

**Université de Montréal**

**Valorisation de lisier de porc dans une plantation de  
saules à croissance rapide**

**par**

**Annie Cavanagh**

**Institut de recherche en biologie végétale**

**Département de sciences biologiques**

**Faculté des arts et sciences**

**Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures**

**en vue de l'obtention du grade de Maîtrise**

**en sciences biologiques**

**Février 2011**

**© Annie Cavanagh, 2011**

**Université de Montréal**  
**Faculté des études supérieures et postdoctorales**

**Ce mémoire intitulé :**

**Valorisation de lisier de porc dans une plantation de saules à croissance rapide**

**Présenté par :**  
**Annie Cavanagh**

**Évalué par un jury composé des personnes suivantes :**

**Jacques Brisson, Ph.D., président-rapporteur**  
**Michel Labrecque, M.Sc., directeur de recherche**  
**Daniel Gagnon, Ph.D., membre du jury**

## Résumé

Le but de cette étude est de mieux comprendre l'effet d'une fertilisation en lisier de porc sur la productivité d'une plantation de saule tout en évaluant les risques d'impact négatif sur l'environnement. Nous avons évalué la réponse des plants à des quantités croissantes de lisiers en plus de la comparer à celle d'une fertilisation minérale. Nous avons aussi vérifié l'impact du lisier sur les teneurs nutritionnelles du sol ainsi que sur les concentrations en nitrates et phosphore de la solution du sol. Bien que l'azote du lisier soit moins efficace que celui des engrais minéraux, les résultats de notre étude montrent que le lisier est un bon engrais pour les plantations de saules. En effet, les rendements sur deux ans des parcelles ayant reçu les quantités croissantes de lisier étaient de l'ordre de 30,3 à 32,9 t/ha. Nous avons observé l'augmentation des teneurs en nitrate, cuivre et zinc dans le sol en fonction des apports croissants de lisier. Ces teneurs ont d'ailleurs diminué lors de la deuxième saison de croissance, ce qui pourrait être dû au prélèvement par les saules. Les concentrations printanières des eaux de lysimètres indiquent que la quantité maximale de lisier telle que testée lors de nos essais comporte un certain facteur de risque de lessivage des nitrates. Nous n'avons pas analysé la solution du sol des parcelles fertilisées avec des quantités plus faibles de lisier, mais nous pouvons croire qu'elles auraient induit des concentrations en nitrate comportant moins de risque de lessivage tout en assurant une productivité considérable.

**Mots-clés** : Saules à croissance rapide, CICR, lisier de porc, fertilisation, nitrate, phosphore.

## **Abstract**

The aim of this study is to investigate the effect of the use of pig slurry as fertilizer on the productivity of a willow plantation, while evaluating the risk of a negative impact on the environment. We evaluated plant response to increasing slurry amounts and compared this response to the effect of mineral fertilization. We also verified the impact of slurry on soil nutritional content as well as on nitrate and phosphorus concentrations in the soil. Although slurry nitrogen was less efficient than mineral fertilizer, the results of our study show that slurry constitutes an effective fertilizer for willow plantations. In fact, yields over two years on plots that received increasing amounts of slurry were on the order of 30.0 to 32.9 t/ha. We observed an increase in soil levels of nitrates, copper and zinc as a function of increasing slurry amounts. These levels actually decreased during the second growing season, possibly due to uptake by the willows. Springtime concentrations of water in lysimeters indicated that the maximum amount of slurry tested in our experiments was accompanied by a certain risk of nitrates leaching into the soil. We did not analyze the soil solution of plots fertilized with lower amounts of slurry, but it seems likely that these nitrate concentrations would have had a lower risk of leaching while still ensuring considerable productivity.

**Keywords:** Fast growing willow, SRIC, pig slurry, fertilization, nitrate, phosphorus.

## Table des matières

|  |             |
|--|-------------|
| <b>Résumé</b> .....  | <b>iii</b>  |
| <b>Abstract</b> .....  | <b>iv</b>   |
| <b>Table des matières</b> .....  | <b>v</b>    |
| <b>Liste des tableaux</b> .....  | <b>vii</b>  |
| <b>Liste des figures</b> .....   | <b>ix</b>   |
| <b>Liste des annexes</b> .....   | <b>x</b>    |
| <b>Liste des abréviations</b> .....  | <b>xi</b>   |
| <b>Remerciements</b> .....   | <b>xii</b>  |
| <b>Contribution à l'article scientifique</b> .....                                 | <b>xiii</b> |
| <br>   |             |
| <b>Chapitre 1 : Introduction</b> .....   | <b>1</b>    |
| 1.1.    Problématique des surplus en lisiers de porc .....                         | 2           |
| 1.2.    Culture intensive sur courtes rotations de saule à croissance rapide ..... | 5           |
| 1.3.    Valorisation des déchets organiques dans les plantations de saules .....   | 6           |
| 1.4.    Objectifs .....  | 8           |
| 1.5.    Approches générales .....  | 9           |
| <br>   |             |
| <b>Chapitre 2 : Pig slurry as fertilizer in willow plantations</b> .....           | <b>10</b>   |
| 2.1.    Abstract .....   | 10          |
| 2.2.    Introduction .....   | 11          |
| 2.3.    Materials and Methods.....   | 13          |
| 2.3.1.    Description of the experimental site .....                               | 13          |
| 2.3.2.    Experimental design.....   | 14          |
| 2.3.3.    Measurements and sampling.....   | 15          |

|  |  |             |
|--|--|-------------|
| 2.3.3.1.                                 | Yields and sampling.....   | 15          |
| 2.3.3.2.                                 | Soil .....   | 16          |
| 2.3.3.3.                                 | Soil solution .....  | 17          |
| 2.3.4.                                   | Chemical analyses.....   | 17          |
| 2.3.5.                                   | Statistical analyses .....   | 18          |
| 2.4.                                     | Results and Discussion.....  | 18          |
| 2.4.1.                                   | Yield.....   | 18          |
| 2.4.2.                                   | Nutritional uptake by willows.....                                 | 21          |
| 2.4.2.1.                                 | Phosphorus .....   | 21          |
| 2.4.2.2.                                 | Nitrogen .....   | 21          |
| 2.4.3.                                   | Changes to the soil properties following slurry fertilization..... | 23          |
| 2.4.3.1.                                 | Nitrates .....   | 23          |
| 2.4.3.2.                                 | Phosphorus .....   | 24          |
| 2.4.3.3.                                 | Heavy metals.....  | 25          |
| 2.4.4.                                   | Analysis of the soil solution.....                                 | 27          |
| 2.4.4.1.                                 | Nitrates .....   | 27          |
| 2.4.4.2.                                 | Phosphorus .....   | 28          |
| 2.5.                                     | Conclusion .....   | 29          |
| 2.6.                                     | Acknowledgments.....   | 30          |
| 2.7.                                     | References.....  | 30          |
| <b>Chapitre 3 : Conclusion.....</b>      |  | <b>36</b>   |
| <b>Références bibliographiques .....</b> |  | <b>40</b>   |
| <b>Annexe 1.....</b>                     |  | <b>xiv</b>  |
| <b>Annexe 2.....</b>                     |  | <b>xix</b>  |
| <b>Annexe 3.....</b>                     |  | <b>xx</b>   |
| <b>Annexe 4.....</b>                     |  | <b>xxii</b> |

## Liste des tableaux

### Chapitre 2

|   |    |
|---|----|
| <b>Table 1:</b> Quantities of nutrients added to the soil by different fertilization treatments .....   | 14 |
| <b>Table 2:</b> Mean values of slurry characteristics.....  | 15 |
| <b>Table 3:</b> Soil properties at the beginning of the trial.....  | 16 |
| <b>Table 4:</b> Willow dry matter yield after two years for each fertilisation treatment.....   | 19 |
| <b>Table 5:</b> ANOVA <i>p</i> values for soil composition.....   | 23 |
| <b>Table 6:</b> Residual nitrate levels at the end of the first and second growing seasons in the soil of plots that had received increasing amounts of N in the form of slurry .....   | 24 |
| <b>Table 7:</b> Levels of Cu <sub>M3</sub> and Zn <sub>M3</sub> at the end of the first and second growing seasons in the superficial soil layer (0-20 cm) of plots that had received increasing amounts of Cu and Zn in the form of slurry ..... | 26 |
| <b>Table 8:</b> Nitrate concentration in water in lysimeters during the second growing season..   | 28 |
| <b>Table 9:</b> Concentration of total phosphorus dissolved in water of lysimeters during the second growing season.....  | 29 |

### Annexe 1

|  |     |
|--|-----|
| <b>Tableau 1:</b> Rendement en biomasse sèche des saules aux différents traitements de fertilisation pour les deux années croissance .....                           | xiv |
| <b>Tableau 2:</b> Prélèvement en azote et phosphore par les tiges des saules aux différents traitements de fertilisation en deuxième année de croissance (2009)..... | xiv |
| <b>Tableau 3:</b> Teneur en NH <sub>4</sub> (mg/kg) dans le sol pour les traitements de fertilisation en lisier .....  | xv  |
| <b>Tableau 4:</b> Teneur en NO <sub>3</sub> (mg/kg) dans le sol pour les traitements de fertilisation en lisier .....  | xv  |
| <b>Tableau 5:</b> Teneur en P (mg/kg) dans le sol pour les traitements de fertilisation en lisier .  | xv  |

|   |       |
|---|-------|
| <b>Tableau 6:</b> Teneur en K (mg/kg) dans le sol pour les traitements de fertilisation en lisier                               | xvi   |
| <b>Tableau 7:</b> Teneur en Ca (mg/kg) dans le sol pour les traitements de fertilisation en lisier                              | xvi   |
| <b>Tableau 8:</b> Teneur en Mg (mg/kg) dans le sol pour les traitements de fertilisation en lisier                              | xvi   |
| <b>Tableau 9:</b> Teneur en Al (mg/kg) dans le sol pour les traitements de fertilisation en lisier                              | xvii  |
| <b>Tableau 10:</b> Teneur en Cu (mg/kg) dans le sol pour les traitements de fertilisation en lisier                             | xvii  |
| <b>Tableau 11:</b> Teneur en Zn (mg/kg) dans le sol pour les traitements de fertilisation en lisier                             | xvii  |
| <b>Tableau 12:</b> Concentration des nitrates dans les eaux de lysimètres durant la deuxième saison de croissance (2009)        | xviii |
| <b>Tableau 13:</b> Concentration du phosphore total dissous dans les eaux de lysimètres durant la deuxième saison de croissance | xviii |



## Liste des figures

**Figure 1:** Willow dry matter yields as a function of the N amount applied with mineral fertilizer (a) or pig slurry (b) for the first and second growing seasons..... 20

**Figure 2:** N uptake in willow stems as a function of N amount applied with mineral fertilizer or pig slurry ..... 22

## Liste des annexes

|   |      |
|---|------|
| <b>Annexe 1</b> : Données brutes.....   | xiv  |
| <b>Annexe 2</b> : Résultats des analyses de variance effectuées sur les données de rendement.....   | xix  |
| <b>Annexe 3</b> : Résultats des analyses de variance effectuées sur les données de contenu en azote et en phosphore des tiges de saules.....                        | xx   |
| <b>Annexe 4</b> : Résultats des analyses de variance effectuées sur les données de composition chimique du sol pour les traitements de fertilisation en lisier..... | xxii |

## Liste des abréviations

AUC : Apparent utilization coefficient

CAU : Coefficient apparent d'utilisation

CICR : Culture intensive sur courtes rotations

M3 : Mehlich 3

SRIC : Short rotation intensive culture

## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Michel Labrecque, mon directeur, qui m'a accueillie dans ce projet et qui a su me conseiller et m'encourager tout au long de mes travaux. Merci à Marc-Olivier Gasser pour ses éclairantes explications agronomiques. Merci à Stéphane Daigle pour sa patience et son humour lors de ses cliniques de statistiques. Merci à Jean Teodorescu pour avoir partagé avec moi son expertise qui m'a été des plus utiles sur le terrain. Merci à Hélène Tardif ainsi qu'à Sylvain Beauregard. Merci enfin à tous ces gens qui m'ont aidé dans l'accomplissement de ces diverses et parfois étranges tâches que font les biologistes, telles qu'échantillonner du lisier de porc, creuser d'innombrables trous, cueillir des feuilles, pomper l'eau du sol, emballer, effeuiller ou encore peser des arbres. Merci donc à la précieuse contribution sur le terrain de Jovette Lemay, Sébastien Turgeon, William René, Francis et Mario Allard, Laurence Bissonnette, Chantale Moisan, Rémy Fluet, Nicola Fontana, Claude Labrecque ainsi que mes parents, toujours aussi intéressés et participatifs. Merci à vous tous.

Cette recherche a été financée par le Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec (CDAC), la Fédération des producteurs de porcs du Québec (FPPQ) et les Fonds de recherche sur la nature et les technologies (FQRNT). La réalisation de ce projet n'aurait pu être possible sans l'appui et le soutien technique de la Coopérative de gestion des engrais organiques de Lanaudière (COGENOR Lanaudière), Agro-Énergie inc., l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), et l'Institut de recherche en biologie végétale (IRBV).

## **Contribution à l'article scientifique**

### **Pig slurry as fertilizer in willow plantations**

Annie Cavanagh, Michel Labrecque et Marc-Olivier Gasser.

Article scientifique en préparation destiné à la revue *Biomass and Bioenergy*

Annie Cavanagh a été la principale auteure de cet article scientifique présenté dans le chapitre 2 de ce mémoire. Son directeur Michel Labrecque et Marc-Olivier Gasser, partenaire dans le projet, ont établi la problématique de recherche, supervisé les actions sur le terrain ainsi que l'analyse des résultats, qu'elle a elle-même faites et révisé les textes.

## Chapitre 1 : Introduction

---

L'intensification de l'agriculture durant les dernières décennies a eu pour conséquence la concentration des activités agricoles. Au Québec, ce phénomène s'est surtout fait sentir au niveau de la production porcine et a entraîné des contraintes environnementales et sociales importantes quant à la gestion des effluents porcins. Face à la problématique de surfertilisation des terres agricoles due à l'épandage excessif des lisiers, des normes d'application maximales ont été établies (Gouvernement du Québec 2002). Les producteurs se trouvent alors aux prises avec des surplus de plus en plus difficiles à gérer. La valorisation des effluents porcins dans une culture de plantes à haut rendement en biomasse, tel que le saule à croissance rapide, apparaît comme une alternative écologique et économique pour le traitement du lisier. La grande productivité qui caractérise les plantations de saules se traduit par une demande hydrique et nutritionnelle très élevée, ce qui est favorable pour la valorisation d'importantes quantités de lisiers comme engrais tout en limitant les impacts négatifs sur l'environnement. Ainsi, la plantation peut agir comme une sorte de filtre végétal qui consomme et retient les nutriments contenus dans le lisier. Cette production végétale, qu'elle soit destinée au secteur énergétique ou à d'autres utilisations, pourrait fournir de nouvelles possibilités de revenus aux producteurs. Par ailleurs, ces plantations pourraient être établies dans d'autres situations comme pour la stabilisation de berges, l'établissement de bandes riveraines ou d'écran anti-odeur et ainsi solutionner des problèmes environnementaux. Une revue de la littérature témoigne du fait qu'aucune étude n'a encore été menée quant à la fertilisation d'une plantation de saules par ce type d'engrais. L'entreprise de travaux de recherche sur le sujet s'avérait donc très pertinente afin de permettre le développement de telles applications de valorisation des effluents porcins.

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à la description de la problématique des surplus en lisiers de porc ainsi que de la technique de culture intensive sur courtes rotations de saules à croissance rapide sur laquelle est basée cette étude. Un survol des

expériences déjà menées quant à la valorisation des déchets organiques dans les plantations des saules est aussi présenté. S'en suit la présentation des objectifs de recherche ainsi qu'une description de l'approche générale des travaux. Les résultats concluants de cette expérience sont présentés sous forme d'article scientifique dans le deuxième chapitre. Le dernier chapitre comporte la conclusion générale de ce mémoire. Finalement, tous les résultats des analyses de variance effectuées sur les données sont présentés en annexe.

### **1.1. Problématique des surplus en lisiers de porc**

La production porcine occupe une place importante dans l'activité agricole des régions du sud du Québec, notamment dans les quatre régions où se trouve près de 82 % du cheptel porcin : Montérégie, Chaudière-Appalaches, Centre-du-Québec et Estrie (Ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec 2006). Dans ces quatre régions, les revenus agricoles du marché provenant de la production porcine s'élèvent à 800 millions de dollars et comptent pour 30 % de l'ensemble des revenus agricoles régionaux. En 2005, 7,4 millions de porcs étaient produits au Québec (Ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec 2006). Cet élevage intensif génère des quantités considérables de déjections animales qui peuvent être valorisées comme fertilisant sur les terres agricoles : 9 million de mètres cubes de lisier sont épandus annuellement au Québec (Chantigny *et al.* 2004). La problématique environnementale en production porcine découle principalement du fait que les lisiers sont appliqués dans des quantités qui dépassent les besoins nutritionnels des cultures réceptrices menant ainsi à des pertes d'azote et de phosphore dans les cours d'eau.

Parce qu'ils sont riches en azote ammoniacal, les lisiers sont des fertilisants qui ont l'avantage de procurer de l'azote rapidement disponible pour les plantes, l'azote ammoniacal ( $\text{NH}_4$ ) et les nitrates ( $\text{NO}_3$ ) étant les deux formes d'azote assimilables. En effet, lors de l'épandage, 70 % de l'azote total contenu dans les lisiers est sous forme de

$\text{NH}_4$  (Doucet 2002). Ce  $\text{NH}_4$ , s'il n'est pas incorporé au sol, est en grande partie perdu par volatilisation. Une fois dans le sol, le  $\text{NH}_4$  est rapidement nitrifié par des bactéries ( $\text{NH}_4 \rightarrow \text{NO}_3$ ). L'azote sous sa forme nitrique est très soluble et s'il n'est pas prélevé par les plantes, immobilisé ou encore dénitrifié ( $\text{NO}_3 \rightarrow \text{N}_2$  atmosphérique), risque d'être lessivé. Ainsi, lorsque les apports en azote par les lisiers dépassent la capacité de support du milieu, les surplus de nitrates peuvent lessiver vers les eaux de surface et sous-terraines et conséquemment mener à la contamination de la nappe phréatique et des cours d'eau (Carpenter *et al.* 1998; Mantovi *et al.* 2006; Penuelas *et al.* 2009; Dauden *et al.* 2004; Gasser *et al.* 2002).

Les lisiers de porcs sont aussi riches en phosphore et les risques de pertes dans les cours d'eau sont aussi à considérer étant donné qu'ils sont à la source des problématiques environnementales d'eutrophisation et de prolifération cyanobactérienne. En effet, il a été montré qu'il existe un lien entre l'application excessive des lisiers et l'enrichissement en phosphore des plans d'eau (Wang *et al.* 2004; Redding 2001; Carpenter *et al.* 1998). Ceci est principalement dû au fait que les doses d'application des lisiers sont la plupart du temps calculées en fonction des besoins en azote des cultures. Comme le ratio P : N du lisier dépasse celui nécessaire aux plantes, les quantités de phosphore apportées dépassent les prélèvements et causent une accumulation du phosphore dans le sol. Le phosphore contenu dans le lisier se présente sous forme d'ions orthophosphate solubles ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ) qui viennent enrichir la solution du sol. Ces ions sont alors soit prélevés par les plantes, soit adsorbés par le complexe argilo-humique, en équilibre avec la solution du sol, soit fixés, donc rendus moins solubles, aux ions de fer, d'aluminium, de calcium et de magnésium (Doucet 2002). L'application répétée de lisier affecte l'équilibre adsorption-solubilité en réduisant la capacité d'adsorption du phosphore du sol et en augmentant sa fraction soluble ainsi que le niveau de saturation du phosphore dans le sol (Holford *et al.* 1997). On désigne par saturation en phosphore du sol la quantité de phosphore fixée par rapport à sa capacité de fixation maximale. L'indice de saturation en phosphore se calcule selon le rapport entre le phosphore disponible dans le sol (P-Mehlich 3) et la teneur en aluminium disponible (Al-Mehlich 3) et s'exprime en pourcentage. Au Québec, l'indice de saturation en phosphore



des sols est un paramètre utilisé pour les recommandations en fertilisation car il fournit une indication du risque que la présence du phosphore représente. Pellerin *et al.* (2006) ont établi des valeurs environnementales critiques de 7,6 % en sol lourd et 13,1 % en sol léger.

