELAPORTE, L. (2001). Tracing particle transport through the soil profile during wetting events using radioactive Cesium-137. Soil Sci. Am. J. (Sous presse).

NEMATI, M.R., CARON, J., GALLICHAND, J. (2000). Using paper de-inking sludge to maintain soil structural form : field measurements. Soil Sci. Soc. Am. J. 64 : 275-285.

NICOLARDOT, B., MARY, B., HOUOT, S., RECOUS, S. (1997). La dynamique de l'azote dans les sols cultivés. Maîtrise de l'azote dans les écosystèmes. Reims (France). Les Colloques n°83. INRA Éditions. pp. 89-92.

Orion Research, Inc. (1996). Nitrate electrode. Instruction manual. Model 93-07 ; Model 97-07 ion plus.

PAGE, A.L. Editor (1982). Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. Second edition. ASA-CSSA-SSSA Madison, Wisconsin, USA. Agronomy monograph, $9^0$. pp. 665-669.

PAGÈS, L., BRUCKLER, L., PELLERIN, S., LAFOLIE, F. (1997). Architecture racinaire et absorption hydrique. L'eau dans l'espace rural. Production végétale et qualité de l'eau. INRA Éditions ($H_20$). Paris. pp. 63-70.

PARADIS, I. (2000). Portrait agroenvironnemental: De nombreux défis à relever dans les grandes cultures. Terre de Chez Nous. Vol. 71, $n^0$09.

PATNI, N.K., MASSE, L., JUI, P.Y. (1998). Groundwater quality under conventional and no tillage : I. Nitrate, electrical conductivity, and pH. J. Environ. Qual. 27 : 869-877.

PIKUL, J.L. Jr, ZUZEL, J.F., RAMING, R.E. (1990). Effect of tillage-induced soil macroporosity on water infiltration. Soil Tillage Res. 17 :153-165.

RANDALL, G.W., IRAGAVARAPU, T.K. (1995). Impact of long-term tillage systems for continuous corn on nitrate leaching to tile drainage. J. Environ. Qual. 24 : 360-366.

RATEL, M.O. (1992). Élimination des nitrates des eaux potables. Document technique du fond national pour le développement des adductions d'eau. Office international de l'eau. Limoge. France. 61 p.

RAWLS, W.J., BRAKENSIEK, D.L. (1989). Estimation of soil water retention and hydraulic properties. Dans : Unsaturated flow in hydrologic modeling theory and practice. H.J. Morel-Seytoux (ed.). Kluwer Academic Publishers. Pays-Bas. pp. 275-300.

RECOUS, S., NICOLARDOT, B., SIMON, J.-C. (1997). Le cycle de l'azote dans les sols et la qualité des eaux souterraines. L'eau dans l'espace rural. Production végétale et qualité de l'eau. INRA Éditions ($H_20$). Paris. pp. 193-215.

SAUER, T.J., CLOTHIER, B.E., DANIEL, T.C. (1990). Surface measurements of the hydraulic properties of a tilled and untilled soil. Soil Tillage Res. 15 : 359-369.

SHIPITALO, M.J., EDWARDS, W.M. (1993). Seasonal patterns of water and chemical movement in tilled and no-till column lysimeters. Soil Sci. Soc. Am. J. 57 : 218-223.

STURNY, W.G. (1993). Le travail du sol : une synthèse. Service cantonal de la protection des sols. Gesellschaftsstr, 78. CH-3012 Berne. pp. 154-167.

TAN, C.S., DRURY, C.F., SOULTANI, M., VAN WESENBEECK, I.J., NG, H.Y.F., GAYNOR, J.D., WELACKY, T.W. (1998). Effect of controlled drainage and tillage on soil structure and tile drainage nitrate loss at the field scale. Wat. Sci. Technol. Vol.38, $N^o$.4-5 : pp. 103-110.

TAUREAU, J.C., MARY, B. (1995). Incorporation des pailles. Quel est l'impact sur l'azote minéral du sol ? Perspectives agricoles n°206 : 16-19.

THÉRIAULT, R. (1995). Introduction au génie rural. Notes de cours GRR-18511. Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation. Département de génie rural. Université Laval.

TRÉPANIER, L. (1992). Évaluation de l'applicabilité d'un modèle mathématique simulant le devenir des nitrates dans les eaux souterraines agricoles. Mémoire de maîtrise. Université du Québec, INRS-Eau. Québec. 176 p.

VANDENBYGAART, A.J., PROTZ, R., TOMLIN, A.D. (1999). Changes in pores structure in a no-till chronosequence of silt loam soils, southern Ontario. Can. J. Soil Sci. 79 :149-160.

WAGENET, R.J., HUTSON, J.L. (1989). LEACHM : Leaching Estimation and Chemistry Model : A process based model of water and solute movement transformation, plant uptake and chemical reaction in the unsaturated zone. Continuum vol. 2. Water Res. Inst., Cornell Univ., Ithaca, NY.

WEED, D.A.J., KANWAR, R.S. (1996). Nitrate and water present in and flowing from root-zone soil. J. Environ. Qual. 25 : 709-719.

# Annexes

# Annexe A

Concentrations en nitrates dans

l'eau interstitielle

## Concentrations en mg $NO_3^-$/L
## Année 1998

| Parcelle | Station | Date 27-05-98 | 03-06-98 | 17-06-98 | 29-06-98 | 06-07-98 | 15-07-98 | 24-07-98 | 01-08-98 | 04-08-98 | 13-08-98 | 20-08-98 | 08-09-98 | 23-09-98 | 05-10-98 | 21-10-98 | 08-11-98 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Labour 1 | I 30 cm | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | I 55 cm | 8267.5360 | * | * | * | 76.6131 | * | 145.2779 | * | * | * | * | * | * | * | * | 256.4726 |
| | I 80 cm | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | I 105 cm | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | II 30 cm | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | II 55 cm | * | * | 9428.8242 | 194.2230 | 234.9799 | 288.1391 | 249.6702 | * | * | * | * | 119.5613 | * | 66.1790 | 91.1493 | 100.5831 |
| | II 80 cm | 21808.1864 | * | 966.2232 | 27.5492 | 101.4991 | * | 199.4612 | 211.6348 | * | * | * | * | * | 246.3568 | 459.9789 | 482.5320 |
| | II 105 cm | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | III 30 cm | * | * | 4180.7581 | 78.4327 | 114.2873 | 176.0924 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | III 55 cm | * | * | * | * | 67.7421 | * | 158.6493 | 204.0281 | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | III 80 cm | * | * | * | 18.2126 | 34.8851 | 79.7293 | 104.8858 | 125.7457 | 110.9202 | 131.7003 | 103.0208 | * | * | * | * | * |
| | III 105 cm | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| Semis direct 1 | IV 30 cm | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | IV 55 cm | 24619.2594 | * | 4708.6113 | 60.4512 | 105.1313 | 156.0441 | 54.1911 | 184.3024 | * | * | * | 494.9752 | * | 544.3561 | * | * |
| | IV 80 cm | * | 137.9800 | 362.7288 | 6.0781 | 16.3090 | 42.2223 | 98.1834 | 74.1083 | 60.2372 | 70.1934 | * | * | * | 116.7294 | * | * |
| | IV 105 cm | * | * | * | 17.8770 | * | 16.1265 | 15.3857 | * | * | * | * | 26.9233 | * | * | * | * |
| | V 30 cm | * | * | * | * | 171.9929 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | V 55 cm | * | * | * | * | 75.9427 | 131.0460 | 161.4678 | * | * | * | * | * | * | 403.0923 | * | * |
| | V 80 cm | * | * | 7612.1881 | 22.8733 | 26.1014 | 38.0913 | 52.7784 | 71.1546 | * | * | * | * | 48.7474 | 42.8797 | * | * |
| | V 105 cm | 2812.6705 | 1226.1683 | 9251.1451 | 15.1919 | 20.4068 | 27.7197 | 32.5195 | 43.6757 | 39.7502 | 57.4328 | 50.7701 | * | * | * | * | * |
| | VI 30 cm | * | * | * | * | 146.1798 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | 240.5720 |
| | VI 55 cm | * | * | * | * | 23.6958 | * | 157.2585 | * | * | * | * | * | 295.6867 | * | 743.7664 | * |
| | VI 80 cm | 427.6408 | * | 1255.1065 | 45.7335 | 59.6356 | 111.0423 | 101.7029 | 128.3291 | 113.8397 | 128.7315 | * | * | * | 283.9091 | * | * |
| | VI 105 cm | * | 755.3450 | 7155.7945 | 27.6776 | 25.7595 | 23.9127 | 23.4780 | 20.6648 | 26.3448 | 29.7843 | 29.3857 | 35.9594 | 47.8830 | 46.2244 | 84.8460 | 111.1620 |
| Labour 2 | VII 30 cm | * | * | 23165.3701 | 221.2315 | 291.4464 | 382.0204 | 339.7830 | * | * | * | * | * | * | * | 259.2771 | * |
| | VII 55 cm | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | VII 80 cm | * | * | * | * | 11.9899 | 36.0990 | 65.4848 | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | VII 105 cm | * | * | * | 3.2294 | 4.4996 | 7.7391 | 13.9041 | * | * | * | * | 49.3085 | 60.9654 | 39.7770 | * | * |
| | VIII 30 cm | * | * | 22194.7183 | 161.2577 | 238.0986 | 346.1898 | 338.2905 | * | * | * | * | * | 45.5840 | 13.9562 | 252.8017 | * |
| | VIII 55 cm | * | * | * | * | 65.1148 | * | * | * | * | * | * | 45.7666 | * | * | * | * |
| | VIII 80 cm | * | 1051.0010 | 266.2710 | 24.5257 | 54.8579 | 119.2877 | 133.6204 | 156.6306 | 142.5864 | * | * | 132.8292 | 141.9843 | 104.7280 | 125.0417 | * |
| | VIII 105 cm | 8303.4131 | 748.7207 | 5430.7297 | 16.1386 | * | 26.0357 | 32.5195 | 39.6139 | 26.9214 | 32.9272 | * | 22.6914 | 83.0089 | 92.7917 | 272.7297 | * |
| | IX 30 cm | * | * | 12662.4943 | 261.5466 | 285.1117 | 461.0445 | 410.5959 | * | * | * | * | * | * | 139.0890 | 112.0616 | 121.3880 |
| | IX 55 cm | 22.3122 | 3528.7018 | 2525.2874 | 51.3715 | 178.1478 | 329.5552 | 303.0341 | 311.4520 | 75.7756 | * | * | 179.7589 | 143.2602 | * | 192.2141 | * |
| | IX 80 cm | * | * | * | * | 30.7105 | * | * | * | * | 54.1272 | * | 99.4512 | * | * | * | * |
| | IX 105 cm | * | 148.7076 | * | 27.1675 | 28.0029 | 34.8291 | 38.7812 | 57.3570 | 48.7216 | 56.9114 | * | * | * | * | * | 90.6477 |
| Semis direct 2 | X 30 cm | * | * | * | * | 268.0975 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | X 55 cm | 24619.2594 | 2322.2116 | 2340.2520 | 17.2242 | 28.3746 | 55.7291 | 72.7825 | 96.1421 | 83.7106 | * | * | * | * | 63.7398 | * | 514.4250 |
| | X 80 cm | 4318.1072 | 6146.4451 | 3506.1550 | 8.8996 | 25.6465 | 22.7637 | 18.2676 | 21.1752 | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | X 105 cm | 19234.6181 | 865.8472 | 1185.4806 | 14.7739 | 19.1048 | 39.1283 | 55.8870 | 60.7177 | * | 38.8015 | * | * | * | * | * | 218.5501 |
| | XI 30 cm | * | * | 9251.1451 | 199.7183 | * | 477.8553 | 442.5042 | 434.7430 | * | * | 490.2512 | 605.5935 | 568.1406 | 354.1817 | 277.3673 | 235.8081 |
| | XI 55 cm | 16387.1404 | 1647.0459 | 3440.0842 | 56.9051 | 71.0976 | 78.6657 | 75.7241 | 82.3744 | 72.8795 | * | * | * | * | * | * | * |
| | XI 80 cm | 20525.4097 | * | 2029.0711 | 45.5214 | 55.3423 | 95.3643 | 107.6932 | 134.7477 | 116.3311 | 142.3158 | 127.4880 | * | * | * | * | * |
| | XI 105 cm | 3462.4644 | 885.1260 | 277.9159 | 16.5952 | 23.4884 | 49.8285 | 43.8687 | 76.8713 | 66.2575 | 78.6693 | 74.3857 | 249.7542 | * | 281.5496 | * | * |
| | XII 30 cm | 23372.6723 | * | 5749.6886 | 194.2230 | 221.9306 | 440.8602 | 454.3483 | 125.7457 | * | * | * | * | 155.2719 | 100.8679 | 73.5170 | * |
| | XII 55 cm | 2178.5440 | 916.8689 | 3472.9625 | 78.0689 | 112.7903 | 169.1387 | 163.6144 | 186.5650 | 168.0877 | * | * | * | * | * | * | * |
| | XII 80 cm | * | * | * | 46.8093 | 75.6096 | 100.1779 | 112.5402 | 127.8082 | * | * | 116.6956 | * | * | 137.9330 | * | * |
| | XII 105 cm | 2344.9615 | 109.2545 | 2127.9058 | 15.6945 | 19.1048 | 36.4237 | 45.2417 | 59.2539 | 50.2209 | 61.7797 | 57.5093 | 104.8242 | 139.4665 | 135.0850 | 213.5760 | * |

Le symbole * signifie qu'il n'y pas eu d'échantillonnage

Concentrations en mg $NO_3^-$/L
Année 1999

| Parcelle | Station | Date | 18-04-99 | 29-04-99 | 10-05-99 | 31-05-99 | 06-06-99 | 10-06-99 | 18-06-99 | 27-06-99 | 01-07-99 | 05-07-99 | 12-07-99 | 27-07-99 | 16-08-99 | 25-08-99 | 15-09-99 | 15-10-99 | 06-11-99 | 25-11-99 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Labour 1 | I 30 cm | | * | | * | * | | 175.7706 | | | | | | | | | | | 95.2632 | * |
| | I 55 cm | | 78.1235 | * | 55.9640 | 58.8308 | * | * | * | * | * | 118.3661 | 146.0133 | * | * | * | * | * | * | * |
| | I 80 cm | | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | I 105 cm | | 135.4293 | 38.7591 | 20.6638 | * | * | 87.9425 | * | 121.0053 | * | * | * | * | * | * | * | * | 31.3452 | 37.9134 |
| | II 30 cm | | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | II 55 cm | | 56.1112 | * | * | 64.6978 | 118.6279 | 128.2026 | 153.9822 | 190.0192 | 172.5140 | 172.7025 | 120.8122 | * | * | * | * | 45.0561 | 61.6968 | * |
| | II 80 cm | | 36.6650 | * | 16.5593 | 25.3323 | 53.3340 | 72.2009 | 93.2870 | 123.1240 | 134.1985 | 135.0683 | 147.3057 | 95.7662 | * | * | * | 17.1540 | * | * |
| | II 105 cm | | 55.8706 | 34.4482 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | III 30 cm | | 60.8858 | * | * | * | 90.2329 | 115.9090 | * | * | 204.2533 | * | 230.8869 | 43.6208 | * | * | * | * | * | * |
| | III 55 cm | | 55.6310 | 16.0423 | * | * | * | 76.4342 | * | 132.5500 | 143.2047 | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | III 80 cm | | 66.3513 | * | 17.8545 | 22.2524 | 25.4573 | * | * | 53.2874 | 64.8338 | 70.1293 | 93.5677 | * | * | * | * | * | * | * |
| | III 105 cm | | 115.0218 | 16.1125 | * | * | * | 31.2594 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | 41.3425 | * |
| Semis direct 1 | IV 30 cm | | 105.0946 | * | 29.8420 | 35.0281 | * | 61.9329 | * | 136.6381 | * | * | * | * | 22.1602 | * | * | * | * | * |
| | IV 55 cm | | 60.8858 | 33.8517 | 16.4138 | 17.9287 | 47.9280 | 31.5347 | 37.9462 | 85.8865 | 95.3186 | 101.3952 | 126.8117 | * | 38.3176 | * | * | 7.5719 | * | 29.3867 |
| | IV 80 cm | | 50.3946 | 39.7881 | 28.0482 | 37.8613 | 40.5678 | 56.7352 | 69.4167 | 155.6353 | 126.3045 | * | 154.6209 | 156.0983 | * | * | * | * | 32.7090 | * |
| | IV 105 cm | | 106.4585 | 37.7567 | 23.0828 | 27.2631 | 50.4508 | 29.2704 | 38.9341 | 64.2185 | 54.0524 | * | 64.3393 | * | * | * | * | 49.5809 | 61.9601 | * |
| | V 30 cm | | 39.7849 | 31.2926 | * | * | * | 125.4236 | 168.4752 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | 111.5862 |
| | V 55 cm | | 62.7455 | 23.6625 | 21.4090 | 27.2631 | 73.4934 | 64.7077 | 99.0523 | 173.4690 | 147.6120 | 162.0406 | 180.4022 | * | * | * | * | * | * | * |
| | V 80 cm | | 36.1953 | * | 19.5945 | 29.5958 | * | 35.3409 | * | 65.9124 | 74.7932 | 81.8672 | 109.6511 | * | * | * | * | * | * | * |
| | V 105 cm | | 39.4443 | * | 27.0720 | 37.6980 | 39.3718 | 35.6521 | * | 48.2258 | 59.1982 | 66.4016 | 92.7468 | * | * | * | * | * | 69.5108 | * |
| | VI 30 cm | | 94.7940 | * | * | * | * | 28.7617 | * | 196.7315 | * | 54.8472 | * | * | * | * | * | 9.7874 | 48.8127 | * |
| | VI 55 cm | | 52.8344 | 14.5093 | 12.9229 | * | * | 16.5569 | * | 22.9626 | 27.6259 | 41.3614 | 63.4944 | * | * | * | * | 23.1587 | * | * |
| | VI 80 cm | | 36.0400 | 18.3680 | 18.4983 | 26.6804 | 27.6114 | 24.6714 | 34.3861 | 59.6517 | 54.7592 | 60.6238 | 88.3589 | 118.0726 | * | * | * | * | * | * |
| | VI 105 cm | | 33.5006 | 18.4483 | 29.8420 | 53.7276 | 50.6669 | 40.8406 | * | 42.1559 | 37.7331 | 31.1915 | 36.2842 | 39.5600 | * | * | * | 18.9590 | 66.8968 | 63.3797 |
| Labour 2 | VII 30 cm | | 111.6127 | * | 30.7815 | 30.1118 | 126.4841 | 136.3155 | 162.7998 | 208.1484 | 193.0727 | 91.7337 | 24.1920 | * | * | 8.2824 | * | 17.0795 | 42.4126 | * |
| | VII 55 cm | | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | VII 80 cm | | 79.4783 | 26.3922 | 18.1736 | 35.1798 | 44.3783 | 74.7774 | 106.9915 | 120.4813 | 127.4031 | 138.1775 | 141.5786 | * | * | * | * | 46.6516 | 46.5786 | 48.9140 |
| | VII 105 cm | | 81.2048 | 34.5989 | 22.2794 | 25.1143 | 24.3920 | 18.6368 | * | 22.9626 | 42.5971 | 49.8474 | 61.2953 | * | * | * | * | * | 39.9576 | * |
| | VIII 30 cm | | * | * | 36.5840 | * | 91.0077 | 143.6768 | * | 196.7315 | 193.0727 | * | * | * | 13.9667 | * | * | 4.5123 | 30.0382 | * |
| | VIII 55 cm | | 85.8713 | 25.7097 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | VIII 80 cm | | 59.5913 | * | 18.2542 | 29.5958 | 46.5150 | 39.6067 | 66.7915 | 80.4742 | 83.7064 | 96.8835 | 121.3456 | * | * | * | * | 11.2003 | * | * |
| | VIII 105 cm | | 92.7786 | 38.9287 | 19.5945 | 39.7043 | 56.6234 | 45.3707 | * | 76.0602 | 101.2760 | 119.4486 | 135.4760 | 142.8903 | 152.3604 | 188.6603 | * | 30.3279 | 54.2967 | * |
| | IX 30 cm | | 77.1226 | * | 25.8993 | 42.7306 | 111.2597 | 122.1683 | * | 209.9627 | 253.6300 | 271.0179 | 221.9104 | * | * | * | * | * | * | * |
| | IX 55 cm | | 159.4577 | 48.0071 | * | 33.8380 | 66.3270 | 60.5905 | 83.0987 | 125.2797 | 137.1358 | 162.7799 | 181.1988 | 168.1634 | * | * | * | * | * | * |
| | IX 80 cm | | 59.0812 | * | 19.8565 | * | 46.7142 | 33.2376 | 42.2352 | 52.1437 | 53.8188 | 59.5301 | 86.0536 | * | * | * | * | * | * | * |
| | IX 105 cm | | 18.5918 | 20.5765 | 29.5789 | * | 51.1020 | 23.4074 | 29.0959 | 34.5278 | 38.3924 | 44.2840 | 53.0006 | 76.5972 | * | * | * | * | 38.4550 | 56.1620 |
| Semis direct 2 | X 30 cm | | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | X 55 cm | | 212.6723 | 160.2349 | 84.8556 | 99.2362 | 113.1786 | 124.8751 | 138.9391 | * | 167.3632 | 193.5163 | 224.8631 | 237.2860 | * | * | * | 161.1653 | * | * |
| | X 80 cm | | 114.5285 | 107.2193 | 65.9271 | 69.9307 | 86.4568 | 97.6971 | 121.6625 | * | 200.7458 | 233.2195 | 276.6012 | 315.1680 | * | * | * | * | 82.4210 | * |
| | X 105 cm | | 109.2397 | 88.4758 | 36.7463 | * | 18.2389 | * | * | * | 126.3045 | 74.0663 | 129.6364 | 131.4099 | * | * | * | * | 92.4651 | * |
| | XI 30 cm | | 126.9735 | * | 82.2657 | 156.2103 | 211.2648 | 280.9421 | 176.6032 | 538.3807 | 449.2046 | * | 473.4831 | * | * | * | * | * | 71.0069 | * |
| | XI 55 cm | | 296.1030 | * | * | 81.7004 | 105.6961 | * | * | * | 115.3256 | * | 136.0742 | * | * | * | * | 27.6802 | * | * |
| | XI 80 cm | | 129.1754 | * | 45.2481 | 62.2301 | 97.4504 | 80.9157 | 106.0788 | 126.3717 | 140.7455 | 152.0370 | 158.0651 | 142.8903 | * | * | * | 10.3118 | * | * |
| | XI 105 cm | | 96.8532 | * | 23.8095 | * | 39.8800 | 38.9183 | 55.7944 | 91.2659 | 78.4421 | 86.8576 | 100.4020 | 109.6014 | 128.8692 | 156.6544 | * | 82.8387 | 107.3285 | * |
| | XII 30 cm | | 45.2603 | * | 26.4792 | 15.0179 | 3.7342 | 3.6660 | 28.2365 | 36.6905 | 43.9081 | 48.7258 | 30.6904 | * | * | 43.7566 | * | * | 43.5103 | * |
| | XII 55 cm | | 145.6954 | 78.9794 | 35.7829 | * | 54.9541 | 39.4334 | 48.6477 | 84.7757 | 67.7030 | 72.0710 | 93.9809 | 107.0809 | 118.7874 | 163.5758 | 139.4865 | * | * | * |
| | XII 80 cm | | 71.3809 | 65.4578 | * | 82.4095 | 107.0603 | 54.3022 | * | 67.3581 | 71.6236 | 65.5011 | 87.5836 | 76.2416 | 103.7064 | * | * | 93.5684 | * | * |
| | XII 105 cm | | 132.5499 | * | 17.6971 | 21.4963 | 30.4642 | 22.3056 | * | 33.7868 | 28.8485 | 26.9637 | 43.6602 | 51.0977 | 62.1878 | 85.5215 | 82.9340 | * | 110.5764 | 109.2029 |

