

Université de Montréal

**Effet de l'irrigation par l'eau usée sur la biomasse
aérienne et souterraine d'une culture intensive de saules
en courtes rotations**

par Ahmed Jerbi

**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**

Avril 2014

© Ahmed Jerbi, 2014

Université de Montréal
Faculté des études supérieures et postdoctorales

Ce mémoire intitulé :

**Effet de l'irrigation par l'eau usée sur la biomasse aérienne et souterraine d'une culture
intensive de saules en courtes rotations**

Présenté par :
Ahmed Jerbi

Évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Alain Cogliastro, Ph.D., président-rapporteur
Michel Labrecque, M.Sc., directeur de recherche
Jacques Brisson, Ph.D., membre du jury

Résumé

Le but de cette étude est de comprendre l'effet d'une irrigation par les eaux usées et /ou de la fertilisation par les engrais chimiques sur la productivité aérienne et souterraine d'une plantation de saule *Salix miyabeana* SX67 en CICR dans un contexte de filtre végétal. Nous avons d'une part évalué l'impact de diverses doses d'eau usées et/ou de la fertilisation minérale sur les rendements en biomasse ligneuse d'une culture de saules au cours d'un cycle de croissance de deux ans. D'autre part et pour la même période nous avons comparé le développement racinaire (biomasse, morphologie et distribution dans le sol) suite aux divers traitements. Les résultats ont montré qu'au terme de deux ans de croissance, les traitements par les eaux usées aussi bien que celle par les engrais a permis l'augmentation des rendements de la biomasse aérienne de notre culture de saules avec un effet plus prononcé suite au traitements des eaux usées qu'à celui du fertilisant chimique. Nous avons mesuré des productivités en biomasse aussi élevées que 39,4 Mg ha⁻¹ et 54,7 Mg ha⁻¹ et ce pour les parcelles qui ont reçu la plus grande quantité d'eaux usées, respectivement pour les saules non fertilisé et fertilisé (D3-NF et D3-F). La majeure partie du système racinaire était en superficie avec 92-96% des racines (racine fine et racine grosse) concentrées dans les premiers 40 cm de sol et nous avons trouvé que la biomasse des racines fines était comprise entre 1,01 et 1,99 Mg ha⁻¹. Généralement la fertilisation chimique n'a pas eu d'effet sur les rendements en biomasse des racines totales et/ou fines. Bien que l'irrigation par les eaux usées ait entraîné une réduction statistiquement significative de la biomasse racinaire, néanmoins cette réduction n'était pas linéaire (avec une réduction de la biomasse de D0 à D1, une augmentation de D1 à D2 pour réduire de nouveau de D2 à D3). Cette tendance porte à penser qu'au-delà d'une certaine quantité d'eau et de nutriments (suite à l'irrigation par les eaux usées), le développement du système racinaire des saules est affecté négativement, et bien que la biomasse aérienne soit restée élevée sous le traitement D3, nous pensons que le développement de la plante a été quelque peu déséquilibré. Aucun changement significatif n'a été constaté dans les traits morphologiques liés à l'irrigation par les eaux usées.

Mots-clés : Saules, CICR, eau usée, filtre végétal, racines fines.

Abstract

The aim of this study was to understand the effect of both wastewater and/or mineral fertilisation on above- and belowground biomass of a *Salix miyabeana* SX67 willow SRC in a filter vegetation context. We firstly assessed the impact of various doses of wastewater and/or mineral fertilization on biomass yield after two season growth. On the other hand and during the same period we estimated root production and assessed vertical root distribution and roots morphology in response to various treatments doses.

The results showed that after two years of growth both mineral fertilization and wastewater sewage fertilization enhanced willow aboveground biomass yields, with a more accurate effect due to wastewater irrigation than the mineral fertilization. We recorded high biomass yields such as 39.4 Mg ha⁻¹ and 54.7 Mg ha⁻¹ respectively for unfertilized and fertilized plants plots which benefits with the largest amount of wastewater (D3-NF and D3-F).

We found that most of the roots were contained in top soil layers with 92-96% of the total roots (including fine and coarse roots) concentrated within the first 40 cm of soil depth, fine root biomass ranged between 1.01 and 1, 99 Mg ha⁻¹. Neither mineral fertilization nor wastewater sewage irrigation showed an effect on total or fine roots biomass yields. Although we found a statistically significant decrease prior to wastewater treatments, this reduction was not linear (with a decrease of the biomass from D0 to D1, increased from D1 to D2 to go down again from D2 to D3). This pattern suggests that beyond a certain amount of water and nutrients (due to irrigation with wastewater) the development of the willow root system is negatively affected, and although the aboveground biomass remained high in the D3 treatment, we believe that the development of the plant was somewhat unbalanced. No significant changes were found in the deep morphological traits related to irrigation with sewage wastewater.

Keywords: willow, SRIC, wastewater, vegetal filter, fines roots.

Table des matières

Résumé	iii
Abstract	iv
Tables des matières	v
Liste des tableaux	vii
Liste des figures	ix
Liste des annexes	x
Liste des abréviations	xi
Remerciements	xiii
Contribution à l'article scientifique	xiv
Chapitre 1 Introduction	1
1.1 Culture intensive de saules en courtes rotations	3
1.2 La fertilisation des plantations de saules en CICR	4
1.2.1 Les fertilisants chimiques	4
1.2.2 Les fertilisants organiques	5
1.2.3 Utilisation des eaux usées dans les CICR	5
1.3 La biomasse et la distribution des racines de saules en CICR	6
1.4 Objectifs	9
1.5 Approches générales	10
Chapitre 2 Willow root development and morphology changes under different irrigation and fertilization regimes in a vegetation filter	13
2.1 Abstract	13
2.2 Introduction.....	14
2.3 Materiels and Methods.....	16
2.3.1 Site description.....	16
2.3.2 Plantation and site preparation	17
2.3.3 Experimental design.....	17
2.3.4 Meteorological conditions	19

2.3.5	Soil characteristics	20
2.3.6	Sampling	21
2.3.6.1	Characterization of soil, wastewater and leach water	21
2.3.6.2	Aboveground biomass assessment.....	21
2.3.6.3	Root sampling.....	22
2.3.7	Statistical analyses	24
2.4	Results.....	24
2.4.1	Wastewater and nutrient supply.....	24
2.4.2	Total Above and belowground biomass yield	25
2.4.3	Analysis of root parameters throughout the soil profile	27
2.5	Discussion.....	29
2.6	Conclusion	33
2.7	Acknowledgments.....	34
2.8	References.....	34
Chapitre 3 : Conclusion		39
Références bibliographiques		43
Annexe 1		xv
Annexe 2		xxi
Annexe 3		xxvii
Annexe 4		xlvi
Annexe 5		1
Annexe 6		lx

Liste des tableaux

Chapitre 2

Table 1: Chemical characteristics and nutrient concentration of wastewater used for willow irrigation.....	18
Table 2: Soil characteristics at the beginning of the trial.....	20
Table 3: Water and nutrient amounts supplied through rainfall, wastewater irrigation and mineral fertilization.....	24
Table 4: Effect of wastewater irrigation and fertilization on <i>Salix miyabeana</i> (SX67) above- and belowground biomass and R/S ratio.....	25
Table 5: Results of the multiple regression analysis of factors related to willow above- and belowground biomass yield and R/S.....	26
Table 6: Effect of wastewater irrigation and fertilization on <i>Salix miyabeana</i> (SX67) fine, coarse and total root biomass, FRLD, SFRL and SRA at different soil depths.....	28
Table 7: Results of the multiple regression analysis of factors related to total, coarse and fine root biomass, FRLD, FRSL and SRA at two soil depths	29

Annexe 1

Tableau 1: Rendement en biomasse sèche des saules aux différents traitements de fertilisation pour les deux années croissance	xv
Tableau 2: Ratio racines souches (R/S) et rendement en biomasse sèche des racines fines, grosse et totales récupérés au niveau de l'horizon 0-80 cm suite à l'application des divers doses d'irrigation et/ou de la fertilisation chimique.....	xvi
Tableau 3: Densité de longueur des racines fines, longueur spécifique des racines fines, superficie spécifique des racines et rendement en biomasse sèche des racines fines, grosses et totales récupérées au niveau de l'horizon 0-20	xvii

Tableau 4: Densité de longueur des racines fines, longueur spécifique des racines fines, superficie spécifique des racines et rendement en biomasse sèche des racines fines, grosses et totales récupérées au niveau de l'horizon 20-40 xviii

Tableau 5: Densité de longueur des racines fines, longueur spécifique des racines fines, superficie spécifique des racines et rendement en biomasse sèche des racines fines, grosses et totales récupérées au niveau de l'horizon 40-60 xix

Tableau 6: Densité de longueur des racines fines, longueur spécifique des racines fines, superficie spécifique des racines et rendement en biomasse sèche des racines fines, grosses et totales récupérées au niveau de l'horizon 40-60 xx

Annexe 6

Tableau 1: Anova des concentrations de macronutriments dans les feuilles aux cours de chaque première année de croissance pour chaque rotation suite au traitement d'irrigation par l'eau usée et à la fertilisation lx

Tableau 2: Anova des concentrations de macronutriments dans le sol au niveau de profondeur 0-20 cm à la fin de chaque rotation suite au traitement d'irrigation par l'eau usée et à la fertilisation lxi

Tableau 3: Anova des concentrations de macronutriments dans le sol au niveau de profondeur 20-40 cm à la fin de chaque rotation suite au traitement d'irrigation par l'eau usée et à la fertilisation lxii

Tableau 4: Anova des rendements de la biomasse ($\text{Mg ha}^{-1}\text{an}^{-1}$) ligneuse au cours de deux rotations et suite aux divers traitements d'irrigation et/ou de fertilisation..... lxiii

Tableau 5: Les quantités d'eau et les charges d'azote et de phosphore reçues par la plantation aux cours des quatre années de traitements lxiv

Tableau 6: Liste des composés et propriétés chimiques de l'eau analysée au niveau des lysimètres et limite des concertations pour l'eau potable (MENVIQ) lxv

Tableau 7: Caractérisation chimique de l'eau d'irrigation au cours des deux rotations lxvi

Liste des figures

Figure 1: Experimental layout of the field..... 17

Figure 2: Mean temperature, monthly rainfall and total rainfall during the growing seasons (2008, 2009 and 2010)..... 20

Figure 3: Layout of the soil core sample 22

Annexe 6

Figure 1: Schémas des macronutriments et/ou des métaux lourds qui dépassent les limites pour la qualité de l'eau suite au traitement d'irrigation par l'eau usée et à la fertilisation lxvii

Liste des annexes

Annexe 1 : Les tableaux des données brutes	xv
Annexe 2 : Résultats des analyses de variance effectuées sur les données de rendement de la biomasse aérienne et souterraine des saules totale suite aux différents traitements d'irrigation et/ou de fertilisation	xxi
Annexe 3 : Résultats des analyses de variance (Multivariées et Univariées) sur les données de rendement de la biomasse souterraine et les données des variables morphologiques racinaires des saules suite aux différents traitements d'irrigation et/ou de fertilisation	xxvii
Annexe 4 : Résultats des analyses de la régression multiple entre les données de rendement de la biomasse aérienne et souterraine totale des saules avec les données des variables associées aux conditions du sol	xlvi
Annexe 5 : Résultats des analyses de la régression multiple entre les données morphologiques et de rendement de la biomasse souterraine des saules avec les données des variables associées aux conditions du sol	l
Annexe 6 : Résultats préliminaires et analyses de variance sur les données recueillies au cours de quatre années de croissance 2009-2010-2011-2012 (deux rotations)	lx

Liste des abréviations

CICR	Culture intensive sur courtes rotations
SRIC	Short rotation intensive culture
SRWC	Short Rotation Woody Crops
RBD	Root Biomass Density (densité de biomasse des racines)
C-RB	Coarse Root Biomass (biomasse des racines grosses)
F-RB	Fine Root Biomass (biomasse des racines fines)
FRLD	Fine Roots Length Density (densité de longueur des racines fines)
SRL	Specific Root Length (longueur spécifique des racines)
SFRL	Specific Fine Root Length (longueur spécifique des racines fines)
SRA	Specific Root Area (superficie spécifique des racines)
wt%	weight percent (pourcentage de la masse)
mm	Millimètres
cm ³	Centimètres cube
cm cm ⁻³	Centimètre par centimètre cube
m ²	Mètres carré
m ² kg ⁻¹	Mètres carré par kilogramme
m g ⁻¹	Mètre par gramme
km	Kilomètre
Mg ha ⁻¹	Méga gramme (tonne) à l'hectare
kg ha ⁻¹	Kilogramme à l'hectare
mg l ⁻¹	Milligramme par litre
mg kg ⁻¹	Milligramme par kilogramme
g m ⁻³	Gramme par mètres cube
TRP	Total reactive phosphorus (phosphore totale réactif)
RSP	Reactive solved phosphorus (PO ₄ -P) (phosphore réactif dissous)
Ec	Electro-conductivity (conductivité électrique)
μS cm ⁻¹	Micro-Siemens par centimètre
ρ	Bulk density (densité apparente)
g cm ⁻³	Gramme par centimètre cube
R/S	Root/Shoot ratio (ratio Racine/Souche)

À mes parents Nessima et Béchir

Qu'Allah les bénit.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche et aussi conservateur du Jardin botanique de Montréal, Michel Labrecque, qui m'a accueilli à bras ouverts dans son équipe de recherche, et m'a donné l'opportunité de travailler sur ce projet qui me tient beaucoup à cœur. Michel m'a appuyé tout le long de mon projet de Maitrise, avec ses conseils et ses encouragements qui m'ont poussé à donner le meilleur de moi-même. Je remercie aussi notre post-doctorant et meilleur ami Werther Guidi Nissim, pour tous les conseils et les recommandations qui m'ont été d'un grand support tout au long de mon cheminement de recherche. Merci à Stéphane Daigle pour son aide inestimable dans la réalisation de la partie statistique du présent mémoire. Aussi je voudrais remercier Madame Hélène Lalande, responsable dans les laboratoires d'analyse chimique de la faculté de l'agriculture et des sciences environnementales de l'Université McGill, pour m'avoir assisté tout le long de mon stage de recherche.

Je ne voudrais pas oublier de remercier Dominic Desjardins, Matthew Mosseler, Alexandre Naud, Vanessa Grenier, Fanny Rohrbacher, Karina Riviello, Nicola Fontana et Claude Labrecque qui m'ont tous aidé dans les diverses tâches d'échantillonnages de l'eau, de la terre, des racines ainsi que dans les mesures de la biomasse et parfois dans des conditions climatiques peu accommodantes. Merci à Francis et Mario Allard pour leur support logistique sur le terrain.