Le cuivre et le zinc sont des minéraux qui sont fréquemment ajoutés à l'alimentation des porcs pour favoriser la croissance et pour prévenir et traiter certaines maladies (Doucet 2002). Ces oligo-éléments sont en grande partie excrétés dans les fèces et les urines et se retrouvent ainsi incorporés dans le sol des cultures réceptrices de lisier (Nicholson *et al.* 2003). Le cuivre et le zinc sont des minéraux essentiels à la croissance des plantes mais sont potentiellement phytotoxiques lorsqu'ils sont en trop grandes concentrations dans le sol. Des études réalisées dans différentes régions agricoles du monde ont mis en évidence des enrichissements en cuivre et en zinc des sols dus à des applications excessives d'effluents porcins riches en ces métaux dans le passé (Berenguer *et al.* 2008; Holford *et al.* 1997; Temmerman *et al.* 2003; Wang *et al.* 2004; Nicholson *et al.* 2003). Lors de travaux réalisés plus à court terme (3 à 5 ans), Qian *et al.* (2003) ont montré que les apports de cuivre et de zinc contenus dans les lisiers modifient les charges et la distribution de ces métaux dans les différentes fractions du sol. Lorsque les sites de fixation deviennent saturés pour ces métaux, on observe un accroissement de la fraction mobile et une mise en disponibilité pouvant conduire à la phytotoxicité.

Face à ces contraintes environnementales, la gestion des surplus de lisier devient alors problématique pour les producteurs qui sont souvent dépourvus d'espace d'épandage suffisant. En 2002, le gouvernement du Québec a émis un projet de loi sur la qualité de l'environnement : le Règlement sur les exploitations agricoles dicte les normes d'application maximales de phosphore sur les terres agricoles (Gouvernement du Québec 2002). Cette loi stipule que les producteurs porcins doivent détenir, que ce soit par propriété, par location ou par entente d'épandage, les superficies requises pour disposer d'une charge en phosphore maximale préétablie. La mise en application de ce règlement

nécessite davantage de terres réceptrices, ce qui résulte en une hausse des coûts de gestion des lisiers et conséquemment des coûts de production porcine.

Plusieurs innovations ont déjà cours quant à la gestion des effluents porcins. De multiples interventions tentent de réduire la charge en nutriments des rejets, que ce soit au niveau de l'alimentation, du volume de lisier produit, ou encore des techniques d'entreposage. La valorisation du lisier dans un contexte de production d'énergie renouvelable est une application en plein développement. La fertilisation en lisiers d'une plantation de saules à croissance rapide s'inscrit dans cette avenue novatrice. L'utilisation du lisier fournirait d'une part un engrais bon marché et permettrait en second lieu de réduire la superficie des terres réceptrices requises pour disposer des déjections animales.

## **1.2. Culture intensive sur courtes rotations de saule à croissance rapide**

C'est suite au choc pétrolier des années soixante dix que plusieurs pays d'Europe et d'Amérique du Nord commencent à s'intéresser à la production de biomasse pour des fins énergétiques (Björheden 2006; Volk *et al.* 2006). Le saule arbustif à croissance rapide, qui présente des facultés de reproduction, d'enracinement et de croissance exceptionnelles, s'avère alors comme une espèce de choix pour la production intensive de biomasse ligneuse. Le modèle cultural qui s'est alors développé pour le saule est la culture intensive sur courte rotation (CICR) où les tiges des plants sont récoltées de façon répétitive à intervalles rapprochés (entre 2 et 5 ans). Les souches laissées au sol conservent la capacité de produire de nouveau des tiges qui seront à leur tour récoltées au terme d'un autre cycle de production. Les hauts taux de développement des saules ainsi que les densités de plantation élevées utilisées dans ce mode de culture (15 000 à 30 000 plants/ha) permettent une production importante de biomasse. Les différents travaux menés en Europe et en Amérique du Nord témoignent de rendements annuels oscillant entre 5 et 35 t/ha (Abrahamson *et al.* 1998; Jug *et al.* 1999; Ledin et Willebrand 1995). Cette grande

variabilité de production est due à plusieurs facteurs tels que les conditions climatiques, les caractéristiques du sol, la densité des plantations, le cycle des récoltes, l'irrigation et la fertilisation (Hofmann-Schielle *et al.* 1999; Labrecque *et al.* 1998; Martin et Stephens 2006; Adegbidi *et al.* 2001). L'expertise accumulée, tant au niveau de l'hybridation que de l'aménagement des plantations, a grandement contribué à l'augmentation des rendements.

Au Québec, les études menées par l'Institut de recherche en biologie végétale depuis 1989 ont montré que les conditions climatiques et édaphiques québécoises sont très propices aux CICR de saule à croissance rapide. Les expériences menées avec différents clones témoignent de productions exceptionnelles : *Salix miyabeana* a montré des rendements annuels de l'ordre de 16 à 17 t/ha de biomasse sèche pouvaient être obtenus dès la deuxième année du premier cycle d'exploitation (Labrecque et Teodorescu 2005).

### **1.3. Valorisation des déchets organiques dans les plantations de saules**

Les hauts taux de rendement qui font la particularité des saules à croissance rapide sont associés à une demande nutritionnelle importante (Adegbidi *et al.* 2001; Ericsson 1994). Afin d'éviter l'épuisement du sol et assurer la durabilité de la plantation, il est nécessaire d'y ajouter des nutriments. La fertilisation peut augmenter substantiellement la productivité des saules et ainsi optimiser les rendements de la plantation. Les fertilisants qui sont généralement utilisés de nos jours sont artificiellement créés en industrie. Malgré les avantages techniques et productifs qu'ils présentent, le coût des engrais synthétiques ainsi que l'énergie nécessaire à leur fabrication sont élevés. Dans le cas des plantations de saules, qui sont particulièrement exigeantes en nutriments, les fertilisants peuvent s'avérer une composante importante des coûts de production (20 à 30 %) (Adegbidi *et al.* 2003). Les résidus organiques, tant agricoles, municipaux qu'industriels, contiennent une quantité de nutriments essentiels et apparaissent comme une source potentielle de fertilisants pour les plantations (Adegbidi *et al.* 2001). En plus de fournir des nutriments à bas prix, l'utilisation

de ces résidus implique dans certain cas une réduction des coûts de traitement de ces déchets (Hansson *et al.* 1999). De plus, la production de biomasse pour des fins énergétiques permet la valorisation de déchets contaminés impropres à la fertilisation des cultures alimentaires.

De ce fait, la valorisation des eaux usées municipales et boues d'épuration dans des plantations de saules à croissance rapide est une avenue qui a été grandement étudiée (Abrahamson *et al.* 1998; Aronsson and Perttu 2001; Hasselgren 1998; Perttu et Kowalik 1997; Rosenqvist *et al.* 1997). Les expériences québécoises mettent en évidence des augmentations de production de biomasse de 2 à 3 fois par l'application de boues d'épuration séchées équivalent à 300 kg de N/ha (Labrecque *et al.* 1998). Le deuxième cycle de rotation d'une plantation de saules fertilisée avec des boues d'épuration compostées témoigne de la meilleure production enregistrée au Québec : 70,36 t/ha (23,45 t/ha/an) qui aurait consommé 528 kg de N/ha (Labrecque et Teodorescu 2003).

Cette revue de la littérature a permis de constater que la valorisation des déjections animales dans une plantation de saules est un système qui a été très peu exploité. Une seule étude montre les avantages de l'utilisation des valeurs fertilisantes des résidus d'élevage dans de telles cultures (Adegbidi *et al.* 2003). Selon cette étude, les rendements en biomasse d'une plantation de saules auraient augmenté de 30 à 38% grâce à une fertilisation au fumier de poule. Même si très répandue en agriculture, la fertilisation avec des lisiers de porc dans un contexte de culture pérenne ligneuse est chose peu commune. Seulement récemment, un projet de recherche mené au Québec s'est intéressé aux effets de la fertilisation par les lisiers d'une plantation de peupliers hybrides (Lteif *et al.* 2007). Les valeurs fertilisantes du lisier auraient induit une augmentation en biomasse de 4 t/ha sur deux ans.

Les hauts taux d'assimilation nutritive qui caractérisent les saules en CICR favoriseraient une diminution des risques de perte dans l'environnement des éléments

nutritifs apportés par les lisiers. En effet, le réseau racinaire très développé des saules permet non seulement le prélèvement efficace en eau et éléments nutritifs mais peut aussi diminuer la percolation ainsi que le lessivage (Makeschin 1994). Ainsi, la biomasse racinaire peut agir comme un important puits pour les nutriments et oligo-éléments. Rappelons que les applications de lisier sont faites au printemps de la deuxième année de croissance des saules alors que le système racinaire est déjà bien développé. En comparaison, les applications printanières de lisier qui se fit habituellement sur les cultures de plantes annuelles telles que le maïs comportent plus de risques de perte de nutriments par lessivage. Différents travaux ont su montrer qu'une fertilisation équivalant à 150-200 kg de N/ha/an ne comportait pas de risque de contamination par les nitrates de la solution du sol dans une plantation de saules (Aronsson et Perttu 2001; Bergstrom et Joliansson 1992). Un autre avantage des plantations de saules est la densité d'occupation du milieu qui diminue le ruissellement de surface et l'écoulement des éléments en excès vers les cours d'eau (Börjesson 1999).

#### **1.4. Objectifs**

Ce projet de maîtrise vise à mieux comprendre l'effet d'une fertilisation en lisier sur la productivité d'une plantation de saules (*S. miyabeana* SX67) tout en évaluant les risques d'impact négatif sur l'environnement. Afin de mettre en perspective les effets de la fertilisation en lisier sur la plantation et sur l'environnement, ceux-ci ont été comparés avec ceux d'une fertilisation minérale. Les objectifs spécifiques de ce projet étaient:

- 1) Étudier et comparer l'effet des apports azotés du lisier et des engrais minéraux sur les rendements en biomasse ainsi que sur les prélèvements nutritionnels des saules.
- 2) Vérifier l'effet de l'application des différentes quantités de lisier sur les teneurs nutritionnelles du sol de la plantation.

- 3) Vérifier l'effet de la fertilisation en lisier et en engrais minéraux sur les concentrations de nitrates et de phosphore dans la solution du sol.

### **1.5. Approches générales**

L'expérience a été conduite sur une surface de 0,45 hectare d'une plantation de *Salix miyabeana* SX67 établie en mai 2007 à Saint-Roch-de-l'Achigan dans la région de Lanaudière. Les plants ont été recepés au cours de l'hiver 2007-2008 et les traitements de fertilisation ont été appliqués au début de juin 2008. Le dispositif expérimental était constitué de trois blocs aléatoires complets avec 8 traitements comportant 4 quantités croissantes de lisier, 3 quantités croissantes d'azote sous forme minérale et un témoin sans apport d'azote. À la fin de la première et de la deuxième saison de croissance, les rendements et les prélèvements nutritionnels des saules ont été mesurés. La composition chimique du sol a aussi été analysée à ces deux mêmes périodes pour les parcelles témoin ainsi que celles ayant reçu les différentes quantités de lisier. L'impact des traitements de fertilisation sur les concentrations en nitrates et en phosphore de la solution du sol a été évalué à partir d'échantillons d'eau récoltés dans des lysimètres à succion installés à un mètre de profondeur des parcelles témoins et celles correspondant aux quantités maximales de lisier et d'engrais minéraux. Des échantillons d'eau ont été récoltés au cours des deux saisons de croissance lorsque la teneur en eau dans le sol était suffisante.

## **Chapitre 2 : Pig slurry as fertilizer in willow plantations**

Annie Cavanagh<sup>1</sup>, Marc Olivier Gasser<sup>2</sup> and Michel Labrecque<sup>3</sup>

1. Département de Sciences biologiques, Université de Montréal, C.P. 6128, succ. Centre-ville, Montreal, Quebec, Canada H3C 3J7

2. Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement, 2700 Einstein, Quebec, Quebec, Canada G1P 3W8

3. Institut de Recherche en Biologie Végétale, 4101 Sherbrooke East, Montreal Quebec, Canada, H1X 2B2

### **2.1. Abstract**

In this study, we applied pig slurry as fertilizer in a willow plantation in order to evaluate its effect on productivity, while estimating the risks of a negative impact on the environment. In a plantation of *Salix miyabeana*, established in 2007 from stem cuttings at a density of 16 000 plants/ha, we investigated biomass yields and nutritional uptake by plants in response to four amounts of slurry (148, 295, 443, 590 kg N/ha) and 3 amounts of mineral fertilizer (100, 200, 300 kg N/ha). We tested the effect of slurry on the nutritional status of the plantation soil and on the concentrations of nitrates and phosphorus in the soil solution. Treatments were applied in spring 2008 and measurements were taken during two subsequent growing seasons. Yields over two years for plots that received increasing amounts of slurry were on the order of 30.3 to 32.9 t/ha, which correspond to an increase of 14.4 to 24.4% over control plots (without nitrogen fertilization). Slurry application had a positive effect on nitrate, copper and zinc levels in the soil. A decrease of these levels during the second growing season could be due to the uptake by the willows. Recycling pig effluent on willow plantations may constitute an ecological and economical alternative method of manure treatment, as well as offering a new sources of income to producers.

**Keywords:** Fast growing willow, SRIC, pig slurry, fertilization, nitrate, phosphorus.

## 2.2. Introduction

The intensification of agricultural activities, characteristic of animal production farms in many regions of North America, often has an undesirable environmental impact. Intensive pig farming, which implies a high animal density per unit of surface area, often results in difficulties in managing the slurry generated. One of the main strategies to manage this waste is to reuse it in agriculture. However, the application of slurry to crops can lead to an excess of nutrients and a leaching into water courses. Several studies have shown a relationship between excessive slurry application and increased nitrogen (N) and phosphorus (P) levels in water bodies (Carpenter *et al.* 1998; Redding 2001; Wang *et al.* 2004). This nutrient enrichment of water bodies causes imbalances in aquatic ecosystems, such as eutrophication and cyanobacterial blooms. Surplus nitrogen in the soil can also leach into groundwater, and lead to the contamination of the water table by nitrates (NO<sub>3</sub>-N) (Dauden *et al.* 2004; Mantovi *et al.* 2006; Penuelas *et al.* 2009; Gasser *et al.* 2002). Other studies have noted significant accumulations of copper (Cu) and zinc (Zn) – metals added to pig fodder – in soils, following excessive application of slurry (Berenguer *et al.* 2008; Nicholson *et al.* 2003; Temmerman *et al.* 2003).

In order to better manage this situation, maximal application norms have been established in many countries. With the frequent results that producers, who often lack the sufficient area for spreading slurry, accumulate a surplus that is increasingly difficult to contain.

Recycling pig effluent in short rotation intensive cultures (SRIC) of fast growing willows may constitute an ecological and economical alternative method for manure treatment. The high biomass yield which characterizes willows, associated with high nutritional and water requirements (Adegbedi *et al.* 2001; Ericsson 1994), would theoretically allow the use of large quantities of slurry as fertilizer, while limiting nutrient loss to the water courses. The highly developed root system of willows (Kuzovkina and Volk 2009) not only takes up



water and nutrients efficiently, but can also reduce percolation, and hence the risk of leaching elements to the water table (Makeschin 1994). Thus slurry application on a willow plantation in SRIC can both supply economical fertilizer for plant production which represents a new source of income to producers, as well as a reduction of the area required for animal waste disposal.

Recycling organic waste on willow plantations is an avenue that has been frequently used during the last few years. Because they contain essential nutrients for plant growth, organic residues are an economical source of fertilizer for willow plantations, which have particularly high nutrient requirements (Adegbidi *et al.* 2001). In addition to ensuring the productivity and durability of the plantation, the utilization of these residues in some cases implies reduced costs for waste treatment (Hansson *et al.* 1999). Consequently, several studies have examined the use of recycled municipal wastewater and sludge in fast growing willow plantations (Abrahamson *et al.* 1998; Aronsson and Perttu 2001; Hasselgren 1998; Perttu and Kowalik 1997; Rosenqvist *et al.* 1997). Experiments in Quebec have shown two to three fold increases in biomass production following the application of dried sludge equivalent to 100 to 300 kg of N/ha (Labrecque and Teodorescu 2001, 2003; Labrecque *et al.* 1998).

Furthermore, few studies have examined the effects of recycling animal waste on willow plantations. One specific study has shown the advantages of using the fertilizing values of livestock residues on such crops (Adegbidi and Briggs 2003). In this trial, the biomass yield of a willow plantation increased from 30 to 38% following fertilization with chicken manure (100 to 300 kg N/ha). While fertilization with pig slurry is a common agricultural practice, it has rarely been used on a perennial woody crop. Only recently Lteif *et al.* (2007) have conducted a study on hybrid poplars fertilized with pig slurry. In this case, the application of slurry equivalent to 116 and 233 kg of N/ha/year induced an increase in biomass of 3.84 and 5.20 t/ha over two years.

The objective of the present study is to test the effect of using pig slurry as a fertilizer on the productivity of a willow plantation, while evaluating the risks of a negative impact on the environment. To highlight the effects of applying increasing quantities of slurry on the plantation and the environment, a comparison was made with the effects of mineral fertilization. To this end, we i) studied and compared the effect produced by slurry and mineral fertilizer on biomass yields, as well as on nutritional uptake by willows, ii) verified the effect of slurry on the nutritional status of the plantation soil and iii) evaluated the effect of fertilization with slurry versus mineral fertilizer on concentrations of nitrates and phosphorus in the soil solution.

## **2.3. Materials and Methods**

### **2.3.1. Description of the experimental site**

The experiment was conducted in a willow plantation located at Saint-Roch-de-l'Achigan in the Lanaudière region of Quebec, Canada (45° 50' 50" N - 73° 38' 27" W). The region has a continental climate characterized by an average annual temperature of 5.3 °C and 1018 mm of total mean annual precipitation. The 2008 and 2009 growing seasons (beginning of May to end of September) were characterized by similar average temperatures (17.0 °C and 16.4 °C respectively) that were close to the normal (16.7 °C). Total precipitation during the first growing season (373 mm) was lower than in 2009 (445 mm) and lower than normal (454 mm) for the time of year (Environment Canada 2010).

The experiment was conducted in a *Salix miyabeana* (clone SX67) plantation, established in SRIC in May 2007 with a density of 16,000 plants ha<sup>-1</sup> (35 cm between plants and 1.8 m between rows) on an area of 0.45 ha. Willow growth and development were excellent during the establishment year (2007), with a survival rate above 95% at the end of the growing season. Plants were coppiced during the winter of 2007-2008, according to

common practice, and in order to promote growth and development of new stems. The various fertilization treatments were applied at the beginning of June 2008.

### 2.3.2. Experimental design

The experiment was a randomized complete block design of 3 blocks with 8 treatments consisting of 4 increasing amounts of slurry, 3 increasing amounts of nitrogen in mineral form and a control with no nitrogen content. The quantities of nutrients supplied by the different treatments are presented in Table 1. Each plot was 5.4 m in width and included three rows 20 m long. A buffer zone of 3 m (without treatment) separated each of the 20 m long plots at their extremities. Pig slurry was applied using a spreader equipped with a tool bar and three flex drop hoses to apply manure by gravity. The manure was then superficially buried the following day (less than 24 hours later) using a harrow, in order to reduce loss of ammonium nitrogen ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) through volatilization. Slurry samples were taken during spreading in order to determine its chemical composition (Table 2).