Le symbole * signifie qu'il n'y pas eu d'échantillonnage

## Concentrations en mg $NO_3^-$/L
## Année 2000

| Parcelle | Station | Date | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 03-04-00 | 20-04-00 | 04-05-00 | 24-05-00 | 07-06-00 | 21-06-00 | 10-07-00 | 24-07-00 | 18-08-00 | 21-08-00 |
| Labour 1 | I 30 cm | 75.8870 | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | I 55 cm | 40.5256 | 40.1062 | * | 44.6803 | * | 90.9102 | 119.9031 | * | * | * |
| | I 80 cm | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | I 105 cm | 39.0359 | 27.5964 | 25.5091 | * | * | * | * | * | * | * |
| | II 30 cm | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | II 55 cm | 65.0241 | 45.2974 | * | * | * | * | 94.7580 | 101.5175 | * | * |
| | II 80 cm | 46.4184 | 21.8225 | * | 47.4904 | 53.9782 | 64.6497 | 85.3897 | * | * | * |
| | II 105 cm | 35.3809 | 29.0741 | * | * | 31.3771 | 42.2558 | * | * | * | * |
| | III 30 cm | 41.4854 | 33.1241 | * | * | * | 90.5086 | * | * | * | * |
| | III 55 cm | 36.2188 | 19.4903 | 14.4614 | * | * | * | * | * | * | * |
| | III 80 cm | 42.0721 | 22.1090 | 18.4554 | * | * | * | * | * | * | * |
| | III 105 cm | 37.0766 | 20.6235 | 19.0372 | * | * | * | 54.0596 | * | * | * |
| Semis direct 1 | IV 30 cm | 45.3444 | 39.2439 | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | IV 55 cm | 40.5256 | 18.1808 | 16.5923 | 34.6532 | * | 54.3979 | 72.8798 | 92.2015 | * | * |
| | IV 80 cm | 19.3418 | 22.7921 | 19.6373 | 30.2094 | * | 49.7884 | 81.9812 | 133.1524 | * | * |
| | IV 105 cm | 30.3163 | 23.2929 | 19.3778 | 28.4219 | * | * | 48.2760 | 66.1192 | * | * |
| | V 30 cm | 62.0502 | 25.7422 | * | * | * | * | 87.7404 | * | * | * |
| | V 55 cm | 56.2403 | 30.3659 | * | 44.0041 | * | 74.4890 | 115.1170 | * | * | * |
| | V 80 cm | 33.4481 | 18.9885 | * | * | * | 66.3900 | 104.2065 | 126.8959 | * | * |
| | V 105 cm | 28.1285 | 21.8225 | 25.0607 | 31.3036 | * | 50.2312 | * | 111.7748 | 85.5000 | 86.4000 |
| | VI 30 cm | 42.4679 | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | VI 55 cm | 43.8826 | 13.9460 | * | * | * | * | * | 102.4097 | * | * |
| | VI 80 cm | 27.7362 | 15.3456 | 18.4554 | 19.3146 | * | 32.1206 | 64.2049 | * | * | * |
| | VI 105 cm | 35.3809 | 16.6669 | 27.5063 | 28.8586 | * | * | 35.6477 | 50.6314 | * | * |
| Labour 2 | VII 30 cm | 37.2506 | 23.2929 | * | 63.1281 | * | 105.2110 | 134.2679 | 89.8126 | * | * |
| | VII 55 cm | * | 22.4968 | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | VII 80 cm | 31.1799 | * | 15.3876 | 23.6692 | * | * | 63.3390 | * | * | * |
| | VII 105 cm | 47.0749 | 15.6828 | 17.1914 | 26.2019 | * | * | * | * | * | * |
| | VIII 30 cm | 41.0988 | 22.8914 | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | VIII 55 cm | 37.9547 | 24.2223 | 17.1154 | 40.3615 | * | 66.9804 | 90.5647 | * | * | * |
| | VIII 80 cm | 44.2954 | 17.1073 | 17.9708 | 29.1534 | * | * | 93.9041 | 102.4097 | * | * |
| | VIII 105 cm | 17.4489 | 14.7568 | 20.8025 | 27.9918 | * | * | 49.3810 | * | * | * |
| | IX 30 cm | 51.6953 | 22.1090 | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | IX 55 cm | 32.0681 | 15.8887 | 13.5910 | 39.1491 | 49.6727 | * | 119.9031 | 147.8946 | * | * |
| | IX 80 cm | 39.5880 | 16.0972 | 18.8691 | * | * | * | 82.7267 | * | * | * |
| | IX 105 cm | 31.0343 | 12.1349 | 25.5091 | 22.2687 | 23.6107 | * | 50.2831 | 100.6330 | 75.8200 | * |
| Semis direct 2 | X 30 cm | 69.1043 | 61.9445 | * | * | * | * | 64.4962 | * | * | * |
| | X 55 cm | 63.5197 | 40.2810 | 37.5170 | 42.8999 | 34.5473 | 59.9627 | * | 339.6078 | * | * |
| | X 80 cm | 52.9197 | 51.8321 | 16.9643 | 10.4420 | * | * | 20.3371 | * | * | * |
| | X 105 cm | 57.8424 | 48.7717 | 15.1171 | 19.8118 | 23.5077 | 25.5155 | * | * | * | * |
| | XI 30 cm | 57.8424 | 46.0919 | * | 22.9583 | * | 36.1989 | * | * | * | * |
| | XI 55 cm | 58.3865 | 24.8623 | * | 42.0365 | 56.1461 | 73.8324 | 108.0489 | 129.1362 | * | * |
| | XI 80 cm | 54.9392 | 28.9480 | * | 46.0639 | * | * | * | 121.9962 | * | * |
| | XI 105 cm | 52.9197 | 21.3533 | 15.3876 | 23.0753 | 40.4404 | 46.5895 | 70.2881 | 174.6455 | * | * |
| | XII 30 cm | 43.8826 | 20.8036 | * | 4.3783 | * | 24.6276 | 139.2187 | 140.3301 | * | * |
| | XII 55 cm | 57.3034 | 16.8124 | * | 21.9317 | * | 22.4412 | 46.7705 | 77.7379 | * | * |
| | XII 80 cm | 72.0780 | 114.3399 | * | 59.9996 | * | * | 73.8761 | 68.1756 | * | * |
| | XII 105 cm | 78.7829 | 114.3399 | 11.5346 | 19.1193 | * | 42.4534 | 45.3119 | 71.8506 | 63.9000 | 62.5000 |

Le symbole * signifie qu'il n'y pas eu d'échantillonnage

Concentrations en mg N/L

Année 1998

| Parcelle | Station | Date 27-05-98 | 03-06-98 | 17-06-98 | 29-06-98 | 06-07-98 | 15-07-98 | 24-07-98 | 01-08-98 | 04-08-98 | 13-08-98 | 20-08-98 | 08-09-98 | 23-09-98 | 05-10-98 | 21-10-98 | 08-11-98 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Labour 1 | I 30 cm | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | I 55 cm | 1866.8630 | * | * | * | 17.2997 | * | 32.8047 | * | * | * | * | * | * | * | * | 57.9132 |
| | I 80 cm | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | I 105 cm | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | II 30 cm | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | II 55 cm | * | * | 2129.0893 | 43.8568 | 53.0600 | 65.0637 | 56.3771 | * | * | * | * | 26.9977 | * | 14.9437 | 20.5821 | 22.7123 |
| | II 80 cm | 4924.4292 | * | 218.1794 | 6.2208 | 22.9192 | * | 45.0396 | 47.7885 | * | * | * | * | * | 55.6289 | 103.8662 | 108.9588 |
| | II 105 cm | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | III 30 cm | * | * | 944.0422 | 17.7106 | 25.8068 | 39.7628 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | III 55 cm | * | * | * | * | 15.2966 | * | 35.8240 | 46.0709 | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | III 80 cm | * | * | * | 4.1125 | 7.8773 | 18.0034 | 23.6839 | 28.3942 | 25.0465 | 29.7388 | 23.2628 | * | * | * | * | * |
| | III 105 cm | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| Semis direct 1 | IV 30 cm | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | IV 55 cm | 5559.1876 | * | 1063.2348 | 13.6503 | 23.7393 | 35.2358 | 12.2367 | 41.6167 | * | * | * | 111.7686 | * | 122.9191 | * | * |
| | IV 80 cm | * | 31.1568 | 81.9065 | 1.3725 | 3.6827 | 9.5341 | 22.1704 | 16.7341 | 13.6019 | 15.8501 | * | * | * | 26.3582 | * | * |
| | IV 105 cm | * | * | * | 4.0367 | * | 3.6415 | 3.4742 | * | * | * | * | 6.0795 | * | * | * | * |
| | V 30 cm | * | * | * | * | 38.8371 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | V 55 cm | * | * | * | * | 17.1483 | 29.5910 | 36.4605 | * | * | * | * | * | * | 91.0208 | * | * |
| | V 80 cm | * | * | 1718.8812 | 5.1649 | 5.8939 | 8.6013 | 11.9177 | 16.0672 | * | * | * | * | 11.0075 | 9.6825 | * | * |
| | V 105 cm | 635.1191 | 276.8767 | 2088.9682 | 3.4304 | 4.6080 | 6.2593 | 7.3431 | 9.8623 | 8.9759 | 12.9687 | 11.4642 | * | * | * | * | * |
| | VI 30 cm | * | * | * | * | 33.0083 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | 54.3227 |
| | VI 55 cm | * | * | * | * | 5.3507 | * | 35.5100 | * | * | * | * | * | 66.7680 | * | 167.9473 | * |
| | VI 80 cm | 96.5640 | * | 283.4112 | 10.3269 | 13.4661 | 25.0741 | 22.9652 | 28.9775 | 25.7057 | 29.0684 | * | * | * | 64.1085 | * | * |
| | VI 105 cm | * | 170.5618 | 1615.8246 | 6.2498 | 5.8167 | 5.3997 | 5.3015 | 4.6662 | 5.9488 | 6.7255 | 6.6355 | 8.1199 | 10.8123 | 10.4378 | 19.1588 | 25.1011 |
| Labour 2 | VII 30 cm | * | * | 5230.8900 | 49.9555 | 65.8105 | 86.2627 | 76.7252 | * | * | * | * | * | * | * | 58.5464 | * |
| | VII 55 cm | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | VII 80 cm | * | * | * | * | 2.7074 | 8.1514 | 14.7869 | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | VII 105 cm | * | * | * | 0.7292 | 1.0160 | 1.7475 | 3.1396 | * | * | * | * | 11.1342 | 13.7664 | 8.9819 | * | * |
| | VIII 30 cm | * | * | 5011.7106 | 36.4130 | 53.7642 | 78.1719 | 76.3882 | * | * | * | * | * | 10.2932 | 3.1514 | 57.0843 | * |
| | VIII 55 cm | * | * | * | * | 14.7034 | * | * | * | * | * | * | 10.3344 | * | * | * | * |
| | VIII 80 cm | * | 237.3228 | 60.1257 | 5.5381 | 12.3873 | 26.9359 | 30.1724 | 35.3682 | 32.1969 | * | * | 29.9937 | 32.0610 | 23.6483 | 28.2352 | * |
| | VIII 105 cm | 1874.9643 | 169.0660 | 1226.2938 | 3.6442 | * | 5.8790 | 7.3431 | 8.9451 | 6.0790 | 7.4352 | * | 5.1239 | 18.7439 | 20.9530 | 61.5841 | * |
| | IX 30 cm | * | * | 2859.2729 | 59.0589 | 64.3801 | * | 92.7152 | * | * | * | * | * | * | 31.4072 | 25.3042 | 27.4102 |
| | IX 55 cm | 5.0382 | 796.8036 | 570.2262 | 11.6000 | 40.2269 | 74.4157 | 68.4271 | 70.3279 | 17.1106 | * | * | 40.5907 | 32.3491 | * | 43.4032 | * |
| | IX 80 cm | * | * | * | * | 6.9346 | * | * | * | * | 12.2223 | * | 22.4567 | * | * | * | * |
| | IX 105 cm | * | 33.5791 | * | 6.1346 | 6.3232 | 7.8646 | 8.7570 | 12.9516 | 11.0017 | 12.8510 | * | * | * | * | * | 20.4688 |
| Semis direct 2 | X 30 cm | * | * | * | * | 60.5381 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | X 55 cm | 5559.1876 | 524.3704 | 528.4440 | 3.8893 | 6.4072 | 12.5840 | 16.4348 | 21.7095 | 18.9024 | * | * | * | * | 14.3929 | * | 116.1605 |
| | X 80 cm | 975.0565 | 1387.9070 | 791.7124 | 2.0096 | 5.7911 | 5.1402 | 4.1249 | 4.7815 | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | X 105 cm | 4343.3009 | 195.5139 | 267.6892 | 3.3360 | 4.3140 | 8.8354 | 12.6197 | 13.7104 | * | 8.7616 | * | * | * | * | * | 49.3500 |
| | XI 30 cm | * | * | 2088.9682 | 45.0977 | * | 107.9028 | 99.9203 | 98.1678 | * | * | 110.7019 | 136.7469 | 128.2898 | 79.9765 | 62.6313 | 53.2470 |
| | XI 55 cm | 3700.3220 | 371.9136 | 776.7932 | 12.8495 | 16.0543 | 17.7632 | 17.0990 | 18.6007 | 16.4567 | * | * | * | * | * | * | * |
| | XI 80 cm | 4634.7699 | * | 458.1774 | 10.2790 | 12.4966 | 21.5339 | 24.3178 | 30.4269 | 26.2683 | 32.1358 | 28.7876 | * | * | * | * | * |
| | XI 105 cm | 781.8468 | 199.8672 | 62.7552 | 3.7473 | 5.3038 | 11.2516 | 9.9058 | 17.3580 | 14.9614 | 17.7640 | 16.7968 | 56.3961 | * | 63.5757 | * | * |
| | XII 30 cm | 5277.7002 | * | 1298.3168 | 43.8568 | 50.1134 | 99.5491 | 102.5948 | 28.3942 | * | * | * | * | 35.0614 | 22.7766 | 16.6006 | * |
| | XII 55 cm | 491.9293 | 207.0349 | 784.2173 | 17.6285 | 25.4688 | 38.1926 | 36.9452 | 42.1276 | 37.9553 | * | * | * | * | * | * | * |
| | XII 80 cm | * | * | * | 10.5698 | 17.0731 | 22.6208 | 25.4123 | 28.8599 | * | * | 26.3506 | * | * | 31.1462 | * | * |
| | XII 105 cm | 529.5074 | 24.6704 | 480.4948 | 3.5439 | 4.3140 | 8.2247 | 10.2159 | 13.3799 | 11.3402 | 13.9503 | 12.9860 | 23.6700 | 31.4924 | 30.5031 | 48.2268 | * |