Cette recherche a été réalisée dans le cadre d'un projet de Laboratoire rural financé par le Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire et impliquant plusieurs partenariats dont Agro Énergie, la Caisse Populaire Desjardins de Saint-Roch-de-l'Achigan, la Commission scolaire des Samares (CSS), le Centre de valorisation des plantes, Hydro-Québec et à la municipalité régionale de comté de Montcalm (MRC- Montcalm).

Contribution à l'article scientifique

Willow root development and morphology changes under different irrigation and fertilization regimes in a vegetation filter

Ahmed Jerbi, Werther Guidi Nissim, Rémy Fluet et Michel Labrecque.

Article scientifique soumis et accepté pour publication au journal BioEnergy Research (Impact Factor 4,25) avec corrections majeures.

Ahmed Jerbi a été le principal auteur de cet article scientifique présenté dans le chapitre 2 du présent mémoire. Werther Guidi Nissim (stagiaire post doctoral) et mon directeur Michel Labrecque ont supervisé les actions sur le terrain ainsi que l'analyse des résultats.

Chapitre 1 : Introduction

La flambée des prix des énergies fossiles a suscité l'intérêt de plusieurs gouvernements à l'égard des énergies renouvelables. Ceci a favorisé le développement de végétaux pour des fins énergétiques en tant que moyen de production d'une énergie durable, propre et permettant la réduction des émissions des gaz à effets de serre (Gross et al., 2003). Considérée comme pionnière dans le domaine du développement des cultures énergétique, la Suède, a mis en place dès les années 70 de vastes superficies de plantations d'arbres à croissance rapide afin de les utiliser pour des fins énergétiques et environnementales. En outre, on a vu naître des systèmes où les plantations ont été utilisées comme un filtre végétal pour le traitement des eaux usées (Christersson, 2010) permettant ainsi la production de biomasse mais également le traitement des contaminants contenus dans les effluents (Mirck et al., 2005).

Au Québec, les eaux usées constituent une source majeure de pollution des écosystèmes aquatiques. Et bien que la plupart des municipalités possèdent leurs propres systèmes d'assainissement (stations d'épuration), néanmoins de grandes quantités de contaminants organiques se retrouvent dans les cours d'eau et contribuent ainsi à l'eutrophisation des milieux. Il est aussi à rappeler que le traitement des eaux usées par les centres d'assainissement est un procédé qui est long et ne garantit pas une totale décontamination des eaux traitées (Environnement Canada, 2001). Par ailleurs, au Québec le développement de l'agriculture basée sur des approches productivistes a entraîné une certaine déprise donnant lieu à de vastes superficies de terres abandonnées. Ces terrains peuvent potentiellement être utilisés pour le développement à grand échelle de cultures de saules et de peupliers pour la production de biomasse et d'énergie (Labrecque & Teodorescu, 2005) et pourraient idéalement être couplées à des fonctions environnementales comme le traitement des eaux usées.

Les saules (*Salix*) ont été largement préférés aux autres plants pour la mise en place des couverts végétaux filtrants. En effet plusieurs études rapportent que les saules en culture intensive sur courtes rotations (CICR) peuvent atteindre de hauts rendements en biomasse, possèdent un taux élevé d'évapotranspiration et sont capables de capter et

d'assimiler de grandes quantités de nutriments et d'éléments traces (Dimitriou & Aronsson, 2003).

Bien que le système racinaire des saules soit le principal organe associé à la captation et à l'assimilation de l'eau et des nutriments, très peu d'études ont fait état de résultats portant sur la structure, la morphologie et la distribution des racines des saules cultivés dans les CICR (Stadnyk, 2010).

Plusieurs recherches stipulent que les racines des saules peuvent constituer le principal organe de réserve en azote (Fircks et al., 2001) et que la biomasse souterraine peut être comparable ou même supérieure à la biomasse aérienne (Isebrands et al., 1996; Karp et al., 2011). Cependant, cette affirmation est contredite par d'autres travaux dont ceux de Heller et al. (2003) et de Pacaldo et al. (2010) qui rapportent des ratios supérieurs pour la partie aérienne. Une quantification de la biomasse souterraine permettrait une meilleure compréhension de la dynamique du carbone dans ces plantations ainsi que les facteurs impliqués dans le cycle des racines de saules, et nous aidera par conséquent dans l'amélioration de la gestion de l'exploitation et des techniques associées à ces pratiques (Volk et al., 2001).

Ainsi, le premier chapitre de ce mémoire comporte une brève description des cultures de saules en CICR, avec survol sur la situation mondiale et québécoise quant au développement de ce type de culture. La revue de la littérature témoigne du fait qu'aucune étude utilisant les saules comme filtre végétatif n'a été faite au Québec et qu'au niveau international, très peu d'études ont été menées quant au développement et à la morphologie du système racinaire des saules dans le cadre de ces systèmes filtrants. Dans ce premier chapitre, il y aura aussi une présentation des objectifs généraux de mon travail de recherche ainsi qu'une brève description de l'approche générale des travaux. Tous les résultats de mon travail de maîtrise sont présentés dans un article scientifique qui constitue le deuxième chapitre. Le dernier chapitre comporte la conclusion générale de ce mémoire. Finalement, tous les résultats des analyses de variance et de régression effectuées sur les données sont présentés en annexe.

1.1 Culture intensive de saules en courte rotations

La culture intensive en courtes rotations (CICR) constitue un mode de production de biomasse ligneuse à haute densité et suivant des récoltes répétées de la biomasse aérienne. Cette forme de culture se fait essentiellement avec des plantes ligneuses à croissance rapide tel les peupliers hybrides et les saules surtout dans les régions tempérées, en Europe et en Amérique du Nord (Agro Énergie, 2007). Le développement des cultures de saules en CICR constitue un des moyens prometteurs pour substituer les énergies fossiles et réduire les émissions de gaz à effets de serre (GES) dans l'atmosphère (Labrecque et al., 1998). En plus de leur capacité à produire de hauts rendements en biomasse, les saules en CICR présentent de nombreux avantages. En outre, on notera leur grand taux d'évapotranspiration et leur capacité à capter et assimiler de grandes quantités de nutriments et d'éléments traces (Dimitriou & Aronsson, 2003 ; Dimitriou & Aronsson, 2011).

Les principes de culture des arbres en CICR impliquent que les tiges des arbres ou arbustes sont récoltées d'une façon répétitive à chaque deux, trois ou quatre ans d'intervalle. On peut répéter ces récoltes de biomasse aérienne plusieurs fois et potentiellement jusqu'à 7 ou 8 fois (20 à 25 ans) au cours de la vie productive d'une plantation (Dimitriou & Aronsson, 2005). La coupe des tiges des saules lors des récoltes permet le développement de nouveaux rejets au niveau des souches laissées au sol, ceci permettra le déploiement de nouvelles tiges et donc à augmenter la production lors des rotations subséquentes. Les CICR se font en cultivant les plants selon de fortes densités autour de 16 000 à 18 000 plants par hectare et permettent de produire annuellement entre 15 et 20 Mg ha⁻¹ de biomasse sèche (Labrecque & Teodorescu, 2001). Les différents travaux menés un peu partout dans le monde et notamment en Grande Bretagne, en Suède et aux États Unis témoignent de rendements annuels variant entre 2 et 27 Mg ha⁻¹ (Adegbedi et al., 2001; Aylott et al., 2008; Christersson, 2010). Ce large écart entre les données de production rapporté entre les différentes études est dû aux caractéristiques édaphiques et climatiques distinctes et propres au site de culture, à la densité de plantation choisie, à la longueur des rotations et aux différents niveaux d'eau et de

fertilisant apportés aux plantations au cours de leurs cycles de croissance (Adegbidi et al., 2001; Baligar et al., 2007; Labrecque et al., 1998; Volk et al., 2006).

Au Québec, les premières plantations énergétiques de grandes surfaces ont été établies au milieu des années 90 (Labrecque & Teodorescu 2003; Grislis & Labrecque 2009), et durant quinze ans de multiples recherche ont été réalisées dans la province dans le but de développer les cultures de saules et ce par la valorisation de la production de la biomasse, l'amélioration des techniques d'entretien des plantations et par le choix judicieux des cultivars adaptés à notre climat (Guidi & Labrecque, 2009). Ces travaux ont permis de démontrer que les conditions pédoclimatique du sud du Québec sont favorables pour le développement des cultures de saules en courtes rotations (Labrecque & Teodorescu, 2003).

1.2 La fertilisation des plantations de saules en CICR

Dans les CICR, il est de première importance d'amender régulièrement les arbres par des apports en nutriments et surtout par l'azote, qui est considéré comme l'élément limitant pour la croissance des plantes et le principal facteur à considérer pour prévoir des hauts rendements en biomasse (Adegbidi et al., 2003; Labrecque et al., 1998; Guidi et al., 2013). En effet, dans les CICR la fréquence des recépages peut diminuer la fertilité du sol et compromettre la durabilité de la plantation du fait que des grandes quantités de nutriments sont exportées du système lors du recépage des tiges. Adegbidi et al. (2001) ont trouvé que pour une biomasse annuelle de 15-22 Mg ha⁻¹(matière sèche) respectivement 75–86 kg N /ha, 10–11 kg P /ha, 27–32 kg K /ha seront extraits par la récolte des tiges. Des valeurs similaires ont été rapportées par Labrecque et al. (2003) pour des CICR de saules établis depuis plusieurs années dans le sud du Québec.

1.2.1 Les fertilisants chimiques

Les engrais chimiques industriels utilisés dans la fertilisation des cultures des saules en courtes rotations représenteraient 40% du coût de production (Heller et al., 2003). L'application prolongée, successive et non contrôlée des fertilisants chimiques contribue à l'acidification du sol et à l'eutrophisation des milieux, sans oublier que les processus de

fabrication des engrais eux-mêmes sont des facteurs responsables de l'augmentation des gaz à effet de serre (GES) (Gilbert et al., 2011).

1.2.2 Les fertilisants organiques

L'utilisation des résidus organiques comme fertilisant dans les CICR permet de valoriser la production de la biomasse, tout en étant un support efficace dans la gestion des divers déchets issus des activités humaines. En effet, ces produits et déchets provenant principalement de la production bovine, de l'aviculture et des activités humaines, peuvent être un substitut aux fertilisants chimiques standards en assurant la demande en nutriments des plants de saules, ainsi qu'en diminuant les coûts liés à l'achat des fertilisants industriels traditionnels (Adegbidi et al., 2003). Ces résidus organiques peuvent ainsi permettre l'augmentation du ratio ou gain énergétique (énergie de la biomasse récoltable / énergie consommée pour avoir cette biomasse) des saules de près de 40% tout en assurant des rendements en biomasse comparables à ceux obtenus par les engrais minéraux (Heller, 2003; Quaye et al., 2011).

1.2.3 Utilisation des eaux usées dans les CICR

L'utilisation d'eau usée pour l'irrigation est une pratique ancestrale qui était déjà utilisée au moyen âge pour certaines cultures agricoles (Dimitriou, 2005). De nos jours les eaux usées (essentiellement celles provenant des centres d'épuration) sont considérées comme une source en nutriments assez bien balancée et qui peuvent être utilisées pour la fertilisation de nombreuses plantations. Mais pour des raisons sanitaires, leur usage a été restreint aux cultures non destinées à l'alimentation humaine ou animale (Dimitriou & Aronsson, 2003). Ainsi, dans les cultures intensives où le principal but est de produire de la biomasse énergétique, ces eaux usées peuvent être très efficaces pour augmenter la croissance, valoriser les rendements de la biomasse tout en permettant leur filtration (Aasamaa et al., 2010).

L'épuration des eaux usées par des cultures intensives de saules est une pratique qui a été initiée en Suède et a été largement adoptée par d'autres pays par la suite. Le choix explicite des saules s'explique par la capacité de ces végétaux à produire de hauts rendements en biomasse, d'avoir une grande capacité d'évapotranspiration et d'être capables d'assimiler certains métaux contaminants (Dimitriou & Aronsson, 2003;

Dimitriou & Aronsson, 2011). Dimitriou & Aronsson (2004) ont rapporté que les quantités d'azote et de phosphore en solution dans les eaux usées étaient adéquates pour subvenir aux besoins nutritionnels des saules en cultures intensives sans que cela ne demande d'ajout additionnel d'engrais chimique. En effet, les eaux usées peuvent contenir de grandes quantités d'azote 500-1000 mg N/L, que les saules pourront aisément absorber étant donné leur grande capacité d'utilisation de celui-ci (Dimitriou & Aronsson, 2004). Mirck et al. (2005) affirmaient que 60% de l'azote en solution dans l'eau usée utilisée pour l'irrigation des saules serait assimilé dans la biomasse, alors qu'une grande partie de la fraction restante entrerait dans la composition minérale du sol et/ou serait perdue par dénitrification. On estime qu'un tel système permettra de retirer annuellement plus de 200 kg N/ha (Dimitriou & Aronsson 2005). Dimitriou & Aronsson (2011) ont également montré que même l'application de très fortes doses d'eau usée (370 kg N/ha/an et 30 kg P/ha/an) n'avaient pas occasionné de lessivage. Dimitriou & Aronsson (2004) ont trouvé que suite à l'application de deux types de fertilisants (eau usée *versus* un fertilisant liquide, tous les deux à des doses équivalentes à 320 kg N/ha) sur une plantation de saules cultivés en conteneurs, les concentrations de NO_3^- lessivé étaient beaucoup moins élevées dans le cas du traitement par l'eau usée que celle par le fertilisant liquide. Ils expliquent que cette différence dans les niveaux de nitrate lessivé par la différence des formes d'azote dans les deux effluents. La grande majorité de l'azote dans les eaux usées est sous forme de NH_4^+ , alors que le fertilisant liquide ne renferme que 10% de NH_4^+ . En effet, même si dans le cas les traitements par les eaux usées une importante partie de l'azote ammoniacal sera nitrifiée en NO_3^- (et sera ainsi captée par les racines des saules), il est à préciser qu'une partie non négligeable de NH_4^+ restera dans le sol et se liera aux agrégats (essentiellement aux particules d'argile), minimisant par ce fait d'éventuels risques de lessivages (Dimitriou & Aronsson, 2004).