**Table 1:** Quantities of nutrients added to the soil by different fertilization treatments

| Treatment                   | Amount applied (kg/ha) |     |     |
|-----------------------------|------------------------|-----|-----|
|                             | N                      | P   | K   |
| F0 : Control                | 0                      | 26  | 50  |
| <i>Pig slurry</i>           |                        |     |     |
| F1 (30 m <sup>3</sup> /ha)  | 148                    | 32  | 75  |
| F2 (60 m <sup>3</sup> /ha)  | 295                    | 64  | 150 |
| F3 (90 m <sup>3</sup> /ha)  | 443                    | 96  | 225 |
| F4 (120 m <sup>3</sup> /ha) | 590                    | 127 | 300 |
| <i>Mineral fertilizer</i>   |                        |     |     |
| F5                          | 100                    | 26  | 50  |
| F6                          | 200                    | 26  | 50  |
| F7                          | 300                    | 26  | 50  |

**Table 2:** Mean values of slurry characteristics

| Components                  | Value |
|-----------------------------|-------|
| pH                          | 7.16  |
| Dry matter (g/kg)           | 51.1  |
| Organic matter (% dry mass) | 72.6  |
| NH <sub>4</sub> -N (g/kg)   | 2.75  |
| N total (g/kg)              | 4.92  |
| P (g/kg)                    | 1.06  |
| K (g/kg)                    | 2.50  |
| Ca (g/kg)                   | 0.97  |
| Mg (g/kg)                   | 0.66  |
| Al (mg/kg)                  | 25.8  |
| Cu (mg/kg)                  | 53.6  |
| Zn (mg/kg)                  | 79.5  |

### 2.3.3. Measurements and sampling

All soil and plant samples were taken from the center row of the plots, in order to minimize border effects.

#### 2.3.3.1. Yields and sampling

At the end of the first growing season, six plants from each plot for a total of 18 plants per treatment were randomly chosen and harvested. The plants (without leaves) were weighed in the field using a balance scale, and dry matter content was obtained from stem samples dried in the laboratory. Yields were calculated taking into account plantation density and stem dry matter content. In fall of the second growing season, all plants situated along a 12 m row in the center of plots were harvested. The productivity based on the weight of about a hundred trees per treatment was then evaluated. In parallel, composite stem samples were taken, dried, ground and analyzed. Uptake levels of nutrients and their exportation following the willow biomass harvest were calculated by using the nutritional content of these stems.

### 2.3.3.2. Soil

A preliminary analysis of the soil at the experimental site was performed in spring of the first growing season, before application of fertilizers. Soil samples were taken at two depths (0-20 cm and 20-40 cm) in each block and homogenized to a single composite sample (n = 30) per depth. Soil texture is a clayey loam and its analysis is presented in Table 3.

**Table 3:** Soil properties at the beginning of the trial

| Components   | 0-20 cm | 20-40 cm |
|--|---------|----------|
| Sand (%)   | 46      | 43       |
| Silt (%)   | 25      | 26       |
| Clay (%)   | 28      | 31       |
| Organic matter (%)                                   | 2.60    | 2.09     |
| pH   | 6.6     | 6.4      |
| NH <sub>4</sub> -N (mg/kg) <sub>KCl</sub>            | 2.20    | 3.72     |
| NO <sub>3</sub> -N (mg/kg) <sub>KCl</sub>            | 4.90    | 2.35     |
| N total (%)  | 0.13    | 0.12     |
| P (mg/kg) <sub>M3</sub>                              | 67      | 46       |
| K (mg/kg) <sub>M3</sub>                              | 156     | 150      |
| Ca (mg/kg) <sub>M3</sub>                             | 1851    | 1747     |
| Mg (mg/kg) <sub>M3</sub>                             | 196     | 336      |
| Al (mg/kg) <sub>M3</sub>                             | 1024    | 1091     |
| Cu (mg/kg) <sub>M3</sub>                             | 2.19    | 2.01     |
| Zn (mg/kg) <sub>M3</sub>                             | 3.31    | 1.52     |
| P saturation (P <sub>M3</sub> /Al <sub>M3</sub> )(%) | 6.6     | 4.2      |

Note: KCl: extract KCl 2M; M3: extract Mehlich 3

At the end of two growing seasons (fall), composite soil samples were taken at two depths (0-20 cm and 20-40 cm) from the control plots as well as from those that received the different amounts of slurry. These samples were analyzed for mineral nitrogen content (NO<sub>3</sub>-N and NH<sub>4</sub>-N) as well as available content of P, K Ca, Mg, Al Cu and Zn.

### **2.3.3.3. Soil solution**

The impact of fertilization treatments on soil solution quality was evaluated based on water samples collected by suction lysimeters inserted at a depth of 1 m into the soil. These samples represent the water which percolates below the root system and that may affect groundwater quality as well as the surface water that flows through the agricultural drainage system. In order to limit the number of samples analyzed and the cost, lysimeters were placed in the center of nine of the 24 plots (three plots in each of three blocks). The plots chosen were controls (F0) and those corresponding to the maximal amounts of slurry (F4: 590 kg N/ha) and mineral fertilizer (F7: 300 kg N/ha). Water samples were collected during the two growing seasons when soil water levels were adequate. Samples were analyzed for  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentration as well as total dissolved P.

### **2.3.4. Chemical analyses**

Mineral nitrogen ( $\text{NO}_3\text{-N}$  and  $\text{NH}_4\text{-N}$ ) of soil and slurry was extracted using KCl 2M and amountd by colorimetry (sodium salicylate for  $\text{NH}_4\text{-N}$  and  $\text{NO}_3\text{-N}$  by cadmium reduction) using an automated analyzer (Technicon AA II). The P, K Ca, Mg, Al, Cu and Zn were obtained from soil samples using Mechlich 3 extractant and amountd by plasma emission spectrometry. Soil organic matter levels were determined by wet test following Walkley and Black (1934). Chemical elements and total N of slurry and stem biomass were determined following acid digestion of fresh material with a mixture of sulphuric and selenious acid (Isaac and Johnson 1976). Total N was amountd by colorimetry, while other chemical elements were amountd by plasma emission spectrometry. For the soil solution,  $\text{NO}_3\text{-N}$  were amountd by colorimetry with an automated analyzer (Technicon AA II), whereas total dissolved P was determined by spectrometric dosage using phosphomolybdate complex formed in the presence of ascorbic acid following ultraviolet digestion in an acidic solution.

### **2.3.5. Statistical analyses**

Analyses of variance (ANOVA) were done separately for the two types of fertilization treatments, slurry and mineral fertilizer. The following variables were analyzed: yield, stem nutritional content, soil phosphorus and nitrate levels. The soil variables were tested with repeated measures ANOVA. In all cases, the ANOVA model included the following sources of variance: block (random factor), fertilization treatment (fixed factor), as well as interaction between the two. When the effect of amount was significant, Tukey post-hoc comparisons were made.  $\text{NO}_3\text{-N}$  and P concentrations in the water samples were too low to be subjected to statistical analysis.

## **2.4. Results and Discussion**

### **2.4.1. Yield**

Statistical analysis did not reveal a significant effect of fertilization treatments on willow productivity. Nonetheless, the trends observed seem to indicate a positive effect on biomass productivity resulting from the input of nitrogen. Yields over two years for plots that received the different amounts of slurry (148 to 590 kg N/ha) are on the order of 30.3 to 32.9 t/ha, which corresponds to an increase in growth rates of 14.4 to 24.4% over control plots (Table 4). Even if the increase in yields compared to control is relatively low, the productivity achieved on plots fertilized with slurry is considerable. Also, yields measured after two growing seasons on plantations fertilized with slurry are comparable to those obtained for a three-year cycle under similar cultivation and climatic conditions (Labrecque and Teodorescu 2001).

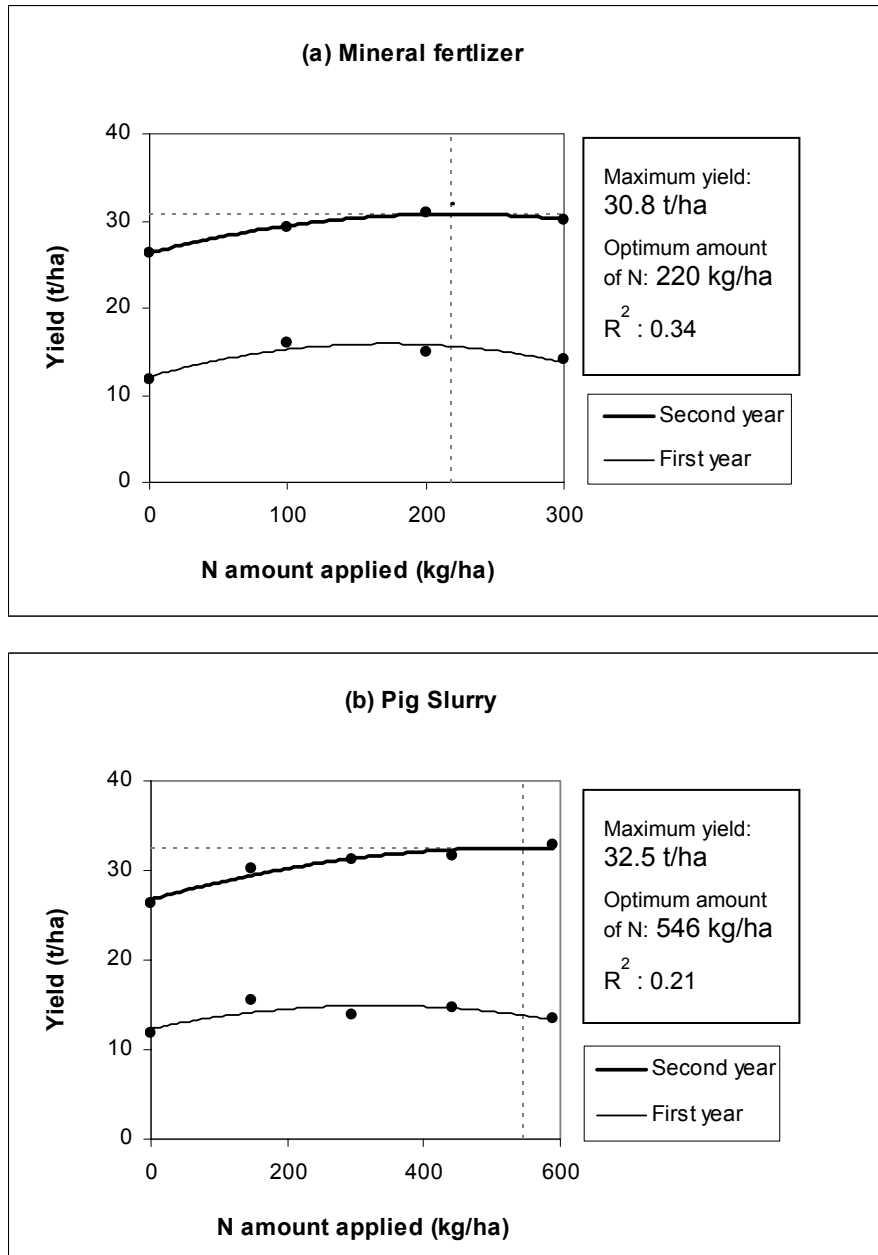
**Table 4:** Willow dry matter yield after two years for each fertilisation treatment

| Treatment                 | Dry biomass (t/ha) |
|---------------------------|--------------------|
| F0 : Control              | 26.4               |
| <i>Pig slurry</i>         |                    |
| F1 (148 kg N/ha)          | 30.3               |
| F2 (295 kg N/ha)          | 31.3               |
| F3 (443 kg N/ha)          | 31.6               |
| F4 (590 kg N/ha)          | 32.9               |
| <i>Mineral fertilizer</i> |                    |
| F5 (100 kg N/ha)          | 29.4               |
| F6 (200 kg N/ha)          | 30.9               |
| F7 (300 kg N/ha)          | 30.2               |

The yields calculated for each of the two years of the experiment were modeled as a function of the amount of N applied according to a quadratic model for the two types of fertilizer (Figure 1). We thus obtained optimal amounts of N corresponding to maximum yields based on model answers. For N applied in the form of mineral fertilizer, maximum yield (30.8 t/ha) corresponds to an optimal amount of 220 kg N/ha. A slight decrease in yield at higher amounts (300 kg N/ha) could possibly be the result of a nutritional imbalance induced by an excessive amount of available N. In the case of slurry application, maximum yield (32.5 t/ha) is achieved at about 546 kg N/ha. Yields of very high amounts of slurry are probably less affected by nutritional imbalance because of the increased amount of macro and microelements contained in the slurry. Inversely, high amounts of mineral fertilizer are more subject to nutritional imbalance when only certain elements (nitrogen in this case) are applied at a massive amount. It is also important to consider that in the case of slurry nitrogen, input is overestimated, given significant loss of  $\text{NH}_3\text{-N}$  by volatilization after spreading (Cameron *et al.* 1995; Morvan *et al.* 1997; Sommer and Hutchings 2001; Chantigny *et al.* 2007; Rochette *et al.* 2009; Rochette *et al.* 2001). Furthermore, part of the  $\text{NH}_4\text{-N}$  in slurry is microbiologically immobilized in the soil in an organic form before being mineralized and once again becoming available to the plant (Morvan *et al.* 1997; Sørensen and Amato 2002). Additionally, a portion of this  $\text{NH}_4\text{-N}$  fixes to clay particles, depending on soil texture (Chantigny *et al.* 2004). The complexity of



this process makes it difficult to predict the real fertilizing value of slurry nitrogen, as well as for making comparisons with equivalent amounts of nitrogen in mineral form.



**Figure 1:** Willow dry matter yields as a function of the N amount applied with mineral fertilizer (a) or pig slurry (b) for the first and second growing seasons

Note: Maximum yields, optimum amount of N and  $R^2$  are indicated for the second growing season only.

## 2.4.2. Nutritional uptake by willows

Analysis of the nutritional content of willow stems harvested in the fall of the second growing season was used to evaluate the quantities of nitrogen and phosphorus taken up by willows and consequently extracted from the cultivation system.

### 2.4.2.1. Phosphorus

Increasing amounts of P in the different amounts of slurry had no effect on the quantity of P taken up by willow biomass. Average uptake for all treatments was 21.4 kg P/ha.

### 2.4.2.2. Nitrogen

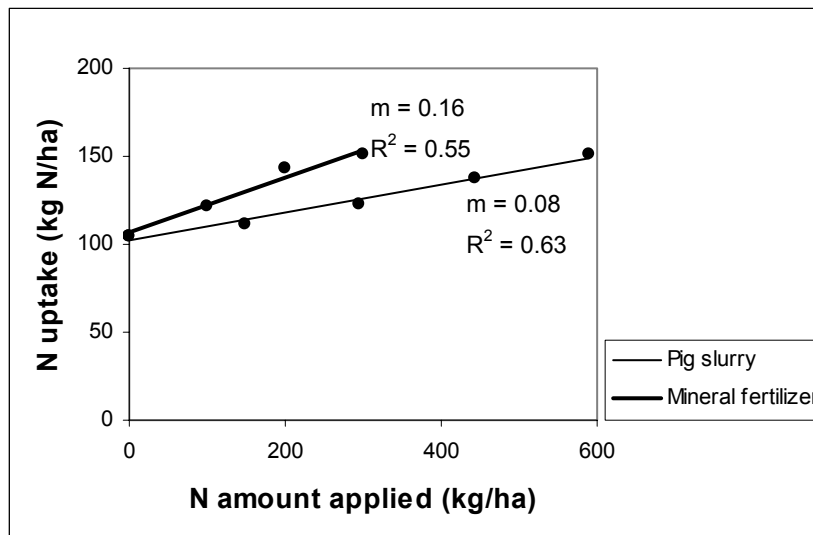
We observed a tendency of N uptake by willows to increase as a function of amount of N applied. This variation is dependent on yield, since concentration of N in stems was not significantly influenced by fertilization treatments. The soil of plots with no added nitrogen (F0) contributed to uptake and export of 105 kg N/ha by willow stems at harvest. The largest amounts of N, 300 kg N/ha in the form of mineral fertilizer or 590 kg N/ha in the form of slurry, allowed the export of approximately an additional 50 kg N/ha.

N uptake in stems was modeled as a function of the N amount added, according to a linear equation for the two types of fertilizer (Figure 2). Each slope expresses the quantity of N uptake by the stems per unit of N added in the form of fertilizer on top of what the soil was able to supply to the plant in the control plot. This quantity corresponds to the average nitrogen apparent utilization coefficient (AUC).

$$AUC = \frac{N_{uptake_F} - N_{uptake_C}}{N}$$

where F refers to the plot fertilized with a amount N and C refers to the control plot. Average AUC are 0.16 for mineral fertilizer and 0.08 for pig slurry. These low AUC demonstrate that the additional amount of N resulted in little increase in N uptake by willows. This can be explained by the fact that the experimental site was previously used for cultivation of corn and soy, was fertilized regularly and soil N was relatively available.

Finally, the proportion of slurry AUC to that of mineral fertilizer expresses the capacity of slurry to provide nitrogen to willows in comparison to mineral fertilizer. The 0.50 value of this AUC ratio demonstrates the lower efficiency of slurry nitrogen, due to loss of  $\text{NH}_4\text{-N}$  during spreading of the slurry and the processes required to make the nitrogen available to the willows, i.e. nitrification of the  $\text{NH}_4\text{-N}$  and mineralization of the organic fraction of the slurry nitrogen. Inversely, the high availability of mineral fertilizer nitrogen would have favoured N uptake by willows.



**Figure 2:** N uptake in willow stems as a function of N amount applied with mineral fertilizer or pig slurry

### 2.4.3. Changes to the soil properties following slurry fertilization

Changes to the soil properties were analysed by comparing N, P and heavy metal concentrations at the end of each growing season. The significance levels obtained following the repeated measures ANOVA analysis are reported in Table 5. It shows how the diverse soil properties varied between levels of two factors (fertilization and growing seasons) with an interaction between them.

**Table 5:** ANOVA *p* values for soil composition

| Components<br>(mg/kg)             | Source of variance |         |                 |        |                 |                 |                      |                 |
|-----------------------------------|--------------------|---------|-----------------|--------|-----------------|-----------------|----------------------|-----------------|
|                                   | Fertilization      |         |                 |        | Time            |                 | Fertilization * Time |                 |
|                                   | First year         |         | Second year     |        | 0-20 cm         | 20-40 cm        | 0-20 cm              | 20-40 cm        |
| 0-20 cm                           | 20-40 cm           | 0-20 cm | 20-40 cm        |        |                 |                 |                      |                 |
| NH <sub>4</sub> -N <sub>KCl</sub> | 0.5224             | 0.8373  | 0.654           | 0.7392 | 0.7298          | 0.3019          | 0.1355               | 0.6492          |
| NO <sub>3</sub> -N <sub>KCl</sub> | 0.0802             | 0.1445  | 0.2483          | 0.138  | <b>0.0229 *</b> | 0.649           | 0.1651               | 0.641           |
| P <sub>M3</sub>                   | 0.5406             | 0.4878  | 0.2856          | 0.3921 | 0.0721          | <b>0.0119 *</b> | 0.696                | 0.4568          |
| K <sub>M3</sub>                   | 0.1165             | 0.9312  | 0.401           | 0.4437 | 0.7773          | 1.000           | 0.8126               | 0.6487          |
| Ca <sub>M3</sub>                  | 0.4398             | 0.2665  | 0.7245          | 0.8576 | 0.4054          | 0.0787          | 0.2474               | <b>0.0212 *</b> |
| Mg <sub>M3</sub>                  | 0.945              | 0.4234  | 0.9774          | 0.9659 | 0.0692          | <b>0.0019 *</b> | 0.5337               | 0.0563          |
| Al <sub>M3</sub>                  | 0.8726             | 0.9621  | 0.7753          | 0.8137 | <b>0.034 *</b>  | 0.1837          | 0.2952               | 0.803           |
| Cu <sub>M3</sub>                  | 0.0536             | 0.7472  | 0.3888          | 0.2808 | <b>0.0013 *</b> | 0.3691          | 0.8693               | 0.4367          |
| Zn <sub>M3</sub>                  | 0.572              | 0.3242  | <b>0.0279 *</b> | 0.8107 | <b>0.0003 *</b> | <b>0.0003 *</b> | 0.2888               | 0.2682          |

Note: \* *p* value  $\leq$  0.05

KCl: extract KCl 2M; M3: extract Mehlich 3

#### 2.4.3.1. Nitrates

Although not statistically demonstrated (Table 5), at the end of the first growing season we observed a trend toward an increase in residual nitrate levels in the soil, as a function of increasing amounts of slurry at both depths (Table 6). The soil of plots fertilized with increasing amounts of nitrogen contained in slurry presented NO<sub>3</sub>-N levels two to eight times higher than soils in control plots at a depth of 0-20cm and two to six times higher at a depth of 20-40 cm. After the second growing season, the trend toward a positive effect of added nitrogen on soil NO<sub>3</sub>-N levels can still be observed, although it is not statistically

significant. This trend also seems less pronounced compared to the previous year, NO<sub>3</sub>-N levels of slurry-fertilized plots being at most double than for those that received no nitrogen input. Further, NO<sub>3</sub>-N levels in the superficial soil layer diminished during the second year of growth ( $p = 0.0229$ ) and became generally lower than those of the deeper soil layer. This could be explained by an increased consumption of nitrogen in the 0-20 cm layer, since willow roots are concentrated near the soil surface. Studies of the root distribution of rapid-growth willows have shown that 40-50% of the biomass of fine roots is found in the first 10 cm and that this root biomass decreases rapidly in deeper layers of the soil (Heinsoo *et al.* 2009; Rytter and Hansson 1996).