Le symbole * signifie qu'il n'y pas eu d'échantillonnage

## Concentrations en mg N/L

Année 1999

| Parcelle | Station | Date 18-04-99 | 29-04-99 | 10-05-99 | 31-05-99 | 06-06-99 | 10-06-99 | 18-06-99 | 27-06-99 | 01-07-99 | 05-07-99 | 12-07-99 | 27-07-99 | 16-08-99 | 25-08-99 | 15-09-99 | 15-10-99 | 06-11-99 | 25-11-99 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Labour 1 | I 30 cm | * | * | * | * | * | 39.6901 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | 21.5111 | * |
| | I 55 cm | 17.6408 | * | 12.6370 | 13.2844 | * | * | * | * | * | 26.7278 | 32.9707 | * | * | * | * | * | * | * |
| | I 80 cm | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | I 105 cm | 30.5808 | 8.7520 | 4.6660 | * | * | 19.8580 | * | 27.3238 | * | * | * | * | * | * | * | * | 7.0779 | 8.5611 |
| | II 30 cm | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | II 55 cm | 12.6703 | * | * | 14.6092 | 26.7869 | 28.9490 | 34.7702 | 42.9076 | 38.9548 | 38.9973 | 27.2802 | * | * | * | * | 10.1740 | 13.9315 | * |
| | II 80 cm | 8.2792 | * | 3.7393 | 5.7202 | 12.0432 | 16.3034 | 21.0648 | 27.8022 | 30.3029 | 30.4993 | 33.2626 | 21.6246 | * | * | * | 3.8735 | * | * |
| | II 105 cm | 12.6159 | 7.7786 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | III 30 cm | 13.7484 | * | * | * | 20.3752 | 26.1730 | * | * | 46.1217 | * | 52.1358 | 9.8499 | * | * | * | * | * | * |
| | III 55 cm | 12.5618 | 3.6225 | * | * | * | 17.2593 | * | 29.9307 | 32.3365 | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | III 80 cm | 14.9825 | * | 4.0317 | 5.0247 | 5.7484 | * | * | 12.0326 | 14.6399 | 15.8357 | 21.1282 | * | * | * | * | * | * | * |
| | III 105 cm | 25.9727 | 3.6383 | * | * | * | 7.0586 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | 9.3354 | * |
| Semis direct 1 | IV 30 cm | 23.7310 | * | 6.7385 | 7.9096 | * | 13.9849 | * | 30.8538 | * | * | * | * | 5.0039 | * | * | * | * | * |
| | IV 55 cm | 13.7484 | 7.6439 | 3.7063 | 4.0484 | 10.8224 | 7.1207 | 8.5685 | 19.3937 | 21.5236 | 22.8957 | 28.6349 | * | 8.6524 | * | * | 1.7098 | * | 6.6357 |
| | IV 80 cm | 11.3794 | 8.9844 | 6.3335 | 8.5493 | 9.1605 | 12.8112 | 15.6747 | 35.1435 | 28.5204 | * | 34.9144 | 35.2480 | * | * | * | * | 7.3859 | * |
| | IV 105 cm | 24.0390 | 8.5257 | 5.2122 | 6.1562 | 11.3921 | 6.6095 | 8.7916 | 14.5009 | 12.2054 | * | 14.5282 | * | * | * | * | 11.1957 | 13.9910 | * |
| | V 30 cm | 8.9837 | 7.0661 | * | * | * | 28.3215 | 38.0428 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | 25.1969 |
| | V 55 cm | 14.1683 | 5.3432 | 4.8343 | 6.1562 | 16.5953 | 14.6114 | 22.3667 | 39.1704 | 33.3317 | 36.5898 | 40.7360 | * | * | * | * | * | * | * |
| | V 80 cm | 8.1731 | * | 4.4246 | 6.6829 | * | 7.9802 | * | 14.8835 | 16.8888 | 18.4861 | 24.7599 | * | * | * | * | * | * | * |
| | V 105 cm | 8.9068 | * | 6.1130 | 8.5125 | 8.8904 | 8.0505 | * | 10.8897 | 13.3673 | 14.9939 | 20.9428 | * | * | * | * | * | 15.6960 | * |
| | VI 30 cm | 21.4051 | * | * | * | * | 6.4946 | * | 44.4232 | * | 12.3849 | * | * | * | * | * | 2.2100 | 11.0222 | * |
| | VI 55 cm | 11.9303 | 3.2763 | 2.9181 | * | * | 3.7387 | * | 5.1851 | 6.2381 | 9.3397 | 14.3374 | * | * | * | * | 5.2294 | * | * |
| | VI 80 cm | 8.1381 | 4.1476 | 4.1770 | 6.0246 | 6.2348 | 5.5710 | 7.7646 | 13.4697 | 12.3650 | 13.6893 | 19.9520 | 26.6616 | * | * | * | * | * | * |
| | VI 105 cm | 7.5646 | 4.1658 | 6.7385 | 12.1320 | 11.4409 | 9.2221 | * | 9.5191 | 8.5204 | 7.0432 | 8.1932 | 8.9329 | * | * | * | 4.2811 | 15.1057 | 14.3115 |
| Labour 2 | VII 30 cm | 25.2029 | * | 6.9507 | 6.7994 | 28.5609 | 30.7809 | 36.7612 | 47.0012 | 43.5971 | 20.7141 | 5.4627 | * | * | 1.8702 | * | 3.8567 | 9.5770 | * |
| | VII 55 cm | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | VII 80 cm | 17.9467 | 5.9595 | 4.1037 | 7.9438 | 10.0209 | 16.8852 | 24.1594 | 27.2055 | 28.7684 | 31.2014 | 31.9694 | * | * | * | * | 10.5342 | 10.5178 | 11.0451 |
| | VII 105 cm | 18.3366 | 7.8127 | 5.0308 | 5.6710 | 5.5079 | 4.2083 | * | 5.1851 | 9.6187 | 11.2559 | 13.8409 | * | * | * | * | * | 9.0227 | * |
| | VIII 30 cm | * | * | 8.2609 | * | 20.5501 | 32.4432 | * | 44.4232 | 43.5971 | * | * | * | 3.1538 | * | * | 1.0189 | 6.7828 | * |
| | VIII 55 cm | 19.3903 | 5.8054 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | VIII 80 cm | 13.4561 | * | 4.1219 | 6.6829 | 10.5034 | 8.9434 | 15.0820 | 18.1716 | 18.9014 | 21.8769 | 27.4006 | * | * | * | * | 2.5291 | * | * |
| | VIII 105 cm | 20.9500 | 8.7904 | 4.4246 | 8.9655 | 12.7859 | 10.2450 | * | 17.1749 | 22.8688 | 26.9723 | 30.5914 | 32.2655 | 34.4040 | 42.6007 | * | 6.8482 | 12.2605 | * |
| | IX 30 cm | 17.4148 | * | 5.8482 | 9.6488 | 25.1232 | 27.5864 | * | 47.4109 | 57.2713 | 61.1976 | 50.1088 | * | * | * | * | * | * | * |
| | IX 55 cm | 36.0066 | 10.8403 | * | 7.6408 | 14.9771 | 13.6817 | 18.7642 | 28.2890 | 30.9661 | 36.7567 | 40.9159 | 37.9724 | * | * | * | * | * | * |
| | IX 80 cm | 13.3409 | * | 4.4837 | * | 10.5484 | 7.5053 | 9.5370 | 11.7744 | 12.1526 | 13.4423 | 19.4315 | * | * | * | * | * | * | * |
| | IX 105 cm | 4.1981 | 4.6463 | 6.6791 | * | 11.5392 | 5.2855 | 6.5701 | 7.7966 | 8.6692 | 9.9996 | 11.9679 | 17.2961 | * | * | * | * | 8.6834 | 12.6817 |
| Semis direct 2 | X 30 cm | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | X 55 cm | 48.0228 | 36.1821 | 19.1609 | 22.4082 | 25.5565 | 28.1976 | 31.3733 | * | 37.7917 | 43.6972 | 50.7755 | 53.5807 | * | * | * | 36.3922 | * | * |
| | X 80 cm | 25.8613 | 24.2108 | 14.8868 | 15.7908 | 19.5225 | 22.0606 | 27.4722 | * | 45.3297 | 52.6625 | 62.4583 | 71.1670 | * | * | * | * | 18.6112 | * |
| | X 105 cm | 24.6670 | 19.9784 | 8.2976 | * | 4.1185 | * | * | * | 28.5204 | 16.7247 | 29.2727 | 29.6732 | * | * | * | * | 20.8792 | * |
| | XI 30 cm | 28.6714 | * | 18.5761 | 35.2733 | 47.7049 | 63.4385 | 39.8781 | 121.5698 | 101.4333 | * | 106.9155 | * | * | * | * | * | 16.0338 | * |
| | XI 55 cm | 66.8620 | * | * | 18.4485 | 23.8669 | * | * | * | 26.0413 | * | 30.7264 | * | * | * | * | 6.2504 | * | * |
| | XI 80 cm | 29.1686 | * | 10.2173 | 14.0520 | 22.0049 | 18.2713 | 23.9533 | 28.5355 | 31.7813 | 34.3309 | 35.6921 | 32.2655 | * | * | * | 2.3285 | * | * |
| | XI 105 cm | 21.8701 | * | 5.3763 | * | 9.0052 | 8.7880 | 12.5987 | 20.6084 | 17.7127 | 19.6130 | 22.6714 | 24.7487 | 29.0995 | 35.3736 | * | 18.7055 | 24.2355 | * |
| | XII 30 cm | 10.2201 | * | 5.9792 | 3.3911 | 0.8432 | 0.8278 | 6.3760 | 8.2849 | 9.9147 | 11.0026 | 6.9301 | * | * | 9.8805 | * | * | 9.8249 | * |
| | XII 55 cm | 32.8990 | 17.8340 | 8.0800 | * | 12.4090 | 8.9043 | 10.9850 | 19.1429 | 15.2878 | 16.2741 | 21.2215 | 24.1796 | 26.8230 | 36.9365 | 31.4970 | * | * | * |
| | XII 80 cm | 16.1183 | 14.7808 | * | 18.6086 | 24.1749 | 12.2618 | * | 15.2099 | 16.1731 | 14.7906 | 19.7770 | 17.2158 | 23.4176 | * | * | 21.1283 | * | * |
| | XII 105 cm | 29.9306 | * | 3.9961 | 4.8540 | 6.8790 | 5.0368 | * | 7.6293 | 6.5142 | 6.0886 | 9.8587 | 11.5382 | 14.0424 | 19.3113 | 18.7270 | * | 24.9689 | 24.6587 |

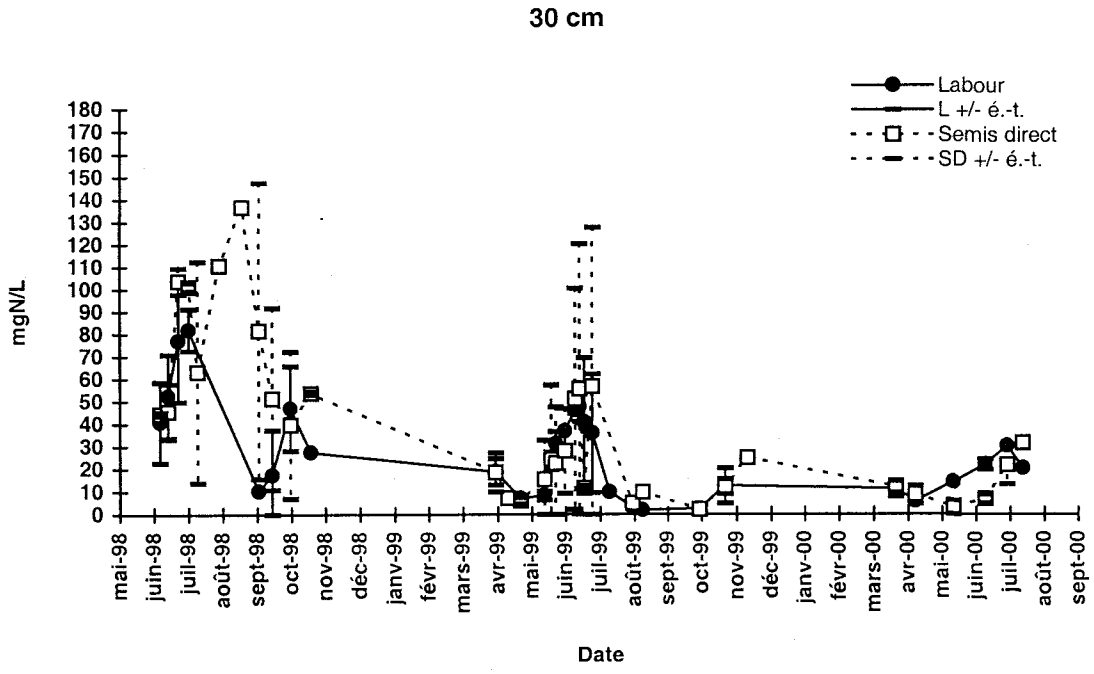
Le symbole * signifie qu'il n'y pas eu d'échantillonnage

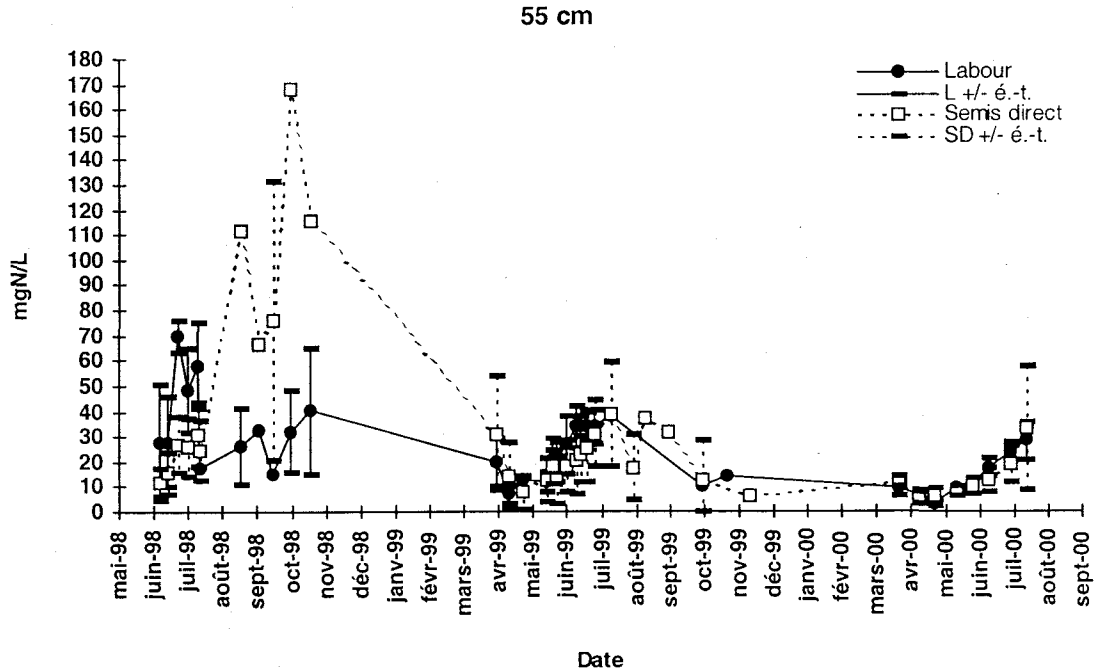
## Concentrations en mg N/L
## Année 2000