1.3 La biomasse et la distribution des racines des saules en CICR :

Bien que de nombreuses études se soient intéressées aux rendements de la biomasse aérienne des saules en culture intensive et aux moyens de sa valorisation, il est regrettable que la plupart de ces travaux n'aient pas inclus l'étude des racines et leurs implications dans de tels processus. Plusieurs travaux font état du fait que la biomasse des racines

pourrait égaler ou même surpasser celle de la partie aérienne (Rytter, 1999). En effet les saules sont des espèces pérennes, qui une fois arrivés à maturité (au-delà de la deuxième ou de la troisième année suivant la mise en place) possèdent un système racinaire très développé. Les racines des saules leur permettent de prospecter efficacement le sol et d'augmenter l'absorption de l'eau et des nutriments (Volk et al., 2006) et plusieurs recherches ont rapporté leurs implications directes dans la majeure partie des processus de filtration des effluents, de la stabilisation des milieux et de la réduction de l'érosion dans les milieux riverains (Heller et al., 2003).

Dans le cadre des CICR des saules, très peu de recherches ont été faites sur la distribution et les rendements de la biomasse souterraine (Volk et al., 2001; Volk et al., 2006) et encore moins sur l'effet de la fertilisation et de l'irrigation sur le complexe racinaire (Heaton et al., 2002). Un de ces travaux est celui de Rytter & Hansson (1996) qui rapportent que la fertilisation, l'irrigation goutte à goutte et une litière riche étaient responsables d'une concentration des racines plus près de la surface qu'en profondeur, et dans le même contexte les auteurs ont trouvé que l'application de grandes doses de nutriments avait davantage contribué à la croissance des pousses plutôt que celles des racines. Faulkner and Fayle (1979) avaient trouvé une corrélation entre la distribution de la profondeur des racines de certains peupliers et les rendements en biomasse. Il semble important que dans le cas des cultures de saule, davantage d'effort soit investi pour mieux comprendre la densité ainsi que la distribution des racines en relation avec la production aérienne. Ceci permettra essentiellement de mieux comprendre les mécanismes associés à l'allocation du carbone entre les différents organes des saules (Rytter & Rytter, 2011) et les limites du potentiel de rétention des eaux usées par les racines.

L'efficacité d'un système filtre utilisant une culture de saules en CICR repose sur l'efficacité du système racinaire à capturer et à assimiler l'eau usée et les divers contaminants qui y sont en solution, et de ce point, il paraît donc essentiel de quantifier la biomasse racinaire et notamment celles des racines fines (diamètre <2mm). En effet, les racines fines occupent une grande partie du volume du sol et sont les parties les plus dynamiques et les plus actives physiologiquement au niveau du système racinaire (Gwenzi et al., 2011). À l'opposé, les racines de plus fort diamètre (racines grosses) ont

davantage un rôle d'ancrage et sont plutôt localisées plus près de la surface. Toutefois dans la littérature actuelle, il existe un grand débat concernant l'abondance des racines fines, dont certains chercheurs supposent qu'elle est favorisée par des sols riches en nutriments alors que d'autres affirment le contraire (Gower & Vitousek, 1989; King et al., 2002; Nadelhoffer et al., 1985; Stadnyk, 2010).

Les caractéristiques physiques et chimiques du sol telles le pH, la texture, la profondeur des horizons et la densité apparente sont aussi considérées comme des facteurs influençant la distribution des racines dans un sol donné (Bennie, 1991) et partant de ce point, des efforts devront être faits pour mieux comprendre de telles relations.

Des données sur certains caractères morphologiques des racines de saule tel que la concentration des racines par un volume de sol pourra orienter le choix de culture pour une espèce donnée. En effet, Ericsson (1984) rapporte qu'une concentration de 0,5g de racines /litre de sol est nécessaire pour permettre une bonne captation des nutriments et éviter des risques potentiels de lessivage (Volk et al., 2001). De ce fait, la biomasse racinaire peut être utilisée comme une indication de l'efficacité d'un cultivar quant à l'utilisation des nutriments et pourra ainsi permettre des prédictions quant à la période de la fertilisation (Volk et al., 2001). Aussi, la densité de la surface racinaire (DSR) pourrait être utilisée comme une référence pour le choix de la culture, ainsi des cultivars avec des faibles DSR pourront être utilisés pour réduire la compétitivité intra-spécifique. Selon cette même logique, des espèces qui possèdent une grande DSR pourraient être utilisées pour combattre les mauvaises herbes, vu que la compétitivité entre ces derniers et les saules se fait essentiellement pour les ressources nutritive et hydrique et non pas pour la lumière (Volk et al., 2001).

1.4. Objectifs

Mon projet de maîtrise vise à mieux comprendre les effets de l'application de diverses doses d'eaux usées sur la biomasse aérienne et racinaire d'une plantation de saule (*S. miyabeana* SX67) en culture intensive. La réalisation de cette étude tient son originalité du fait que les résultats qui en découleront permettront de mieux juger du potentiel d'une plantation de saules pour filtrer les effluents de la municipalité (enjeux environnementale et écologique) et pour valoriser la biomasse ainsi produite (enjeu économique).

Il est à indiquer que l'actuelle étude s'intègre à un plus vaste projet de démonstration qui a été entrepris en 2008 et qui s'est terminé à la fin de l'année 2013. Il a permis de suivre l'impact de l'irrigation par des eaux usées d'une plantation de saules sur deux rotations (2009-2010 et 2011-2012). Mon étude a été entreprise au printemps 2011 et a principalement porté sur le développement des racines des saules dans un tel contexte. Mon travail a donc considéré les conditions et les traitements qui ont été caractérisés préalablement à mes échantillonnages. Ainsi, certains aspects de la méthodologie décrits ci-dessous (la mise en place du dispositif, l'installation des lysimètres, la caractérisation de l'eau de l'effluent et les analyses chimique du sol) ont été réalisés par d'autres membres de l'équipe avant mon implication dans ce projet.

Plus spécifiquement l'étude a pour but de :

- Comparer la croissance et les rendements des saules durant un premier et second cycle d'exploitation, suivant diverses doses d'application d'eau usée.
- Mieux comprendre l'impact de l'irrigation des eaux usées, des fertilisants et du sol (type du sol, propriétés physico-chimique du sol) sur la production de biomasse des racines (surtout les racines fines <2mm) ainsi que sur la distribution de celles-ci dans les horizons du sol.

1.5. Approches générales

Dispositif expérimental

Le site expérimental se situe à Saint-Roch-de-l'Achigan dans la région de Lanaudière au nord de Montréal. Une plantation de 4 hectares de saules *Salix miyabeana* (SX67) a été établie en 2008, suivant une densité de 16 000 plants à l'hectare (35 cm entre deux plants; 1,8 m entre les rangs). Au sein de cette plantation une surface d'étude d'une superficie de 0,72 hectares (7200 m²) a été délimitée. Cette dernière comprenait 4 blocs, incluant chacun de façon aléatoire huit traitements, constituant un total de 32 parcelles : 4 blocs x 8 traitements.

Durant les deux premières années du projet, l'irrigation a débuté la deuxième semaine de juin et a été arrêtée à la mi-octobre couvrant ainsi la saison de croissance des saules avec une moyenne de 140 jours d'irrigation. Les quantités d'eau usée appliquées étaient (D1=300 mm, D2=393 mm, et D3=584 mm) pour l'année 2009 et (D1=414 mm, D2=467 mm, et D3=794 mm) pour l'année 2010. Une dose de 100 kg N ha⁻¹ d'engrais chimique tertiaire (N-P-K) de fraction 30.9-9.2-9.2 a été épandue sur 16 parcelles (la moitié du dispositif) vers la mi-juin de la première année de croissance.

Un échantillonnage du sol a été fait au courant du mois de mai 2008 afin de permettre l'identification des nutriments disponibles et leurs concentrations avant la mise en place de la plantation. Un autre échantillonnage a été refait en novembre 2010 juste après la fermeture du système d'irrigation pour permettre la caractérisation du sol suite aux différentes doses d'irrigation et/ou de fertilisation et ainsi juger des effets à moyen terme de ces traitements.

Des lysimètres ont été installés à 1m de profondeur au centre de chaque parcelle pour pouvoir collecter l'eau de percolation lessivée vers la partie souterraine au voisinage du système racinaire. L'échantillonnage se faisait à une fréquence bihebdomadaire, il commençait généralement vers le début du mois de juin et prenait fin à la troisième semaine d'octobre. Tous les échantillons sont conservés dans le réfrigérateur sous une température de 4°C. De même, des échantillons d'eau ont été prélevés directement au

niveau du conduit d'alimentation du système d'irrigation afin de permettre la spéciation et la caractérisation des éléments apportés à la culture.

Vers la fin de la première saison de croissance (mi-novembre), des mesures de croissance et de biomasse ont été prises afin de quantifier la biomasse produite. Vers la fin de la deuxième année (novembre 2010), un recépage total de la plantation a été réalisé.

Toutes ces informations préalables à mon étude seront importantes à considérer pour l'interprétation des résultats.

Pour les mesures de la distribution et de la biomasse des racines des saules, un carottage a été fait dans chaque parcelle au début de la saison 2011. Les carottes d'une longueur de 80 cm ont été découpées en quatre sous-carottes de 20 cm de longueur afin d'avoir la distribution des racines selon quatre niveaux de profondeurs (0-20cm; 20-40 cm; 40-60cm et 60-80cm). Dans chacune des 128 sous-carottes (1 réplica x 32 parcelles x 4 profondeurs), une fraction de terre sans les racines a été prélevée afin de permettre de caractériser le pH, l'électroconductivité (Ec), et de la densité apparente (ρ) du sol. Dans chacun de ces sous échantillons, les racines ont été isolées, nettoyées et par la suite numérisées pour permettre les mesures morphologiques suivantes : le FRLD (Fine Root Length Density cm cm^{-3}), le RBD (Root Biomass Density g m^{-3}), le SFRL (Specific Fine Root Length m g^{-1}) et le SRA (Specific root area m^2kg^{-1}).

Des mesures de croissance et de la masse sèche ont été prises sur chacune des 32 parcelles durant les cinq années qu'a duré le projet afin d'estimer et de comparer les rendements de la biomasse pour chacune des deux rotations soit 2009-2010 et 2011-2012. Les mesures de croissance (le nombre des tiges, leur hauteur et le diamètre de la tige la plus longue) ont été prises sur six plants choisis aléatoirement dans chacune des parcelles. Les plants ont par la suite été récoltés et pesés. Pour la détermination du taux d'humidité dans la biomasse ligneuse, huit échantillons ont été pris (deux plants par traitement). Les échantillons qui étaient composés des trois différentes parties des tiges (base, milieu et bout) ont été pesés, et séchés (à une température de 75°C pendant 72heures) et repesés de nouveau. La compilation de toutes ces variables (en tenant compte du décompte de la

mortalité fait pour chaque parcelle) nous a permis de prédire la quantité de biomasse produite sous l'effet des différents niveaux de traitements. Vers la fin des deux cycles (novembre 2010 et 2012), un recépage total de la plantation a été réalisé, et les mesures de la biomasse récoltables par machinerie ont été comparées à celles estimées afin de juger sur les pertes occasionnées par la récolte mécanique.

Des analyses chimiques de l'eau souterraine ont été faites suite à l'application des différentes doses d'eau usée et ce pour évaluer les éventuels risques de lessivage, par la quantification des nutriments et d'éléments traces contenus dans l'eau de percolation. Les méthodes d'échantillonnage et d'analyse sont détaillées au Chapitre 2.

Des feuilles ont été récoltées et analysées chimiquement pour permettre la comparaison des statuts nutritifs des saules lorsque soumis aux différents traitements. Ces résultats vont permettre d'estimer le potentiel d'interception et de captation des divers éléments en solution dans les eaux par le clone *Salix miyabeana* SX67 et ainsi de juger de la capacité de filtration et de décontamination d'un système de saules en CICR.

Les données préliminaires de ces analyses de feuilles sont données à titre indicatif dans l'Annexe 6 et serviront la rédaction d'un autre article ultérieurement à la publication du présent mémoire.

Chapitre 2: Willow root development and morphology changes under different irrigation and fertilization regimes in a vegetation filter¹

Ahmed Jerbi¹, Werther Guidi Nissim², Rémy Fluet³ and Michel Labrecque⁴

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

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

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

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

2.1. Abstract

Determining the appropriate wastewater dose to supply nutrients while avoiding overirrigation is essential for achieving more balanced above- and belowground development of the plants, thereby ensuring high filtering functionality of a willow vegetation filter system.

The evaluation of aboveground biomass and root development of a 3-year old willow vegetation filter in response to three increasing doses of secondary treated urban wastewater under both fertilized and unfertilized conditions. Fine, coarse and total root biomass, fine root length density (FRLD), specific fine root length (SFRL) and specific root area (SRA) were assessed in soil core samples collected at four different depths (0-20cm, 20-40cm, 40-60cm and 60-80cm) in all treatments. While aboveground biomass increased as wastewater amounts and fertilization increased (from 23.89 Mg ha⁻¹ in non-irrigated condition to 47.07 Mg ha⁻¹ in the highest wastewater dose, from 31.5 Mg ha⁻¹ in unfertilized plots to 40.1 Mg ha⁻¹ in the fertilized), total and fine root biomass decreased when willow was irrigated with the highest wastewater dose (i.e. total root biomass: 2.54 Mg ha⁻¹ in non-irrigated condition – 1.36 Mg ha⁻¹ in the highest wastewater dose). No changes in root morphological traits (FRLD, SFRL, SRA) were detected following either wastewater or fertilization treatment.

KEYWORDS:

Salix, SRC, Phytoremediation, Rhizofiltration, Wastewater.

¹ Cet article vient d'être accepté pour publication au journal BioEnergy Research (Impact Factor 4,25) avec corrections majeures. Les corrections proposées par les réviseurs ont été intégrées à la version présentée ici.

2.2. INTRODUCTION

The use of short-rotation coppice (SRC) plantations as vegetation filters is a rather well known phytotechnology that shows great potential for improving the quality of pretreated wastewater prior to discharge into a water body and for enabling the reuse of municipal sewage sludge rather than disposal in a landfill. Originally conceived in Sweden at the beginning of 1990s (Perttu, 1993), this approach has been adopted in other European countries (Truu *et al.*, 2009) to remediate urban and/or agricultural wastes. In cold-temperate regions, the most common species used in this system are fast-growing *Salicaceae* like willows and poplars, whose advantages include easy establishment, a high evapotranspiration rate (Guidi *et al.*, 2008) and efficient nutrient uptake and retention rates (Mirck *et al.*, 2005). In addition, they produce high quality biomass feedstock that can eventually be used as a clean and sustainable energy source (Dimitriou and Rosenqvist, 2011). Both genus, especially willows, are able to withstand soil waterlogging to some extent (Guidi and Labrecque, 2010), also surviving under permanently irrigated (and sometimes flooded) conditions.