**Table 6:** Residual nitrate levels at the end of the first and second growing seasons in the soil of plots that had received increasing amounts of N in the form of slurry

| Treatment | N applied (kg/ha) | First year                 |          | Second year |          |
|-----------|-------------------|----------------------------|----------|-------------|----------|
|           |                   | 0-20 cm                    | 20-40 cm | 0-20 cm     | 20-40 cm |
|           |                   | NO <sub>3</sub> -N (mg/kg) |          |             |          |
| Control   | 0                 | 1.04                       | 1.22     | 1.21        | 2.10     |
| F1        | 148               | 2.24                       | 2.67     | 1.74        | 2.63     |
| F2        | 295               | 3.34                       | 4.83     | 1.96        | 3.29     |
| F3        | 443               | 4.30                       | 3.50     | 2.35        | 4.13     |
| F4        | 590               | 8.03                       | 5.73     | 2.91        | 4.34     |

#### 2.4.3.2. Phosphorus

The different slurry fertilization treatments had no significant effect on available P content measured in the soil, in either the fall of the first or the second year of growth, at either depth (Table 5). In the fall of the first growing season, average available P concentration for all plots fertilized with slurry was 69 mg/kg in the 0-20 cm layer and 47 mg/kg in the 20-40 cm layer, while a year later in the fall of the second growing season they were 62 mg/kg in the 0-20 cm layer and 56 mg/kg in the 20-40 cm layer. Statistical analyses show that available P concentration in the 0-20 cm layer remained unchanged over the two years. On the other hand, concentration in the 20-40 cm layer increased significantly during the second growing season ( $p = 0.0119$ ). This phenomenon could be explained by the

saturation of P exchange sites in the surface layer, which may have led to the migration of P to the deeper layer (Pellerin *et al.* 2006). In fact, P saturation percentages ( $P_{M3}/Al_{M3}$ ) corresponding to average levels in the 0-20 cm layer are at 7% in the fall of the first season and 6.7% in the fall of the second season, which is only slightly lower than the critical environmental value of 7.6% in heavy soil established by Pellerin *et al.* (2006). In the deeper layer, P saturation percentages corresponding to average levels are at 4.7% in the fall of the first season and 5.7% in the fall of the second season.

Application of different amounts of slurry in the willow plantation did not increase saturation levels beyond the critical environmental value. However, repeated spreading of slurry at amounts such as those applied during our experiment (32 to 127 kg P/ha) could lead to significant increases in soil P application of this element surpass aerial biomass uptake and exportation (21.4 kg P/ha after two years of growth), especially in the case of agricultural soils already rich in P, as in this experiment (P saturation percentage of 6.6% in the 0-20 cm layer, Table 3). Such accumulations of P in the soil could result in risks of P runoff or leaching into surrounding water bodies.

#### **2.4.3.3. Heavy metals**

Although it was not statistically demonstrated (Table 5), we observed, at the end of the first growing season, a trend toward increased levels of labile Cu and Zn in the superficial soil layer (0-20 cm) as a function of increasing slurry amounts (Table 7). The soil of plots fertilized with increasing amounts of slurry presented  $Cu_{M3}$  levels from 10 to 31 % higher than those in control plots and  $Zn_{M3}$  levels from 24 to 64% higher than controls. In the 20-40 cm layer, no trend was observed with regard to the effect of slurry application on  $Cu_{M3}$  and  $Zn_{M3}$  levels (data not presented). These levels are generally lower than those in the superficial layer, and the averages for plots fertilized with different amounts of slurry were 1.79 mg/kg for  $Cu_{M3}$  and 1.49 mg/kg for  $Zn_{M3}$ . Other studies have also shown that accumulations of Cu and Zn occurred in the superficial soil layer as a result of application of pig manure rich in these metals (Wang *et al.* 2004). These accumulations tend to be

situated in the top centimetres of soil, since Cu and Zn bond strongly to organic matter (Bolan *et al.* 2003).

At the end of the second growing season, the trend toward a positive effect of slurry input on levels of  $\text{Cu}_{\text{M3}}$  and  $\text{Zn}_{\text{M3}}$  in the 0-20 cm layer remained observable and significant in the case of  $\text{Zn}_{\text{M3}}$  ( $p = 0.0279$ ). The soil of plots fertilized with slurry presents levels of  $\text{Cu}_{\text{M3}}$  from 16 to 31 % higher than those of control plots, and levels of  $\text{Zn}_{\text{M3}}$  from 18 to 32% higher than control plots. In the 20-40 cm layer, no trend was observed in terms of the effect of slurry input on levels of  $\text{Cu}_{\text{M3}}$  and  $\text{Zn}_{\text{M3}}$ . These levels are generally lower than those of the superficial layer, and averages for the plots fertilized with slurry are 1.78 mg/kg for  $\text{Cu}_{\text{M3}}$  and 1.22 mg/kg for  $\text{Zn}_{\text{M3}}$ .

Levels of  $\text{Cu}_{\text{M3}}$  and  $\text{Zn}_{\text{M3}}$  in the superficial layer diminished significantly during the second year of growth ( $p = 0.0013$  and  $p = 0.0003$  respectively). Such a significant decrease was also noted in  $\text{Zn}_{\text{M3}}$  in the 20-40cm layer. These lower levels could be due to uptake of Cu and Zn by willows or alternatively to adsorption of these metals on soil particles, which would result in a decrease of their labile fraction. Several studies have shown that willows can absorb Cu as well as significant quantities of Zn when growing in soil contaminated by these metals (Bissonnette *et al.* 2010; Labrecque *et al.* 1995; Pulford *et al.* 2002; Rosselli *et al.* 2003).

**Table 7:** Levels of  $\text{Cu}_{\text{M3}}$  and  $\text{Zn}_{\text{M3}}$  at the end of the first and second growing seasons in the superficial soil layer (0-20 cm) of plots that had received increasing amounts of Cu and Zn in the form of slurry

| Treatment | Cu applied (kg/ha) | Zn applied (kg/ha) | First year                      |                                 | Second year                     |                                 |
|-----------|--------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
|           |                    |                    | $\text{Cu}_{\text{M3}}$ (mg/kg) | $\text{Zn}_{\text{M3}}$ (mg/kg) | $\text{Cu}_{\text{M3}}$ (mg/kg) | $\text{Zn}_{\text{M3}}$ (mg/kg) |
| Control   | 0                  | 0                  | 1.84                            | 1.26                            | 1.54                            | 1.07 a                          |
| F1        | 1.6                | 2.4                | 2.03                            | 1.56                            | 1.79                            | 1.26 ab                         |
| F2        | 3.2                | 4.8                | 1.98                            | 1.69                            | 1.71                            | 1.25 ab                         |
| F3        | 4.8                | 7.2                | 2.45                            | 2.09                            | 2.02                            | 1.42 b                          |
| F4        | 6.4                | 9.5                | 2.41                            | 2.07                            | 2.02                            | 1.47 b                          |

Note: Means within column followed by different letters are significantly different ( $p < 0,05$ )

#### **2.4.4. Analysis of the soil solution**

Analysis of water samples collected during the first growing season resulted in erratic values for both nitrate concentrations and dissolved phosphorus, perhaps due to disturbance of the soil and paths created when lysimeters were installed. From the end of August, no water samples could be collected because water tension in the soil had become too high to allow sampling. The soil dried out to this extent due to lack of precipitation, two times less than recorded averages for the months of August and September (Environnement Canada 2010), as well as due to increased water consumption by the willows. The same drought phenomenon reoccurred in August and September of the following year, and made water sampling impossible. We present here only the most coherent data from the second growing season.

##### **2.4.4.1. Nitrates**

In spring of the second year,  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentrations in the lysimeter water of plots fertilized with slurry (590 kg N/ha) or mineral fertilizer (300 kg N/ha) were relatively equivalent, with averages for April-May of 17.5 and 18.1 mg/L respectively, whereas those of control plots with no nitrogen input were almost at zero (Table 8). The latter remained at this level until the end of the sampling period. The concentrations for April and May on plots fertilized with nitrogen are above the quality criterion of 10 mg/L defined for drinking water (Ministère du Développement durable de l'Environnement et des Parcs 2009). On the other hand, these concentrations do not constitute a direct measure of the quality of surface or ground water, but they demonstrate the potential risk for nitrates to leach deep into soil and eventually to water bodies or ground water. During June and July,  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentrations in plots fertilized with greater amounts of slurry and mineral fertilizer gradually diminished, while remaining equivalent, and stabilized at about 6 mg/L as of mid-July.



Spring concentrations seem to indicate that the larger amounts of nitrogen supplied to the willow plantation, whether in mineral or slurry form, include a certain risk factor with regard to nitrate leaching. However, it is interesting to note that these concentrations stabilized under the quality criterion of 10 mg/L as of the beginning of summer. We can conclude that lower amounts of slurry such as those applied in our experiment (148, 295 and 443 kg N/ha) would have induced nitrate concentrations with less risk of leaching while ensuring considerable productivity (30.3 to 31.6 t/ha over two years). Further, it should be noted that this experiment was conducted on a young plantation (first rotation cycle) and that the retention capacity of the willow root system would increase progressively as these develop, thus significantly lowering the risk of nitrate leaching.

**Table 8:** Nitrate concentration in water in lysimeters during the second growing season

|                    |                   | Dates                    |          |           |            |           |            |            |
|--------------------|-------------------|--------------------------|----------|-----------|------------|-----------|------------|------------|
|                    |                   | 19<br>April              | 1<br>May | 14<br>May | 12<br>June | 2<br>July | 15<br>July | 29<br>July |
| Treatment          | N applied (kg/ha) | N-NO <sub>3</sub> (mg/L) |          |           |            |           |            |            |
| Control            | 0                 | 0.87                     | 1.30     | 0.51      | 0.24       | 0.34      | 0.16       | 0.13       |
| Pig slurry         | 590               | 17.5                     | 19.0     | 16.1      | 9.2        | 7.5       | 6.1        | 6.1        |
| Mineral fertilizer | 300               | 19.0                     | 17.5     | 17.8      | 9.5        | 7.4       | 6.8        | 5.5        |

#### 2.4.4.2. Phosphorus

Throughout the sampling period for the second growing season, concentrations of P dissolved in the water of lysimeters on plots that received additional phosphorus as slurry (127 kg P/ha) were relatively similar to those plots that received a amount five times weaker in mineral form (26 kg P/ha) (Table 9). Thus, the addition of a large amount of slurry such as we applied in the willow plantation does not seem to have had a determining effect on the quantity of P in the soil solution. Given that the soil of our experimental site was rich in P to begin with, we can assume that the concentrations observed were the result of the site's agricultural history rather than limited addition of slurry. On the whole, these concentrations remained stable throughout the sampling period and varied around and slightly above the quality criterion for surface water in Quebec of 30 µg P/L, which aims to

limit excessive algae and aquatic plant growth in waterways (Ministère du Développement durable de l'Environnement et des Parcs 2009).

**Table 9:** Concentration of total phosphorus dissolved in water of lysimeters during the second growing season

|                    |                   | Dates                 |          |           |            |           |            |            |
|--------------------|-------------------|-----------------------|----------|-----------|------------|-----------|------------|------------|
|                    |                   | 19<br>April           | 1<br>May | 14<br>May | 12<br>June | 2<br>July | 15<br>July | 29<br>July |
| Treatment          | P applied (kg/ha) | P ( $\mu\text{g/L}$ ) |          |           |            |           |            |            |
| Control            | 26                | 27                    | 23       | 27        | 26         | 36        | 44         | 46         |
| Pig slurry         | 127               | 29                    | 34       | 34        | 35         | 40        | 54         | 50         |
| Mineral fertilizer | 26                | 34                    | 27       | 42        | 24         | 47        | 73         | 64         |

## 2.5. Conclusion

This study has shown that slurry constitutes a good fertilizer for willow plantations under SRIC. In fact, yields on the order of 30.3 to 32.9 t/ha obtained over two years make it possible to predict that typical three-year rotation cycles could be reduced to two years, under good production conditions (fertile soil and good climatic conditions). This would imply a significant reduction in production costs of willow-based biomass as well as recycling of a greater quantity of slurry. The results showed that nitrogen in slurry is two times less efficient than that of mineral fertilizer, most likely due to ammonia volatilization at time of spreading and afterwards. The risks of detectable nitrate leaching with amounts of slurry as high as that tested in our experiment (590 kg/ha) could be reduced by using lower amounts of slurry, while still ensuring considerable productivity. Immediate incorporation of pig slurry would also increase slurry fertilizer N value and favour a greater N/P fertilizer value. It would be important to conduct longer term studies on phosphorus, copper and zinc accumulation in the soil following repeated slurry applications, especially in the case of agricultural soil already rich in phosphorus. An additional interesting avenue for future study would be the application of slurry on a willow plantation with nitrogen-

poor and phosphorus-fixing soil, which would reduce the risk of accumulation and nutrient leaching into the environment as well as favour the development of marginal lands.

## 2.6. Acknowledgments

This study was funded by the Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec (CDAC), the Quebec Pork Producers Federation (FPPQ) and the Fonds de recherche sur la nature et les technologies (FQRNT). This project would not have been possible without the support and technical assistance of: la Coopérative de gestion des engrais organiques de Lanaudière (COGENOR Lanaudière), Agro-Énergie inc., l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), and l'Institut de recherche en biologie végétale (IRBV). We would also like to thank Traian Ion Teodorescu for his assistance in setting up the experimental design and Stéphane Daigle for his help in the statistical analyses. Finally, we thank Werther Guidi and Karen Grislis for their critical review of the manuscript.

## 2.7. References

- Abrahamson, L P, D J Robison, T A Volk, E H White, E F Neuhauser, W H Benjamin, and J M Peterson. 1998. Sustainability and environmental issues associated with willow bioenergy development in New York (U.S.A.). *SO - Biomass and Bioenergy*. 15(1). 1998. 17-22.
- Adegbidi, H. G., and R. D. Briggs. 2003. Nitrogen mineralization of sewage sludge and composted poultry manure applied to willow in a greenhouse experiment. *Biomass and Bioenergy* 25 (6):665-673.
- Adegbidi, H. G., T. A. Volk, E. H. White, L. P. Abrahamson, R. D. Briggs, and D. H. Bickelhaupt. 2001. Biomass and nutrient removal by willow clones in experimental bioenergy plantations in New York State. *Biomass and Bioenergy* 20 (6):399-411.

- Aronsson, P., and K. Perttu. 2001. Willow vegetation filters for wastewater treatment and soil remediation combined with biomass production. *Forestry Chronicle* 77 (2):293-299.
- Berenguer, P., S. Cela, F. Santiveri, J. Boixadera, and J. Lloveras. 2008. Copper and zinc soil accumulation and plant concentration in irrigated maize fertilized with liquid swine manure. *Agronomy Journal* 100 (4):1056-1061.
- Bissonnette, L., M. St-Arnaud, and M. Labrecque. 2010. Phytoextraction of heavy metals by two Salicaceae clones in symbiosis with arbuscular mycorrhizal fungi during the second year of a field trial. *Plant and Soil* 332 (1):55-67.
- Bolan, N. S., M. A. Khan, J. Donaldson, D. C. Adriano, and C. Matthew. 2003. Distribution and bioavailability of copper in farm effluent. *Science of the Total Environment* 309 (1/3):225-236.
- Cameron, C. K, Rate, W. A, Carey, L. P, Smith, and P. N. 1995. - Fate of nitrogen in pig effluent applied to a shallow stony pasture soil. *New Zealand Journal of Agricultural Research*. 1995. 38: 4, 533 542. 39 ref.
- Carpenter, S. R., N. F. Caraco, D. L. Correll, R. W. Howarth, A. N. Sharpley, and V. H. Smith. 1998. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications* 8 (3):559-568.
- Chantigny, M. H., D. A. Angers, P. Rochette, G. Belanger, D. Masse, and D. Côté. 2007. Gaseous nitrogen emissions and forage nitrogen uptake on soils fertilized with raw and treated swine manure. *Journal of Environmental Quality* 36 (6):1864-1872.
- Chantigny, M. H., P. Rochette, D. A. Angers, D. Masse, and D. Côté. 2004. Ammonia volatilization and selected soil characteristics following application of anaerobically digested pig slurry. *Soil Science Society of America Journal* 68 (1):306-312.

- Dauden, A., D. Quilez, and M. V. Vera. 2004. Pig slurry application and irrigation effects on nitrate leaching in Mediterranean soil lysimeters. *Journal of Environmental Quality* 33 (6):2290-2295.
- Environment Canada. *National Climate Data and Information Archive*. 2010. Available from [http://climate.weatheroffice.gc.ca/climateData/monthlydata\\_f.html](http://climate.weatheroffice.gc.ca/climateData/monthlydata_f.html).
- Ericsson, T. 1994. Nutrient cycling in energy forest plantations. *Biomass and Bioenergy* 6 (1-2):115-121.
- Gasser, M. O., M. R. Laverdière, R. Lagace, and J. Caron. 2002. Impact of potato-cereal rotations and slurry applications on nitrate leaching and nitrogen balance in sandy soils. *Canadian Journal of Soil Science* 82 (4):469-479.
- Hansson, P. A., S. E. Svensson, F. Hallefalt, and H. Diedrichs. 1999. Nutrient and cost optimization of fertilizing strategies for *Salix* including use of organic waste products. *Biomass and Bioenergy* 17 (5):377-387.
- Hasselgren, Kenth. 1998. Use of municipal waste products in energy forestry: highlights from 15 years of experience. *Biomass and Bioenergy* 15 (1):71-74.
- Heinsoo, K., E. Merilo, M. Petrovits, and A. Koppel. 2009. Fine root biomass and production in a *Salix viminalis* and *Salix dasyclados* plantation. *Estonian Journal of Ecology* 58 (1):27-37.
- Isaac, R. A., and W. C. Johnson. 1976. Determination of total nitrogen in plant tissue, using a block digester. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists* 59 (1):98-100.
- Kuzovkina, Y. A., and T. A. Volk. 2009. The characterization of willow (*Salix* L.) varieties for use in ecological engineering applications: co-ordination of structure, function and autecology. *Ecological Engineering* 35 (8):1178-1189.