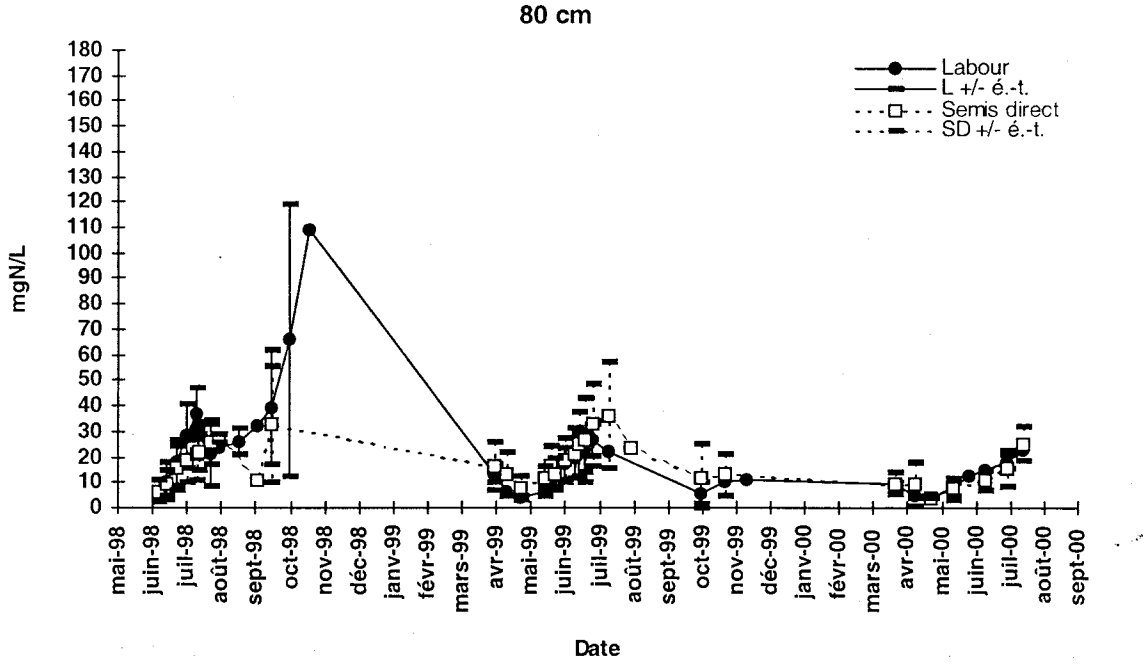
| Parcelle | Station | Date 03-04-00 | 20-04-00 | 04-05-00 | 24-05-00 | 07-06-00 | 21-06-00 | 10-07-00 | 24-07-00 | 18-08-00 | 21-08-00 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Labour 1 | I 30 cm | 17.1358 | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | I 55 cm | 9.1509 | 9.0562 | * | 10.0891 | * | 20.5281 | 27.0749 | * | * | * |
| | I 80 cm | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | I 105 cm | 8.8146 | 6.2314 | 5.7601 | * | * | * | * | * | * | * |
| | II 30 cm | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | II 55 cm | 14.6829 | 10.2284 | * | * | * | * | 21.3970 | 22.9233 | * | * |
| | II 80 cm | 10.4816 | 4.9277 | * | 10.7236 | 12.1886 | 14.5983 | 19.2815 | * | * | * |
| | II 105 cm | 7.9892 | 6.5651 | * | * | 7.0851 | 9.5439 | * | * | * | * |
| | III 30 cm | 9.3677 | 7.4796 | * | * | * | 20.4374 | * | * | * | * |
| | III 55 cm | 8.1784 | 4.4010 | 3.2655 | * | * | * | * | * | * | * |
| | III 80 cm | 9.5002 | 4.9923 | 4.1673 | * | * | * | * | * | * | * |
| | III 105 cm | 8.3721 | 4.6569 | 4.2987 | * | * | * | 12.2070 | * | * | * |
| Semis direct 1 | IV 30 cm | 10.2391 | 8.8615 | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | IV 55 cm | 9.1509 | 4.1053 | 3.7466 | 7.8249 | * | 12.2834 | 16.4567 | 20.8197 | * | * |
| | IV 80 cm | 4.3675 | 5.1466 | 4.4342 | 6.8215 | * | 11.2426 | 18.5119 | 30.0667 | * | * |
| | IV 105 cm | 6.8456 | 5.2597 | 4.3756 | 6.4178 | * | * | 10.9010 | 14.9301 | * | * |
| | V 30 cm | 14.0113 | 5.8127 | * | * | * | * | 19.8123 | * | * | * |
| | V 55 cm | 12.6994 | 6.8568 | * | 9.9364 | * | 16.8201 | 25.9942 | * | * | * |
| | V 80 cm | 7.5528 | 4.2877 | * | * | * | 14.9913 | 23.5305 | 28.6539 | * | * |
| | V 105 cm | 6.3516 | 4.9277 | 5.6589 | 7.0686 | * | 11.3425 | * | 25.2395 | 19.3200 | 19.5200 |
| | VI 30 cm | 9.5895 | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | VI 55 cm | 9.9090 | 3.1491 | * | * | * | * | * | 23.1248 | * | * |
| | VI 80 cm | 6.2630 | 3.4651 | 4.1673 | 4.3614 | * | 7.2530 | 14.4979 | * | * | * |
| | VI 105 cm | 7.9892 | 3.7635 | 6.2111 | 6.5165 | * | * | 8.0495 | 11.4329 | * | * |
| Labour 2 | VII 30 cm | 8.4114 | 5.2597 | * | 14.2547 | * | 23.7573 | 30.3186 | 20.2803 | * | * |
| | VII 55 cm | * | 5.0799 | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | VII 80 cm | 7.0406 | * | 3.4746 | 5.3447 | * | * | 14.3024 | * | * | * |
| | VII 105 cm | 10.6298 | 3.5413 | 3.8819 | 5.9166 | * | * | * | * | * | * |
| | VIII 30 cm | 9.2804 | 5.1690 | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | VIII 55 cm | 8.5704 | 5.4695 | 3.8648 | 9.1139 | * | 15.1246 | 20.4501 | * | * | * |
| | VIII 80 cm | 10.0022 | 3.8629 | 4.0579 | 6.5830 | * | * | 21.2041 | 23.1248 | * | * |
| | VIII 105 cm | 3.9401 | 3.3322 | 4.6973 | 6.3207 | * | * | 11.1505 | * | * | * |
| | IX 30 cm | 11.6731 | 4.9923 | * | * | * | * | * | * | * | * |
| | IX 55 cm | 7.2412 | 3.5878 | 3.0689 | 8.8401 | 11.2164 | * | 27.0749 | 33.3956 | * | * |
| | IX 80 cm | 8.9392 | 3.6349 | 4.2608 | * | * | * | 18.6802 | * | * | * |
| | IX 105 cm | 7.0077 | 2.7401 | 5.7601 | 5.0284 | 5.3315 | * | 11.3543 | 22.7236 | 17.1400 | * |
| Semis direct 2 | X 30 cm | 15.6042 | 13.9875 | * | * | * | * | 14.5637 | * | * | * |
| | X 55 cm | 14.3432 | 9.0957 | 8.4716 | 9.6871 | 7.8010 | 13.5400 | * | 76.6856 | * | * |
| | X 80 cm | 11.9496 | 11.7040 | 3.8306 | 2.3579 | * | * | 4.5922 | * | * | * |
| | X 105 cm | 13.0612 | 11.0130 | 3.4135 | 4.4736 | 5.3082 | 5.7616 | * | * | * | * |
| | XI 30 cm | 13.0612 | 10.4079 | * | 5.1841 | * | 8.1740 | * | * | * | * |
| | XI 55 cm | 13.1841 | 5.6141 | * | 9.4921 | 12.6781 | 16.6718 | 24.3981 | 29.1598 | * | * |
| | XI 80 cm | 12.4056 | 6.5366 | * | 10.4015 | * | * | * | 27.5475 | * | * |
| | XI 105 cm | 11.9496 | 4.8217 | 3.4746 | 5.2105 | 9.1317 | 10.5202 | 15.8715 | 39.4361 | * | * |
| | XII 30 cm | 9.9090 | 4.6976 | * | 0.9887 | * | 5.5611 | 31.4365 | 31.6874 | * | * |
| | XII 55 cm | 12.9395 | 3.7964 | * | 4.9523 | * | 5.0674 | 10.5611 | 17.5537 | * | * |
| | XII 80 cm | 16.2757 | 25.8187 | * | 13.5483 | * | * | 16.6817 | 15.3945 | * | * |
| | XII 105 cm | 17.7897 | 25.8187 | 2.6046 | 4.3173 | * | 9.5862 | 10.2317 | 16.2243 | 14.4500 | 14.1300 |

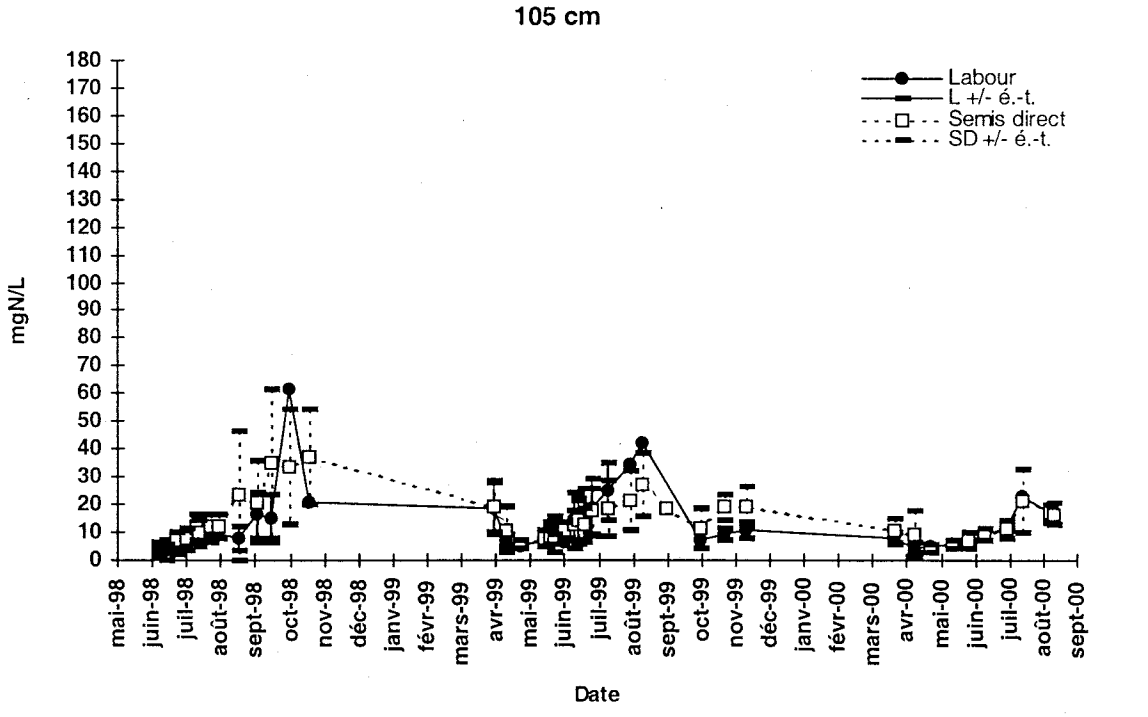
Le symbole * signifie qu'il n'y pas eu d'échantillonnage

**Comparaison des concentrations en nitrates dans l'eau interstitielle des deux modes de travail de sol pour tous les échantillons d'eau**

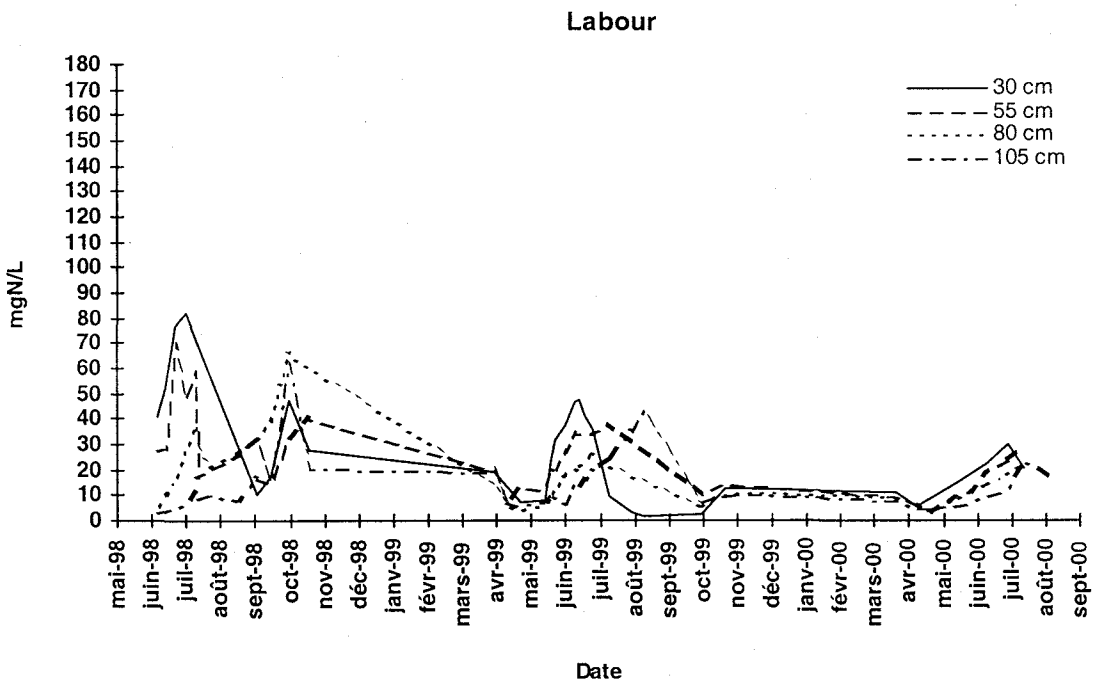


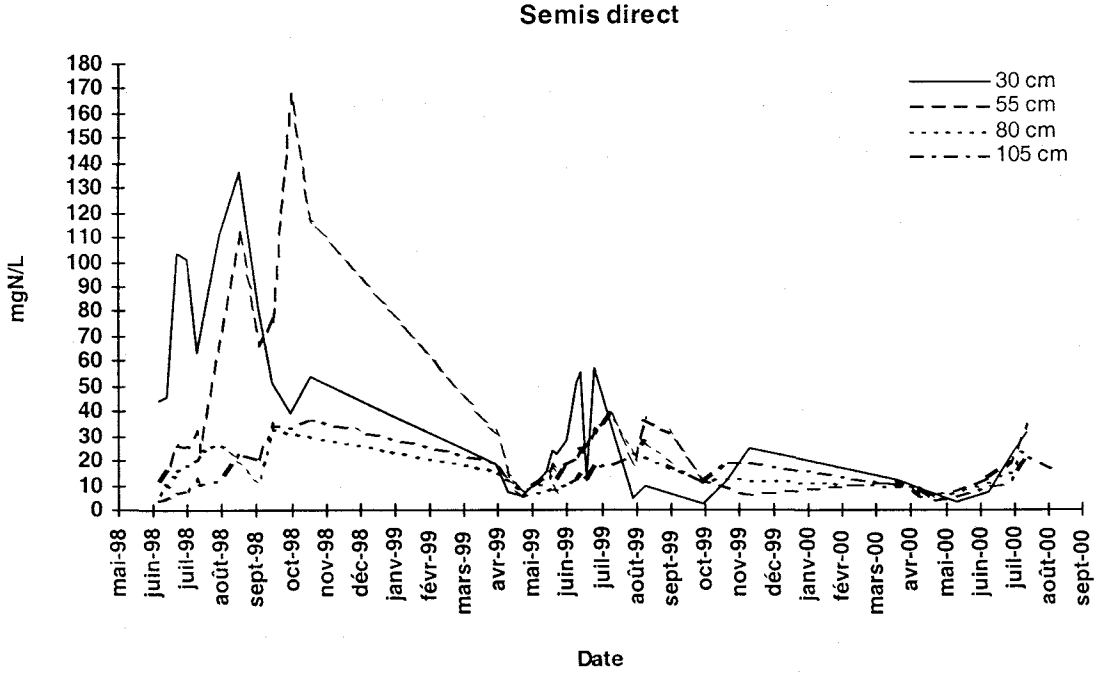




80 cm
Labour
L +/- é.-t.
Semis direct
SD +/- é.-t.
mgN/L
Date

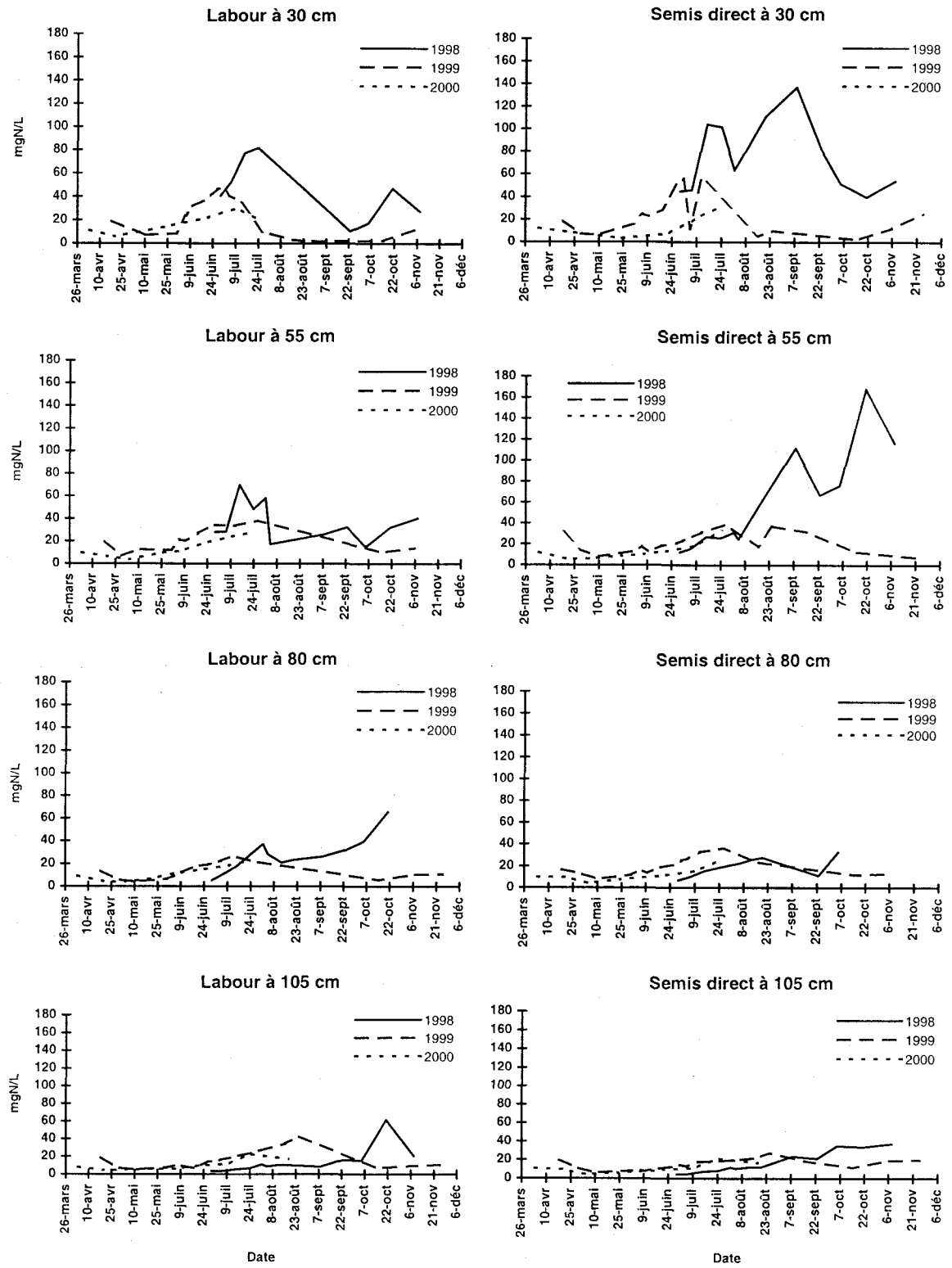

105 cm
Labour
L +/- é.-t.
Semis direct
SD +/- é.-t.
mgN/L
Date

## Concentrations en nitrates dans l'eau interstitielle aux quatre profondeurs mesurées pour tous les échantillons d'eau



## Évolution des concentrations en nitrates dans l'eau interstitielle pour les trois saisons de croissance et pour tous les échantillons d'eau