Studies have been carried out recently to test either the efficiency of such a filtration system in terms of nutrient uptake/retention (Perttu and Kowalik, 1997), or the effect of wastewater and sludge supply on aboveground biomass yield (Elowson, 1999; Aronsson *et al.*, 2002), or both (Dimitriou and Aronsson, 2011). The efficiency of willow vegetation filters has been studied mainly by Northern European researchers over the past 10-15 years. Many studies have demonstrated the efficiency of the system for uptake of nitrogen, phosphorus (Dimitriou and Aronsson, 2011) and trace elements (Dimitriou *et al.*, 2006) from soil following wastewater and sewage sludge application. Some studies have suggested that high aboveground biomass yields and high nitrogen content in willow leaves following wastewater application imply that the root system effectively takes up and removes nitrogen from irrigation water, making willow stands efficient green filters. For example, Dimitriou and Aronsson (2011) attributed the very low ammonia and nitrate concentrations found in drainage water of willows and poplars grown for two years in lysimeters to the plants' well-established root system, and consequently suggested that these species show great potential for wastewater treatment even under high irrigation rates. Since roots are responsible for water and nutrient uptake,

the filtering capacity and thus the efficiency of the entire system rely on root system development and functioning.

Despite its key role in the remediation process, to date, few studies have been conducted to examine the root system of willow vegetation filters. Very little is known about specific root distribution in SRC stands (Volk *et al.*, 2001; Volk *et al.*, 2006; Pacaldo *et al.*, 2013), and even less about the influence of fertilization and irrigation on the distribution and quantity of roots in fast-growing energy crops, especially in the context of vegetation filter systems (Heaton *et al.*, 2002).

Several parameters can be used to describe the development of plant roots cultivated under diverse conditions, including willow in SRC. Vertical and horizontal root development in willow SRC has been shown to be influenced by soil properties, plant spacing and management as well as the intrinsic characteristics of the genotype (Volk *et al.*, 2001). Willow (*Salix viminalis* L.) roots have typically been shown to reach an average depth of 25-30 cm during the first growing season, extending to greater depths over subsequent growing seasons (Rytter and Hansson, 1996), with rooting depth primarily a function of the moisture gradient in the soil profile. Other studies have shown that an average of 75–95% of willow roots occur in the first 30-40 cm of soil (Crow and Houston, 2004). In SRC fertilizer use and leaf litter decomposition increase the nutrient concentration in the upper soil layers, contributing to rather shallow root distribution (Rytter and Hansson, 1996).

A plant's root system is usually made of both coarse and fine roots, each having a rather specific ecological function. While coarse roots mainly support and anchor the plant, fine roots (frequently defined as roots < 2 mm in diameter (Jackson and Attwood, 1996) provide access to nutrients and water (Püttsepp, 2004). The fine root system has the highest turnover over the largest surface area, and in some cases, may exceed aboveground biomass production (Rytter, 1999). Consequently, it is very important to consider fine root biomass (FRB) in phytoremediation strategies. Fine root length density (FRLD) (*i.e.* the ratio between the length of fine roots and the volume of the soil sample) is another parameter often used to describe resource-use efficiency and carbon storage in soil (Atkinson, 2000). Specific root length (SRL) represents the volume of soil explored per unit of biomass invested in fine roots. For instance, high SRL ratios are often

associated with fast-growing plant species (Comas *et al.*, 2002), because fast growth requires rapid, efficient acquisition of resources; a high SRL allows quicker nutrient uptake per unit root mass (Ryser, 2006). Root biomass density (RBD) is the weight of roots present in a unit volume of soil at a specific depth and represents a good descriptor of the root plant system. Specific root area (SRA) has been largely used because it describes very well the fine root turnover dynamic (Gill and Jackson, 2000; Leuschner *et al.*, 2009; Useche and Shipley, 2010). The most common methods for studying roots under field conditions are root-extraction (*i.e.* core and monolith) and trench profiles (Bohm, 1979). Extraction methods are assumed to provide reliable information on most root parameters such as FRLD, but may underestimate root biomass because the washing procedure it incorporates may not only eliminate soil, but also strip away root fragments. Furthermore, this method is costly, in terms of both time and resources. On the other hand, field measurements such as trench profiles are less time consuming, but more destructive and difficult to replicate, and may require calibration with a root extraction if total RLD is required (Kücke *et al.*, 1995).

The aim of the current study was to evaluate above and belowground biomass of an SRC willow vegetation filter at the end of the first cycle of growth and following stem harvesting (at harvest, stems were two years old and roots three) in response to increasing wastewater and fertilization regimes, thereby determining the dose of wastewater that enables optimal root growth. The main hypothesis was that increasing wastewater supply will support an increase of plant aboveground biomass and root development up to a threshold beyond which stress on plants will eventually result in some negative impacts on above- and belowground productivity.

2.3. MATERIALS AND METHODS

2.3.1. Site description

The trial was carried out on a site in Saint-Roch-de-l'Achigan (45° 50' 50" N - 73° 38' 27" O), 55 km north-east of Montreal (Quebec), Canada. The region has a humid continental climate characterized by wide seasonal temperature variations, warm, humid summers and cold winters. Average (1970-2000) daily temperature is 7.4°C and annual precipitation averages about 1062 mm (835 mm rainfall and 226 mm of snowfall). The

experimental field was formerly used for traditional agricultural crop (maize). The soil was mowed, and then ploughed with a rotary tiller to a depth of 15 cm before planting.

2.3.2. Plantation and site preparation

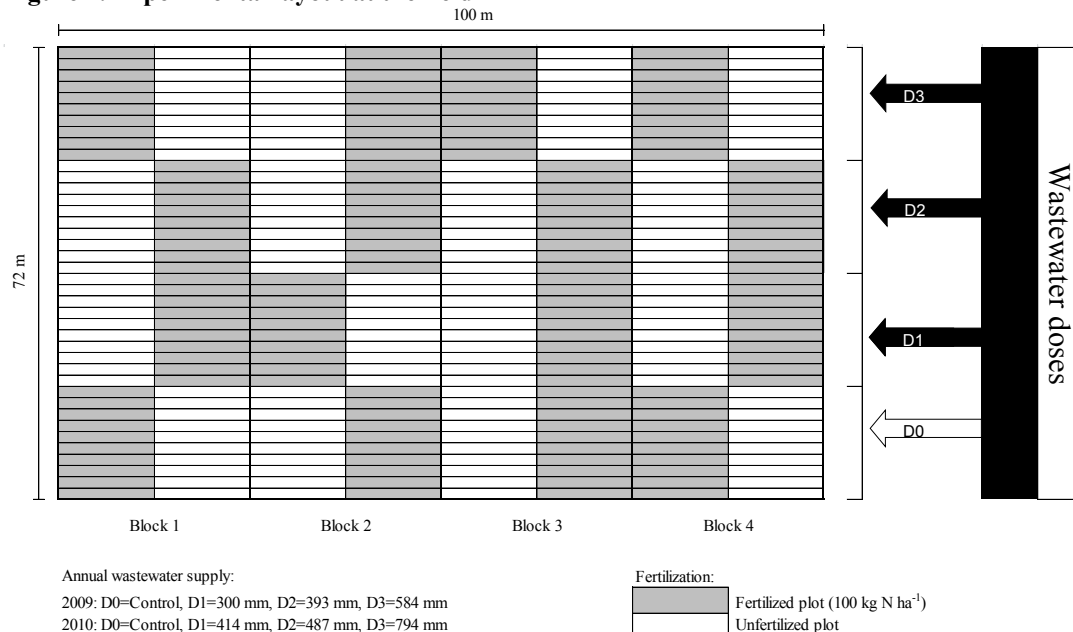
In late spring 2008, the experimental site was planted at a density of about 16,000 plants per hectare (1.80 m between rows and 0.34 m between plants). The willow cultivar *Salix miyabeana* SX67 was used. The dormant cuttings used for planting (20-22 cm long and 15 mm diameter) had been harvested the previous fall and stored in a refrigerator at -2°C and 95% humidity over the winter.

A pre-emergence residual herbicide mix (2.30 kg Devrinol and 0.37 kg Simazine per hectare) was applied in order to prevent weed development. During the first growing season (2008), the field was mechanically weeded between willow rows with a vibra-shank cultivator. In October, after leaf fall, all willow stems were cut back to allow the development of a denser stand canopy.

2.3.3. Experimental design

In the early spring of 2009, a 7200 m² area was delimited and used for the trial in a strip-plot design layout (Fig.1).

Figure 1. Experimental layout at the field



A sub-irrigation system (Netafim™) was installed between willow rows at a depth of 0.30 m. Wastewater was supplied through a 1.5 km long 2 ½ inch hose linking the basin of the village's effluent treatment facility to the willow SRC plantation, activated by a submersible pump. A filtration system was also installed at the pump outlet to remove coarse particles that could impede irrigation system functionality. The filters were connected to a system control panel, which facilitated regular cleaning sessions. An electronic solar energy panel (the Irritrol® IBOC® Plus controller 12 Station) was installed and connected to the entire irrigation system, to deliver the required volume of wastewater for each treatment. Also, flowmeters (F-2000 Blue-White Industries) were installed to control irrigation levels throughout the growing season. The main chemical and physical characteristics of irrigation wastewater are shown in Table 1.

Table 1: Chemical characteristics and nutrient concentration of wastewater used for the willow irrigation.

Parameters	Units	Values
pH	-	8.04
Conductivity	uS cm ⁻¹	1269
Total N	mg l ⁻¹	29.7
NH ₄ -N	mg l ⁻¹	20.8
NO ₃ -N	mg l ⁻¹	0.2
Organic N	mg l ⁻¹	8.7
TRP	mg l ⁻¹	1.17
RSP	mg l ⁻¹	1.08
Available K	mg l ⁻¹	11.4
Available Ca	mg l ⁻¹	38.4
Available Mg	mg l ⁻¹	22.1

Note: TRP refers to total reactive phosphorus and RSP to reactive solved phosphorus (PO₄-P)

Four treatments corresponding to four wastewater doses, D1, D2 and D3, as well as D0 (the latter with no irrigation, *i.e.* control), were determined, and each treatment was applied along ten willow rows. We selected four increasing wastewater irrigation doses for the first growing season (2009: 0 mm (D0), 300 mm (D1), 400 mm (D2), 600 mm (D3)), and four higher, increasing doses for the second (2010: 0 mm (D0), 400 mm (D1), 600 mm (D2), 800 mm (D3)), which corresponded in both cases to an increase of 33 and 50% among increments. As measured by the flowmeters, the actual wastewater amounts supplied were respectively 0 mm (D0), 300 mm (D1), 393 mm (D2), 584 mm (D3) in

2009 (128 days of irrigation), and 0 mm (D0), 414 mm (D1), 487 mm (D2), 794 mm (D3) in 2010 (150 days of irrigation), thus very close to the theoretical estimated values.

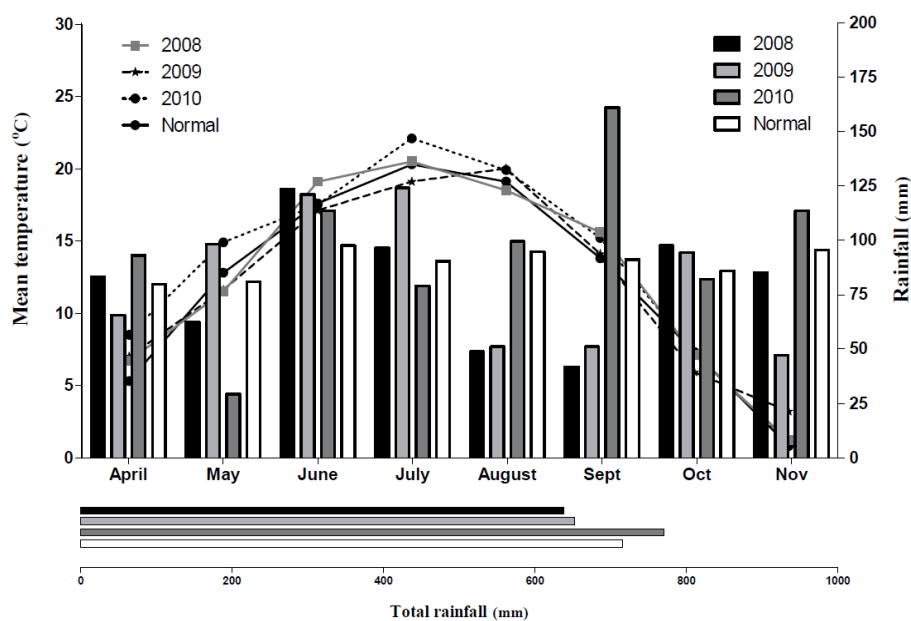
In addition to the wastewater treatment, a fertilization treatment (fertilized or not) was also applied (*i.e.* 100 kg ha⁻¹ of N, 60 kg ha⁻¹ of P and 60 kg ha⁻¹ of K). Fertilization was performed once for the 2009 growing seasons in two split time periods (30% of the total amount of nitrogen was applied at the end of May and the remaining 70% at the end of June).

The strip-block experimental set up comprised 4 blocks within which 2 factors were randomized: irrigation (main plot factor; 4 levels) and fertilization (sub-plot factor; 2 levels, with/without), to constitute 32 parcels. Each plot had a surface of 225 m² and contained 10 rows with approximately 35 plants per row.

2.3.4. Meteorological conditions

Air temperature and precipitation patterns recorded over the 3-year study period are presented in Fig. 2. During the establishment year (2008), mean temperatures were close to normal (mean temperature from May to October was 15.4 °C) and distribution of rain during the season was uniform except for in August and September, when total rainfall was 50% below normal. Temperatures for the first growing season (2009) were also close to normal, with a slight fluctuation from July to August. Precipitation recorded at the beginning of this season (from May to July) was 28% above normal (mean 114 mm). From August to September, an unusual drought was recorded, and little rain was recorded, 50% below normal (mean 61 mm). Total precipitation for 2008 and 2009 was respectively 638 mm and 652 mm, below normal (716 mm) in both years. Finally, during the second growing season (2010), temperatures from April to September were slightly above average, except in June. Precipitation was close to normal, with the exception of the months of May and September. Total precipitation (771 mm) during the second growing season (2010) was above normal primarily due to high precipitation in September (161 mm), which represents an increase of 77% above normal.