- Labrecque, M., and T. I. Teodorescu. 2001. Influence of plantation site and wastewater sludge fertilization on the performance and foliar nutrient status of two willow species grown under SRIC in southern Quebec (Canada). *Forest Ecology & Management* 150 (3):223-239.
- Labrecque, M., and T. I. Teodorescu. 2003. High biomass yield achieved by *Salix* clones in SRIC following two 3-year coppice rotations on abandoned farmland in southern Quebec, Canada. *Biomass and Bioenergy* 25 (2):135-146.
- Labrecque, M., T. I. Teodorescu, and S. Daigle. 1995. Effect of wastewater sludge on growth and heavy metal bioaccumulation of two *salix* species. *Plant and Soil* 171 (2):303-316.
- Labrecque, M., T. I. Teodorescu, and S. Daigle. 1998. Early performance and nutrition of two willow species in short-rotation intensive culture fertilized with wastewater sludge and impact on the soil characteristics. *Canadian Journal of Forest Research* 28 (11):1621-1635.
- Lteif, A., J. K. Whalen, R. L. Bradley, and C. Camiré. 2007. Mixtures of papermill biosolids and pig slurry improve soil quality and growth of hybrid poplar. *Soil Use and Management* 23 (4):393-403.
- Makeschin, F. 1994. Effects of energy forestry on soils. *Biomass and Bioenergy* 6:1-2.
- Mantovi, P., L. Fumagalli, G. P. Beretta, and M. Guermandi. 2006. Nitrate leaching through the unsaturated zone following pig slurry applications. *Journal of Hydrology* 316 (1-4):195-212.
- Ministère du Développement durable de l'Environnement et des Parcs. 2009. Critères de qualité de l'eau de surface. Gouvernement du Québec.

- Morvan, T., P. Leterme, G. G. Arsene, and B. Mary. 1997. Nitrogen transformations after the spreading of pig slurry on bare soil and ryegrass using <sup>15</sup>N-labelled ammonium. *European Journal of Agronomy* 7 (1-3):181-188.
- Nicholson, F. A., S. R. Smith, B. J. Alloway, C. Carlton-Smith, and B. J. Chambers. 2003. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales. *Science of the Total Environment* 311 (1/3):205-219.
- Pellerin, A., L. E. Parent, J. Fortin, C. Tremblay, L. Khiari, and M. Giroux. 2006. Environmental Mehlich-III soil phosphorus saturation indices for Quebec acid to near neutral mineral soils varying in texture and genesis. *Canadian Journal of Soil Science* 86 (4):711-723.
- Penuelas, J., J. Sardans, J. M. Alcaniz, and J. M. Poch. 2009. Increased eutrophication and nutrient imbalances in the agricultural soil of NE Catalonia, Spain. *Journal of Environmental Biology* 30 (5 - Supplement):841-846.
- Perttu, K. L., and P. J. Kowalik. 1997. Salix vegetation filters for purification of waters and soils. *Biomass and Bioenergy* 12 (1):9-19.
- Pulford, I. D., D. Riddell-Black, and C. Stewart. 2002. Heavy metal uptake by willow clones from sewage sludge-treated soil: the potential for phytoremediation. *International Journal of Phytoremediation* 4 (1):59-72.
- Redding, M. R. 2001. Pig effluent-P application can increase the risk of P transport: two case studies. *Australian Journal of Soil Research* 39 (1):161-174.
- Rochette, P., D. A. Angers, M. H. Chantigny, J. D. MacDonald, M. O. Gasser, and N. Bertrand. 2009. Reducing ammonia volatilization in a no-till soil by incorporating urea and pig slurry in shallow bands. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 84 (1):71-80.

- Rochette, P., M. H. Chantigny, D. A. Angers, N. Bertrand, and D. Côté. 2001. Ammonia volatilization and soil nitrogen dynamics following fall application of pig slurry on canola crop residues. *Canadian Journal of Soil Science* 81 (4):515-523.
- Rosenqvist, H., P. Aronsson, K. Hasselgren, and K. Perttu. 1997. Economics of using municipal wastewater irrigation of willow coppice crops. *Biomass and Bioenergy* 12 (1):1-8.
- Rosselli, W., C. Keller, and K. Boschi. 2003. Phytoextraction capacity of trees growing on a metal contaminated soil. *Plant and Soil* 256:265-272.
- Rytter, R. M., and A. C. Hansson. 1996. Seasonal amount, growth and depth distribution of fine roots in an irrigated and fertilized *Salix viminalis* L. plantation. *Biomass and Bioenergy* 11 (2/3):129-137.
- Sommer, S. G., and N. J. Hutchings. 2001. Ammonia emission from field applied manure and its reduction--invited paper. *European Journal of Agronomy* 15 (1):1-15.
- Sørensen, Peter, and Maurice Amato. 2002. Remineralisation and residual effects of N after application of pig slurry to soil. *European Journal of Agronomy* 16 (2):81-95.
- Temmerman, L. de, L. Vanongeval, W. Boon, M. Hoenig, and M. Geypens. 2003. Heavy metal content of arable soils in Northern Belgium. *Water, Air, and Soil Pollution* 148 (1/4):61-76.
- Walkley, A., and C. A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposal modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37:29-38.
- Wang, H. L., G. N. Magesan, and N. S. Bolan. 2004. An overview of the environmental effects of land application of farm effluents. (Special Issue: Land application of farm wastes). *New Zealand Journal of Agricultural Research* 47 (4):389-403.



## Chapitre 3 : Conclusion

---

Ce travail avait pour but d'analyser l'effet d'une fertilisation en lisier de porc sur la productivité d'une plantation de saule à croissance rapide tout en évaluant les risques d'impact négatif sur l'environnement. L'expérimentation a été réalisée dans une plantation de saules (*S. miyabeana*) établie selon un modèle de culture intensive sur courtes rotations (CICR). En plus des traitements de fertilisation en lisier, des traitements de fertilisation minérale ont aussi été appliqués pour fin de comparaison. La réponse des plantes au niveau de leur rendement et de leur prélèvement, l'évolution des teneurs nutritionnelles du sol ainsi que les concentrations en nitrates et en phosphore de la solution de sol ont été suivies durant deux années de croissance.

Les résultats de l'étude ont montré que le lisier est un bon engrais pour une plantation de saules. En effet, les rendements sur deux ans des parcelles fertilisées avec les quantités croissantes de lisier, de l'ordre de 30,3 à 32,9 t/ha, sont considérables, surtout si l'on prend en compte qu'il s'agit du premier cycle de rotation de la plantation. Une telle productivité permet d'envisager que les cycles de rotations normalement de trois ans pourraient être réduits à deux ans, dans des bonnes conditions de production (sol fertile et bonnes conditions climatiques), ce qui impliquerait une réduction importante des coûts de production de la biomasse à partir de saules ainsi que la valorisation d'une plus grande quantité de lisier.

L'évaluation des taux de prélèvements en azote par les saules a permis de mieux connaître les capacités des fertilisants à fournir de l'azote aux plants. Les faibles coefficients apparents d'utilisation moyens de l'azote (CAU) ainsi que les faibles taux d'accroissement de rendement par rapport au témoin sans apport azoté témoignent de la grande disponibilité en azote du sol. Ceci s'explique par le fait que le site expérimental a été auparavant exploité pour la culture du maïs et du soya et était régulièrement fertilisé. De

plus, le rapport des CAU moyens du lisier sur celui de l'engrais minéral montre que l'azote du lisier est deux fois moins efficace que celui des engrais minéraux. Cette efficacité moindre est possiblement due aux pertes d'azote ammoniacal par volatilisation engendrées lors de l'épandage du lisier. L'incorporation immédiate du lisier dans le sol augmenterait sa valeur fertilisante en azote et favoriserait par le fait même un meilleur ratio N/P.

Par l'analyse de la composition chimique du sol à la fin de chacune des saisons de croissance, nous avons pu évaluer l'effet de l'application du lisier sur les teneurs en azote et phosphore du sol ainsi que l'évolution de ces teneurs pendant ces deux années. Nous avons observé une tendance à l'augmentation des teneurs en nitrates résiduelles du sol en fonction des quantités croissantes de lisier. Cette tendance était moins prononcée lors de la deuxième saison de croissance et les teneurs en nitrates de la couche superficielle (0-20cm) ont significativement diminué jusqu'à des niveaux plus faibles que dans la couche plus profonde (20-40cm). Cette diminution pourrait être causée par la consommation accrue en azote des saules qui concentre leur racine près de la surface du sol. Pour ce qui est des teneurs en phosphore du sol, l'application des lisiers n'a pas eu d'effet sur celles-ci. Les pourcentages de saturation en phosphore ( $P_{M3}/Al_{M3}$ ) sont demeurés inférieurs à la valeur environnementale critique de 7,6%. Cependant, l'application répétée de lisier pourrait mener à des augmentations des teneurs en phosphore dans le sol surtout dans le cas d'une terre agricole déjà riche en phosphore tel que celle dans lequel s'est réalisée cette expérience. Des telles accumulations de phosphore dans le sol pourraient entraîner des risques de pertes dans l'environnement.

L'examen de la composition chimique du sol met aussi en évidence des augmentations des teneurs en cuivre et en zinc en fonction des quantités de lisiers appliquées. Cet effet n'est cependant pas perceptible dans la couche inférieure du sol où les teneurs en ces métaux sont d'ailleurs plus faibles que dans la couche supérieure. Ces accumulations se situeraient dans les premiers centimètres du sol car le cuivre et le zinc se lient fortement à la matière organique. Nous avons observé une baisse des teneurs en ces

métaux au cours des deux années qui pourrait être due au prélèvement par les saules ou encore à l'adsorption de ces métaux sur les particules du sol qui se traduirait par une diminution de leur fraction labile.

L'analyse de la solution du sol s'est limitée à la deuxième saison de croissance étant donné les épisodes de sécheresse et les valeurs de concentration erratiques obtenues lors de la première année et. Au printemps de la deuxième année, les quantités accrues d'azote apportées dans la plantation de saules, tant sous forme minérale (300 kg N /ha) que de lisier (590 kg N/ha), ont induit des concentrations en nitrates deux fois supérieures au critère de qualité de 10 mg/L défini pour l'eau potable, ce qui indique un certain facteur de risque de lessivage des nitrates. Nous n'avons pu étendre l'analyse de la solution du sol aux autres quantités de lisiers appliquées lors de nos essais (148, 295 et 443 kg N/ha), mais nous pouvons croire que de ces quantités plus faibles auraient induit des concentrations en nitrate comportant moins de risque de lessivage tout en assurant une productivité considérable (30,3 à 31,6 t/ha sur deux ans). Pour ce qui des concentrations de phosphore dans la solution du sol, l'apport de la quantité accrue de lisier ne semble pas avoir eu d'effet déterminant sur celles-ci car elles étaient semblables tant pour l'apport sous forme de lisier (127 kg P/ha) que pour une quantité cinq fois plus faible sous forme minérale (26 kg P/ha). Dans l'ensemble, ces concentrations sont restées stables tout au long de la période d'échantillonnage et variaient autour et un peu au dessus du critère de qualité de l'eau de surface au Québec de 30 µg P/L. Il est cependant à noter que cette expérimentation a été réalisée dans une jeune plantation (premier cycle rotation). Il aurait sans doute été préférable que l'expérimentation eu lieu dans une plantation plus mature. Les capacités de rétention du système racinaire plus développés des saules seraient plus grandes, diminuant ainsi de beaucoup le risque de lessivage.

Les résultats de cette étude ne peuvent être extrapolés à plusieurs applications de lisiers. Il serait important de procéder à des études à plus long terme portant sur l'accumulation dans le sol du phosphore, ainsi que du cuivre et du zinc, lors d'application

répétées de lisier, surtout dans le cas d'un sol agricole déjà riche en phosphore. En outre, l'application des lisiers dans une plantation de saules implantée sur un sol pauvre en azote et fixateur de phosphore, réduisant ainsi les risques d'accumulation et de pertes de nutriments dans l'environnement en plus de permettre la valorisation de terres marginales, serait une avenue intéressante pour de futures travaux.

## Références bibliographiques

---

- Abrahamson, L P, D J Robison, T A Volk, E H White, E F Neuhauser, W H Benjamin, et J M Peterson. 1998. Sustainability and environmental issues associated with willow bioenergy development in New York (U.S.A.). *SO - Biomass and Bioenergy*. 15(1). 1998. 17-22.
- Adegbidi, H. G., R. D. Briggs, T. A. Volk, E. H. White, et L. P. Abrahamson. 2003. Effect of organic amendments and slow-release nitrogen fertilizer on willow biomass production and soil chemical characteristics. *Biomass and Bioenergy* 25 (4):389-398.
- Adegbidi, H. G., T. A. Volk, E. H. White, L. P. Abrahamson, R. D. Briggs, et D. H. Bickelhaupt. 2001. Biomass and nutrient removal by willow clones in experimental bioenergy plantations in New York State. *Biomass and Bioenergy* 20 (6):399-411.
- Aronsson, P., et K. Perttu. 2001. Willow vegetation filters for wastewater treatment and soil remediation combined with biomass production. *Forestry Chronicle* 77 (2):293-299.
- Berenguer, P., S. Cela, F. Santiveri, J. Boixadera, et J. Lloveras. 2008. Copper and zinc soil accumulation and plant concentration in irrigated maize fertilized with liquid swine manure. *Agronomy Journal* 100 (4):1056-1061.
- Bergstrom, L., et R. Joliansson. 1992. Influence of fertilized short-rotation forest plantations on nitrogen concentrations in groundwater. *Soil Use and Management* 8 (1):36-40.
- Björheden, Rolf. 2006. Drivers behind the development of forest energy in Sweden. *Biomass and Bioenergy* 30 (4):289-295.

- Börjesson, P. 1999. Environmental effects of energy crop cultivation in Sweden--I: Identification and quantification. *Biomass and Bioenergy* 16 (2):137-154.
- Carpenter, S. R., N. F. Caraco, D. L. Correll, R. W. Howarth, A. N. Sharpley, et V. H. Smith. 1998. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications* 8 (3):559-568.
- Chantigny, M. H., P. Rochette, D. A. Angers, D. Masse, et D. Côté. 2004. Ammonia volatilization and selected soil characteristics following application of anaerobically digested pig slurry. *Soil Science Society of America Journal* 68 (1):306-312.
- Dauden, A., D. Quilez, et M. V. Vera. 2004. Pig slurry application and irrigation effects on nitrate leaching in Mediterranean soil lysimeters. *Journal of Environmental Quality* 33 (6):2290-2295.
- Doucet, R. 2002. *La science agricole, Fertilisation et environnement*. Éditions Berger ed. Eastman.
- Ericsson, T. 1994. Nutrient cycling in energy forest plantations. *Biomass and Bioenergy* 6 (1-2):115-121.
- Gasser, M. O., M. R. Laverdière, R. Lagace, et J. Caron. 2002. Impact of potato-cereal rotations and slurry applications on nitrate leaching and nitrogen balance in sandy soils. *Canadian Journal of Soil Science* 82 (4):469-479.
- Gouvernement du Québec. 2002. Loi sur la qualité de l'environnement. Règlement sur les exploitations agricoles.c. Q-2, r.11.1.
- Hansson, P. A., S. E. Svensson, F. Hallefalt, et H. Diedrichs. 1999. Nutrient and cost optimization of fertilizing strategies for *Salix* including use of organic waste products. *Biomass and Bioenergy* 17 (5):377-387.
- Hasselgren, K. 1998. Use of municipal waste products in energy forestry: highlights from 15 years of experience. *Biomass and Bioenergy* 15 (1):71-74.

- Hofmann-Schielle, C., A. Jug, F. Makeschin, et K. E. Rehfues. 1999. Short-rotation plantations of balsam poplars, aspen and willows on former arable land in the Federal Republic of Germany. I. Site-growth relationships. *Forest Ecology and Management* 121 (1):41-55.
- Holford, I. C. R., C. Hird, et R. Lawrie. 1997. Effects of animal effluents on the phosphorus sorption characteristics of soils. *Australian Journal of Soil Research* 35 (2):365-373.
- Jug, A., C. Hofmann-Schielle, F. Makeschin, et K. E. Rehfues. 1999. Short-rotation plantations of balsam poplars, aspen and willows on former arable land in the Federal Republic of Germany. II. Nutritional status and bioelement export by harvested shoot axes. *Forest Ecology and Management* 121 (1):67-83.
- Labrecque, M., et T. I. Teodorescu. 2003. High biomass yield achieved by *Salix* clones in SRIC following two 3-year coppice rotations on abandoned farmland in southern Quebec, Canada. *Biomass and Bioenergy* 25 (2):135-146.
- Labrecque, M., et T. I. Teodorescu. 2005. Field performance and biomass production of 12 willow and poplar clones in short-rotation coppice in southern Quebec (Canada). *Biomass and Bioenergy* 29 (1):1-9.
- Labrecque, M., T. I. Teodorescu, et S. Daigle. 1998. Early performance and nutrition of two willow species in short-rotation intensive culture fertilized with wastewater sludge and impact on the soil characteristics. *Canadian Journal of Forest Research-Journal Canadien de la Recherche Forestiere* 28 (11):1621-1635.
- Ledin, Stig, et Eva Willebrand. 1995. *Handbook on how to grow short rotation forests*. Edited by W. E. Ledin S. Uppsala: IEA bioenergy, Task VIII, Task XII. Swedish University Agricultural Science.

- Lteif, A., J. K. Whalen, R. L. Bradley, et C. Camire. 2007. Mixtures of papermill biosolids and pig slurry improve soil quality and growth of hybrid poplar. *Soil Use and Management* 23 (4):393-403.
- Makeschin, F. 1994. Effects of energy forestry on soils. *Biomass and Bioenergy* 6:1-2.
- Mantovi, P., L. Fumagalli, G. P. Beretta, et M. Guermandi. 2006. Nitrate leaching through the unsaturated zone following pig slurry applications. *Journal of Hydrology* 316 (1-4):195-212.
- Martin, P. J., et W. Stephens. 2006. Willow growth in response to nutrients and moisture on a clay landfill cap soil. I. Growth and biomass production. *Bioresource Technology* 97 (3):437-448.
- Ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. 2006. Fiche d'information : Portrait économique de la production porcine. Gouvernement du Québec.
- Nicholson, F. A., S. R. Smith, B. J. Alloway, C. Carlton-Smith, et B. J. Chambers. 2003. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales. *Science of the Total Environment* 311 (1/3):205-219.
- Pellerin, A., L. E. Parent, J. Fortin, C. Tremblay, L. Khiari, et M. Giroux. 2006. Environmental Mehlich-III soil phosphorus saturation indices for Quebec acid to near neutral mineral soils varying in texture and genesis. *Canadian Journal of Soil Science* 86 (4):711-723.
- Penuelas, J., J. Sardans, J. M. Alcaniz, et J. M. Poch. 2009. Increased eutrophication and nutrient imbalances in the agricultural soil of NE Catalonia, Spain. *Journal of Environmental Biology* 30 (5 - Supplement):841-846.
- Perttu, K. L., et P. J. Kowalik. 1997. Salix vegetation filters for purification of waters and soils. *Biomass and Bioenergy* 12 (1):9-19.



- Qian, P., J. J. Schoenau, T. Wu, et S. P. Mooleki. 2003. Copper and zinc amounts and distribution in soil as influenced by application of animal manure in east-central Saskatchewan. *Canadian Journal of Soil Science* 83 (2):197-202.
- Redding, M. R. 2001. Pig effluent-P application can increase the risk of P transport: two case studies. *Australian Journal of Soil Research* 39 (1):161-174.
- Rosenqvist, H., P. Aronsson, K. Hasselgren, et K. Perttu. 1997. Economics of using municipal wastewater irrigation of willow coppice crops. *Biomass and Bioenergy* 12 (1):1-8.
- Temmerman, L. de, L. Vanongeval, W. Boon, M. Hoenig, et M. Geypens. 2003. Heavy metal content of arable soils in Northern Belgium. *Water, Air, and Soil Pollution* 148 (1/4):61-76.
- Volk, T. A., L. P. Abrahamson, C. A. Nowak, L. B. Smart, P. J. Tharakan, et E. H. White. 2006. The development of short-rotation willow in the northeastern United States for bioenergy and bioproducts, agroforestry and phytoremediation. *SO - Biomass and Bioenergy*. 30(8-9). AUG-SEP 2006. 715-727.
- Wang, H. L., G. N. Magesan, et N. S. Bolan. 2004. An overview of the environmental effects of land application of farm effluents. (Special Issue: Land application of farm wastes). *New Zealand Journal of Agricultural Research* 47 (4):389-403.