# Annexe B

Contenus en nitrates du sol

**Contenus en mg $NO_3^-$/kg**

| Parcelle | Station | Date 25-06-98 | 04-08-98 | 11-05-99 | 15-06-99 | 14-07-99 | 11-08-99 | 08-11-99 | 30-05-00 | 12-07-00 | 04-08-00 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Labour 1 | A 25 cm | 94.8060 | 21.2747 | 32.4111 | 19.6467 | 32.3903 | 11.0542 | 16.2113 | 10.1208 | 14.3018 | 4.9276 |
| | A 50 cm | 12.2190 | 14.3002 | 7.0461 | 6.6153 | 28.7481 | 6.9572 | 7.5730 | 9.1679 | 11.0459 | 5.9124 |
| | A 75 cm | 17.8397 | 12.1345 | 3.2930 | 8.9243 | 21.6101 | 5.3198 | 8.2406 | 12.0154 | 7.1817 | 5.5703 |
| | A 100 cm | 6.8311 | 5.8333 | 5.7157 | 4.5204 | 10.6334 | 27.1161 | 9.7912 | 2.4992 | 7.0742 | 4.3598 |
| | B 25 cm | 40.6380 | 21.5114 | 39.5849 | 25.4251 | 45.4460 | 5.3801 | 15.5371 | 18.6801 | 29.5387 | 23.6319 |
| | B 50 cm | 10.4233 | 28.5205 | 6.5331 | 6.6617 | 39.9537 | 6.6729 | 12.7371 | 10.2901 | 15.6186 | 9.9234 |
| | B 75 cm | 6.4548 | 11.4483 | 4.6414 | 5.0757 | 15.1048 | 14.8526 | 8.4892 | 6.7460 | 18.1664 | 8.2159 |
| | B 100 cm | 13.6312 | 10.1251 | 8.1063 | 3.3265 | 9.4962 | 16.0141 | 12.4174 | 6.0592 | 9.7400 | 6.9197 |
| | C 25 cm | 96.3320 | 79.7716 | 25.2785 | 27.2794 | 20.7969 | 13.0701 | 25.8913 | 10.9921 | 10.3435 | 12.8534 |
| | C 50 cm | 44.1663 | 35.5263 | 6.4836 | 13.6017 | 21.8690 | 13.0801 | 15.3712 | 8.0835 | 9.1662 | 13.9388 |
| | C 75 cm | 8.4023 | 12.9648 | 5.1310 | 7.0253 | 20.8157 | 13.7863 | 11.2612 | 5.1010 | 7.7936 | 11.0909 |
| | C 100 cm | 5.6053 | 13.8241 | 9.8273 | 5.3245 | 11.8765 | 12.7018 | 11.5036 | 6.3023 | 7.1355 | 5.8913 |
| | D 25 cm | 84.9286 | 32.1244 | 38.9510 | 51.0310 | 37.7721 | 36.3391 | 19.1260 | 15.3362 | 12.6038 | 6.6815 |
| | D 50 cm | 7.2123 | 26.8461 | 13.9964 | 18.0962 | 31.5167 | 11.7144 | 12.0430 | 11.6847 | 6.9774 | 8.9564 |
| | D 75 cm | 9.5879 | 27.0538 | 7.4720 | 12.4645 | 19.5773 | 18.6619 | 10.4798 | 5.8459 | 10.0928 | 9.2478 |
| | D 100 cm | 9.9780 | 20.2153 | 5.9240 | 10.3989 | 10.8100 | 15.2965 | 10.1816 | 5.1147 | 9.1454 | 4.9236 |
| Semis direct1 | A 25 cm | 43.9249 | 38.7748 | 23.9581 | 12.9470 | 51.0628 | 13.7115 | 10.2262 | 20.4555 | 14.0825 | 9.8756 |
| | A 50 cm | 16.3676 | 30.9859 | 6.0876 | 7.5578 | 24.7350 | 13.5067 | 8.3888 | 21.3867 | 10.7332 | 12.4005 |
| | A 75 cm | 16.1834 | 12.7304 | 5.2739 | 5.0994 | 16.9912 | 16.7594 | 6.4558 | 15.5317 | 8.5171 | 12.7399 |
| | A 100 cm | 6.1858 | 7.2040 | 7.9822 | 3.0379 | 9.3479 | 17.7210 | 10.4536 | 2.7062 | 12.7365 | 11.8678 |
| | B 25 cm | 84.8326 | 42.9958 | 45.5594 | 52.4528 | 103.2115 | 38.0288 | 13.0414 | 8.2667 | 24.0762 | 16.4799 |
| | B 50 cm | 25.0443 | 15.2947 | 8.8986 | 12.3237 | 25.8288 | 28.3363 | 5.5514 | 5.4419 | 7.4449 | 12.2169 |
| | B 75 cm | 9.9249 | 10.4149 | 5.0718 | 5.6067 | 14.2375 | 16.9948 | 4.9897 | 4.9493 | 9.4200 | 7.8750 |
| | B 100 cm | 6.0211 | 7.6606 | 7.5737 | 4.8221 | 11.8080 | 11.8499 | 10.8571 | 6.1905 | 5.8592 | 6.6104 |
| | C 25 cm | 65.8527 | 158.7832 | 10.9026 | 40.4759 | 40.9169 | 54.1240 | 20.1520 | 21.5117 | 26.2990 | 5.2329 |
| | C 50 cm | 11.8594 | 29.5251 | * | 11.9622 | 26.2091 | 32.2585 | 7.6071 | 7.8677 | 18.6553 | 33.0153 |
| | C 75 cm | 6.5533 | 12.1195 | 4.5213 | 4.3791 | 21.9218 | 26.3391 | 7.9331 | 2.8276 | 10.4242 | 4.9030 |
| | C 100 cm | 10.7473 | 46.6823 | 5.3478 | 4.4008 | 14.8505 | 23.2320 | 9.0426 | 6.1789 | 7.9330 | 3.4228 |
| | D 25 cm | 72.9998 | 28.9144 | 15.7077 | 36.1428 | 56.9970 | 83.3135 | 8.2758 | 10.4308 | 39.4925 | * |
| | D 50 cm | 13.5939 | 24.0920 | 7.7609 | 11.5957 | 23.6049 | 93.4193 | 10.7958 | 10.7018 | 20.5276 | 32.9922 |
| | D 75 cm | 11.8968 | 8.3701 | 6.4482 | 8.5385 | 13.9687 | 43.4925 | 30.0756 | 6.3145 | 15.6673 | 12.8454 |
| | D 100 cm | 12.5631 | 7.4821 | 5.6169 | 4.8813 | 10.8326 | 17.9482 | 11.1906 | 7.1961 | 7.2199 | 10.7256 |
| Labour 2 | A 25 cm | 209.7549 | 32.9988 | 43.1694 | 28.5516 | 22.8430 | 7.1585 | 10.8724 | 30.9964 | 17.9194 | 7.0184 |
| | A 50 cm | 27.4545 | 29.9055 | 6.7712 | 6.1927 | 15.4628 | 8.5112 | 7.8109 | 9.4142 | 10.5491 | 8.5915 |
| | A 75 cm | 15.4672 | 22.5955 | 6.9740 | 5.3714 | 10.7951 | 17.9098 | 7.3532 | 5.4644 | 14.7604 | 3.1584 |
| | A 100 cm | 13.6222 | 7.5186 | 7.9483 | 5.0457 | 11.6991 | 10.6249 | 8.7768 | 5.7681 | 6.9289 | 2.9710 |
| | B 25 cm | 141.3879 | 46.7335 | 22.4935 | 54.1332 | 52.0161 | 8.8377 | 9.6263 | 14.9726 | 28.7479 | 6.0614 |
| | B 50 cm | 32.1630 | 19.8271 | 4.5569 | 17.2523 | 26.9725 | 5.1904 | 6.1956 | 9.0243 | 12.4177 | 7.5917 |
| | B 75 cm | 9.4014 | 23.0639 | 5.6523 | 9.1024 | 16.1928 | 8.1171 | 7.6872 | 6.3352 | 7.2237 | 7.3202 |
| | B 100 cm | 10.2952 | 11.9925 | 5.0581 | 5.9529 | 10.5365 | 17.0613 | 10.5111 | 6.4175 | 6.9668 | 7.7865 |
| | C 25 cm | 80.0648 | 102.9779 | 21.9391 | 16.9792 | 11.4032 | 8.0609 | 19.6402 | 17.0785 | 28.2398 | 6.7630 |
| | C 50 cm | 22.0826 | 73.2362 | 6.5374 | 5.2468 | 20.7218 | 10.6422 | * | 10.6643 | 10.0458 | 7.3476 |
| | C 75 cm | 9.5556 | 23.5528 | 7.7032 | 4.1989 | 13.6265 | 9.5889 | 9.3367 | 5.6366 | 9.6148 | 4.2806 |
| | C 100 cm | 7.7352 | 11.9910 | 21.7839 | 4.7941 | 9.8902 | 11.8444 | 9.0651 | 6.4818 | 7.5222 | 4.7052 |
| | D 25 cm | 175.4261 | 24.9917 | 24.8341 | 33.4555 | 45.0327 | 15.6982 | 16.3273 | 18.3068 | 7.0836 | 7.1713 |
| | D 50 cm | 12.2555 | 20.8870 | 4.5477 | 6.1163 | 39.3679 | 13.0061 | 12.5175 | 11.4258 | 4.7149 | 7.3342 |
| | D 75 cm | 6.6394 | 15.4310 | 6.3600 | 4.6730 | 17.7256 | 11.4357 | 10.0205 | 5.8727 | 3.7554 | 7.0143 |
| | D 100 cm | 7.1569 | 9.2409 | 14.0380 | 6.3297 | 8.2671 | 9.9160 | 9.3891 | 5.0673 | 5.0618 | 10.5624 |
| Semis direct 2 | A 25 cm | 98.5067 | 49.9737 | 17.0654 | 30.7519 | 63.5879 | 42.4137 | 16.4014 | 15.8168 | 24.6858 | 2.8511 |
| | A 50 cm | 9.6080 | 16.0473 | 16.5023 | 12.7804 | 37.3594 | 8.1642 | 6.0914 | 7.5415 | 28.6276 | 3.7752 |
| | A 75 cm | 4.1254 | 6.5232 | 8.0845 | 10.9170 | 24.7694 | 11.1630 | 6.0673 | 5.8958 | 20.1639 | 4.0290 |
| | A 100 cm | 3.8407 | 5.5015 | 4.6280 | 6.1911 | 19.6579 | 7.9005 | 22.2541 | 4.4403 | 26.0064 | 3.2543 |
| | B 25 cm | 34.4039 | 27.8465 | 26.6110 | 86.0469 | 68.6527 | 54.8635 | 16.4814 | 11.1301 | 19.1304 | 6.1432 |
| | B 50 cm | 9.6204 | 15.1353 | 12.4103 | 32.6033 | 54.4969 | 26.6824 | 11.6655 | 9.0765 | 11.5373 | 5.6760 |
| | B 75 cm | 4.1798 | 6.3530 | 6.3340 | 12.5329 | 20.6034 | 19.9056 | 11.5261 | 6.3007 | 7.3318 | 4.5538 |
| | B 100 cm | 4.9098 | 3.9620 | 5.6202 | 12.0789 | 10.6390 | 17.0889 | 7.6322 | 4.8219 | 8.1131 | 3.7863 |
| | C 25 cm | 89.3748 | 19.6829 | 10.4635 | 27.3061 | 64.4618 | 22.6376 | 8.6868 | 10.7877 | 15.8275 | 3.9079 |
| | C 50 cm | 16.1359 | 13.6534 | 4.7640 | 8.4900 | 38.1035 | 16.8163 | 7.2811 | 9.8547 | 14.3545 | 4.4368 |
| | C 75 cm | 7.1910 | 4.8074 | 3.1961 | 4.4993 | 24.1157 | 18.8404 | 10.0115 | 6.1900 | 5.6608 | 4.4995 |
| | C 100 cm | 6.7045 | 3.9592 | 7.5749 | 5.3638 | 15.7511 | 11.7886 | 8.4088 | 5.8610 | 6.8063 | 4.8822 |
| | D 25 cm | 132.7748 | 10.9268 | 45.1653 | 22.5086 | 59.0249 | 68.2541 | 18.6765 | 10.0040 | 10.2475 | 5.1392 |
| | D 50 cm | 15.5295 | 8.4215 | 13.3045 | 21.6477 | 19.5056 | 52.1292 | 9.9304 | 9.8869 | 8.4735 | 6.6769 |
| | D 75 cm | 5.7322 | 6.0385 | 8.4584 | 6.8928 | 10.4701 | 28.8358 | 14.7175 | 6.2409 | 8.6542 | 7.4798 |
| | D 100 cm | 4.3932 | 3.1925 | 12.6695 | 4.6258 | 10.2585 | 21.2128 | 9.0156 | 7.0750 | 11.8487 | 5.9647 |

Le symbole * signifie qu'il n'y pas eu d'échantillonnage

**Contenus en mg N/kg**

| Parcelle | Station | Date 25-06-98 | 04-08-98 | 11-05-99 | 15-06-99 | 14-07-99 | 11-08-99 | 08-11-99 | 30-05-00 | 12-07-00 | 04-08-00 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Labour 1 | A 25 cm | 21.4078 | 4.8040 | 7.3186 | 4.4364 | 7.3139 | 2.4961 | 3.6606 | 2.2854 | 3.2294 | 1.1127 |
| | A 50 cm | 2.7591 | 3.2291 | 1.5910 | 1.4938 | 6.4915 | 1.5710 | 1.7100 | 2.0702 | 2.4942 | 1.3351 |
| | A 75 cm | 4.0283 | 2.7401 | 0.7436 | 2.0152 | 4.8797 | 1.2013 | 1.8608 | 2.7132 | 1.6217 | 1.2578 |
| | A 100 cm | 1.5425 | 1.3172 | 1.2906 | 1.0207 | 2.4011 | 6.1230 | 2.2109 | 0.5643 | 1.5974 | 0.9845 |
| | B 25 cm | 9.1763 | 4.8574 | 8.9385 | 5.7412 | 10.2620 | 1.2149 | 3.5084 | 4.2181 | 6.6700 | 5.3362 |
| | B 50 cm | 2.3536 | 6.4401 | 1.4752 | 1.5043 | 9.0218 | 1.5068 | 2.8761 | 2.3236 | 3.5268 | 2.2408 |
| | B 75 cm | 1.4575 | 2.5851 | 1.0481 | 1.1461 | 3.4108 | 3.3538 | 1.9169 | 1.5233 | 4.1021 | 1.8552 |
| | B 100 cm | 3.0780 | 2.2863 | 1.8305 | 0.7511 | 2.1443 | 3.6161 | 2.8039 | 1.3682 | 2.1993 | 1.5625 |
| | C 25 cm | 21.7524 | 18.0129 | 5.7080 | 6.1599 | 4.6961 | 2.9513 | 5.8464 | 2.4821 | 2.3356 | 2.9024 |
| | C 50 cm | 9.9730 | 8.0221 | 1.4640 | 3.0713 | 4.9382 | 2.9536 | 3.4709 | 1.8253 | 2.0698 | 3.1475 |
| | C 75 cm | 1.8973 | 2.9275 | 1.1586 | 1.5864 | 4.7003 | 3.1130 | 2.5428 | 1.1518 | 1.7598 | 2.5044 |
| | C 100 cm | 1.2657 | 3.1216 | 2.2191 | 1.2023 | 2.6818 | 2.8682 | 2.5976 | 1.4231 | 1.6113 | 1.3303 |
| | D 25 cm | 19.1774 | 7.2539 | 8.7954 | 11.5231 | 8.5292 | 8.2056 | 4.3188 | 3.4630 | 2.8460 | 1.5087 |
| | D 50 cm | 1.6286 | 6.0620 | 3.1605 | 4.0862 | 7.1167 | 2.6452 | 2.7194 | 2.6385 | 1.5755 | 2.0224 |
| | D 75 cm | 2.1650 | 6.1089 | 1.6872 | 2.8146 | 4.4207 | 4.2140 | 2.3664 | 1.3200 | 2.2790 | 2.0882 |
| | D 100 cm | 2.2531 | 4.5647 | 1.3377 | 2.3481 | 2.4410 | 3.4540 | 2.2991 | 1.1549 | 2.0651 | 1.1118 |
| Semis direct1 | A 25 cm | 9.9185 | 8.7556 | 5.4099 | 2.9235 | 11.5303 | 3.0962 | 2.3091 | 4.6190 | 3.1799 | 2.2300 |
| | A 50 cm | 3.6959 | 6.9968 | 1.3746 | 1.7066 | 5.5853 | 3.0499 | 1.8942 | 4.8293 | 2.4236 | 2.8001 |
| | A 75 cm | 3.6543 | 2.8746 | 1.1909 | 1.1515 | 3.8367 | 3.7844 | 1.4578 | 3.5072 | 1.9232 | 2.8767 |
| | A 100 cm | 1.3968 | 1.6267 | 1.8024 | 0.6860 | 2.1108 | 4.0015 | 2.3605 | 0.6111 | 2.8760 | 2.6798 |
| | B 25 cm | 19.1558 | 9.7087 | 10.2876 | 11.8442 | 23.3058 | 8.5871 | 2.9448 | 1.8667 | 5.4366 | 3.7213 |
| | B 50 cm | 5.6552 | 3.4536 | 2.0094 | 2.7828 | 5.8323 | 6.3985 | 1.2535 | 1.2288 | 1.6811 | 2.7587 |
| | B 75 cm | 2.2411 | 2.3517 | 1.1453 | 1.2660 | 3.2149 | 3.8375 | 1.1267 | 1.1176 | 2.1271 | 1.7782 |
| | B 100 cm | 1.3596 | 1.7298 | 1.7102 | 1.0889 | 2.6663 | 2.6758 | 2.4516 | 1.3979 | 1.3231 | 1.4927 |
| | C 25 cm | 14.8700 | 35.8543 | 2.4619 | 9.1397 | 9.2393 | 12.2216 | 4.5505 | 4.8575 | 5.9385 | 1.1816 |
| | C 50 cm | 2.6779 | 6.6670 | * | 2.7011 | 5.9182 | 7.2842 | 1.7177 | 1.7766 | 4.2125 | 7.4551 |
| | C 75 cm | 1.4798 | 2.7367 | 1.0209 | 0.9888 | 4.9501 | 5.9475 | 1.7913 | 0.6385 | 2.3538 | 1.1071 |
| | C 100 cm | 2.4268 | 10.5412 | 1.2076 | 0.9937 | 3.3533 | 5.2459 | 2.0419 | 1.3952 | 1.7913 | 0.7729 |
| | D 25 cm | 16.4838 | 6.5291 | 3.5469 | 8.1613 | 12.8703 | 18.8127 | 1.8687 | 2.3553 | 8.9177 | * |
| | D 50 cm | 3.0696 | 5.4401 | 1.7525 | 2.6184 | 5.3301 | 21.0947 | 2.4378 | 2.4165 | 4.6353 | 7.4499 |
| | D 75 cm | 2.6864 | 1.8900 | 1.4560 | 1.9281 | 3.1542 | 9.8209 | 6.7913 | 1.4259 | 3.5378 | 2.9006 |
| | D 100 cm | 2.8368 | 1.6895 | 1.2683 | 1.1022 | 2.4461 | 4.0528 | 2.5269 | 1.6249 | 1.6303 | 2.4219 |
| Labour 2 | A 25 cm | 47.3640 | 7.4513 | 9.7479 | 6.4471 | 5.1581 | 1.6164 | 2.4551 | 6.9992 | 4.0463 | 1.5848 |
| | A 50 cm | 6.1994 | 6.7528 | 1.5290 | 1.3983 | 3.4916 | 1.9219 | 1.7638 | 2.1258 | 2.3821 | 1.9400 |
| | A 75 cm | 3.4926 | 5.1022 | 1.5748 | 1.2129 | 2.4376 | 4.0441 | 1.6604 | 1.2339 | 3.3330 | 0.7132 |
| | A 100 cm | 3.0760 | 1.6977 | 1.7948 | 1.1394 | 2.6417 | 2.3992 | 1.9819 | 1.3025 | 1.5646 | 0.6709 |
| | B 25 cm | 31.9263 | 10.5527 | 5.0792 | 12.2236 | 11.7456 | 1.9956 | 2.1737 | 3.3809 | 6.4915 | 1.3687 |
| | B 50 cm | 7.2626 | 4.4771 | 1.0290 | 3.8957 | 6.0906 | 1.1720 | 1.3990 | 2.0377 | 2.8040 | 1.7143 |
| | B 75 cm | 2.1229 | 5.2080 | 1.2763 | 2.0554 | 3.6564 | 1.8329 | 1.7358 | 1.4305 | 1.6312 | 1.6530 |
| | B 100 cm | 2.3247 | 2.7080 | 1.1422 | 1.3442 | 2.3792 | 3.8525 | 2.3735 | 1.4491 | 1.5732 | 1.7582 |
| | C 25 cm | 18.0791 | 23.2531 | 4.9540 | 3.8340 | 2.5749 | 1.8202 | 4.4349 | 3.8564 | 6.3767 | 1.5271 |
| | C 50 cm | 4.9864 | 16.5372 | 1.4762 | 1.1848 | 4.6791 | 2.4031 | * | 2.4081 | 2.2684 | 1.6591 |
| | C 75 cm | 2.1577 | 5.3184 | 1.7394 | 0.9481 | 3.0769 | 2.1652 | 2.1083 | 1.2728 | 2.1711 | 0.9666 |
| | C 100 cm | 1.7467 | 2.7077 | 4.9189 | 1.0825 | 2.2333 | 2.6745 | 2.0470 | 1.4636 | 1.6986 | 1.0625 |
| | D 25 cm | 39.6123 | 5.6433 | 5.6077 | 7.5545 | 10.1687 | 3.5447 | 3.6868 | 4.1338 | 1.5995 | 1.6193 |
| | D 50 cm | 2.7674 | 4.7164 | 1.0269 | 1.3811 | 8.8895 | 2.9369 | 2.8265 | 2.5800 | 1.0646 | 1.6561 |
| | D 75 cm | 1.4992 | 3.4844 | 1.4361 | 1.0552 | 4.0026 | 2.5822 | 2.2627 | 1.3261 | 0.8480 | 1.5839 |
| | D 100 cm | 1.6161 | 2.0867 | 3.1699 | 1.4293 | 1.8668 | 2.2391 | 2.1201 | 1.1442 | 1.1430 | 2.3851 |
| Semis direct 2 | A 25 cm | 22.2435 | 11.2844 | 3.8535 | 6.9440 | 14.3586 | 9.5773 | 3.7035 | 3.5715 | 5.5742 | 0.6438 |
| | A 50 cm | 2.1696 | 3.6236 | 3.7263 | 2.8859 | 8.4360 | 1.8435 | 1.3755 | 1.7029 | 6.4643 | 0.8525 |
| | A 75 cm | 0.9315 | 1.4730 | 1.8255 | 2.4651 | 5.5931 | 2.5207 | 1.3700 | 1.3313 | 4.5531 | 0.9098 |
| | A 100 cm | 0.8673 | 1.2423 | 1.0450 | 1.3980 | 4.4389 | 1.7840 | 5.0251 | 1.0026 | 5.8724 | 0.7348 |
| | B 25 cm | 7.7686 | 6.2879 | 6.0089 | 19.4300 | 15.5022 | 12.3885 | 3.7216 | 2.5132 | 4.3198 | 1.3872 |
| | B 50 cm | 2.1723 | 3.4177 | 2.8023 | 7.3620 | 12.3058 | 6.0251 | 2.6342 | 2.0495 | 2.6052 | 1.2817 |
| | B 75 cm | 0.9438 | 1.4345 | 1.4303 | 2.8300 | 4.6524 | 4.4948 | 2.6027 | 1.4227 | 1.6556 | 1.0283 |
| | B 100 cm | 1.1087 | 0.8946 | 1.2691 | 2.7275 | 2.4023 | 3.8588 | 1.7234 | 1.0888 | 1.8320 | 0.8550 |
| | C 25 cm | 20.1814 | 4.4445 | 2.3627 | 6.1659 | 14.5559 | 5.1117 | 1.9615 | 2.4359 | 3.5740 | 0.8824 |
| | C 50 cm | 3.6436 | 3.0830 | 1.0757 | 1.9171 | 8.6040 | 3.7972 | 1.6441 | 2.2253 | 3.2413 | 1.0019 |
| | C 75 cm | 1.6238 | 1.0855 | 0.7217 | 1.0160 | 5.4455 | 4.2543 | 2.2607 | 1.3977 | 1.2782 | 1.0160 |
| | C 100 cm | 1.5139 | 0.8940 | 1.7105 | 1.2112 | 3.5567 | 2.6620 | 1.8988 | 1.3235 | 1.5369 | 1.1024 |
| | D 25 cm | 29.9814 | 2.4674 | 10.1986 | 5.0826 | 13.3282 | 15.4122 | 4.2173 | 2.2590 | 2.3140 | 1.1605 |
| | D 50 cm | 3.5067 | 1.9016 | 3.0042 | 4.8882 | 4.4045 | 11.7711 | 2.2423 | 2.2325 | 1.9134 | 1.5077 |
| | D 75 cm | 1.2944 | 1.3635 | 1.9100 | 1.5564 | 2.3642 | 6.5113 | 3.3233 | 1.4092 | 1.9542 | 1.6890 |
| | D 100 cm | 0.9920 | 0.7209 | 2.8609 | 1.0445 | 2.3164 | 4.7900 | 2.0358 | 1.5976 | 2.6755 | 1.3469 |