Figure 2. Mean temperature, monthly rainfall and total rainfall during the growth seasons (2008, 2009 and 2010). Normal values refer to the period 1971-2000.



2.3.5. Soil characteristics

Table 2. Soil characteristics at the beginning of the trial

Parameters	Units	Soil Depth (cm)	
		0-20	20-40
Sand	wt%	76	79
Silt	wt%	15	13
Clay	wt%	9	8
Texture		Sandy Loam	Loamy sand
Organic matter	wt%	2.57	1.99
Total N	wt%	0.12	0.09
pH		6.69	6.74
Available P	mg kg ⁻¹	87.5	72
Available K	mg kg ⁻¹	58.7	46.4
Available Ca	mg kg ⁻¹	1189	962
Available Mg	mg kg ⁻¹	70.3	56
Na	mg kg ⁻¹	5.2	4.2

Soil texture was determined by granulometric analysis. Total nitrogen was measured using the Kjeldhal method. P, K, Ca, and Mg were extracted by Mehlich-3 digestion and determined using ICP (Inductively Coupled Plasma Spectrophotometry).

At the beginning of the trial, soil texture was examined at two depths and defined as sandy loam in the top layer and loamy sand in the deeper one (Table 2). Total nitrogen was measured using the Kjeldhal method. P, K, Ca, and Mg were extracted by Mehlich-3 digestion and determined using ICP (Inductively Coupled Plasma Spectrophotometry). Both Organic matter content and nutrient concentrations (including N, P, K, Ca and Mg) were higher in the top soil layer, whereas pH was slightly lower near the surface than in the 20-40 cm layer.

2.3.6. Sampling

2.3.6.1 Characterization of soil, wastewater and leach water

In May 2009 and prior to the irrigation-fertilization treatments, soil was sampled at two depth layers (0-20 cm and 20-40 cm). Two samples were collected in each of the four blocks along a diagonal, to construct an overall characterization of composition. To characterize wastewater, one sample was taken from the main pipe on the field, and analyzes were performed to quantify nutrient content. In addition, thirty-two soil water lysimeters (Model 1900 Soilmoisture Equipment Corp.) were installed at 1 m depth in the center of each plot (on the 5th row), to sample water leaching from the ground throughout the growing seasons and thereby document the filtering efficiency of willow SRC (Unpublished data).

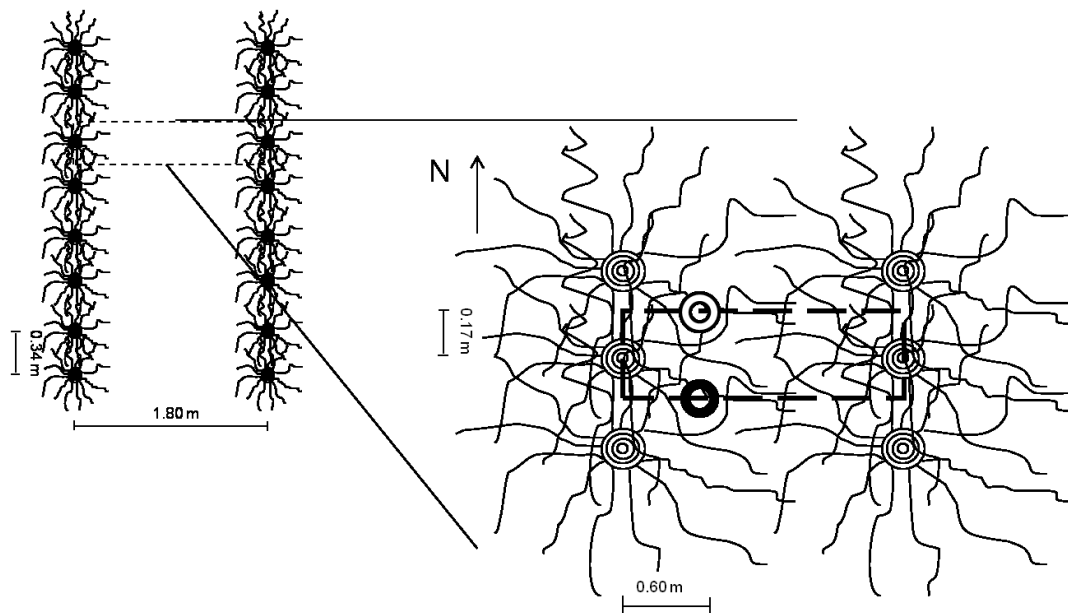
2.3.6.2 Aboveground biomass assessment

At the end of 2010, ten plants were randomly selected in each plot, and their height, main stem diameter, total stems per plant and total fresh weight were measured. In addition, eight samples including segments from the bottom, middle and top of stems were collected to estimate dry matter content. At the same time, plant survival rate was estimated by counting the number of living stools on three central rows and relating this figure with the initial planting density. The resulting combined data allows a better estimation of the biomass yield per hectare. Willow stems were harvested at the end of their second growing season (November 2010).

2.3.6.3 Root sampling

Root sampling and soil bulk density were assessed during two successive samplings in June 2011 by means of a 1 m cylinder core sampler (Eijkelkamp Equipments, the Netherlands) powered by a percussion hammer. A single sample was taken for each plot, and the core sampler (diameter 8.5 cm, height 80 cm) was placed 60 cm away from the stool axis, 17 cm northward and driven into the ground to a depth of 80 cm (Figure 3).

Figure 3 Layout of the soil core sampling. Black annulus indicates the position of soil coring for root sampling operation. White annulus indicates the position where soil cores were dug to measure soil bulk density.



The first 80 cm soil core was divided into four 20 cm thick sections representing four soil depths layers (0-20cm, 20-40cm, 40-60cm and 60-80cm). One core sample per plot was taken to constitute 32 samples (8 treatments per block in four blocks). Soil bulk density of all samples ($n=128$) was calculated as the ratio between dry soil weight and soil volume. Each sub-core (Volume = 1134 cm^3) was weighed and oven dried at $105 \text{ }^\circ\text{C}$ to constant weight, assuming that the weight of roots within cores was negligible in comparison to soil weight.

Root sampling was carried out following the same methodology on a second set of soil core sections taken at 60 cm from the stool axis and 17 cm southwards. Soil cores were positioned in the plot so as to be surrounded by living willow stools. All 128 samples (4

replicates x 8 treatments x 4 soil layers) were bagged, labelled and transported to cold storage, where they were kept at -10 °C until further processing. Before washing samples, a soil (~15g) was collected (without roots) and retained for pH and electrical conductivity (Ec) measurements. The soil cores (128 samples) were processed by placing them between two 0.5 mm sieves and rinsing with tap water, thereby separating the roots from the soil. Dead and living roots were separated on the basis of general appearance (colour and consistency), following the procedure adopted by other researchers (Zutter *et al.*, 1999; Gwenzi *et al.*, 2011). Roots that were dark brown to black in color were classified as dead. Due to the young age of the crop, dead roots were insignificant in comparison to total root biomass. Living roots were hydrated in deionized water and stored in a solution of deionised water and ethanol (40%-60 %) until analysis. Roots of each sample were first suspended in 1-2 cm of water in a 20 cm × 25 cm acrylic tray and then scanned at 400 DPI with a flat-bed scanner (Perfection V700 Photo, Epson). Root images were analyzed using calibrated image analysis WinRHIZO[®] Regular 2012 software (Regent Instruments, Canada). The Software was configured to measure and compute root length, root diameter, root surface area and root volume distribution in each 0.5 mm diameter class. Before image analysis within the same sample, roots were removed from the tray in order to differentiate the fine roots fraction (<2mm) from the other root diameter size classes. After numerical analyses, fine and coarse roots of each soil sample were oven dried at 70°C to constant weight and dry biomass determined. Root (*i.e.* fine, coarse and total) biomass densities (RBD, *i.e.* mass of roots per volume of soil) were used to estimate the root biomass at stand level (Mg ha⁻¹) under each irrigation and fertilization treatment. Finally, root/shoot (R/S) ratio was calculated by dividing below and aboveground biomass for all treatments.

The above-mentioned software was also used to derive root parameters specifically targeted to verify whether soil depth would affect root distribution and shape under different irrigation and fertilization regimes. These included Specific Fine Root Length (SFRL, *i.e.* total fine root length divided by total root dry mass, m g⁻¹), Specific Root Area (SRA, *i.e.* total surface root area divided by total root mass, m² kg⁻¹) and Fine Root Length Density (FRLD, total fine root length per soil volume, cm cm⁻³).

2.3.7. Statistical analysis

All variables were analyzed with mixed-model ANOVAs. The model includes block as a random factor, and irrigation and fertilization as fixed factors. Variables measured at different depths were treated to repeated-measures ANOVA, because measures at different depths are not statistically independent. The former group includes the following variables: aboveground biomass, total fine root biomass, total coarse root biomass, and the root to shoot ratio (R/S). The variables taken at different depths are F-RB, C-RB, Total RB, FRLD, SFRL, and SRA. Data were tested for normality and homogeneity (or equality) of variances. In the case of aboveground biomass, total fine root biomass, R/S, F-RB, C-RB, Total RB, FRLD, SFRL and SRA, and the additional effects of pH, Electro-conductivity (Ec) and bulk density were tested using multivariate regressions. For all tests, the classical level of 0.05 was used as *p*-value threshold. Analyses were performed using JMP statistical software version 8.0 (SAS Institute, Cary, NC).

2.4. RESULTS

2.4.1. Wastewater and nutrient supply

The actual volume and/or amount of inputs to the system are shown in Table 3. In the establishment year (2008), the plantation did not receive any external inputs other than 638 mm of rainfall over the course of the growing season.

Table 3. Water and nutrient amounts supplied through rainfall, wastewater irrigation and mineral fertilization

Year	Treatments Irrigation (mm)	Fertilization		Water input		Tot. N load (kg ha ⁻¹)		Tot. P load (kg ha ⁻¹)	
		N (kg ha ⁻¹)	P (kg ha ⁻¹)	Rainfall (mm)	Irrigation + Rainfall (mm)	Through Irrigation	Total	Through Irrigation	Total
2008	0	-	-	638	638	-	-	-	-
2009	D0 = 0				652	-	-	-	-
	D1 = 300				952	89	89	3.5	3.5
	D2 = 393	-	-		1045	117	117	4.6	4.6
	D3 = 584				1236	173	173	6.8	6.8
				652					
	D0 = 0				652	0	100	0	60
	D1 = 300				952	89	189	3.5	63.5
	D2 = 393	100	60		1045	117	217	4.6	64.6
D3 = 584				1236	173	273	6.8	66.8	
2010	D0 = 0				771	0	0	0	0
	D1 = 414				1185	123	123	4.8	4.8
	D2 = 487	-	-	771	1258	139	139	5.5	5.5
	D3 = 794				1565	236	236	9.3	9.3

During the second growing season (2009), the plots received a variable amount of water (rainfall and wastewater), ranging from 652 mm in the control (D0) to 1236 mm (sum of rainfall and wastewater) (D3). Consequently, the amount of nutrients supplied through the wastewater and fertilizer ranged from 0 to 173 kg ha⁻¹ in unfertilized plots and 100 - 273 kg ha⁻¹ in fertilized plots for nitrogen and from 0 to 6.8 kg ha⁻¹ in unfertilized plots and 60 - 66.8 kg ha⁻¹ in fertilized plots for phosphorus. Finally, in the third year (2010), the plantation received from 771mm (D0) to 1565 mm (D3) of water inputs (rainfall + wastewater), and nitrogen and phosphorus supplied through the wastewater ranged from 0 to 236 kg ha⁻¹ for nitrogen and from 0 to and 9.3 kg ha⁻¹ for phosphorus.

2.4.2. Total Above and belowground biomass yield

Results concerning above- and belowground biomass yields are shown in Table.4.

Table 4. Effect of wastewater irrigation and fertilization on *Salix miyabeana* (SX67) aboveground and belowground biomass and R/S ratio.

Treatments	Levels	Biomass (Mg ha ⁻¹)														
		Aboveground		Total Root		Root / Shoot		Total Corse Root		Total Fine Root						
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD					
Irrigation	D0	23.9	± 6.59	<i>a</i>	2.54	± 0.22	<i>a</i>	0.11	± 0.04	<i>a</i>	0.57	± 0.18	<i>a</i>	1.97	± 0.04	<i>b</i>
	D1	33.7	± 1.35	<i>b</i>	1.69	± 0.45	<i>ab</i>	0.05	± 0.02	<i>b</i>	0.31	± 0.14	<i>a</i>	1.38	± 0.30	<i>ab</i>
	D2	38.6	± 5.44	<i>c</i>	2.46	± 0.26	<i>ab</i>	0.07	± 0.04	<i>b</i>	0.67	± 0.01	<i>a</i>	1.80	± 0.24	<i>ab</i>
	D3	47.07	± 10.8	<i>d</i>	1.36	± 0.11	<i>b</i>	0.03	± 0.01	<i>b</i>	0.34	± 0.14	<i>a</i>	1.03	± 0.04	<i>a</i>
Fertilization	F	40.1	± 11.3	<i>b</i>	1.95	± 0.65	<i>a</i>	0.05	± 0.04	<i>a</i>	0.5	± 0.23	<i>a</i>	1.45	± 0.50	<i>a</i>
	NF	31.5	± 8.7	<i>a</i>	2.08	± 0.59	<i>a</i>	0.07	± 0.04	<i>a</i>	0.44	± 0.18	<i>a</i>	1.64	± 0.40	<i>a</i>
	D0-F	28.6	± 4.6	<i>cd</i>	2.70	± 1.16	<i>a</i>	0.10	± 0.04	<i>ab</i>	0.70	± 0.60	<i>a</i>	2.00	± 0.58	<i>a</i>
	D0-NF	19.2	± 0.9	<i>d</i>	2.38	± 0.69	<i>a</i>	0.12	± 0.04	<i>a</i>	0.45	± 0.25	<i>a</i>	1.94	± 0.53	<i>a</i>
	D1-F	34.6	± 7.1	<i>bc</i>	1.37	± 0.45	<i>a</i>	0.04	± 0.01	<i>bc</i>	0.21	± 0.11	<i>a</i>	1.16	± 0.35	<i>a</i>
	D1-NF	32.7	± 1.5	<i>bc</i>	2.00	± 0.48	<i>a</i>	0.06	± 0.02	<i>abc</i>	0.41	± 0.22	<i>a</i>	1.59	± 0.27	<i>a</i>
	D2-F	42.5	± 4.6	<i>b</i>	2.28	± 1.26	<i>a</i>	0.06	± 0.04	<i>bc</i>	0.66	± 0.56	<i>a</i>	1.62	± 0.71	<i>a</i>
	D2-NF	34.8	± 6.1	<i>bc</i>	2.64	± 0.94	<i>a</i>	0.08	± 0.03	<i>abc</i>	0.67	± 0.39	<i>a</i>	1.97	± 0.61	<i>a</i>
	D3-F	54.7	± 4.5	<i>a</i>	1.44	± 0.91	<i>a</i>	0.03	± 0.02	<i>c</i>	0.44	± 0.43	<i>a</i>	1.00	± 0.54	<i>a</i>
	D3-NF	39.4	± 4.3	<i>b</i>	1.29	± 0.45	<i>a</i>	0.03	± 0.01	<i>c</i>	0.24	± 0.15	<i>a</i>	1.05	± 0.30	<i>a</i>
Anova p- values	Irrigation	<0.0001		0.0414*		0.0014*		0.1329		0.0238*						
	Fertilization	0.0202*		0.5353		0.0891		0.6327		0.1455						
	Irr x Fert	0.1816		0.6881		0.8547		0.5733		0.7783						

Values are the averages (mean ± SD, *n*=8 irrigation, *n*=16 fertilization) for each treatment.