## Annexe 1

**Tableau 1:** Rendement en biomasse sèche des saules aux différents traitements de fertilisation pour les deux années croissance

| Traitement | Rendement 2008 (t/ha) |        |        |         |            | Rendement 2009 (t/ha) |        |        |         |            |
|------------|-----------------------|--------|--------|---------|------------|-----------------------|--------|--------|---------|------------|
|            | Bloc 1                | Bloc 2 | Bloc 3 | Moyenne | Écart-type | Bloc 1                | Bloc 2 | Bloc 3 | Moyenne | Écart-type |
| F0         | 11,2                  | 14,7   | 9,7    | 11,9    | 2,6        | 23,9                  | 31,3   | 23,8   | 26,4    | 3,9        |
| F1         | 16,6                  | 15,4   | 14,3   | 15,4    | 1,2        | 31,1                  | 29,2   | 30,6   | 30,3    | 0,8        |
| F2         | 17,7                  | 11,9   | 12,0   | 13,9    | 3,3        | 41,8                  | 23,3   | 28,7   | 31,3    | 4,0        |
| F3         | 16,3                  | 12,2   | 15,7   | 14,7    | 2,2        | 29,9                  | 31,5   | 33,4   | 31,6    | 1,1        |
| F4         | 16,2                  | 10,8   | 13,4   | 13,5    | 2,7        | 37,5                  | 29,1   | 32,0   | 32,9    | 2,0        |
| F5         | 16,9                  | 16,8   | 14,5   | 16,1    | 1,3        | 30,4                  | 26,5   | 31,2   | 29,4    | 2,4        |
| F6         | 13,3                  | 17,3   | 14,4   | 15,0    | 2,1        | 29,8                  | 34,0   | 28,8   | 30,9    | 2,6        |
| F7         | 16,1                  | 13,5   | 12,5   | 14,1    | 1,9        | 31,6                  | 29,3   | 29,6   | 30,2    | 0,4        |

**Tableau 2:** Prélèvement en azote et phosphore par les tiges des saules aux différents traitements de fertilisation en deuxième année de croissance (2009)

| Traitement | N (kg/ha) |        |        |         |            | P (kg/ha) |        |        |         |            |
|------------|-----------|--------|--------|---------|------------|-----------|--------|--------|---------|------------|
|            | Bloc 1    | Bloc 2 | Bloc 3 | Moyenne | Écart-type | Bloc 1    | Bloc 2 | Bloc 3 | Moyenne | Écart-type |
| F0         | 116       | 102    | 97     | 105     | 9,7        | 22,5      | 21,1   | 20,1   | 21,2    | 0,6        |
| F1         | 108       | 113    | 114    | 112     | 3,4        | 21,4      | 21,0   | 20,0   | 20,8    | 0,5        |
| F2         | 136       | 104    | 128    | 123     | 16,7       | 25,7      | 16,9   | 22,4   | 21,7    | 3,0        |
| F3         | 120       | 157    | 135    | 138     | 18,4       | 20,7      | 26,2   | 22,9   | 23,3    | 1,8        |
| F4         | 169       | 127    | 157    | 151     | 21,5       | 23,4      | 19,9   | 23,5   | 22,3    | 1,8        |
| F5         | 111       | 106    | 147    | 121     | 22,2       | 19,5      | 17,9   | 27,1   | 21,5    | 4,7        |
| F6         | 163       | 151    | 115    | 143     | 25,3       | 22,2      | 22,4   | 19,0   | 21,2    | 1,7        |
| F7         | 169       | 138    | 145    | 151     | 16,4       | 20,8      | 17,7   | 17,9   | 18,8    | 0,6        |

**Tableau 3:** Teneur en  $\text{NH}_4$  (mg/kg) dans le sol pour les traitements de fertilisation en lisier

| Traitement | Profondeur<br>(cm) | 2008   |        |        |         |            | 2009   |        |        |         |            |
|------------|--------------------|--------|--------|--------|---------|------------|--------|--------|--------|---------|------------|
|            |                    | Bloc 1 | Bloc 2 | Bloc 3 | Moyenne | Écart-type | Bloc 1 | Bloc 2 | Bloc 3 | Moyenne | Écart-type |
| F0         | 0-20               | 1,89   | 0,93   | 0,97   | 1,26    | 0,54       | 1,95   | 2,15   | 1,34   | 1,81    | 0,41       |
|            | 20-40              | 1,54   | 1,00   | 1,11   | 1,22    | 0,29       | 1,66   | 1,01   | 1,02   | 1,23    | 0,12       |
| F1         | 0-20               | 2,08   | 1,19   | 1,06   | 1,44    | 0,56       | 2,4    | 1,28   | 0,876  | 1,52    | 0,32       |
|            | 20-40              | 2,19   | 1,15   | 0,99   | 1,44    | 0,65       | 2,25   | 1,14   | 0,749  | 1,38    | 0,32       |
| F2         | 0-20               | 1,09   | 1,85   | 1,16   | 1,37    | 0,42       | 1,17   | 2,04   | 0,988  | 1,40    | 0,53       |
|            | 20-40              | 1,18   | 2,13   | 1,28   | 1,53    | 0,52       | 1,08   | 1,72   | 1,08   | 1,29    | 0,33       |
| F3         | 0-20               | 2,71   | 1,56   | 1,39   | 1,89    | 0,72       | 1,52   | 1,69   | 1,22   | 1,48    | 0,24       |
|            | 20-40              | 1,60   | 1,82   | 1,47   | 1,63    | 0,18       | 2,25   | 1,64   | 1,06   | 1,65    | 0,34       |
| F4         | 0-20               | 1,35   | 1,46   | 1,44   | 1,42    | 0,06       | 1,27   | 1,67   | 1,1    | 1,35    | 0,29       |
|            | 20-40              | 1,00   | 1,73   | 1,47   | 1,40    | 0,37       | 1,39   | 1,53   | 1,12   | 1,35    | 0,21       |

**Tableau 4:** Teneur en  $\text{NO}_3$  (mg/kg) dans le sol pour les traitements de fertilisation en lisier

| Traitement | Profondeur<br>(cm) | 2008   |        |        |         |            | 2009   |        |        |         |            |
|------------|--------------------|--------|--------|--------|---------|------------|--------|--------|--------|---------|------------|
|            |                    | Bloc 1 | Bloc 2 | Bloc 3 | Moyenne | Écart-type | Bloc 1 | Bloc 2 | Bloc 3 | Moyenne | Écart-type |
| F0         | 0-20               | 1,21   | 1,16   | 0,75   | 1,04    | 0,25       | 1,69   | 1,44   | 0,50   | 1,21    | 0,49       |
|            | 20-40              | 1,53   | 1,30   | 0,84   | 1,22    | 0,35       | 2,87   | 3,08   | 0,34   | 2,10    | 1,39       |
| F1         | 0-20               | 1,59   | 1,14   | 3,98   | 2,24    | 1,53       | 2,70   | 0,24   | 2,29   | 1,74    | 1,06       |
|            | 20-40              | 1,69   | 1,31   | 5,00   | 2,67    | 2,03       | 3,60   | 1,20   | 3,10   | 2,63    | 0,99       |
| F2         | 0-20               | 5,28   | 2,40   | 2,35   | 3,34    | 1,68       | 1,61   | 2,75   | 1,53   | 1,96    | 0,62       |
|            | 20-40              | 8,73   | 1,98   | 3,77   | 4,83    | 3,50       | 3,02   | 3,35   | 3,49   | 3,29    | 0,10       |
| F3         | 0-20               | 5,04   | 3,13   | 4,72   | 4,30    | 1,02       | 2,6    | 2,46   | 1,98   | 2,35    | 0,25       |
|            | 20-40              | 4,04   | 2,77   | 3,70   | 3,50    | 0,66       | 5,87   | 2,95   | 3,56   | 4,13    | 0,59       |
| F4         | 0-20               | 14,3   | 2,35   | 7,44   | 8,03    | 6,00       | 3,87   | 1,85   | 3,00   | 2,91    | 0,64       |
|            | 20-40              | 8,18   | 1,87   | 7,14   | 5,73    | 3,38       | 4,58   | 4,25   | 4,19   | 4,34    | 0,08       |

**Tableau 5:** Teneur en P (mg/kg) dans le sol pour les traitements de fertilisation en lisier

| Traitement | Profondeur<br>(cm) | 2008   |        |        |         |            | 2009   |        |        |         |            |
|------------|--------------------|--------|--------|--------|---------|------------|--------|--------|--------|---------|------------|
|            |                    | Bloc 1 | Bloc 2 | Bloc 3 | Moyenne | Écart-type | Bloc 1 | Bloc 2 | Bloc 3 | Moyenne | Écart-type |
| F0         | 0-20               | 65,9   | 61,7   | 60,1   | 62,6    | 3,0        | 64,7   | 52,9   | 55,9   | 57,8    | 2,5        |
|            | 20-40              | 40,0   | 64,4   | 35,1   | 46,5    | 15,7       | 50,1   | 50,1   | 45,8   | 48,7    | 2,2        |
| F1         | 0-20               | 57,6   | 52,5   | 77,9   | 62,7    | 13,4       | 66,6   | 52,3   | 64,4   | 61,1    | 6,3        |
|            | 20-40              | 34,0   | 38,5   | 56,4   | 43,0    | 11,8       | 43,1   | 45,7   | 66,1   | 51,6    | 10,5       |
| F2         | 0-20               | 105,0  | 51,5   | 83,5   | 80,0    | 26,9       | 75,3   | 56,3   | 69,9   | 67,2    | 7,2        |
|            | 20-40              | 71,1   | 33,4   | 62,6   | 55,7    | 19,8       | 70,4   | 45,6   | 73,7   | 63,2    | 14,2       |
| F3         | 0-20               | 77,0   | 55,7   | 62,8   | 65,2    | 10,8       | 65,6   | 53,3   | 69,8   | 62,9    | 8,3        |
|            | 20-40              | 39,2   | 38,6   | 28,9   | 35,6    | 5,8        | 60,4   | 40,1   | 52,6   | 51,0    | 6,8        |
| F4         | 0-20               | 94,3   | 40,6   | 74,5   | 69,8    | 27,2       | 62,6   | 38,5   | 71,0   | 57,4    | 16,3       |
|            | 20-40              | 57,3   | 52,3   | 48,9   | 52,8    | 4,2        | 64,8   | 38,7   | 65,9   | 56,5    | 13,8       |

**Tableau 6:** Teneur en K (mg/kg) dans le sol pour les traitements de fertilisation en lisier

| Traitement | Profondeur<br>(cm) | 2008   |        |        |         |            | 2009   |        |        |         |            |
|------------|--------------------|--------|--------|--------|---------|------------|--------|--------|--------|---------|------------|
|            |                    | Bloc 1 | Bloc 2 | Bloc 3 | Moyenne | Écart-type | Bloc 1 | Bloc 2 | Bloc 3 | Moyenne | Écart-type |
| F0         | 0-20               | 136    | 111    | 132    | 126     | 13         | 127    | 133    | 121    | 127     | 6          |
|            | 20-40              | 129    | 124    | 150    | 134     | 14         | 132    | 106    | 114    | 117     | 6          |
| F1         | 0-20               | 121    | 112    | 171    | 135     | 32         | 123    | 119    | 169    | 137     | 25         |
|            | 20-40              | 118    | 87     | 168    | 124     | 41         | 102    | 94,4   | 174    | 123     | 40         |
| F2         | 0-20               | 124    | 127    | 187    | 146     | 36         | 155    | 129    | 197    | 160     | 34         |
|            | 20-40              | 104    | 102    | 202    | 136     | 57         | 125    | 104    | 184    | 138     | 40         |
| F3         | 0-20               | 167    | 138    | 177    | 161     | 20         | 186    | 105    | 191    | 161     | 44         |
|            | 20-40              | 121    | 114    | 146    | 127     | 17         | 135    | 99,1   | 153    | 129     | 27         |
| F4         | 0-20               | 186    | 117    | 203    | 169     | 46         | 147    | 117    | 216    | 160     | 50         |
|            | 20-40              | 139    | 122    | 146    | 136     | 12         | 145    | 103    | 201    | 150     | 49         |

**Tableau 7:** Teneur en Ca (mg/kg) dans le sol pour les traitements de fertilisation en lisier

| Traitement | Profondeur<br>(cm) | 2008   |        |        |         |            | 2009   |        |        |         |            |
|------------|--------------------|--------|--------|--------|---------|------------|--------|--------|--------|---------|------------|
|            |                    | Bloc 1 | Bloc 2 | Bloc 3 | Moyenne | Écart-type | Bloc 1 | Bloc 2 | Bloc 3 | Moyenne | Écart-type |
| F0         | 0-20               | 1773   | 1511   | 1490   | 1591    | 158        | 1720   | 1363   | 1477   | 1520    | 81         |
|            | 20-40              | 2112   | 1770   | 1778   | 1887    | 195        | 1832   | 1249   | 1438   | 1506    | 133        |
| F1         | 0-20               | 2439   | 1702   | 1639   | 1927    | 445        | 1991   | 1505   | 1587   | 1694    | 95         |
|            | 20-40              | 2033   | 1377   | 1460   | 1623    | 357        | 1739   | 1446   | 1472   | 1552    | 55         |
| F2         | 0-20               | 1402   | 1766   | 1701   | 1623    | 194        | 1464   | 1685   | 1655   | 1601    | 42         |
|            | 20-40              | 1153   | 1545   | 1569   | 1422    | 234        | 1398   | 1447   | 1681   | 1509    | 121        |
| F3         | 0-20               | 1932   | 1665   | 1934   | 1844    | 155        | 1701   | 1654   | 1705   | 1687    | 26         |
|            | 20-40              | 1908   | 1785   | 1977   | 1890    | 97         | 1707   | 1471   | 1596   | 1591    | 71         |
| F4         | 0-20               | 1706   | 1743   | 1637   | 1695    | 54         | 1629   | 1854   | 1532   | 1672    | 161        |
|            | 20-40              | 1350   | 1922   | 1093   | 1455    | 424        | 1720   | 1778   | 1437   | 1645    | 172        |

**Tableau 8:** Teneur en Mg (mg/kg) dans le sol pour les traitements de fertilisation en lisier

| Traitement | Profondeur<br>(cm) | 2008   |        |        |         |            | 2009   |        |        |         |            |
|------------|--------------------|--------|--------|--------|---------|------------|--------|--------|--------|---------|------------|
|            |                    | Bloc 1 | Bloc 2 | Bloc 3 | Moyenne | Écart-type | Bloc 1 | Bloc 2 | Bloc 3 | Moyenne | Écart-type |
| F0         | 0-20               | 300    | 132    | 214    | 215     | 84         | 294    | 140    | 193    | 209     | 36         |
|            | 20-40              | 616    | 145    | 455    | 405     | 239        | 468    | 143    | 243    | 285     | 73         |
| F1         | 0-20               | 341    | 173    | 138    | 217     | 109        | 354    | 151    | 156    | 220     | 39         |
|            | 20-40              | 573    | 225    | 150    | 316     | 226        | 369    | 174    | 159    | 234     | 40         |
| F2         | 0-20               | 118    | 330    | 208    | 219     | 106        | 116    | 308    | 198    | 207     | 61         |
|            | 20-40              | 118    | 463    | 283    | 288     | 173        | 126    | 342    | 219    | 229     | 68         |
| F3         | 0-20               | 280    | 257    | 260    | 266     | 13         | 246    | 242    | 250    | 246     | 4          |
|            | 20-40              | 463    | 490    | 581    | 511     | 62         | 266    | 247    | 273    | 262     | 13         |
| F4         | 0-20               | 193    | 329    | 209    | 244     | 74         | 180    | 248    | 213    | 214     | 20         |
|            | 20-40              | 212    | 260    | 216    | 229     | 27         | 191    | 285    | 231    | 236     | 30         |

**Tableau 9:** Teneur en Al (mg/kg) dans le sol pour les traitements de fertilisation en lisier

| Traitement | Profondeur<br>(cm) | 2008   |        |        |         |            | 2009   |        |        |         |            |
|------------|--------------------|--------|--------|--------|---------|------------|--------|--------|--------|---------|------------|
|            |                    | Bloc 1 | Bloc 2 | Bloc 3 | Moyenne | Écart-type | Bloc 1 | Bloc 2 | Bloc 3 | Moyenne | Écart-type |
| F0         | 0-20               | 1081   | 860    | 1134   | 1025    | 145        | 1088   | 841    | 1127   | 1019    | 144        |
|            | 20-40              | 1057   | 846    | 1151   | 1018    | 156        | 1059   | 850    | 1155   | 1021    | 153        |
| F1         | 0-20               | 921    | 822    | 1164   | 969     | 176        | 953    | 819    | 1110   | 961     | 146        |
|            | 20-40              | 973    | 772    | 1226   | 990     | 227        | 956    | 822    | 1154   | 977     | 166        |
| F2         | 0-20               | 922    | 1037   | 1169   | 1043    | 124        | 890    | 979    | 1139   | 1003    | 86         |
|            | 20-40              | 946    | 974    | 1179   | 1033    | 127        | 910    | 986    | 1185   | 1027    | 105        |
| F3         | 0-20               | 943    | 1027   | 964    | 978     | 44         | 922    | 1018   | 985    | 975     | 23         |
|            | 20-40              | 917    | 1061   | 1046   | 1008    | 79         | 903    | 1023   | 1005   | 977     | 23         |
| F4         | 0-20               | 1009   | 814    | 1127   | 983     | 158        | 898    | 763    | 1113   | 925     | 175        |
|            | 20-40              | 1012   | 786    | 1129   | 976     | 174        | 921    | 777    | 1146   | 948     | 185        |

**Tableau 10:** Teneur en Cu (mg/kg) dans le sol pour les traitements de fertilisation en lisier

| Traitement | Profondeur<br>(cm) | 2008   |        |        |         |            | 2009   |        |        |         |            |
|------------|--------------------|--------|--------|--------|---------|------------|--------|--------|--------|---------|------------|
|            |                    | Bloc 1 | Bloc 2 | Bloc 3 | Moyenne | Écart-type | Bloc 1 | Bloc 2 | Bloc 3 | Moyenne | Écart-type |
| F0         | 0-20               | 1081   | 860    | 1134   | 1025    | 145        | 1088   | 841    | 1127   | 1019    | 144        |
|            | 20-40              | 1057   | 846    | 1151   | 1018    | 156        | 1059   | 850    | 1155   | 1021    | 153        |
| F1         | 0-20               | 921    | 822    | 1164   | 969     | 176        | 953    | 819    | 1110   | 961     | 146        |
|            | 20-40              | 973    | 772    | 1226   | 990     | 227        | 956    | 822    | 1154   | 977     | 166        |
| F2         | 0-20               | 922    | 1037   | 1169   | 1043    | 124        | 890    | 979    | 1139   | 1003    | 86         |
|            | 20-40              | 946    | 974    | 1179   | 1033    | 127        | 910    | 986    | 1185   | 1027    | 105        |
| F3         | 0-20               | 943    | 1027   | 964    | 978     | 44         | 922    | 1018   | 985    | 975     | 23         |
|            | 20-40              | 917    | 1061   | 1046   | 1008    | 79         | 903    | 1023   | 1005   | 977     | 23         |
| F4         | 0-20               | 1009   | 814    | 1127   | 983     | 158        | 898    | 763    | 1113   | 925     | 175        |
|            | 20-40              | 1012   | 786    | 1129   | 976     | 174        | 921    | 777    | 1146   | 948     | 185        |