*Le symbole* * signifie qu'il n'y pas eu d'échantillonnage

# Annexe C

Paramètres physiques

| Parcelle | Station | Capacité au champ ($m^3/m^3$) | | | Conductivité hydraulique (cm/h) | | | Masse volumique apparente sèche ($m^3/m^3$) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1998 | 1999 | 2000 | 1998 | 1999 | 2000 | 1998 | 1999 | 2000 |
| Labour 1 | A Surface | 0.4518 | 0.4356 | 0.3874 | 33.9075 | 46.6331 | 5.3585 | 1.2426 | 0.9882 | 0.9217 |
| | A 30 cm | 0.4173 | 0.4108 | 0.3148 | 3.3998 | 5.4057 | * | 1.2463 | 1.1701 | 0.9663 |
| | A 70 cm | 0.3979 | 0.3130 | -0.2112 | 3.5347 | 4.3551 | 50.3343 | 1.2681 | 1.1388 | 1.4646 |
| | B Surface | 0.4936 | 0.4384 | 0.3751 | * | 5.1831 | 3.1784 | 0.8931 | 1.1678 | 1.1520 |
| | B 30 cm | 0.4782 | 0.4119 | 0.2978 | * | 2.0258 | 9.1735 | 1.0027 | 0.9993 | 1.2791 |
| | B 70 cm | 0.4133 | 0.1911 | 0.2607 | * | * | 8.5326 | 1.2276 | 1.1696 | 1.2935 |
| | C Surface | 0.4526 | 0.4682 | 0.3626 | 54.5059 | 11.5071 | 0.0377 | 0.7888 | 0.8957 | 1.0590 |
| | C 30 cm | 0.4251 | 0.4042 | 0.3265 | * | 4.3475 | 29.1413 | 1.1479 | 1.0791 | 1.0122 |
| | C 70 cm | 0.3827 | 0.3372 | 0.3033 | * | 4.3842 | 1.7485 | 1.2411 | 1.0904 | 1.1711 |
| | D Surface | 0.5022 | 0.4053 | 0.4388 | 30.7184 | 5.3459 | 1.9679 | 0.9035 | 0.9721 | 1.0721 |
| | D 30 cm | 0.8144 | 0.3889 | 0.3283 | 61.9311 | 1.7084 | 30.3787 | 1.6406 | 1.2556 | 1.1213 |
| | D 70 cm | 0.4323 | 0.3416 | 0.3082 | 1.8186 | 3.4356 | 2.5125 | 1.2337 | 1.3064 | 1.3757 |
| Semis direct 1 | A Surface | * | 0.4189 | 0.4249 | 58.1369 | 21.9212 | 4.2326 | * | 1.0199 | 1.0536 |
| | A 30 cm | 0.4409 | 0.2482 | 0.3243 | 10.2779 | 7.3080 | 47.7917 | 1.0890 | 1.1521 | 0.9841 |
| | A 70 cm | 0.4108 | 0.3981 | 0.2859 | 1.1860 | 1.8056 | 2.3887 | 1.3446 | 1.2029 | 1.4644 |
| | B Surface | 0.4767 | 0.4295 | 0.3544 | 57.4717 | 33.5449 | 4.9168 | 0.9450 | 0.9721 | 1.1442 |
| | B 30 cm | 0.4647 | 0.3219 | 0.3038 | 79.0662 | 14.4094 | 40.1702 | 1.1173 | 1.2233 | 0.9080 |
| | B 70 cm | 0.4113 | * | 0.2718 | 1.8268 | 11.9371 | 12.6963 | 1.3373 | * | 1.2458 |
| | C Surface | 0.5437 | 0.4633 | 0.3892 | 104.1914 | 57.8265 | 0.4029 | 0.9504 | 1.0579 | 1.0572 |
| | C 30 cm | 0.4427 | 0.3481 | 0.3050 | 20.5500 | 0.4284 | 28.5431 | 1.0668 | 1.2432 | 1.1597 |
| | C 70 cm | 0.4050 | * | 0.2832 | 15.6796 | * | 4.1342 | 1.2669 | * | 1.3767 |
| | D Surface | 0.4560 | 0.4201 | 0.3591 | * | 58.6005 | 0.4270 | 0.9687 | 0.9614 | 0.9703 |
| | D 30 cm | 0.5582 | 0.3206 | 0.3270 | 7.8476 | 6.4772 | 38.3888 | 1.2919 | 1.1150 | 1.0079 |
| | D 70 cm | 0.3811 | 0.3038 | 0.3347 | 1.6854 | 9.4715 | 0.8594 | 1.3033 | 1.2668 | 1.3843 |
| Labour 2 | A Surface | 0.5236 | 0.4257 | 0.4739 | 57.1170 | 22.7852 | 0.1638 | 0.9014 | 0.9812 | 1.2925 |
| | A 30 cm | 0.4158 | * | 0.2908 | 14.4492 | 0.4080 | 61.9523 | 1.0159 | * | 0.8912 |
| | A 70 cm | 0.4052 | 0.3624 | 0.3041 | 4.9355 | 0.2693 | 0.6120 | 1.1993 | 1.1644 | 1.2934 |
| | B Surface | 0.4400 | 0.4075 | 0.3648 | 100.4254 | 15.2377 | 12.9399 | 0.8787 | 1.0120 | 1.0182 |
| | B 30 cm | 0.5062 | 0.3296 | 0.2816 | 4.8939 | 11.3205 | 25.4789 | 1.3341 | 1.1342 | 0.9547 |
| | B 70 cm | 0.3921 | 0.4319 | 0.2921 | 7.8574 | 5.2295 | 2.3737 | 1.2121 | 1.2603 | 1.2531 |
| | C Surface | 0.4866 | 0.4222 | 0.5089 | 14.1992 | 1.3125 | 0.0482 | 1.1001 | 1.0420 | 1.0239 |
| | C 30 cm | 0.3805 | 0.4029 | 0.3158 | 1.6432 | 3.6081 | 35.2345 | 1.2494 | 1.0597 | 1.1586 |
| | C 70 cm | 0.3546 | 0.3616 | 0.2817 | 15.2312 | 1.5288 | 0.6842 | 1.1975 | 1.3408 | 1.3827 |
| | D Surface | 0.4795 | 0.4378 | 0.3746 | 60.4550 | 0.5584 | 5.2316 | 0.9130 | 1.2155 | 1.0099 |
| | D 30 cm | 0.5776 | 0.4120 | 0.2994 | 8.5717 | 3.3879 | 19.8959 | 1.2153 | 1.0932 | 1.0465 |
| | D 70 cm | 0.4028 | 0.4237 | 0.2886 | 16.5339 | 0.1189 | 1.1891 | 1.1896 | 1.5103 | 1.4121 |
| Semis direct 2 | A Surface | 0.4931 | 0.4161 | 0.3806 | * | 10.9510 | 0.0045 | 0.9117 | 1.0184 | 0.9125 |
| | A 30 cm | 0.4904 | 0.3440 | 0.3650 | 9.2722 | 0.1755 | 20.9089 | 1.2398 | 1.4064 | 1.1687 |
| | A 70 cm | 0.4053 | 0.2931 | 0.3205 | 2.3169 | 0.2748 | 0.9135 | 1.3107 | 1.2095 | 1.2810 |
| | B Surface | 0.4909 | 0.4731 | 0.4195 | 81.5956 | 90.2992 | 0.7099 | 0.9548 | 1.0499 | 1.0113 |
| | B 30 cm | 0.4524 | 0.4256 | 0.3304 | 51.6704 | 9.1568 | * | 1.1938 | 1.2881 | 1.0868 |
| | B 70 cm | 0.3993 | 0.3126 | 0.3267 | 15.9505 | 11.5534 | 0.9066 | 1.2478 | 1.0808 | 1.3079 |
| | C Surface | 0.4612 | 0.4139 | 0.4524 | 73.9161 | 13.0267 | 5.2656 | 1.0230 | 1.1093 | 1.3068 |
| | C 30 cm | 0.4257 | 0.3416 | 0.3409 | 14.3344 | 0.5612 | 13.4180 | 1.1703 | 1.3543 | 1.1097 |
| | C 70 cm | 0.3582 | 0.3060 | 0.2873 | 5.5829 | 2.6982 | 0.9151 | 1.2742 | 1.2500 | 1.3331 |
| | D Surface | 0.5301 | 0.4937 | 0.4408 | * | 2.8920 | 7.8282 | 1.0235 | 1.1608 | 1.1167 |
| | D 30 cm | 0.4209 | 0.4124 | 0.3677 | 2.1187 | 12.6833 | 37.5340 | 1.1050 | 1.1653 | 1.1176 |
| | D 70 cm | 0.5429 | 0.3209 | 0.3193 | 3.1268 | 2.0399 | 0.7713 | 1.5509 | 1.0018 | 1.4099 |

Le symbole * signifie qu'il n'y pas eu d'échantillonnage

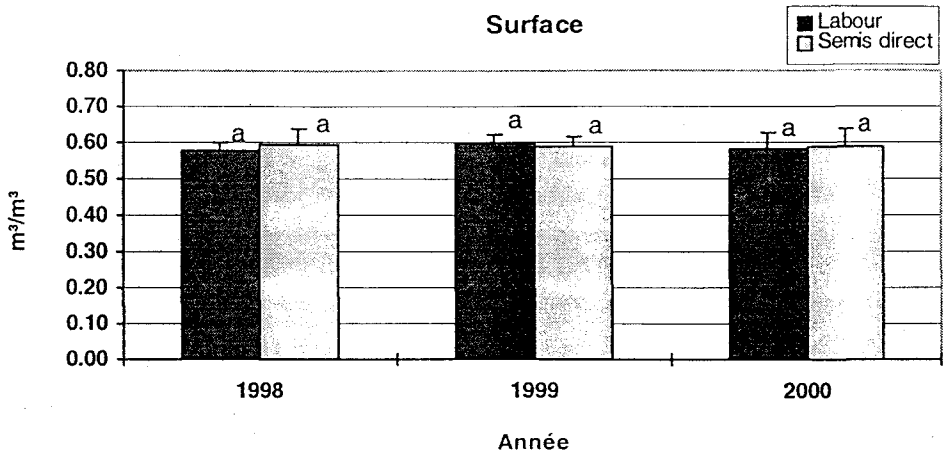
Infiltromètre de Côté (cm/h)
(Labour à 30 cm)

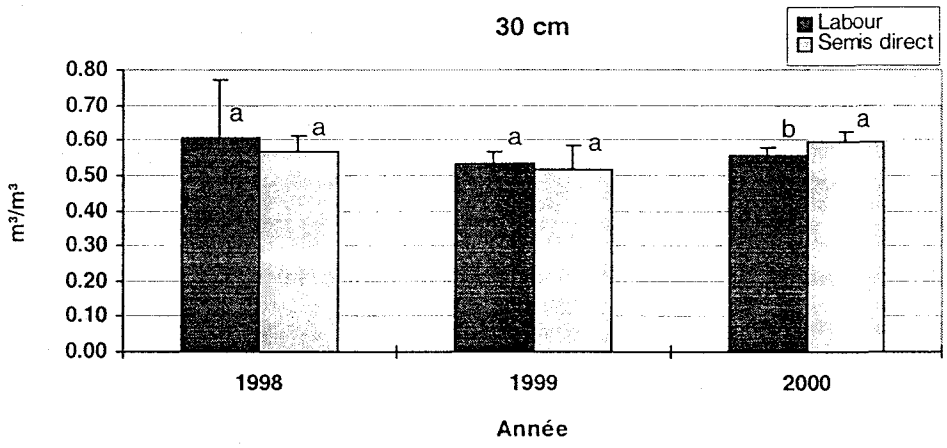
| |
|---|
| 1.1667 |
| 7.1962 |
| 5.4000 |
| 0.8827 |