Significance levels (*p*-values) of irrigation, fertilization and irrigation x fertilization effect are shown. Different letters in the same column within same treatment indicate significant differences according to HSD-Tukey-test for irrigation and fertilization (*p* ≤ 0.05)

Aboveground biomass harvested and measured at the end of the second growing season (2010) was significantly affected by both treatments, and ranged from minimum values of 19.2 Mg ha⁻¹ (D0-NF) to a maximum values of 54.7 Mg ha⁻¹ (D3-F).

Overall, wastewater irrigation enhanced aboveground willow biomass yield by 70% (D1), 80% (D2) and 100% (D3) under unfertilized conditions and by 20% (D1), 50% (D2) and 90% (D3) under fertilized conditions respectively, compared to the control (D0). Chemical fertilizer supply increased the same parameter by 48% (D0), 6% (D1), 22% (D2) and 39% (D3) respectively. In the presence of chemical fertilizer, we found that soil parameters only marginally reflect actual aboveground biomass response (Table 5). Inversely, irrigation with wastewater was generally followed by a decrease in belowground biomass, although the pattern was somewhat uneven. Total root biomass, which was significantly negatively affected by the irrigation treatment, decreased (46%) from D0 (2.54 Mg ha⁻¹) to the highest irrigation dose in D3 (1.36 Mg ha⁻¹), even though the intermediate wastewater amount in D2 was almost as high as the control (2.46 Mg ha⁻¹). Fertilization had no significant effect on total root biomass yield.

Fine root biomass, which on average represented 77% of total root biomass, followed the same pattern as total biomass, with highest values found in the control (1.97 Mg ha⁻¹) and D2 (1.80 Mg ha⁻¹), and the lowest value (1.03 Mg ha⁻¹) under the D3 treatment. Fertilization did not affect fine root biomass, and the comparison of corresponding pairs revealed no difference between the biomass of fertilized and unfertilized plants. In general, coarse root biomass was not significantly influenced by either irrigation or fertilization and data showed that the biomass ranged from 0.4 to 0.5 Mg ha⁻¹ which is 3-4 times lower than that of fine roots. The R/S ratio decreased significantly following wastewater treatment, and ranged from a maximum value of 0.11 in the control to a minimum value of 0.03 under the highest wastewater amount.

Table 5. Results of the multiple regression analysis of factors related to willow above and below biomass yield and R/S.

Predictor variables	Biomass (Mg ha ⁻¹)							
	Above ground biomass		Total root biomass		Total fine root biomass		Root/Shoot ratio	
	F Value	Prob > F	F Value	Prob > F	F Value	Prob > F	F Value	Prob > F
Irrigation	53,309	<.0001*	0,3205	0,5762	1,9034	0,1795	9,9115	0.0041*
Fertilisation	13,992	0.0009*	0,6389	0,4314	1,1122	0,3013	5,0219	0.0338*
Soil Bulk Density	0,0706	0,7925	0,0413	0,8405	0,0002	0,9887	0,2585	0,6154
Soil pH	0,2643	0,6115	0,6711	0,4201	0,6763	0,4184	0,0432	0,8371
Soil Ec	0,5069	0,4828	1,7993	0,1914	0,9494	0,3388	1,6302	0,2131

2.4.3. Analysis of root parameters throughout the soil profile

Data concerning root growth parameters along the soil profile are shown in Table 6. It should be noted that since roots were often absent from soil cores at depths below 40 cm, statistical analysis was limited to the first two shallow soil layers (0-20 cm and 20-40 cm). However, we chose to show mean values to provide the reader with a point of reference when comparing different depths. Multivariate analysis showed that fine, coarse and total root biomass, FRLD, all decreased significantly ($p < 0.05$) with soil depth (0-20 cm; 20-40cm), whereas SFRL and SRA did not change significantly with soil depth. A large proportion of the total and fine roots (average 87%) were found in the uppermost soil layer, whereas only 7% were measured in the 20-40cm layer, 5% in the 40-60cm and only 1% below 60cm. Coarse roots followed the same pattern, although they were slightly more abundant in the intermediate soil layers. FRB followed the same pattern as total root biomass. The effect of irrigation on fine root biomass was significant at both 0-20 cm and 20-40 cm depths but neither fertilization (F) nor the interaction was significant. Fine root biomass in both soil layers was negatively affected by irrigation and a decrease of 27%, 18% and 46% was observed in the 0-20 cm soil layer respectively in D1, D2, and D3 in comparison to the control D0.

The same parameter in the 20-40 cm layer was affected by irrigation, but to a variable degree, decreasing measurably under D1 and D3, and insignificantly so under the D2 irrigation treatment. We did not find any significant difference in coarse root response to neither irrigation nor fertilization. Total root biomass was negatively affected by fertilization in the upper soil layer and showed a response pattern similar to that of fine root biomass in the 20-40cm layer. Irrigation and fertilization did not significantly affect FRLD, SFRL or SRA. Average FRLD ranged from 5.9 (D0) to 3.2(D3) and from 4.3 (F) to 5.1 (UF) cm cm^{-3} ; SFRL from 65.4 (D0) to 86.8 (D1), and from 73.7 (F) to 72.6 (UF) m g^{-1} ; SRA from 103 (D2) to 131 (D1), and from 114 (F) to 111 (UF) $\text{m}^{-2} \text{kg}^{-1}$. We also found that in the uppermost soil layer (0-20cm), the wastewater supply explained most variability of fine root biomass and FRLD, whereas in the 20-40cm layer, root biomass response was better explained by soil bulk density (Table 7).

Table 6. Effect of wastewater irrigation and fertilization on *Salix miyabeana* (SX67) fine, coarse and total root biomass, FRLD, SFRL and SRA at different soil depths.

Treatments	Levels	Fine root biomass (Mg ha ⁻¹)				Coarse root biomass (Mg ha ⁻¹)				Total root biomass (Mg ha ⁻¹)			
		0-20	20-40	40-60	60-80	0-20	20-40	40-60	60-80	0-20	20-40	40-60	60-80
Irrigation	D0	1.74 ± 0.57 <i>a</i>	0.13 ± 0.10 <i>ab</i>	0.08 ± 0.09	0.013 ± 0.021	0.44 ± 0.44 <i>a</i>	0.03 ± 0.03 <i>a</i>	0.094 ± 0.212	0.003 ± 0.006	2.19 ± 0.94 <i>a</i>	0.17 ± 0.13 <i>ab</i>	0.17 ± 0.29	0.016 ± 0.026
	D1	1.27 ± 0.35 <i>ab</i>	0.05 ± 0.05 <i>b</i>	0.04 ± 0.05	0.013 ± 0.026	0.30 ± 0.20 <i>a</i>	0.07 ± 0.01 <i>a</i>	0.003 ± 0.006	0.001 ± 0.004	1.57 ± 0.53 <i>a</i>	0.06 ± 0.06 <i>b</i>	0.04 ± 0.05	0.014 ± 0.029
	D2	1.42 ± 0.60 <i>ab</i>	0.22 ± 0.20 <i>a</i>	0.12 ± 0.13	0.032 ± 0.045	0.52 ± 0.34 <i>a</i>	0.10 ± 0.14 <i>a</i>	0.050 ± 0.120	0.002 ± 0.004	2.29 ± 1.61 <i>a</i>	0.32 ± 0.33 <i>a</i>	0.17 ± 0.19	0.034 ± 0.048
	D3	0.94 ± 0.38 <i>b</i>	0.05 ± 0.05 <i>b</i>	0.03 ± 0.07	0.007 ± 0.012	0.32 ± 0.30 <i>a</i>	0.01 ± 0.02 <i>a</i>	0.011 ± 0.028	0.000 ± 0.000	1.26 ± 0.63 <i>a</i>	0.06 ± 0.07 <i>b</i>	0.05 ± 0.10	0.007 ± 0.012
Fertilization	F	1.22 ± 0.59 <i>a</i>	0.12 ± 0.15 <i>a</i>	0.08 ± 0.09	0.022 ± 0.034	0.39 ± 0.39 <i>a</i>	0.05 ± 0.10 <i>a</i>	0.066 ± 0.170	0.002 ± 0.003	1.61 ± 0.92 <i>a</i>	0.17 ± 0.24 <i>a</i>	0.14 ± 0.24	0.024 ± 0.036
	NF	1.46 ± 0.49 <i>a</i>	0.11 ± 0.12 <i>a</i>	0.06 ± 0.09	0.010 ± 0.022	0.40 ± 0.27 <i>a</i>	0.03 ± 0.04 <i>a</i>	0.013 ± 0.026	0.002 ± 0.005	2.04 ± 1.17 <i>b</i>	0.13 ± 0.16 <i>a</i>	0.07 ± 0.11	0.012 ± 0.026
ANOVA <i>p</i> - values	Irr	0.0495*	0.0202*			0.315	0.056			0.0939	0.0265*		
	Fert	0.1215	0.7666			0.850	0.530			0.0354*	0.6648		
	Irr x Fert	0.7323	0.9893	n.a.		0.389	0.786			0.457	0.9766		n.a.
Treatments	Levels	Fine Root Length Density (cm cm ⁻³)				Specific Fine Root Length (mg ⁻¹)				Specific Root Area (m ² kg ⁻¹)			
		0-20	20-40	40-60	60-80	0-20	20-40	40-60	60-80	0-20	20-40	40-60	60-80
Irrigation	D0	5.93 ± 2.52 <i>a</i>	0.26 ± 0.20 <i>a</i>	0.10 ± 0.08	0.033 ± 0.049	65.4 ± 17.3 <i>a</i>	36.3 ± 17.4 <i>a</i>	27.4 ± 21.8	22.1 ± 32.3	105.0 ± 24.0 <i>a</i>	82.3 ± 23.0 <i>a</i>	71.2 ± 35.2	85.6 ± 64.4
	D1	5.33 ± 1.15 <i>a</i>	0.14 ± 0.18 <i>a</i>	0.18 ± 0.26	0.024 ± 0.046	86.8 ± 20.2 <i>a</i>	36.5 ± 20.6 <i>a</i>	46.4 ± 42.1	11.3 ± 22.5	131.0 ± 26.2 <i>a</i>	91.4 ± 25.0 <i>a</i>	185.0 ± 136.2	93.7 ± 40.2
	D2	4.53 ± 1.71 <i>a</i>	0.40 ± 0.40 <i>a</i>	0.17 ± 0.22	0.027 ± 0.041	68.3 ± 18.6 <i>a</i>	38.9 ± 20.7 <i>a</i>	16.8 ± 15.8	6.3 ± 9.7	103.0 ± 35.0 <i>a</i>	75.7 ± 48.0 <i>a</i>	53.1 ± 25.8	36.1 ± 13.4
	D3	3.25 ± 1.22 <i>a</i>	0.09 ± 0.09 <i>a</i>	0.06 ± 0.11	0.022 ± 0.036	72.0 ± 27.5 <i>a</i>	41.0 ± 11.4 <i>a</i>	44.1 ± 33.7	24.9 ± 32.1	114.0 ± 50.0 <i>a</i>	91.8 ± 21.0 <i>a</i>	121.8 ± 48.9	139.2 ± 21.3
Fertilization	F	4.39 ± 2.16 <i>a</i>	0.23 ± 0.29 <i>a</i>	0.14 ± 0.19	0.033 ± 0.044	73.7 ± 26.3 <i>a</i>	38.5 ± 17.5 <i>a</i>	36.6 ± 34.6	20.0 ± 30.0	114.3 ± 43.1 <i>a</i>	88.9 ± 35.5 <i>a</i>	94.1 ± 59.3	95.3 ± 57.8
	NF	5.13 ± 1.67 <i>a</i>	0.22 ± 0.25 <i>a</i>	0.12 ± 0.17	0.021 ± 0.039	72.6 ± 17.2 <i>a</i>	37.9 ± 17.4 <i>a</i>	30.8 ± 28.2	12.3 ± 23.1	111.8 ± 26.7 <i>a</i>	81.5 ± 27.9 <i>a</i>	127.7 ± 113.1	77.7 ± 52.9
ANOVA <i>p</i> - values	Irr	0.2009	0.0988			0.281	0.909			0.310	0.483		
	Fert	0.2049	0.8989			0.856	0.936			0.850	0.826		
	Irr x Fert	0.9908	0.9774	n.a.		0.062	0.190			0.108	0.176		n.a.

Values are the averages (mean ± SD, *n*=8 irrigation, *n*=16 fertilization) for each treatment. Significance levels (*p*-values) of irrigation, fertilization and irrigation x fertilization effect are shown. Different letters in the same column within same treatment indicate significant differences according to HSD-Tukey-test for irrigation and fertilization (*p* ≤ 0.05). Since data concerning root samples in cores below 40 cm soil depth were missing the ANOVA test was not performed below this depth.

Table 7. Results of the multiple regression analysis of factors related to total, coarse and fine root biomass, FRLD, FRSL and SRA at two soil depths.