**Tableau 11:** Teneur en Zn (mg/kg) dans le sol pour les traitements de fertilisation en lisier

| Traitement | Profondeur<br>(cm) | 2008   |        |        |         |            | 2009   |        |        |         |            |
|------------|--------------------|--------|--------|--------|---------|------------|--------|--------|--------|---------|------------|
|            |                    | Bloc 1 | Bloc 2 | Bloc 3 | Moyenne | Écart-type | Bloc 1 | Bloc 2 | Bloc 3 | Moyenne | Écart-type |
| F0         | 0-20               | 1,46   | 1,26   | 1,05   | 1,26    | 0,21       | 1,24   | 1,08   | 0,88   | 1,07    | 0,11       |
|            | 20-40              | 1,48   | 1,37   | 1,15   | 1,33    | 0,17       | 1,15   | 1,20   | 1,09   | 1,15    | 0,06       |
| F1         | 0-20               | 1,70   | 1,56   | 1,42   | 1,56    | 0,14       | 1,49   | 1,21   | 1,08   | 1,26    | 0,09       |
|            | 20-40              | 1,44   | 1,20   | 1,32   | 1,32    | 0,12       | 1,38   | 1,02   | 1,12   | 1,17    | 0,08       |
| F2         | 0-20               | 1,67   | 1,72   | 1,68   | 1,69    | 0,03       | 1,04   | 1,70   | 1,02   | 1,25    | 0,35       |
|            | 20-40              | 1,36   | 1,42   | 1,50   | 1,43    | 0,07       | 1,30   | 1,23   | 1,08   | 1,20    | 0,08       |
| F3         | 0-20               | 2,52   | 1,56   | 2,20   | 2,09    | 0,49       | 1,97   | 1,01   | 1,29   | 1,42    | 0,21       |
|            | 20-40              | 1,90   | 1,28   | 1,64   | 1,61    | 0,31       | 1,56   | 0,90   | 1,24   | 1,23    | 0,19       |
| F4         | 0-20               | 2,63   | 1,97   | 1,61   | 2,07    | 0,52       | 1,45   | 1,79   | 1,17   | 1,47    | 0,31       |
|            | 20-40              | 1,82   | 2,24   | 1,25   | 1,77    | 0,50       | 1,31   | 1,58   | 1,10   | 1,33    | 0,24       |

**Tableau 12:** Concentration des nitrates dans les eaux de lysimètres durant la deuxième saison de croissance (2009)

| Traitement | Bloc       | Dates                  |                        |           |            |              |               |               |
|------------|------------|------------------------|------------------------|-----------|------------|--------------|---------------|---------------|
|            |            | 19<br>avril            | 1 <sup>er</sup><br>mai | 14<br>mai | 12<br>juin | 2<br>juillet | 15<br>juillet | 29<br>juillet |
|            |            | NO <sub>3</sub> (mg/L) |                        |           |            |              |               |               |
| F0         | 1          | 0,37                   | 0,85                   | 0,73      | 0,24       | 0,32         | 0,07          | 0,10          |
|            | 2          | 0,52                   | 0,99                   | 0,65      | 0,46       | 0,64         | 0,34          | 0,23          |
|            | 3          | 1,71                   | 2,06                   | 0,15      | 0,02       | 0,07         | 0,06          | 0,07          |
|            | Moyenne    | 0,87                   | 1,30                   | 0,51      | 0,24       | 0,34         | 0,16          | 0,13          |
|            | Écart-type | 0,74                   | 0,66                   | 0,31      | 0,22       | 0,28         | 0,16          | 0,09          |
| F4         | 1          |                        |                        |           |            |              |               |               |
|            | 2          | 16,2                   | 19,5                   | 13,9      | 0,8        | 4,0          | 1,4           | 1,7           |
|            | 3          | 18,7                   | 18,5                   | 18,2      | 17,6       | 11,0         | 10,7          | 10,5          |
|            | Moyenne    | 17,5                   | 19,0                   | 16,1      | 9,2        | 7,5          | 6,1           | 6,1           |
|            | Écart-type | 1,8                    | 0,7                    | 3,0       | 11,9       | 5,0          | 6,6           | 6,2           |
| F7         | 1          | 11,5                   | 11,8                   | 12,2      | 6,6        | 1,9          | 3,7           | 5,3           |
|            | 2          | 14,1                   | 13,5                   | 14,4      | 13,4       | 6,6          | 9,4           | 7,3           |
|            | 3          | 31,3                   | 27,3                   | 26,9      | 8,6        | 13,8         | 7,3           | 4,0           |
|            | Moyenne    | 19,0                   | 17,5                   | 17,8      | 9,5        | 7,4          | 6,8           | 5,5           |
|            | Écart-type | 10,8                   | 8,5                    | 7,9       | 3,5        | 6,0          | 2,9           | 1,7           |

Note : Les données de la parcelle F4 du bloc 1 sont manquantes pour cause de défectuosité du lysimètre.

**Tableau 13:** Concentration du phosphore total dissous dans les eaux de lysimètres durant la deuxième saison de croissance

| Traitement | Bloc       | Dates       |                        |           |            |              |               |               |
|------------|------------|-------------|------------------------|-----------|------------|--------------|---------------|---------------|
|            |            | 19<br>avril | 1 <sup>er</sup><br>mai | 14<br>mai | 12<br>juin | 2<br>juillet | 15<br>juillet | 29<br>juillet |
|            |            | P (µg/L)    |                        |           |            |              |               |               |
| F0         | 1          | 15          | 18                     | 33        | 19         | 40           | 40            | 46            |
|            | 2          | 57          | 36                     | 32        | 34         | 49           | 79            | 76            |
|            | 3          | 9           | 15                     | 15        | 24         | 19           | 12            | 15            |
|            | Moyenne    | 27          | 23                     | 27        | 26         | 36           | 44            | 46            |
|            | Écart-type | 26          | 11                     | 10        | 8          | 15           | 34            | 31            |
| F4         | 1          |             |                        |           |            |              |               |               |
|            | 2          | 16          | 18                     | 18        | 17         | 59           | 42            | 21            |
|            | 3          | 41          | 49                     | 50        | 53         | 20           | 65            | 78            |
|            | Moyenne    | 29          | 34                     | 34        | 35         | 40           | 54            | 50            |
|            | Écart-type | 18          | 22                     | 23        | 25         | 28           | 16            | 40            |
| F7         | 1          | 20          | 22                     | 24        | 29         | 53           | 51            | 65            |
|            | 2          | 42          | 29                     | 41        | 21         | 46           | 79            | 37            |
|            | 3          | 41          | 31                     | 61        | 23         | 43           | 88            | 89            |
|            | Moyenne    | 34          | 27                     | 42        | 24         | 47           | 73            | 64            |
|            | Écart-type | 12          | 5                      | 19        | 4          | 5            | 19            | 26            |

Note : Les données de la parcelle F4 du bloc 1 sont manquantes pour cause de défectuosité du lysimètre.

## Annexe 2

### Résultats des analyses de variance effectuées sur les données de rendements de 2009 pour les traitements de fertilisation en lisier

#### Response Rendement (kg/ha)

##### Summary of Fit

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | 0,147189 |
| RSquare Adj                | -0,19394 |
| Root Mean Square Error     | 5,22985  |
| Mean of Response           | 30,47333 |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

##### Fixed Effect Tests

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 0,6799  | 0,6250   |

### Résultats des analyses de variance effectuées sur les données de rendements de 2009 pour les traitements de fertilisation minérale

#### Response Rendement (kg/ha)

##### Summary of Fit

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | 0,195945 |
| RSquare Adj                | -0,10558 |
| Root Mean Square Error     | 2,862254 |
| Mean of Response           | 29,18333 |
| Observations (or Sum Wgts) | 12       |

##### Fixed Effect Tests

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 3     | 3  | 6     | 1,9087  | 0,2293   |

## Annexe 3

### Résultats des analyses de variance effectuées sur les données de contenu en azote et phosphore des tiges de saules pour les traitements de fertilisation en lisier

#### Response N Total (%)

##### Summary of Fit

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | -0,49498 |
| RSquare Adj                | -1,09297 |
| Root Mean Square Error     | 0,060524 |
| Mean of Response           | 0,415067 |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

##### Fixed Effect Tests

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 0,9566  | 0,4804   |

#### Response P (mg/kg)

##### Summary of Fit

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | -1,00248 |
| RSquare Adj                | -1,80348 |
| Root Mean Square Error     | 94,29952 |
| Mean of Response           | 726,4667 |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

##### Fixed Effect Tests

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 1,0751  | 0,4292   |



## Résultats des analyses de variance effectuées sur les données de contenu en azote et phosphore des tiges de saules pour les traitements de fertilisation minérale

### Response N Total %

#### Summary of Fit

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | 0,469419 |
| RSquare Adj                | 0,270451 |
| Root Mean Square Error     | 0,060056 |
| Mean of Response           | 0,4455   |
| Observations (or Sum Wgts) | 12       |

#### Fixed Effect Tests

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 3     | 3  | 6     | 1,6222  | 0,2807   |

### Response P (mg/kg)

#### Summary of Fit

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | 0,528054 |
| RSquare Adj                | 0,351074 |
| Root Mean Square Error     | 92,20087 |
| Mean of Response           | 714,75   |
| Observations (or Sum Wgts) | 12       |

#### Fixed Effect Tests

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 3     | 3  | 6     | 2,3746  | 0,1691   |

## Annexe 4

### Résultats des analyses de variance effectuées sur les données de composition chimique du sol dans la couche 0-20 cm pour les traitements de fertilisation en lisier

#### Response N-NH-4 (mg/kg) 08

##### Summary of Fit

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | 0,468201 |
| RSquare Adj                | 0,255482 |
| Root Mean Square Error     | 0,446021 |
| Mean of Response           | 1,475333 |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

##### Fixed Effect Tests

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 0,8687  | 0,5224   |

#### Response N-NH-4 (mg/kg) 09

##### Summary of Fit

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | 0,542726 |
| RSquare Adj                | 0,359816 |
| Root Mean Square Error     | 0,396146 |
| Mean of Response           | 1,510933 |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

##### Fixed Effect Tests

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 0,6314  | 0,6540   |

#### Manova Fit

##### Between Subjects (Sum)

##### F Test

|             | Value     | Exact F  | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------|-----------|----------|-------|-------|--------|
| All Between | 0,9873734 | 1,3165   | 6     | 8     | 0,3497 |
| Intercept   | 29,687817 | 237,5025 | 1     | 8     | <,0001 |
| Bloc        | 0,8214819 | 3,2859   | 2     | 8     | 0,0908 |
| Traitement  | 0,1658915 | 0,3318   | 4     | 8     | 0,8492 |

##### Within Subjects (Contrast)

##### F Test

|                         | Value     | Exact F | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------------------|-----------|---------|-------|-------|--------|
| All Within Interactions | 1,9074878 | 2,5433  | 6     | 8     | 0,1109 |
| Time                    | 0,0160009 | 0,1280  | 1     | 8     | 0,7298 |
| Time*Bloc               | 0,7057878 | 2,8232  | 2     | 8     | 0,1181 |
| Time*Traitement         | 1,2016999 | 2,4034  | 4     | 8     | 0,1355 |

**Response N-NO3 (mg/kg) 08****Summary of Fit**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | 0,640639 |
| RSquare Adj                | 0,496895 |
| Root Mean Square Error     | 2,614432 |
| Mean of Response           | 3,789467 |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

**Fixed Effect Tests**

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 3,1168  | 0,0802   |

**Response N-NO3 (mg/kg) 09****Summary of Fit**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | 0,420047 |
| RSquare Adj                | 0,188066 |
| Root Mean Square Error     | 0,853858 |
| Mean of Response           | 2,034333 |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

**Fixed Effect Tests**

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 1,6720  | 0,2483   |

**Manova Fit****Between Subjects (Sum)****F Test**

|             | Value     | Exact F | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------|-----------|---------|-------|-------|--------|
| All Between | 2,3425596 | 3,1234  | 6     | 8     | 0,0698 |
| Intercept   | 6,8580334 | 54,8643 | 1     | 8     | <,0001 |
| Bloc        | 0,5940495 | 2,3762  | 2     | 8     | 0,1549 |
| Traitement  | 1,7485101 | 3,4970  | 4     | 8     | 0,0621 |

**Within Subjects (Contrast)****F Test**

|                         | Value     | Exact F | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------------------|-----------|---------|-------|-------|--------|
| All Within Interactions | 1,4757963 | 1,9677  | 6     | 8     | 0,1846 |
| Time                    | 0,9863632 | 7,8909  | 1     | 8     | 0,0229 |
| Time*Bloc               | 0,3983249 | 1,5933  | 2     | 8     | 0,2616 |
| Time*Traitement         | 1,0774714 | 2,1549  | 4     | 8     | 0,1651 |

**Response P (mg/kg) 08****Summary of Fit**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | 0,614754 |
| RSquare Adj                | 0,460655 |
| Root Mean Square Error     | 13,8568  |
| Mean of Response           | 68,04    |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

**Fixed Effect Tests**

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 0,8329  | 0,5406   |

**Response P (mg/kg) 09****Summary of Fit**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | 0,799013 |
| RSquare Adj                | 0,718618 |
| Root Mean Square Error     | 5,651489 |
| Mean of Response           | 61,27333 |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

**Fixed Effect Tests**

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 1,5147  | 0,2856   |

**Manova Fit****Between Subjects (Sum)****F Test**

|             | Value     | Exact F  | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------|-----------|----------|-------|-------|--------|
| All Between | 2,8988397 | 3,8651   | 6     | 8     | 0,0411 |
| Intercept   | 108,92534 | 871,4028 | 1     | 8     | <,0001 |
| Bloc        | 2,3319765 | 9,3279   | 2     | 8     | 0,0081 |
| Traitement  | 0,5668632 | 1,1337   | 4     | 8     | 0,4060 |

**Within Subjects (Contrast)****F Test**

|                         | Value     | Exact F | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------------------|-----------|---------|-------|-------|--------|
| All Within Interactions | 0,5380238 | 0,7174  | 6     | 8     | 0,6475 |
| Time                    | 0,5363895 | 4,2911  | 1     | 8     | 0,0721 |
| Time*Bloc               | 0,2560747 | 1,0243  | 2     | 8     | 0,4017 |
| Time*Traitement         | 0,2819491 | 0,5639  | 4     | 8     | 0,6960 |

**Response K (mg/kg) 08****Summary of Fit**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | 0,784693 |
| RSquare Adj                | 0,69857  |
| Root Mean Square Error     | 18,88297 |
| Mean of Response           | 147,2667 |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

**Fixed Effect Tests**

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 2,6000  | 0,1165   |

**Response K (mg/kg) 09****Summary of Fit**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | 0,672549 |
| RSquare Adj                | 0,541568 |
| Root Mean Square Error     | 25,74523 |
| Mean of Response           | 149      |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

**Fixed Effect Tests**

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 1,1469  | 0,4010   |

**Manova Fit****Between Subjects (Sum)****F Test**

|             | Value     | Exact F  | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------|-----------|----------|-------|-------|--------|
| All Between | 3,6053533 | 4,8071   | 6     | 8     | 0,0228 |
| Intercept   | 108,81426 | 870,5141 | 1     | 8     | <,0001 |
| Bloc        | 2,5570873 | 10,2283  | 2     | 8     | 0,0062 |
| Traitement  | 1,0482661 | 2,0965   | 4     | 8     | 0,1731 |

**Within Subjects (Contrast)****F Test**

|                         | Value     | Exact F | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------------------|-----------|---------|-------|-------|--------|
| All Within Interactions | 0,2109946 | 0,2813  | 6     | 8     | 0,9302 |
| Time                    | 0,0107033 | 0,0856  | 1     | 8     | 0,7773 |
| Time*Bloc               | 0,0176066 | 0,0704  | 2     | 8     | 0,9326 |
| Time*Traitement         | 0,193388  | 0,3868  | 4     | 8     | 0,8126 |

**Response Ca (mg/kg) 08****Summary of Fit**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | 0,247018 |
| RSquare Adj                | -0,05418 |
| Root Mean Square Error     | 244,0056 |
| Mean of Response           | 1736     |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

**Fixed Effect Tests**

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 1,0493  | 0,4398   |

**Response Ca (mg/kg) 09****Summary of Fit**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | -0,05094 |
| RSquare Adj                | -0,47132 |
| Root Mean Square Error     | 177,7737 |
| Mean of Response           | 1634,8   |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

**Fixed Effect Tests**

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 0,5195  | 0,7245   |

**Manova Fit****Between Subjects (Sum)****F Test**

|             | Value     | Exact F   | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------|-----------|-----------|-------|-------|--------|
| All Between | 1,1324196 | 1,3589    | 5     | 6     | 0,3558 |
| Intercept   | 230,08932 | 1380,5359 | 1     | 6     | <,0001 |
| Bloc        | 0,3779116 | 1,1337    | 2     | 6     | 0,3822 |
| Traitement  | 0,7545081 | 1,5090    | 3     | 6     | 0,3051 |

**Within Subjects (Contrast)****F Test**

|                         | Value     | Exact F | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------------------|-----------|---------|-------|-------|--------|
| All Within Interactions | 1,1044084 | 1,3253  | 5     | 6     | 0,3663 |
| Time                    | 0,1334205 | 0,8005  | 1     | 6     | 0,4054 |
| Time*Bloc               | 0,2048302 | 0,6145  | 2     | 6     | 0,5718 |
| Time*Traitement         | 0,8995782 | 1,7992  | 3     | 6     | 0,2474 |

**Response Mg (mg/kg) 08****Summary of Fit**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | -0,54099 |
| RSquare Adj                | -1,15739 |
| Root Mean Square Error     | 91,14576 |
| Mean of Response           | 232,1333 |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

**Fixed Effect Tests**

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 0,1752  | 0,9450   |

**Response Mg (mg/kg) 09****Summary of Fit**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | -0,88138 |
| RSquare Adj                | -1,63393 |
| Root Mean Square Error     | 84,19165 |
| Mean of Response           | 219,2667 |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

**Fixed Effect Tests**

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 0,1053  | 0,9774   |

**Manova Fit****Between Subjects (Sum)****F Test**

|             | Value     | Exact F  | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------|-----------|----------|-------|-------|--------|
| All Between | 0,1290739 | 0,1721   | 6     | 8     | 0,9771 |
| Intercept   | 12,639323 | 101,1146 | 1     | 8     | <,0001 |
| Bloc        | 0,0641455 | 0,2566   | 2     | 8     | 0,7798 |
| Traitement  | 0,0649284 | 0,1299   | 4     | 8     | 0,9672 |

**Within Subjects (Contrast)****F Test**

|                         | Value     | Exact F | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------------------|-----------|---------|-------|-------|--------|
| All Within Interactions | 0,7391805 | 0,9856  | 6     | 8     | 0,4926 |
| Time                    | 0,5501905 | 4,4015  | 1     | 8     | 0,0692 |
| Time*Bloc               | 0,3160616 | 1,2642  | 2     | 8     | 0,3333 |
| Time*Traitement         | 0,423119  | 0,8462  | 4     | 8     | 0,5337 |

**Response Al (mg/kg) 08****Summary of Fit**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | 0,558542 |
| RSquare Adj                | 0,381959 |
| Root Mean Square Error     | 102,7508 |
| Mean of Response           | 999,6    |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

**Fixed Effect Tests**

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 0,2960  | 0,8726   |

**Response Al (mg/kg) 09****Summary of Fit**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | 0,629855 |
| RSquare Adj                | 0,481798 |
| Root Mean Square Error     | 95,68107 |
| Mean of Response           | 976,3333 |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

**Fixed Effect Tests**

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 0,4426  | 0,7753   |

**Manova Fit****Between Subjects (Sum)****F Test**

|             | Value     | Exact F   | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------|-----------|-----------|-------|-------|--------|
| All Between | 1,6051503 | 2,1402    | 6     | 8     | 0,1576 |
| Intercept   | 191,73784 | 1533,9027 | 1     | 8     | <,0001 |
| Bloc        | 1,4412664 | 5,7651    | 2     | 8     | 0,0282 |
| Traitement  | 0,1638839 | 0,3278    | 4     | 8     | 0,8519 |

**Within Subjects (Contrast)****F Test**

|                         | Value     | Exact F | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------------------|-----------|---------|-------|-------|--------|
| All Within Interactions | 0,7728082 | 1,0304  | 6     | 8     | 0,4702 |
| Time                    | 0,8152787 | 6,5222  | 1     | 8     | 0,0340 |
| Time*Bloc               | 0,0337488 | 0,1350  | 2     | 8     | 0,8757 |
| Time*Traitement         | 0,7390594 | 1,4781  | 4     | 8     | 0,2952 |



**Response Cu (mg/gkg) 09****Summary of Fit**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | 0,534182 |
| RSquare Adj                | 0,347855 |
| Root Mean Square Error     | 0,328288 |
| Mean of Response           | 1,816667 |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

**Fixed Effect Tests**

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 1,1796  | 0,3888   |

**Response Cu (mg/gkg) 08****Summary of Fit**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | 0,739699 |
| RSquare Adj                | 0,635579 |
| Root Mean Square Error     | 0,245122 |
| Mean of Response           | 2,140667 |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