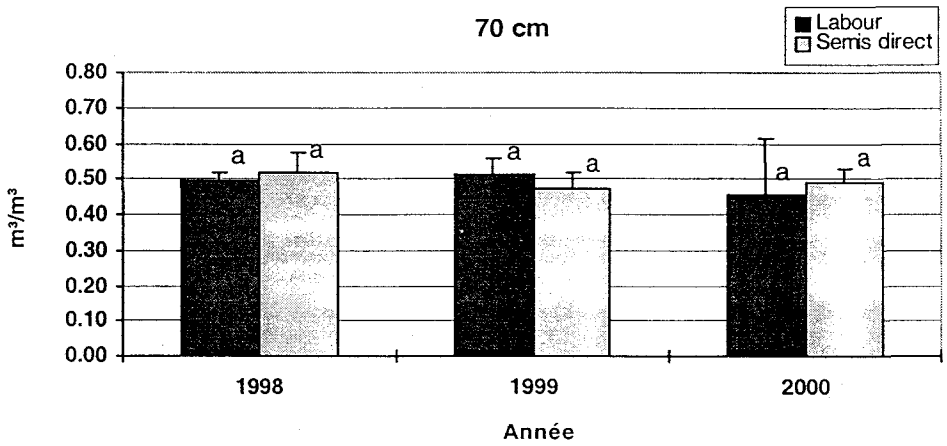
| Parcelle | Station | Matière organique (%) | | | Porosité ($m^3/m^3$) | | | Porosité de drainage ($m^3/m^3$) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1998 | 1999 | 2000 | 1998 | 1999 | 2000 | 1998 | 1999 | 2000 |
| Labour 1 | A Surface | 4.6734 | 7.1083 | 8.4000 | 0.5550 | 0.6212 | 0.6675 | 0.1032 | 0.1857 | 0.2801 |
| | A 30 cm | 1.8640 | 2.8224 | 4.7976 | 0.5184 | 0.5009 | 0.5658 | 0.1011 | 0.0901 | 0.2510 |
| | A 70 cm | 1.7430 | 2.1422 | 2.6500 | 0.4769 | 0.4628 | 0.0787 | 0.0790 | 0.1498 | 0.2899 |
| | B Surface | 6.4516 | 6.4066 | 8.6457 | 0.5979 | 0.5842 | 0.5184 | 0.1043 | 0.1457 | 0.1432 |
| | B 30 cm | 3.3613 | 3.1593 | 5.1000 | 0.5463 | 0.5140 | 0.4995 | 0.0681 | 0.1021 | 0.2017 |
| | B 70 cm | 2.0122 | 2.4650 | 4.5000 | 0.5247 | 0.4762 | 0.4742 | 0.1114 | 0.1685 | 0.2136 |
| | C Surface | 8.4126 | 7.5773 | 9.7951 | 0.5499 | 0.5925 | 0.5575 | 0.0972 | 0.1243 | 0.1948 |
| | C 30 cm | 2.2070 | 4.1130 | 7.5462 | 0.5236 | 0.5793 | 0.5756 | 0.0986 | 0.1751 | 0.2490 |
| | C 70 cm | 1.8765 | 2.7695 | 2.6500 | 0.4992 | 0.4814 | 0.5879 | 0.1164 | 0.1442 | 0.2847 |
| | D Surface | 8.7968 | 7.5113 | 7.7461 | 0.6107 | 0.5683 | 0.5987 | 0.1085 | 0.1630 | 0.1599 |
| | D 30 cm | 3.3483 | 1.9980 | 3.9980 | 0.9864 | 0.5174 | 0.5491 | 0.1721 | 0.1284 | 0.2208 |
| | D 70 cm | 4.9674 | 1.5905 | 1.9500 | 0.5291 | 0.4949 | 0.5079 | 0.0968 | 0.1533 | 0.1997 |
| Semis direct 1 | A Surface | 6.8434 | 7.5253 | 7.7461 | 0.6998 | 0.6112 | 0.6274 | 0.0380 | 0.1924 | 0.2025 |
| | A 30 cm | 2.9499 | 2.8515 | 4.4500 | 0.5649 | 0.5820 | 0.6060 | 0.1240 | 0.3338 | 0.2817 |
| | A 70 cm | 1.8803 | 2.2059 | 1.9000 | 0.5427 | 0.5300 | 0.4616 | 0.1319 | 0.1319 | 0.1757 |
| | B Surface | 6.3023 | 7.6615 | 7.3000 | 0.5827 | 0.5649 | 0.5779 | 0.1059 | 0.1354 | 0.2235 |
| | B 30 cm | 3.2471 | 2.1934 | 8.4042 | 0.5869 | 0.4680 | 0.6202 | 0.1222 | 0.1461 | 0.3164 |
| | B 70 cm | 1.7769 | * | 4.4478 | 0.4821 | * | 0.4788 | 0.0708 | * | 0.2069 |
| | C Surface | 7.3075 | 6.9370 | 9.3500 | 0.5945 | 0.6385 | 0.4993 | 0.0508 | 0.1752 | 0.1102 |
| | C 30 cm | 2.6633 | 2.5049 | 5.5472 | 0.5396 | 0.4749 | 0.5323 | 0.0969 | 0.1268 | 0.2273 |
| | C 70 cm | 1.6575 | * | 4.2521 | 0.4906 | * | 0.4506 | 0.0856 | * | 0.1673 |
| | D Surface | 5.2477 | 7.1327 | 9.7000 | 0.5963 | 0.5560 | 0.5606 | 0.1404 | 0.1358 | 0.2015 |
| | D 30 cm | 2.3279 | 2.1256 | 5.0525 | 0.6584 | 0.5016 | 0.6171 | 0.1002 | 0.1810 | 0.2901 |
| | D 70 cm | 1.9704 | 1.5377 | 7.1395 | 0.5381 | 0.4863 | 0.4890 | 0.1570 | 0.1824 | 0.1544 |
| Labour 2 | A Surface | * | 7.1977 | 7.6000 | 0.5935 | 0.6307 | 0.5632 | 0.0698 | 0.2050 | 0.0893 |
| | A 30 cm | 2.3096 | * | 5.6972 | 0.5360 | * | 0.5787 | 0.1201 | * | 0.2879 |
| | A 70 cm | 2.3108 | 2.5794 | 2.5000 | 0.4946 | 0.5229 | 0.5111 | 0.0895 | 0.1605 | 0.2070 |
| | B Surface | 7.0658 | 6.6412 | 10.0500 | 0.5482 | 0.6219 | 0.6129 | 0.1082 | 0.2143 | 0.2480 |
| | B 30 cm | 1.9451 | 2.3821 | 5.9500 | 0.6645 | 0.5165 | 0.5703 | 0.1583 | 0.1869 | 0.2887 |
| | B 70 cm | 1.5454 | 2.4781 | 3.3500 | 0.4975 | 0.5195 | 0.5409 | 0.1054 | 0.0876 | 0.2488 |
| | C Surface | 5.4696 | 6.4612 | 7.8961 | 0.5728 | 0.5864 | 0.5796 | 0.0862 | 0.1642 | 0.0707 |
| | C 30 cm | 1.8765 | 3.7647 | 6.3500 | 0.4516 | 0.5890 | 0.5533 | 0.0711 | 0.1861 | 0.2375 |
| | C 70 cm | 1.6992 | 1.9930 | 4.8976 | 0.4766 | 0.5454 | 0.4872 | 0.1220 | 0.1839 | 0.2054 |
| | D Surface | 5.9241 | 7.2573 | 7.2000 | 0.5737 | 0.5867 | 0.5796 | 0.0942 | 0.1489 | 0.2050 |
| | D 30 cm | 2.9708 | 2.9698 | 4.7976 | 0.6085 | 0.5230 | 0.5550 | 0.0309 | 0.1111 | 0.2556 |
| | D 70 cm | 1.5392 | 1.6915 | 2.6500 | 0.4744 | 0.6044 | 0.4471 | 0.0715 | 0.1807 | 0.1585 |
| Semis direct 2 | A Surface | 7.4111 | 7.8025 | 7.5500 | 0.5968 | 0.5597 | 0.6329 | 0.1037 | 0.1435 | 0.2523 |
| | A 30 cm | 3.0288 | 2.2660 | 4.9000 | 0.5616 | 0.4594 | 0.6113 | 0.0712 | 0.1154 | 0.2464 |
| | A 70 cm | 1.5960 | 2.0874 | 2.1000 | 0.4987 | 0.4118 | 0.5385 | 0.0934 | 0.1187 | 0.2180 |
| | B Surface | 6.0606 | 6.9678 | 7.8921 | 0.5864 | 0.5958 | 0.6227 | 0.0955 | 0.1227 | 0.2032 |
| | B 30 cm | 2.0249 | 2.7885 | 5.0500 | 0.5325 | 0.5728 | 0.5952 | 0.0801 | 0.1471 | 0.2649 |
| | B 70 cm | 1.5392 | 2.3000 | 2.2000 | 0.4800 | 0.4792 | 0.5370 | 0.0807 | 0.1666 | 0.2103 |
| | C Surface | 4.9683 | 5.9339 | 7.1000 | 0.5604 | 0.5769 | 0.6192 | 0.0992 | 0.1630 | 0.1669 |
| | C 30 cm | 2.5424 | 2.6291 | 4.2000 | 0.4914 | 0.4621 | 0.5987 | 0.0657 | 0.1205 | 0.2579 |
| | C 70 cm | 1.7535 | 2.0693 | 4.7000 | 0.4842 | 0.4461 | 0.5292 | 0.1260 | 0.1401 | 0.2419 |
| | D Surface | 5.9126 | 7.2412 | 7.2036 | 0.5550 | 0.5963 | 0.5876 | 0.0248 | 0.1024 | 0.1468 |
| | D 30 cm | 2.5348 | 3.9543 | 4.0480 | 0.5917 | 0.6235 | 0.6015 | 0.1708 | 0.2111 | 0.2338 |
| | D 70 cm | 1.5617 | 3.1628 | 2.5987 | 0.6466 | 0.4974 | 0.4381 | 0.1037 | 0.1765 | 0.1188 |

Le symbole * signifie qu'il n'y pas eu d'échantillonnage

## Comparaison des porosités des deux modes de travail de sol



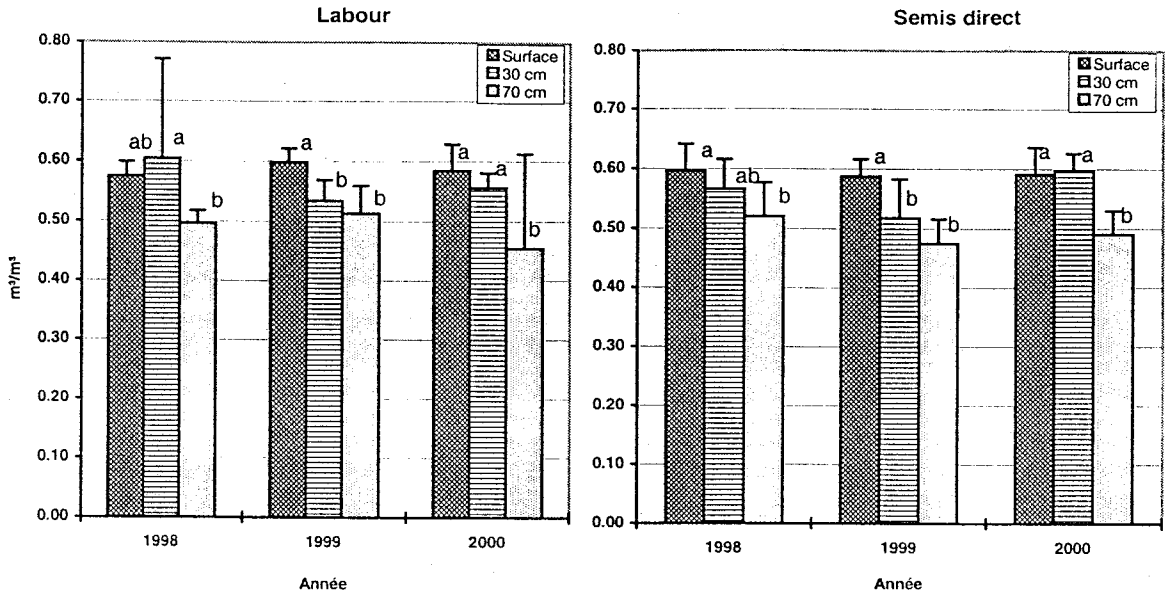



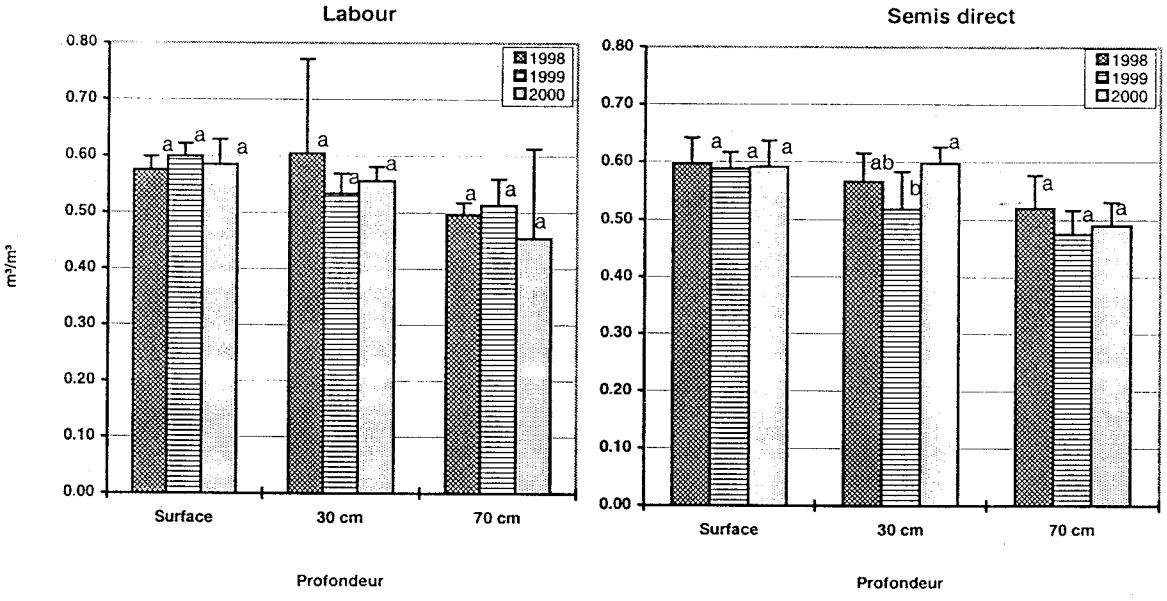

Note : Les histogrammes représentent les moyennes et les barres représentent les écarts types.
Les traitements qui ne sont pas indiqués avec la même lettre sont significativement différents à P≤0.05.

## Comparaison des porosités

### Par profondeur

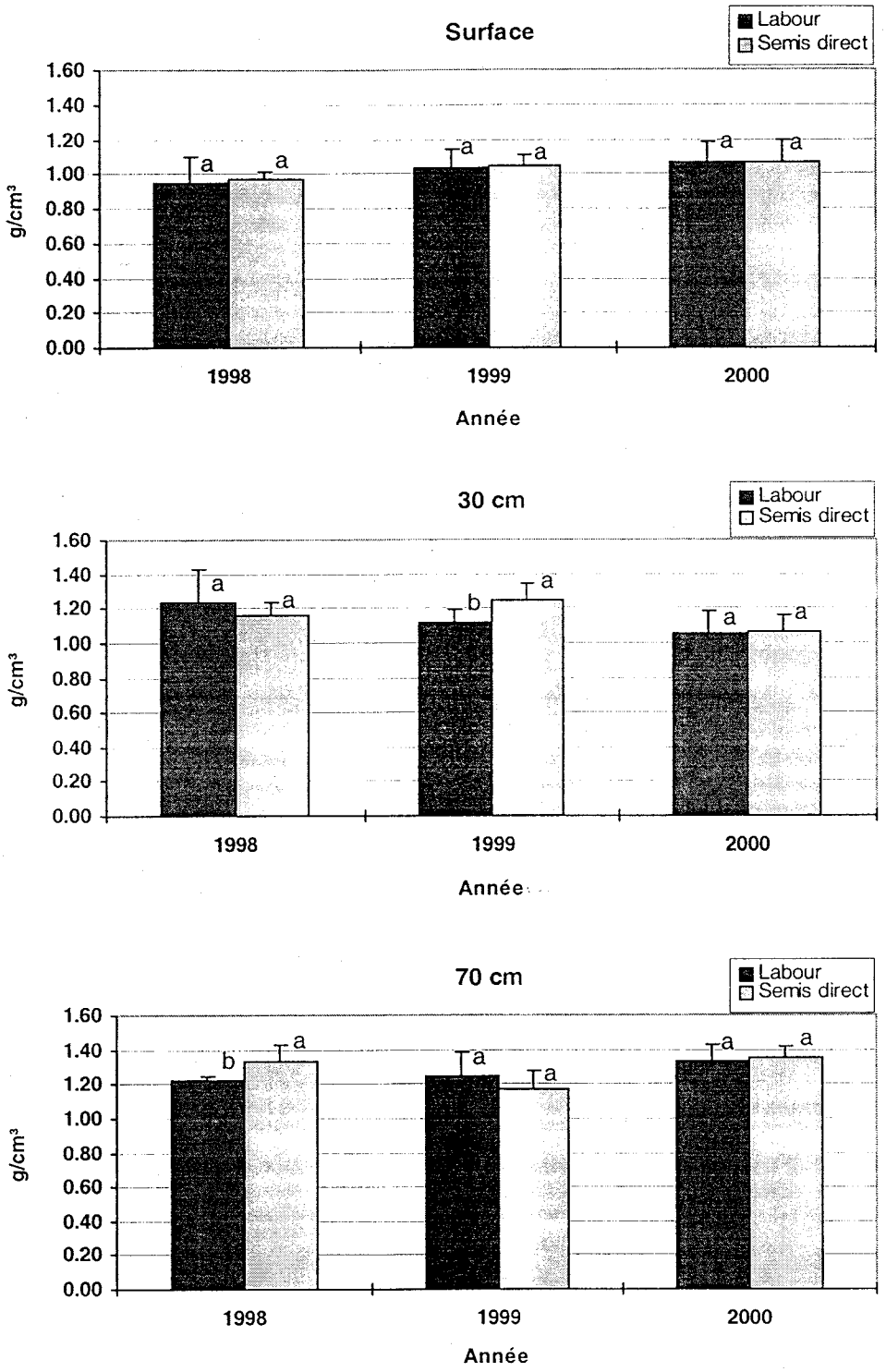



### Par année




Note : Les histogrammes représentent les moyennes et les barres représentent les écarts types.
Les traitements qui ne sont pas indiqués avec la même lettre sont significativement différents à P≤0.05.

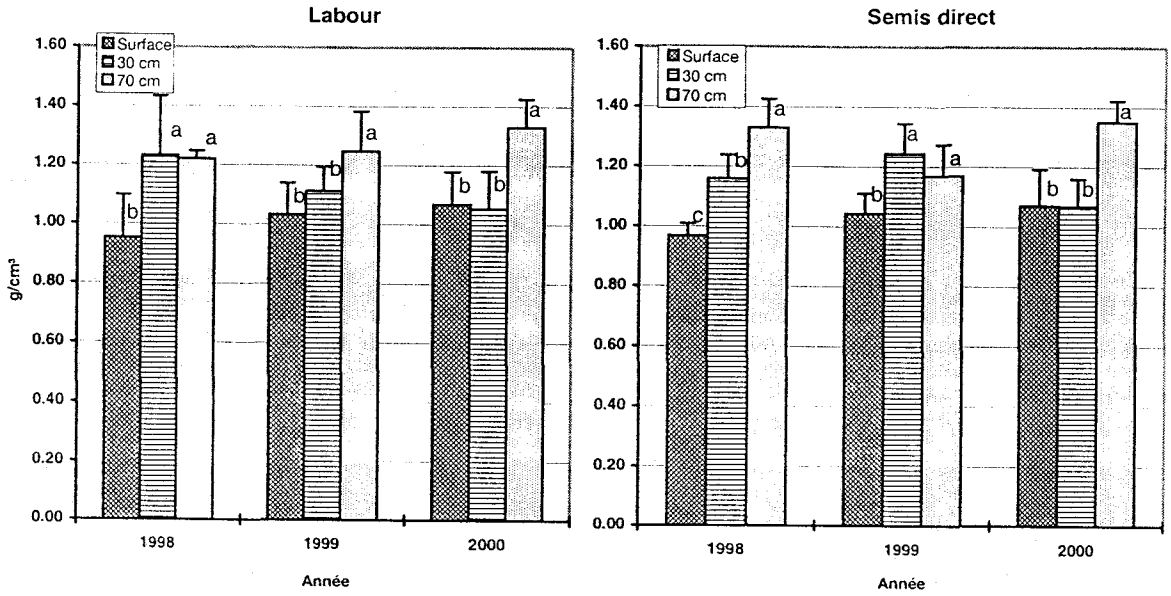
## Comparaison des masses volumiques apparentes sèches des deux modes de travail de sol



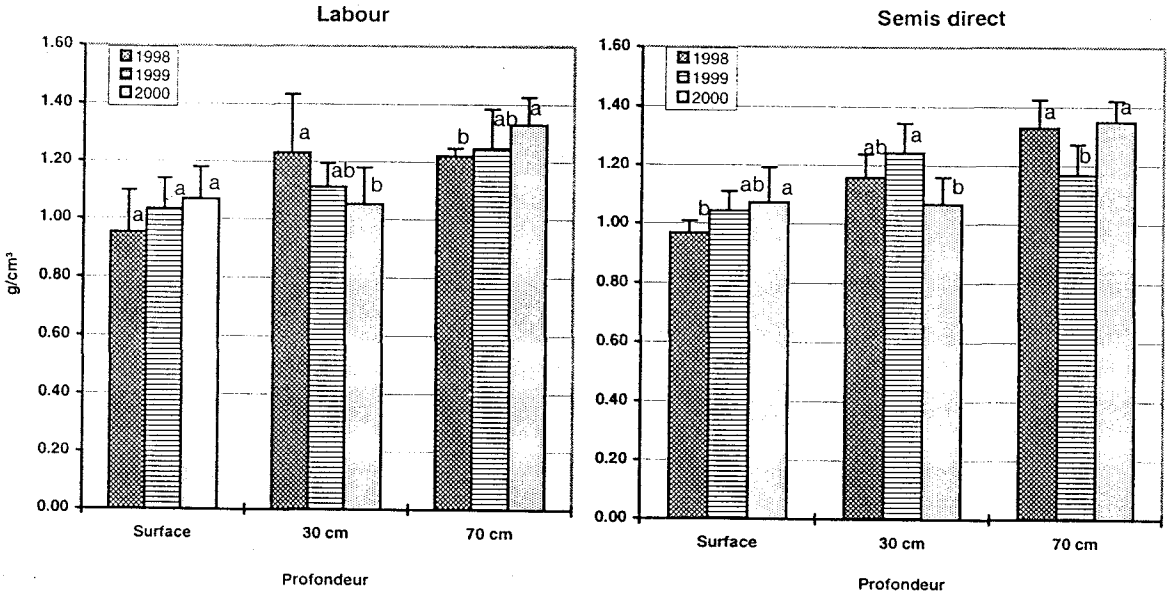

Note : Les histogrammes représentent les moyennes et les barres représentent les écarts types.
Les traitements qui ne sont pas indiqués avec la même lettre sont significativement différents à $P \leq 0.05$.