Predictor variables	Fine root biomass (Mg ha ⁻¹)				Coarse root biomass (Mg ha ⁻¹)				Total root biomass (Mg ha ⁻¹)			
	0-20		20-40		0-20		20-40		0-20		20-40	
	F Value	Prob > F	F Value	Prob > F	F Value	Prob > F	F Value	Prob > F	F Value	Prob > F	F Value	Prob > F
Irrigation	6.4432	0.0175*	0.0102	0.9204	0.0414	0.8404	0.5106	0.4818	0.6083	0.4425	0.0391	0.8449
Fertilisation	1.8216	0.1888	1.2862	0.2679	0.0771	0.7834	2.7458	0.1105	1.5036	0.2311	1.8411	0.1876
Soil Bulk Density	0.3244	0.5739	1.8011	0.1921	0.5793	0.4535	3.1563	0.0883	0.1528	0.6991	2.3626	0.1374
Soil pH	1.0585	0.3131	1.3398	0.2585	4.7704	0.0382*	1.5675	0.2226	4.3740	0.0464*	1.4936	0.2335
Soil Ec	0.5137	0.4799	0.1803	0.6749	2.4286	0.1312	0.0498	0.8253	0.3892	0.5381	0.1304	0.7212

Predictor variables	Fine Root Length Density (cm cm ⁻³)				Specific Fine Root Length (m g ⁻¹)				Specific Root Area (m ² kg ⁻¹)			
	0-20		20-40		0-20		20-40		0-20		20-40	
	F Value	Prob > F	F Value	Prob > F	F Value	Prob > F	F Value	Prob > F	F Value	Prob > F	F Value	Prob > F
Irrigation	8.3577	0.0077*	0.0409	0.8414	0.1405	0.7108	0.0000	0.9998	0.1884	0.6678	0.0055	0.9413
Fertilisation	1.0773	0.3089	0.4827	0.4939	0.2748	0.6045	1.1149	0.3015	0.1469	0.7046	0.3417	0.5643
Soil Bulk Density	0.0834	0.7750	0.5164	0.4793	0.7729	0.3874	5.9071	0.0229*	0.5076	0.4825	4.9119	0.0364*
Soil pH	0.9517	0.3383	0.8671	0.3610	0.9969	0.3273	0.7050	0.4094	1.3534	0.2553	1.1628	0.2916
Soil Ec	2.7841	0.1072	0.0481	0.8282	2.7705	0.1080	0.9268	0.3453	2.743	0.1097	1.1042	0.3038

2.5. DISCUSSION

This study demonstrated that at the end of the first rotation both wastewater irrigation and chemical fertilization treatments had a positive impact on willow aboveground biomass yield, the effect of the former being stronger than that of the latter (Table 5). We registered biomass yields of 39.4 Mg ha⁻¹ and 54.7 Mg ha⁻¹ after two years of growth in willows that received the highest wastewater amount, *i.e.* 1378 mm without (409 kg ha⁻¹ of N, 16.1 kg ha⁻¹ of P) or with (509 kg ha⁻¹ of N, 76.1 kg ha⁻¹ of P) chemical fertilizer. Previous studies on SRC have shown that willow under high water and nutrient supply may achieve increased yields (Guidi *et al.*, 2008). Our biomass data results are very similar to those obtained for the ‘Tora’ clone (*Salix schwerinii* x *S. viminalis*; (Dimitriou and Aronsson, 2011) in a lysimeter trial in Sweden with a sandy soil. The stands (1-year old shoots on 3-year old roots), which were supplied with 7 mm of wastewater daily throughout two growing seasons, achieved an equivalent in biomass yield of 40 Mg ha⁻¹. The loads of nitrogen given to the plants during this two-growing season experiment were respectively 262 and 369 kg ha⁻¹, and were 51-56.4% higher than the amounts of nitrogen given to our stands through wastewater irrigation (173 and 236 kg ha⁻¹). Also the ‘Tora’ clone benefited from greater amounts of phosphorus (21.2 and 29.8 kg ha⁻¹), which were three times higher than the dose applied in our study (6.8 and 9.3 kg ha⁻¹). Despite the fact that greater quantities of water and nutrients were supplied to stands through precipitation (756 and 1064 mm) and wastewater irrigation (431 and 604 mm) during the two growing seasons of the Dimitriou experiment, than in our trial (Table 3

and Table 1), biomass yields for both studies were comparable (40 Mg ha⁻¹ Vs 39 Mg ha⁻¹). This may be explained by the soil used in our study, richer in organic matter, 2.57 (0-20 cm) and 1.99 (20-40 cm), compared to levels in the Swedish experiment, which were as low as 1.3 and 0.4 for top and sub-soil.

Actually, *Salix miyabeana* SX64 and SX67 have been shown to be among the most productive commercial varieties over several rotations in Quebec, Canada (Guidi *et al.*, 2013). In addition, when grown under the same conditions as the control (D0), *Salix miyabeana* has shown comparable biomass yields in other trials in Quebec (Labrecque and Teodorescu, 2005; Cavanagh *et al.*, 2011).

Overall, total root biomass in our study was somewhat lower than what has been found by other researchers. This is likely because we did not consider belowground stool biomass, which in some reported studies represented up to 25% of the total belowground willow biomass (Pacaldo *et al.*, 2013). Most literature data have shown that the majority of roots in willow SRC are concentrated in the shallow soil layers (Rytter and Hansson, 1996; Heaton *et al.*, 2002; Stadnyk, 2010; Pacaldo *et al.*, 2013). Similarly, in our study, most roots (for all treatments) were located in the top soil layer and 92-96 % of roots (both coarse and fine) were found in the first 40 cm. This concurs with Crow and Houston (Crow and Houston, 2004), who found that irrespective of soil type, 75–95% of willow SRC roots generally occurred at depths from 30–36 cm. Furthermore, another study on an irrigated and fertilized willow plantation highlighted that mean rooting depth was essentially between 25 and 30 cm for the first year of measurement but fluctuated during the second year from 20-to 40 cm from the beginning of the growing season until mid-July (Rytter and Hansson, 1996).

According to Keyes and Grier (Keyes and Grier, 1981), the typical response associated with increased soil N availability is a decrease in root biomass. However we did not find any significant effect of N-fertilization on total or fine root biomass. On the other hand, we did observe that irrigation decreased total and fine root biomass. In fact, the pattern of this decrease was not linear, as there was a drop from the control D0 to D1, an increase in D2 and another drop to a minimum level under D3. This would suggest that, beyond a specific wastewater amount, the willow root system's development is negatively affected by

wastewater supply, and although aboveground biomass under D3 remained high, plant development was somewhat unbalanced. This phenomenon has been reported as a specific response of woody plants to flooding (Kozłowski, 1997). Flooding may indeed explain the imbalance in this instance, since the water volume (rainfall + wastewater) supplied in the D3 treatment was far greater than that administered in most studies on willow evapotranspiration (Guidi *et al.*, 2008). The fine root biomass values measured in our soil cores ranged from 1.01 to 1.99 Mg ha⁻¹. Compared to findings in the literature, our results are very close to those reported in a similar trial, where the fine root biomass of a 4-year old irrigated and fertilized willow plantation ranged from 0.83 to 1.70 Mg ha⁻¹ (Rytter and Hansson, 1996). Another soil core trial in Saskatchewan, Canada, on six willow cultivars planted on four different sites, found that mean fine root biomass ranged from 0.27 - 0.92 Mg ha⁻¹, which is a little lower than our findings (Stadnyk, 2010). However, when comparing results from a single site having the same soil texture and soil bulk density (*i.e.* the Prince Albert site in Saskatchewan), reported values of 0.4-1.6 Mg ha⁻¹ are very close to our results.

The R/S ratio patterns in our study decreased from the control (0.11) to the highest wastewater supply (0.03) and were generally rather low compared with most data in the literature. This could again be explained by the fact that we did not sample belowground stool biomass and also by the very high aboveground yield our clone achieved. Nevertheless, our data showed that R/S ratios were reduced with increasing wastewater supply, thus paralleling the findings of other studies on willow-water relations (Pezeshki *et al.*, 1998). In addition, the difference in biomass allocation patterns in wastewater-irrigated plots may have been influenced by the amount of nutrients supplied. High levels of nutrient resources, especially nitrogen, have been shown to increase shoot growth over root growth in willow, eventually resulting in a decreased R/S ratio as soil nitrogen availability increased (Good and Williams, 1986). This is consistent with the resource optimization strategy described by (Ågren and Franklin, 2003), since increasing nutrient availability means that less effort is needed to acquire this resource.

About 92 % of fine root lengths were found in the top 20 cm of soil. In the current study, FRLD was two times higher than that reported by Rytter (Rytter, 1999) for willow, at the same depth and with the same soil investigation method (soil coring). On the other hand,

FRLD average values in the 0-20 cm soil layer between 3.3 and 5.9 cm cm⁻³ were comparable with those (2.4-6.3 cm cm⁻³) reported for the top soil layer (18 cm) by Heilmann *et al.* (Heilman *et al.*, 1994) on a fertilized poplar plantation. We also observed a decrease in FRLD with increasing soil depth, which is in line with most data in the literature (Børja *et al.*, 2008; Makita *et al.*, 2011). Regardless of soil depth, neither irrigation nor fertilization seemed to have any significant effect on fine root length density. FRLD is a root index that indicates the status of soil resource availability. The lack of any significant variation of this parameter following both fertilization and irrigation treatments suggests that although high levels of irrigation may reduce fine root willow biomass, this does not necessarily affect the status of nutrient availability or thereby root architecture.

Since root surface area is the most important trait for nutrient uptake, root length per unit of root biomass (m·g⁻¹ dry mass), specific root length (SRL), reflects root physiological function. High SRL values imply a large surface area per unit of root biomass, allowing for more rapid nutrient uptake per unit of root mass. According to the literature, SRL is given most often for fine roots, and mean estimated SFRL values have been reported to be rather large, ranging from 1.4 to 196 m g⁻¹ in different parts of the fine root system in different tree species (Ostonen *et al.*, 2007). Some authors have shown that SFRL may increase, decrease, or remain constant in response to nutrient limitation (Ryser, 2006).

In the current study, the specific fine root length (SFRL) ranged from 65.4 to 72 m g⁻¹ in the top 20 cm of soil. The SFRL was from 36.3 to 41 m g⁻¹, from 16.8 to 44.1 m g⁻¹, and from 6.3 to 24.9 m g⁻¹ respectively at depths of 20-40, 40-60 and 60-80 cm. Neither wastewater irrigation nor fertilization had a significant effect on the SFRL. On the other hand, significant differences were found when comparing the variance through depth groups. As with FRDL, average SFRL decreased along with soil depth, which corresponds to findings on other fast growing species like Eucalyptus (O'Grady *et al.*, 2005) and Pine species (Bakker *et al.*, 2009). However, SFRL levels of our findings are relatively lower than those reported for willow. For instance, Rytter and Hansson (Rytter and Hansson, 1996) found that, despite the similar fine root biomass of the two species they studied, the SFRL at a depth of 50 cm, measured at different times throughout the growing season, ranged from 109-159 m g⁻¹ and did not vary with soil depth. A possible explanation of these discrepancies may be the

different stand density in the two trials. For instance, a recent study recorded higher SFRL in Norway spruce stands planted under high stem density, as compared to low stem density, mainly because of the higher proportion of very fine roots (diameter <0–0.25mm) recorded in high stem density plots (Kucbel *et al.*, 2011). In the current study, plant density was 20% lower than in Rytter and Hansson's trial. We found that specific root area (SRA) followed the same pattern as FRDL and SFRL, being higher in the upper soil layers than at greater depths and remaining statistically unchanged following both wastewater and fertilization supply. This also supports our conclusion that root morphology adapts to the environment independently of irrigation dose, generating a high surface area per unit of root biomass where nutrients are more concentrated so as to allow more rapid nutrient uptake per unit of root mass.

2.6. CONCLUSION

This study investigated the response of willow in a vegetation filter to irrigation and fertilization treatments, specifically in terms of above- and belowground biomass production. In particular, the aim of the work was to test the initial hypothesis that increasing amounts of wastewater would enhance stand biomass up to a threshold where plants would be injured by some waterlogging stress, and would eventually show a decrease first in biomass productivity and then in filtering functionality. Two growing seasons after coppicing, aboveground biomass continued to increase under the highest wastewater amount, but a significant decrease in total and fine root biomass was observed. No significant change was found in root morphological traits in relation to wastewater supply. Based on these findings, we can draw two main conclusions. First, from a more ecophysiological perspective, *Salix miyabeana* reacts to high (waste) water supply by reducing only root biomass, and with no change in morphological traits of the roots. Second, from a more practical perspective, the plant secures a more balanced above- and belowground development by avoiding a high volume of wastewater. The next phase of our research will focus on the application of these findings to the actual functionality of the “filtering” capacity of SRC willow.

2.7. ACKNOWLEDGEMENTS

This study received financial support from the MDDEFP – Quebec. The authors wish to thank Francis Allard from Agro Énergie Inc. for providing access to the experimental field. We are grateful to Alexandre Naud, Dominic Desjardins and Matthew Mosseler for their assistance during soil coring. We also wish to thank Stéphane Daigle for statistical support and Karen Grislis for linguistic revision.

2.8. REFERENCES

- Aasamaa, K., Heinsoo, K., & Holm, B. (2010). Biomass production, water use and photosynthesis of *Salix* clones grown in a wastewater purification system. *Biomass and Bioenergy*, 34(6), 897–905.
- Adegbidi, H. G., Briggs, R. D., Volk, T. a., White, E. H., & Abrahamson, L. P. (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., Volk, T. A., White, E. H., & Abrahamson, L. P. (2001). Biomass and nutrient removal by willow clones in experimental bioenergy plantations in New York State. *Biomass and Bioenergy*, 20, 399–411.
- Aylott, M. J., Casella, E., Tubby, I., Street, N. R., Smith, P., & Taylor, G. (2008). Yield and spatial supply of bioenergy poplar and willow short-rotation coppice in the UK. *The New Phytologist*, 178(2), 358–70.
- Baligar, V. C., Fageria, N. K., & He, Z. L. (2007). Communications in Soil Science and Plant Analysis. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, (March 2012), 37–41.
- Bennie, A. T. P. (1991). Growth and mechanical impedance. In Y. Waisel, A. Eshel, & U. Kafkafi (Eds.), *Plant Roots The Hidden Half* (pp. 393–414). Marcel Dekker, Inc.