**Fixed Effect Tests**

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 3,7262  | 0,0536   |

**Manova Fit****Between Subjects (Sum)****F Test**

|             | Value     | Exact F  | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------|-----------|----------|-------|-------|--------|
| All Between | 2,3778908 | 3,1705   | 6     | 8     | 0,0674 |
| Intercept   | 109,37928 | 875,0342 | 1     | 8     | <,0001 |
| Bloc        | 1,1080504 | 4,4322   | 2     | 8     | 0,0506 |
| Traitement  | 1,2698404 | 2,5397   | 4     | 8     | 0,1220 |

**Within Subjects (Contrast)****F Test**

|                         | Value     | Exact F | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------------------|-----------|---------|-------|-------|--------|
| All Within Interactions | 0,2064078 | 0,2752  | 6     | 8     | 0,9334 |
| Time                    | 2,9263325 | 23,4107 | 1     | 8     | 0,0013 |
| Time*Bloc               | 0,0558267 | 0,2233  | 2     | 8     | 0,8047 |
| Time*Traitement         | 0,1505811 | 0,3012  | 4     | 8     | 0,8693 |

**Response Zn (mg/kg) 08**

**Summary of Fit**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | 0,747158 |
| RSquare Adj                | 0,646021 |
| Root Mean Square Error     | 0,278768 |
| Mean of Response           | 1,734    |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

**Fixed Effect Tests**

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 4,8456  | 0,0279   |

**LSMeans Differences Tukey HSD**

$\alpha = 0,050$

LSMean[i] By LSMean[j]

| Mean[i]-Mean[j] | 0       | 1       | 2       | 3       | 4       |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Std Err Dif     |         |         |         |         |         |
| Lower CL Dif    |         |         |         |         |         |
| Upper CL Dif    |         |         |         |         |         |
| 0               | 0       | -0,3033 | -0,4333 | -0,8367 | -0,8133 |
|                 | 0       | 0,22761 | 0,22761 | 0,22761 | 0,22761 |
|                 | 0       | -1,0897 | -1,2197 | -1,623  | -1,5997 |
|                 | 0       | 0,48302 | 0,35302 | -0,0503 | -0,027  |
| 1               | 0,30333 | 0       | -0,13   | -0,5333 | -0,51   |
|                 | 0,22761 | 0       | 0,22761 | 0,22761 | 0,22761 |
|                 | -0,483  | 0       | -0,9163 | -1,3197 | -1,2963 |
|                 | 1,08968 | 0       | 0,65635 | 0,25302 | 0,27635 |
| 2               | 0,43333 | 0,13    | 0       | -0,4033 | -0,38   |
|                 | 0,22761 | 0,22761 | 0       | 0,22761 | 0,22761 |
|                 | -0,353  | -0,6563 | 0       | -1,1897 | -1,1663 |
|                 | 1,21968 | 0,91635 | 0       | 0,38302 | 0,40635 |
| 3               | 0,83667 | 0,53333 | 0,40333 | 0       | 0,02333 |
|                 | 0,22761 | 0,22761 | 0,22761 | 0       | 0,22761 |
|                 | 0,05032 | -0,253  | -0,383  | 0       | -0,763  |
|                 | 1,62302 | 1,31968 | 1,18968 | 0       | 0,80968 |
| 4               | 0,81333 | 0,51    | 0,38    | -0,0233 | 0       |
|                 | 0,22761 | 0,22761 | 0,22761 | 0,22761 | 0       |
|                 | 0,02698 | -0,2763 | -0,4063 | -0,8097 | 0       |
|                 | 1,59968 | 1,29635 | 1,16635 | 0,76302 | 0       |

| Level |     | Least Sq Mean |
|-------|-----|---------------|
| 3     | A   | 2,0933333     |
| 4     | A   | 2,0700000     |
| 2     | A B | 1,6900000     |
| 1     | A B | 1,5600000     |
| 0     | B   | 1,2566667     |

Levels not connected by same letter are significantly different.

**Response Zn (mg/kg) 09****Summary of Fit**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | 0,366355 |
| RSquare Adj                | 0,112897 |
| Root Mean Square Error     | 0,315466 |
| Mean of Response           | 1,294467 |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

**Fixed Effect Tests**

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 0,7736  | 0,5720   |

**Manova Fit****Between Subjects (Sum)****F Test**

|             | Value     | Exact F  | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------|-----------|----------|-------|-------|--------|
| All Between | 2,0923714 | 2,7898   | 6     | 8     | 0,0906 |
| Intercept   | 62,63907  | 501,1126 | 1     | 8     | <,0001 |
| Bloc        | 0,6590479 | 2,6362   | 2     | 8     | 0,1320 |
| Traitement  | 1,4333235 | 2,8666   | 4     | 8     | 0,0957 |

**Within Subjects (Contrast)****F Test**

|                         | Value     | Exact F | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------------------|-----------|---------|-------|-------|--------|
| All Within Interactions | 1,1575024 | 1,5433  | 6     | 8     | 0,2780 |
| Time                    | 4,5321989 | 36,2576 | 1     | 8     | 0,0003 |
| Time*Bloc               | 0,4062661 | 1,6251  | 2     | 8     | 0,2557 |
| Time*Traitement         | 0,7512363 | 1,5025  | 4     | 8     | 0,2888 |

## Résultats des analyses de variance effectuées sur les données de composition chimique du sol dans la couche 20-40 cm pour les traitements de fertilisation en lisier

### Response N-NH-4 (mg/kg) 08

#### Summary of Fit

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | -0,06082 |
| RSquare Adj                | -0,48515 |
| Root Mean Square Error     | 0,453115 |
| Mean of Response           | 1,443933 |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

#### Fixed Effect Tests

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 0,3498  | 0,8373   |

### Response N-NH-4 (mg/kg) 09

#### Summary of Fit

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | 0,536208 |
| RSquare Adj                | 0,350691 |
| Root Mean Square Error     | 0,396164 |
| Mean of Response           | 1,379933 |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

#### Fixed Effect Tests

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 0,4971  | 0,7392   |

### Manova Fit

#### Between Subjects (Sum)

##### F Test

|             | Value     | Exact F  | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------|-----------|----------|-------|-------|--------|
| All Between | 0,6537675 | 0,8717   | 6     | 8     | 0,5540 |
| Intercept   | 22,181207 | 177,4497 | 1     | 8     | <,0001 |
| Bloc        | 0,4554062 | 1,8216   | 2     | 8     | 0,2229 |
| Traitement  | 0,1983613 | 0,3967   | 4     | 8     | 0,8060 |

#### Within Subjects (Contrast)

##### F Test

|                         | Value     | Exact F | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------------------|-----------|---------|-------|-------|--------|
| All Within Interactions | 1,934934  | 2,5799  | 6     | 8     | 0,1076 |
| Time                    | 0,1522337 | 1,2179  | 1     | 8     | 0,3019 |
| Time*Bloc               | 1,6152779 | 6,4611  | 2     | 8     | 0,0214 |
| Time*Traitement         | 0,3196561 | 0,6393  | 4     | 8     | 0,6492 |

**Response N-NO3 (mg/kg) 08****Summary of Fit**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | 0,626829 |
| RSquare Adj                | 0,477561 |
| Root Mean Square Error     | 2,015654 |
| Mean of Response           | 3,589933 |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

**Fixed Effect Tests**

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 2,3207  | 0,1445   |

**Response N-NO3 (mg/kg) 09****Summary of Fit**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | 0,549939 |
| RSquare Adj                | 0,369915 |
| Root Mean Square Error     | 1,073723 |
| Mean of Response           | 3,2966   |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

**Fixed Effect Tests**

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 2,3799  | 0,1380   |

**Manova Fit****Between Subjects (Sum)****F Test**

|             | Value     | Exact F  | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------|-----------|----------|-------|-------|--------|
| All Between | 3,2910509 | 4,3881   | 6     | 8     | 0,0293 |
| Intercept   | 19,088271 | 152,7062 | 1     | 8     | <,0001 |
| Bloc        | 1,0825973 | 4,3304   | 2     | 8     | 0,0532 |
| Traitement  | 2,2084536 | 4,4169   | 4     | 8     | 0,0354 |

**Within Subjects (Contrast)****F Test**

|                         | Value     | Exact F | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------------------|-----------|---------|-------|-------|--------|
| All Within Interactions | 0,6559753 | 0,8746  | 6     | 8     | 0,5524 |
| Time                    | 0,0279458 | 0,2236  | 1     | 8     | 0,6490 |
| Time*Bloc               | 0,3295137 | 1,3181  | 2     | 8     | 0,3201 |
| Time*Traitement         | 0,3264616 | 0,6529  | 4     | 8     | 0,6410 |

**Response P (mg/kg) 08****Summary of Fit**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | -2,87055 |
| RSquare Adj                | -4,41876 |
| Root Mean Square Error     | 14,30241 |
| Mean of Response           | 46,71333 |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

**Fixed Effect Tests**

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 0,9406  | 0,4878   |

**Response P (mg/kg) 09****Summary of Fit**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | 0,616589 |
| RSquare Adj                | 0,463224 |
| Root Mean Square Error     | 9,264691 |
| Mean of Response           | 54,20667 |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

**Fixed Effect Tests**

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 1,1706  | 0,3921   |

**Manova Fit****Between Subjects (Sum)****F Test**

|             | Value     | Exact F  | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------|-----------|----------|-------|-------|--------|
| All Between | 0,7502085 | 1,0003   | 6     | 8     | 0,4851 |
| Intercept   | 38,164118 | 305,3129 | 1     | 8     | <,0001 |
| Bloc        | 0,2459847 | 0,9839   | 2     | 8     | 0,4149 |
| Traitement  | 0,5042238 | 1,0084   | 4     | 8     | 0,4572 |

**Within Subjects (Contrast)****F Test**

|                         | Value     | Exact F | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------------------|-----------|---------|-------|-------|--------|
| All Within Interactions | 1,5240799 | 2,0321  | 6     | 8     | 0,1740 |
| Time                    | 1,3093716 | 10,4750 | 1     | 8     | 0,0119 |
| Time*Bloc               | 1,0193352 | 4,0773  | 2     | 8     | 0,0601 |
| Time*Traitement         | 0,5047447 | 1,0095  | 4     | 8     | 0,4568 |

**Response K (mg/kg) 08****Summary of Fit**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | 0,679926 |
| RSquare Adj                | 0,551896 |
| Root Mean Square Error     | 21,16266 |
| Mean of Response           | 131,4333 |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

**Fixed Effect Tests**

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 0,2004  | 0,9312   |

**Response K (mg/kg) 09****Summary of Fit**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | 0,763044 |
| RSquare Adj                | 0,668261 |
| Root Mean Square Error     | 21,47173 |
| Mean of Response           | 131,4333 |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

**Fixed Effect Tests**

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 1,0401  | 0,4437   |

**Manova Fit****Between Subjects (Sum)****F Test**

|             | Value     | Exact F  | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------|-----------|----------|-------|-------|--------|
| All Between | 3,8589439 | 5,1453   | 6     | 8     | 0,0188 |
| Intercept   | 104,41179 | 835,2943 | 1     | 8     | <,0001 |
| Bloc        | 3,5490036 | 14,1960  | 2     | 8     | 0,0023 |
| Traitement  | 0,3099403 | 0,6199   | 4     | 8     | 0,6610 |

**Within Subjects (Contrast)****F Test**

|                         | Value     | Exact F | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------------------|-----------|---------|-------|-------|--------|
| All Within Interactions | 0,4389654 | 0,5853  | 6     | 8     | 0,7349 |
| Time                    | 0         | 0,0000  | 1     | 8     | 1,0000 |
| Time*Bloc               | 0,1189059 | 0,4756  | 2     | 8     | 0,6380 |
| Time*Traitement         | 0,3200595 | 0,6401  | 4     | 8     | 0,6487 |

**Response Ca (mg/kg) 08****Summary of Fit**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | -0,04793 |
| RSquare Adj                | -0,4671  |
| Root Mean Square Error     | 310,0421 |
| Mean of Response           | 1655,467 |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

**Fixed Effect Tests**

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 1,5919  | 0,2665   |

**Response Ca (mg/kg) 09****Summary of Fit**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | 0,277603 |
| RSquare Adj                | -0,01136 |
| Root Mean Square Error     | 179,9563 |
| Mean of Response           | 1560,733 |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

**Fixed Effect Tests**

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 0,3191  | 0,8576   |

**Manova Fit****Between Subjects (Sum)****F Test**

|             | Value     | Exact F  | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------|-----------|----------|-------|-------|--------|
| All Between | 0,4634747 | 0,6180   | 6     | 8     | 0,7128 |
| Intercept   | 86,635154 | 693,0812 | 1     | 8     | <,0001 |
| Bloc        | 0,1317427 | 0,5270   | 2     | 8     | 0,6095 |
| Traitement  | 0,331732  | 0,6635   | 4     | 8     | 0,6347 |

**Within Subjects (Contrast)****F Test**

|                         | Value     | Exact F | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------------------|-----------|---------|-------|-------|--------|
| All Within Interactions | 3,0135702 | 4,0181  | 6     | 8     | 0,0372 |
| Time                    | 0,5075686 | 4,0605  | 1     | 8     | 0,0787 |
| Time*Bloc               | 0,3262173 | 1,3049  | 2     | 8     | 0,3233 |
| Time*Traitement         | 2,6873529 | 5,3747  | 4     | 8     | 0,0212 |



**Response Mg (mg/kg) 08****Summary of Fit**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | -0,22712 |
| RSquare Adj                | -0,71797 |
| Root Mean Square Error     | 183,007  |
| Mean of Response           | 350      |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

**Fixed Effect Tests**

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 1,0895  | 0,4234   |

**Response Mg (mg/kg) 09****Summary of Fit**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | -0,43199 |
| RSquare Adj                | -1,00479 |
| Root Mean Square Error     | 112,6772 |
| Mean of Response           | 249,0667 |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

**Fixed Effect Tests**

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 0,1326  | 0,9659   |

**Manova Fit****Between Subjects (Sum)****F Test**

|             | Value     | Exact F | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------|-----------|---------|-------|-------|--------|
| All Between | 0,3633681 | 0,4845  | 6     | 8     | 0,8036 |
| Intercept   | 7,9192181 | 63,3537 | 1     | 8     | <,0001 |
| Bloc        | 0,0731766 | 0,2927  | 2     | 8     | 0,7539 |
| Traitement  | 0,2901915 | 0,5804  | 4     | 8     | 0,6856 |

**Within Subjects (Contrast)****F Test**

|                         | Value     | Exact F | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------------------|-----------|---------|-------|-------|--------|
| All Within Interactions | 1,8892345 | 2,5190  | 6     | 8     | 0,1132 |
| Time                    | 2,5796692 | 20,6374 | 1     | 8     | 0,0019 |
| Time*Bloc               | 0,0642926 | 0,2572  | 2     | 8     | 0,7794 |
| Time*Traitement         | 1,8249419 | 3,6499  | 4     | 8     | 0,0563 |

**Response AI (mg/kg) 08****Summary of Fit**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | 0,661108 |
| RSquare Adj                | 0,525551 |
| Root Mean Square Error     | 104,1399 |
| Mean of Response           | 1005     |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

**Fixed Effect Tests**

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 0,1409  | 0,9621   |

**Response AI (mg/kg) 09****Summary of Fit**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | 0,697954 |
| RSquare Adj                | 0,577135 |
| Root Mean Square Error     | 93,01989 |
| Mean of Response           | 990,1333 |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

**Fixed Effect Tests**

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 0,3852  | 0,8137   |

**Manova Fit****Between Subjects (Sum)****F Test**

|             | Value     | Exact F   | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------|-----------|-----------|-------|-------|--------|
| All Between | 2,2774672 | 3,0366    | 6     | 8     | 0,0746 |
| Intercept   | 199,40069 | 1595,2055 | 1     | 8     | <,0001 |
| Bloc        | 2,155981  | 8,6239    | 2     | 8     | 0,0101 |
| Traitement  | 0,1214863 | 0,2430    | 4     | 8     | 0,9061 |

**Within Subjects (Contrast)****F Test**

|                         | Value     | Exact F | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------------------|-----------|---------|-------|-------|--------|
| All Within Interactions | 0,4483261 | 0,5978  | 6     | 8     | 0,7264 |
| Time                    | 0,2646708 | 2,1174  | 1     | 8     | 0,1837 |
| Time*Bloc               | 0,2477513 | 0,9910  | 2     | 8     | 0,4126 |
| Time*Traitement         | 0,2005748 | 0,4011  | 4     | 8     | 0,8030 |

**Response Cu (mg/gkg) 08****Summary of Fit**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | 0,418493 |
| RSquare Adj                | 0,18589  |
| Root Mean Square Error     | 0,306907 |
| Mean of Response           | 1,785333 |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

**Fixed Effect Tests**

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 0,4849  | 0,7472   |

**Response Cu (mg/gkg) 09****Summary of Fit**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | 0,488996 |
| RSquare Adj                | 0,284594 |
| Root Mean Square Error     | 0,22723  |
| Mean of Response           | 1,724    |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

**Fixed Effect Tests**

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 1,5334  | 0,2808   |

**Manova Fit****Between Subjects (Sum)****F Test**

|             | Value     | Exact F  | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------|-----------|----------|-------|-------|--------|
| All Between | 1,0888558 | 1,4518   | 6     | 8     | 0,3048 |
| Intercept   | 100,68564 | 805,4851 | 1     | 8     | <,0001 |
| Bloc        | 0,6880201 | 2,7521   | 2     | 8     | 0,1232 |
| Traitement  | 0,4008357 | 0,8017   | 4     | 8     | 0,5569 |

**Within Subjects (Contrast)****F Test**

|                         | Value     | Exact F | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------------------|-----------|---------|-------|-------|--------|
| All Within Interactions | 0,7015648 | 0,9354  | 6     | 8     | 0,5188 |
| Time                    | 0,1132005 | 0,9056  | 1     | 8     | 0,3691 |
| Time*Bloc               | 0,1731978 | 0,6928  | 2     | 8     | 0,5279 |
| Time*Traitement         | 0,528367  | 1,0567  | 4     | 8     | 0,4367 |

**Response Zn (mg/kg) 08**

**Summary of Fit**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | 0,305472 |
| RSquare Adj                | 0,027661 |
| Root Mean Square Error     | 0,285479 |
| Mean of Response           | 1,491333 |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

**Fixed Effect Tests**

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 1,3754  | 0,3242   |

**Response Zn (mg/kg) 09**

**Summary of Fit**

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| RSquare                    | 0,269708 |
| RSquare Adj                | -0,02241 |
| Root Mean Square Error     | 0,196789 |
| Mean of Response           | 1,2176   |
| Observations (or Sum Wgts) | 15       |

**Fixed Effect Tests**

| Source     | Nparm | DF | DFDen | F Ratio | Prob > F |
|------------|-------|----|-------|---------|----------|
| Traitement | 4     | 4  | 8     | 0,3897  | 0,8107   |

**Manova Fit**

**Between Subjects (Sum)**

**F Test**

|             | Value     | Exact F  | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------|-----------|----------|-------|-------|--------|
| All Between | 0,7832758 | 1,0444   | 6     | 8     | 0,4634 |
| Intercept   | 65,405972 | 523,2478 | 1     | 8     | <,0001 |
| Bloc        | 0,2920176 | 1,1681   | 2     | 8     | 0,3589 |
| Traitement  | 0,4912582 | 0,9825   | 4     | 8     | 0,4686 |

**Within Subjects (Contrast)**

**F Test**

|                         | Value     | Exact F | NumDF | DenDF | Prob>F |
|-------------------------|-----------|---------|-------|-------|--------|
| All Within Interactions | 0,848117  | 1,1308  | 6     | 8     | 0,4236 |
| Time                    | 4,6707074 | 37,3657 | 1     | 8     | 0,0003 |
| Time*Bloc               | 0,0556277 | 0,2225  | 2     | 8     | 0,8053 |
| Time*Traitement         | 0,7924893 | 1,5850  | 4     | 8     | 0,2682 |