## Comparaison des masses volumiques apparentes sèches

### Par profondeur




### Par année




Note : Les histogrammes représentent les moyennes et les barres représentent les écarts types.
Les traitements qui ne sont pas indiqués avec la même lettre sont significativement différents à $P \leq 0.05$.

# Annexe D

Résultats statistiques

## Résultats statistiques des paramètres physiques

**Comparaison par traitement**

| Paramètre physique | Profondeur | Année | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1998 | | 1999 | | 2000 | |
| | | Prob. | F value | Prob. | F value | Prob. | F value |
| Capacité au champ | Surface | 0.3855 | 0.81 | 0.4135 | 0.71 | 0.7358 | 0.12 |
| | 30 cm | 0.4583 | 0.58 | 0.0573 | 4.35 | 0.0251 * | 6.29 |
| | 70 cm | 0.4439 | 0.62 | 0.5085 | 0.46 | 0.2699 | 1.33 |
| Conductivité hydraulique | Surface | 0.1168 | 2.95 | 0.0805 | 3.55 | 0.7352 | 0.12 |
| | 30 cm | 0.5425 | 0.39 | 0.3216 | 1.06 | 0.7778 | 0.08 |
| | 70 cm | 0.4895 | 0.51 | 0.1843 | 1.98 | 0.3870 | 0.80 |
| Masse volumique apparente sèche | Surface | 0.7905 | 0.07 | 0.8358 | 0.04 | 0.9606 | 0.00 |
| | 30 cm | 0.3609 | 0.89 | 0.0183 * | 7.27 | 0.8028 | 0.06 |
| | 70 cm | 0.0080 * | 9.53 | 0.2624 | 1.38 | 0.6495 | 0.22 |
| Matière organique | Surface | 0.5098 | 0.46 | 0.6284 | 0.24 | 0.4041 | 0.74 |
| | 30 cm | 0.5133 | 0.45 | 0.3042 | 1.14 | 0.6139 | 0.27 |
| | 70 cm | 0.2449 | 1.47 | 0.9587 | 0.00 | 0.4893 | 0.50 |
| Porosité | Surface | 0.2542 | 1.41 | 0.3822 | 0.81 | 0.7829 | 0.08 |
| | 30 cm | 0.5411 | 0.39 | 0.5640 | 0.35 | 0.0070 * | 9.95 |
| | 70 cm | 0.2857 | 1.23 | 0.1330 | 2.60 | 0.5416 | 0.39 |
| Porosité de drainage | Surface | 0.3557 | 0.91 | 0.1540 | 2.27 | 0.6407 | 0.23 |
| | 30 cm | 0.9492 | 0.00 | 0.3137 | 1.10 | 0.3116 | 1.10 |
| | 70 cm | 0.5688 | 0.34 | 0.9565 | 0.00 | 0.0864 | 3.40 |

* : significatif à $P \leq 0.05$

**Comparaison par profondeur**

| Paramètre physique | Traitement | Année | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1998 | | 1999 | | 2000 | |
| | | Prob. | F value | Prob. | F value | Prob. | F value |
| Capacité au champ | Labour | 0.0530 | 3.39 | 0.0083 * | 6.14 | 0.0001 * | 25.55 |
| | Semis direct | 0.0109 * | 5.71 | 0.0001 * | 15.63 | 0.0001 * | 24.55 |
| Conductivité hydraulique | Labour | 0.0064 * | 7.05 | 0.0671 | 3.10 | 0.0032 * | 7.74 |
| | Semis direct | 0.0001 * | 19.87 | 0.0050 * | 6.97 | 0.0001 * | 40.32 |
| Masse volumique apparente sèche | Labour | 0.0011 * | 9.59 | 0.0040 * | 7.39 | 0.0001 * | 15.55 |
| | Semis direct | 0.0001 * | 41.33 | 0.0012 * | 9.75 | 0.0001 * | 22.29 |
| Matière organique | Labour | 0.0001 * | 35.63 | 0.0001 * | 173.56 | 0.0001 * | 49.71 |
| | Semis direct | 0.0001 * | 139.73 | 0.0001 * | 171.17 | 0.0001 * | 18.54 |
| Porosité | Labour | 0.0991 | 2.59 | 0.0003 * | 12.38 | 0.0314 * | 4.10 |
| | Semis direct | 0.0220 * | 4.60 | 0.0011 * | 9.91 | 0.0001 * | 19.54 |
| Porosité de drainage | Labour | 0.9214 | 0.08 | 0.2842 | 1.34 | 0.0269 * | 4.32 |
| | Semis direct | 0.3399 | 1.14 | 0.5516 | 0.61 | 0.0007 * | 10.55 |

* : significatif à $P \leq 0.05$

| Comparaison par année | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Paramètre physique | Profondeur | Traitement | | | |
| | | Labour | | Semis direct | |
| | | Prob. | F value | Prob. | F value |
| Capacité au champ | Surface | 0.0054 * | 6.75 | 0.0002 * | 13.37 |
| | 30 cm | 0.0008 * | 10.42 | 0.0001 * | 21.51 |
| | 70 cm | 0.0198 * | 4.75 | 0.0001 * | 15.97 |
| Conductivité hydraulique | Surface | 0.0002 * | 13.76 | 0.0001 * | 18.29 |
| | 30 cm | 0.0155 * | 5.30 | 0.0260 * | 4.40 |
| | 70 cm | 0.5621 | 0.59 | 0.4696 | 0.79 |
| Masse volumique apparente sèche | Surface | 0.1747 | 1.90 | 0.0769 | 2.92 |
| | 30 cm | 0.0733 | 2.99 | 0.0037 * | 7.40 |
| | 70 cm | 0.0863 | 2.76 | 0.0031 * | 7.96 |
| Matière organique | Surface | 0.0108 * | 5.72 | 0.0021 * | 8.36 |
| | 30 cm | 0.0001 * | 28.36 | 0.0001 * | 21.37 |
| | 70 cm | 0.0903 | 2.70 | 0.0082 * | 6.26 |
| Porosité | Surface | 0.3358 | 1.15 | 0.9028 | 0.10 |
| | 30 cm | 0.4032 | 0.95 | 0.0145 * | 5.22 |
| | 70 cm | 0.4580 | 0.81 | 0.2084 | 1.70 |
| Porosité de drainage | Surface | 0.0046 * | 7.02 | 0.0001 * | 15.32 |
| | 30 cm | 0.0001 * | 28.48 | 0.0001 * | 21.19 |
| | 70 cm | 0.0001 * | 29.78 | 0.0004 * | 12.01 |

* : significatif à $P \leq 0.05$

## Résultats statistiques des contenus en nitrates du sol

**Comparaison par traitement**

| Profondeur | Date | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 25-06-98 | | 04-08-98 | | 11-05-99 | | 15-06-99 | | 14-07-99 | | 11-08-99 | | 08-11-99 | | 30-05-00 | | 12-07-00 | | 04-08-00 | |
| | Prob. | F value | Prob. | F value | Prob. | F value | Prob. | F value | Prob. | F value | Prob. | F value | Prob. | F value | Prob. | F value | Prob. | F value | Prob. | F value |
| 25 cm | 0.1183 | 2.77 | 0.9230 | 0.01 | 0.2727 | 1.30 | 0.4961 | 0.49 | 0.0025 * | 13.53 | 0.0018 * | 14.77 | 0.2932 | 1.19 | 0.2460 | 1.47 | 0.5014 | 0.48 | 0.4393 | 0.64 |
| 50 cm | 0.2191 | 1.66 | 0.1117 | 2.88 | 0.1446 | 2.41 | 0.1849 | 1.95 | 0.5456 | 0.38 | 0.0260 * | 6.20 | 0.1571 | 2.26 | 0.8888 | 0.02 | 0.0963 | 3.18 | 0.2580 | 1.39 |
| 75 cm | 0.3070 | 1.12 | 0.0009 * | 17.38 | 0.9809 | 0.00 | 0.8929 | 0.02 | 0.5328 | 0.41 | 0.0196 * | 6.94 | 0.4336 | 0.65 | 0.9216 | 0.01 | 0.7061 | 0.15 | 0.8144 | 0.06 |
| 100 cm | 0.0954 | 3.20 | 0.8428 | 0.04 | 0.5796 | 0.32 | 0.9207 | 0.01 | 0.2587 | 1.39 | 0.8840 | 0.02 | 0.7364 | 0.12 | 0.9821 | 0.00 | 0.3540 | 0.92 | 0.3286 | 1.02 |

* : significatif à P ≤ 0.05

**Comparaison par profondeur**

| Ttaitement | Date | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 25-06-98 | | 04-08-98 | | 11-05-99 | | 15-06-99 | | 14-07-99 | | 11-08-99 | | 08-11-99 | | 30-05-00 | | 12-07-00 | | 04-08-00 | |
| | Prob. | F value | Prob. | F value | Prob. | F value | Prob. | F value | Prob. | F value | Prob. | F value | Prob. | F value | Prob. | F value | Prob. | F value | Prob. | F value |
| Labour | 0.0001 * | 24.12 | 0.0071 * | 4.97 | 0.0001 * | 38.62 | 0.0001 * | 20.27 | 0.0001 * | 10.74 | 0.3063 | 1.26 | 0.0004 * | 8.47 | 0.0001 * | 16.26 | 0.0028 * | 6.01 | 0.1808 | 1.75 |
| Semis direct | 0.0001 * | 38.03 | 0.0121 * | 4.34 | 0.0001 * | 9.94 | 0.0001 * | 13.09 | 0.0001 * | 34.97 | 0.0088 * | 4.67 | 0.2326 | 1.51 | 0.0012 * | 6.93 | 0.0085 * | 4.71 | 0.1484 | 1.93 |

* : significatif à P ≤ 0.05

| Comparaison par date | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Année | Profondeur | Traitement | | | |
| | | Labour | | Semis direct | |
| | | Prob. | F value | Prob. | F value |
| 1998 | 25 cm | 0.0074 * | 9.79 | 0.1463 | 2.37 |
| | 50 cm | 0.2204 | 1.65 | 0.2088 | 1.74 |
| | 75 cm | 0.0078 * | 9.60 | 0.9157 | 0.01 |
| | 100 cm | 0.3138 | 1.09 | 0.4863 | 0.51 |
| 1999 | 25 cm | 0.0007 * | 6.27 | 0.0001 * | 9.41 |
| | 50 cm | 0.0001 * | 21.01 | 0.0014 * | 5.62 |
| | 75 cm | 0.0001 * | 16.43 | 0.0001 * | 10.08 |
| | 100 cm | 0.0006 * | 6.35 | 0.0001 * | 9.57 |
| 2000 | 25 cm | 0.0449 * | 3.61 | 0.0016 * | 9.05 |
| | 50 cm | 0.4818 | 0.76 | 0.5172 | 0.68 |
| | 75 cm | 0.1328 | 2.23 | 0.1391 | 2.17 |
| | 100 cm | 0.0938 | 2.66 | 0.0519 | 3.42 |

* : significatif à $P \leq 0.05$

# Annexe E

Paramètres du modèle AgriFlux

**Caractéristiques des simulations**

| Paramètre | |
|---|---|
| Nombre de simulation | 100 |
| Date de début de simulation | 01-10-88 |
| Date de fin de simulation | 31-12-00 |
| État des réservoirs | Mensuellement |
| Jour pour l'état des réservoirs | 15 |

**Caractéristiques climatiques**

| Paramètre | |
|---|---|
| Nombre de jours de pluie | 175 |
| Jour où la température est la plus basse | 21 |
| Fraction de la neige au sol au début de la fonte (%) | 60-80 |
| Taux de fonte de la neige (m/ $^{0}$C/jour) | 0.007 |

| Mois | Précipitations (m) | Température ($^{0}$C) | Évaporation (m) |
|---|---|---|---|
| Janvier | 0.0904 | -11.7 | 0 |
| Février | 0.0847 | -10.4 | 0 |
| Mars | 0.0778 | -4.3 | 0 |
| Avril | 0.0694 | 3.5 | 0 |
| Mai | 0.0860 | 11.1 | 0.1003 |
| Juin | 0.1027 | 16.6 | 0.1104 |
| Juillet | 0.1189 | 19.4 | 0.1231 |
| Août | 0.1094 | 17.9 | 0.0979 |
| Septembre | 0.1149 | 13.1 | 0.0644 |
| Octobre | 0.0888 | 7.2 | 0.0376 |
| Novembre | 0.0958 | 0.3 | 0 |
| Décembre | 0.1176 | -8.7 | 0 |

**Caractéristiques des cultures**

| Paramètre | Maïs (2375 UTM) | Maïs (3500 UTM) | Prairie |
|---|---|---|---|
| Besoin en eau (m) | 0.4 | 0.65 | 0.143 |
| Besoin en azote (kg N/ha) | 120 | 193 | 20 |
| Fraction de l'azote récoltée | 0.7 | 0.7 | 0 |
| Fraction de l'azote résiduelle | 0.3 | 0.3 | 0.9 |
| Rapport C/N des résidus de récolte | 60(6) | 60(6) | 60(6) |
| Rapport C/N des racines | 25(2.5) | 25(2.5) | 25(2.5) |
| Profondeur des racines à maturité (m) | 0.95-1.05 | 0.95-1.05 | 0.4-0.6 |
| Patron racinaire | Conique | Conique | Conique |

**Caractéristiques des cycles culturaux**

| Paramètre | Prairie | | | | Maïs | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1989 | 1990 | 1992 à 1996 | 1997 | 1991 | 1998 | 1999 | 2000 |
| Type de culture | Pérenne | Pérenne | Pérenne | Pérenne | Annuelle | Annuelle | Annuelle | Annuelle |
| Date de début de croissance | 15-avr | 15-avr | 15-avr | 15-avr | 11-mai | 10-juin | 21-mai | 07-juin |
| Date de fin de croissance | 15-oct | 15-oct | 15-oct | 15-oct | 30-sept | 30-sept | 30-sept | 30-sept |
| Date de coupe | 10-nov | 10-nov | 10-nov | 18-mai | 27-oct | 27-oct | 10-nov | 25-oct |
| Date de travail du sol | - | 25-avr | - | 28-mai | 04-nov | 04-nov | 15-nov | 26-oct |
| Profondeur de travail du sol (m) | - | 0.2 | - | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |

**Caractéristiques des fertilisations organiques**

| Paramètre | 1991 | | 1998 |
|---|---|---|---|
| Date d'épandage | 01-mai | 12-août | 28-mai |
| Profondeur d'application (m) | 0.2 | 0 | 0.2 |
| Volume d'eau apporté ($m^3$/ha) | 0 | 0 | 0 |
| Contenu en litière (kg N/ha) | 100 | 0 | 100 |
| Contenu en fèces (kg N/ha) | 0 | 67 | 0 |
| Rapport C/N de la litière | 5 | 5 | 5 |
| Rapport C/N des fèces | 0 | 5 | 0 |

**Caractéristiques des fertilisations inorganiques**

| Paramètre | 1991 | | 1998 | | 1999 | | | 2000 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Date d'épandage | 11-mai | 22-juil | 10-juin | 27-juil | 21-mai | 21-mai | 22-juin | 07-juin | 05-juil |
| Contenu en NH4 (kg N/ha) | 40 | 0 | 42 | 0 | 5.35 | 25.9 | 0 | 30 | 0 |
| Contenu en NO3 (kg N/ha) | 0 | 34 | 0 | 78.3 | 0 | 7.5 | 92.5 | 0 | 86.4 |
| Type de relargage | Constant | Constant | Constant | Constant | Constant | Constant | Constant | Constant | Constant |
| Nombre de jours de relargage | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |

## Caractéristiques du sol

| Paramètre | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Pente du sol (%) | 1 | | | | |
| Profondeur maximale d'évaporation (m) | 0.2 | | | | |
| | Couche | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Épaisseur (m) | 0.15 | 0.15 | 0.25 | 0.25 | 0.25 |
| Densité apparente sèche (g/cm$^3$) | 1.02 | 1.14 | 1.14 | 1.28 | 1.28 |
| Conductivité hydraulique à saturation (m/j) | 26.32(26.32) | 8.045(8.045) | 8.045(8.045) | 1.443(1.443) | 1.443(1.443) |
| Porosité (m$^3$/m$^3$) | 0.589(0.0589) | 0.56(0.056) | 0.56(0.056) | 0.492(0.0492) | 0.492(0.0492) |
| Capacité au champ (m$^3$/m$^3$) | 0.207(0.0207) | 0.183(0.0183) | 0.183(0.0183) | 0.157(0.0157) | 0.157(0.0157) |
| Point de flétrissement (m$^3$/m$^3$) | 0.133(0.055) | 0.133(0.055) | 0.133(0.055) | 0.133(0.055) | 0.133(0.055) |
| Contenu en sable (%) | 14.1 | 14.1 | 14.1 | 14.1 | 14.1 |
| Contenu en limon (%) | 63 | 63 | 63 | 63 | 63 |
| Contenu en argile (%) | 22.9 | 22.9 | 22.9 | 22.9 | 22.9 |
| Contenu en matière organique (%) | 7.26 | 3.61 | 3.61 | 2.54 | 2.54 |
| Fraction de la matière organique dissoute | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 |

## Caractéristiques du cycle de l'azote

| Paramètre | |
|---|---|
| Constante de dégradation de la litière (1/jour) | 0.035(0.0035) |
| Constante de dégradation des fèces (1/jour) | 0.035(0.0035) |
| Efficacité de la synthèse microbienne de la litière | 0.5(0.05) |
| Efficacité de la synthèse microbienne des fèces | 0.5(0.05) |
| Fraction de la litière passant à l'humus | 0.15(0.015) |
| Fraction des fèces passant à l'humus | 0.15(0.015) |
| Rapport C/N du sol | 4-10 |
| Constante de minéralisation de l'humus (1/jour) | 3E-5(3E-6) |
| Fraction de l'azote inorganique disponible | 0.1(0.01) |
| Rapport NO3/NH4 du sol | 10-20 |
| Constante de nitrification (1/jour) | 0.2(0.02) |
| Constante de demi-saturation pour la dénitrification (mg N/l) | 10(1) |
| Constante de dénitrification (g N/m$^2$/jour) | 0.2(0.02) |
| Profondeur maximale de dénitrification (m) | 1(0.1) |
| Patron de dénitrification | Exponentiel |

| | Couche | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Contenu en C du réservoir litière (kg C/ha) | 43140 | 24000 | 28140 | 31440 | 31440 |
| Contenu en N du réservoir litière (kg N/ha) | 719 | 400 | 470 | 524 | 524 |
| Contenu en N du réservoir humus (kg N/ha) | 7193 | 3996 | 4694 | 5236 | 5236 |