- Christersson, L. (2010). Wood production potential in poplar plantations in Sweden. *Biomass and Bioenergy*, 34(9), 1289–1299.
- Dimitriou, I. (2005). Performance and Sustainability of Short-Rotation Energy Crops Treated With Municipal and Industrial Residues. Doctoral diss. *Dept. of Short Rotation Forestry, SLU. Acta Universitatis agriculturae Sueciae* vol.2005:44.
- Dimitriou, I., P. Aronsson. P (2003). Wastewater phytoremediation treatment systems in Sweden using short rotation willow coppice. In: SRC Crops for Bioenergy: New Zealand, pp. 225-228. *Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala*.
- Dimitriou, I., & Aronsson, P. (2004). Nitrogen leaching from short-rotation willow coppice after intensive irrigation with wastewater. *Biomass and Bioenergy*, 26(5), 433–441.
- Dimitriou, I., & Aronsson, P. (2005). Willows for energy and phytoremediation in Sweden. *Unasylva* 221, 56, 47–50.
- Dimitriou, I., & Aronsson, P. (2011). Wastewater and sewage sludge application to willows and poplars grown in lysimeters—Plant response and treatment efficiency. *Biomass and Bioenergy*, 35(1), 161–170.
- Énergie, A. (2007). Commission sur l'avenir de l'agriculture et de l'agroalimentaire québécois, Mémoire présenté par Francis Allard, 1–16.
- Firecks, Y. Von, Ericsson, T., & Sennerby-forsse, L. (2001). Seasonal variation of macronutrients in leaves, stems and roots of *Salix dasyclados* Wimm grown at two nutrient levels. *Biomass and Bioenergy*, 21, 321–334.
- Gilbert, P., Thornley, P., & Riche, A. B. (2011). The influence of organic and inorganic fertiliser application rates on UK biomass crop sustainability. *Biomass and Bioenergy*, 35(3), 1170–1181.
- Gower, S. T., & Vitousek, P. M. (1989). Effects of nutrient amendments on fine root biomass in a primary successional forest in Hawai'i. *Oecologia*, 81(4), 566–568.

- Gross, R., Leach, M., & Bauen, A. (2003). Progress in renewable energy. *Environment International*, 29(1), 105–22.
- Guidi, W., & Labrecque, M. (2009). Effects of High Water Supply on Growth, Water Use, and Nutrient Allocation in Willow and Poplar Grown in a 1-Year Pot Trial. *Water, Air, and Soil Pollution*, 207(1-4), 85–101.
- Gwenzi, W., Veneklaas, E. J., Holmes, K. W., Bleby, T. M., Phillips, I. R., & Hinz, C. (2011). Spatial analysis of fine root distribution on a recently constructed ecosystem in a water-limited environment. *Plant and Soil*, 344(1-2), 255–272.
- Heaton, R. J., Sims, R. E., & Tungcul, R. O. (2002). The root growth of *Salix viminalis* and *Eucalyptus nitens* in response to dairy farm pond effluent irrigation. *Bioresource Technology*, 81(1), 1–6.
- Heller, M., Keoleian, G., & Volk, T. A. (2003). Life cycle assessment of a willow bioenergy cropping system. *Biomass and Bioenergy*, 25, 147–165.
- Isebrands, J., Host, G., Bollmark, L., & Porter, J. (1996). A strategy for process modelling of short-rotation *Salix* coppice plantations. *Biomass and Bioenergy*, 11, 245–252.
- Karp, A., Hanley, S. J., Trybush, S. O., Macalpine, W., Pei, M., & Shield, I. (2011). Genetic improvement of willow for bioenergy and biofuels. *Journal of Integrative Plant Biology*, 53(2), 151–65.
- King, J. S., Albaugh, T. J., Allen, H. L., Buford, M., Strain, B. R., & Dougherty, P. (2002). Below-ground carbon input to soil is controlled by nutrient availability and fine root dynamics in loblolly pine. *New Phytologist*, 154(2), 389–398.
- Labrecque, M., & Teodorescu, T. I. (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 and Management*, 150(3), 223–239

- Labrecque, M., & Teodorescu, T. I. (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, 135–146.
- Labrecque, M., & Teodorescu, T. I. (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., Teodorescu, T. I., & Daigle, S. (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.
- Mirck, J., Isebrands, J. G., Verwijst, T., & Ledin, S. (2005). Development of short-rotation willow coppice systems for environmental purposes in Sweden. *Biomass and Bioenergy*, 28(2), 219–228.
- Nadelhoffer, K. J., Aber, J. D., & Melillo, J. M. (1985). Fine roots, net primary production, and soil nitrogen availability: a new hypothesis. *Ecology*, 66(4), 1377–1390.
- Pacaldo, R. S., Volk, T. A., Abrahamson, L. P., & Briggs, R. D. (2010). Above- and Below-ground Biomass and Soil Organic Carbon Inventories of Willow Biomass Crops Across a 19 year Chronosequence. In: *Proceedings of the 8th Biennial Short Rotation Woody Crops Operations Working Group—Short Rotation Woody Crops in a Renewable Energy Future: Challenges and Opportunities*, October 17–19, 2010, Syracuse, New York.
- Quaye, A. K., Volk, T. a., Hafner, S., Leopold, D. J., & Schirmer, C. (2011). Impacts of paper sludge and manure on soil and biomass production of willow. *Biomass and Bioenergy*, 35(7), 2796–2806.
- Rytter, R. (1999). Fine-root production and turnover in a willow plantation estimated by different calculation methods. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 14, 526–537.

- Rytter, R. M., & Hansson, A. C. (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.
- Rytter, R.-M., & Rytter, L. (2011). Quantitative estimates of root densities at minirhizotrons differ from those in the bulk soil. *Plant and Soil*, 350(1-2), 205–220.
- Stadnyk, C. N. (2010). Root dynamics and carbon accumulation of six willow clones in Saskatchewan. *M.Sc. Thesis. University of Saskatchewan, Saskatoon, SK.*
- Volk, T. A., Abrahamson, L. P., & White, E. H. (2001). Root dynamics in willow crops. *Interim Report Prepared for the United States Department of Energy*, 30.
- Volk, T., Abrahamson, L., Nowak, C., Smart, L., Tharakan, P., & White, E. (2006). The development of short-rotation willow in the northeastern United States for bioenergy and bioproducts, agroforestry and phytoremediation. *Biomass and Bioenergy*, 30(8-9), 715–727.

Chapitre 3 : Conclusion

Le présent travail de recherche avait pour objectif de mieux comprendre l'effet d'une fertilisation par les eaux usées sur la biomasse aérienne et racinaire d'une plantation de saules en culture intensive, tout en le comparant à l'effet d'une fertilisation minérale.

D'une manière générale, l'irrigation avec des eaux usées a eu un impact positif considérable sur la production en biomasse aérienne des saules. Au terme d'un premier cycle de croissance de deux ans (2009-2010), des rendements en biomasse aérienne de l'ordre de 39,4 Mg ha⁻¹ et 54,7 Mg ha⁻¹ respectivement pour les saules non fertilisé et fertilisé ont été enregistrés pour les saules ayant reçu les plus grandes quantités d'eaux usées (D3-NF et D3-F). Et ainsi, en considérant juste le traitement par les eaux usées (sans tenir compte de la fertilisation chimique), l'irrigation a permis une augmentation nette de 200 % des rendements de la biomasse ligneuse récoltée (19.2 et 39.4 Mg ha⁻¹ respectivement pour le témoin et les parcelles les plus irriguées).

Concernant les racines, nous avons observé que la majeure partie des racines étaient en superficie avec 92-96% des racines (fines et grosses) concentrées dans les premiers 40 cm de profondeur. Ce résultat est parfaitement en accord avec la littérature qui estime qu'entre 75 et 95% de racines de saule qui sont cultivées CICR se trouvent à 30-36 cm de profondeur.

Dans l'ensemble, la biomasse totale des racines trouvées dans l'actuelle étude ont été légèrement inférieure aux résultats rapportés par d'autres études. Ceci peut probablement être expliqué par le fait que dans notre expérience nous n'avons pas tenu compte de la biomasse souterraine des souches, qui selon Pacaldo et al. (2010) à elles seules peuvent représenter jusqu'à 25% de la biomasse souterraine totale des saules. Dans la littérature, on rapporte que la réponse typique associée à une augmentation de la disponibilité de l'azote dans le sol est une diminution de la biomasse racinaire. Cependant, nous n'avons pas détecté d'effet significatif de la fertilisation minérale ni sur la biomasse des racines totales ni pour celles des racines fines bien qu'en apparence la biomasse des racines totales (incluant fines et grosses) se soit révélée plus élevée dans les parcelles non fertilisées chimiquement. Cette différence peut être expliquée par les très faibles différences dans les quantités d'azote rajoutée suite à la fertilisation chimique et en particulier dans le cas des parcelles qui ont reçu d'importantes quantités de nutriments via l'irrigation par les eaux usées.

La réaction du système racinaire suite aux traitements d'irrigation par les eaux usées n'était pas différente de celle de la fertilisation chimique, bien que dans le cas de l'irrigation, il y a eu une diminution statistiquement détectable pour la biomasse des racines totale et fines. Il est à préciser que cette réduction n'était pas linéaire (avec une décroissance de la biomasse de D0 à D1, une augmentation de D1 à D2 pour descendre de nouveau de D2 à D3). Cette tendance porte à penser qu'au-delà d'une certaine quantité d'eau et de nutriments (suite à l'irrigation par les eaux usées) le développement du système racinaire des saules est affecté négativement, et bien que la biomasse aérienne soit restée élevée sous le traitement D3, nous pensons que le développement de la plante a été quelque peu déséquilibré. Ce phénomène a été rapporté comme étant une réponse spécifique de certaines plantes ligneuses face à l'inondation (saturation hydrique) (Kozłowski 1997) et dans le cas du traitement D3, les plantes ont reçu de très grandes quantités d'eau (pluie + eaux usées) qui dépassent les valeurs optimales d'évapotranspiration rapportées pour les saules (Guidi *et al.*, 2008).

Généralement, les valeurs du FRLD ont diminué avec la profondeur. De fait, 92% des racines fines, détectées suivant leur longueur, ont été trouvées dans les premiers 20 cm, et ni l'irrigation, ni la fertilisation n'ont eu d'effet significatif sur cette variable morphologique. En effet le FRLD est un indicateur morphologique des racines qui répond essentiellement à la disponibilité du sol en nutriments, et bien que l'irrigation ait réduit la biomasse des racines fines, l'absence de variation du FRLD peut suggérer l'idée que l'irrigation n'a pas eu une incidence suffisante pour changer le statut général de la disponibilité des nutriments dans le sol et par conséquent sur la variation de l'architecture racinaire.

La longueur spécifique des racines (SRL) est un trait de la fonction physiologique des racines, et il est souvent donné pour les racines fines (SFRL). Il a été montré qu'il peut augmenter, diminuer ou rester constant en réponse à la limitation en nutriments (Ryser 2006) et des valeurs élevées du SFRL sont généralement associées à un plus grand investissement de la plante dans l'extension de sa surface racinaire plutôt que dans sa biomasse racinaire, permettant ainsi une prospection plus rapide et plus étendue du sol. Généralement nos données du SFRL ont été moins élevées que celles rapportées dans d'autres études et de la même façon que pour le F-RLD, ni l'irrigation par les eaux usées et ni la fertilisation n'ont eu d'effet significatif sur le SFRL. Du reste, les valeurs les plus élevées ont été trouvées entre 0 et 20 cm de profondeur (entre 65,4 et 72 m g⁻¹).

Il n'y a pas eu d'exception pour la superficie spécifique des racines (SRA) qui a suivi la même tendance que le FRDL et le SFRL, en étant plus élevée dans les couches supérieures du sol et sans effet apparent ni d'irrigation ni de la fertilisation. Ceci soutient encore une fois l'idée de l'adaptation morphologique indépendamment de la dose d'irrigation, la plante qui s'adapte à son environnement en priorisant une plus grande surface racinaire par unité de biomasse, dans les endroits où les nutriments sont plus concentrés et ce pour permettre une absorption plus rapide des nutriments par unité de masse racinaire.

Finalement les résultats de cette étude ont montré qu'au niveau expérimental, une culture intensive de saules d'une superficie de 7200 m² a permis de traiter par année plus de 10³ m³ d'effluents liquides issues du centre d'assainissement de la municipalité de Saint-Roch-de-l'Achigan (une agglomération urbaine de 5000 habitants). Les analyses chimiques des eaux lessivées (résultats présentés en annexe) ont montré que des saules en cultures intensives ont permis d'intercepter et d'assimiler de grandes quantités de contaminants d'une eau qui était relativement riche en azote (~30mg l⁻¹). Ces éléments ont profité à la culture et ont ainsi permis d'optimiser les rendements de la biomasse ligneuse de près de 100% dans certaines cas. Ces résultats soutiennent davantage l'idée qu'une substitution de la fertilisation chimique par celle avec les eaux usées peut être profitable dans le domaine de la production des énergies renouvelables. En effet, cette pratique permet de réduire potentiellement le coût de production des cultures bioénergétiques et peut ainsi générer des profits qui encourageraient d'éventuels investissements dans le secteur de la bioénergie. Les résultats quant à la partie souterraine ont montré que la majorité des racines des saules du clone *Salix miyabeana SX67* étaient concentrés en surface (40 cm) du sol et que la fertilisation par les eaux usées n'a pas montré d'effets directs sur les variables morphologiques racinaires étudiées, mais a davantage contribué à la diminution de la biomasse des racines, surtout celles qui étaient fines (diamètre <2mm). En corroborant ces données de la morphologie et de la biomasse racinaire du clone *Salix miyabeana SX67* avec les résultats des recherches faites sur d'autres cultivars de saules, nous pourrions ainsi prévoir le choix pour un cultivar donné en fonction du choix de la culture et de la composition du sol.

Les résultats de cette étude peuvent être extrapolés sur une plus grande échelle en envisageant l'application et ce sur une plus large période de temps (troisième et quatrième rotation) avec de plus grandes quantités d'eaux usées. Ceci nous permettra d'évaluer

davantage la limite des cultures de saules *Salix miyabeana* SX67 à assimiler l'eau et les nutriments et à prévoir des éventuels lessivages, surtout de l'élément phosphore.

Références bibliographiques

- Aasamaa, K., Heinsoo, K., & Holm, B. (2010). Biomass production, water use and photosynthesis of *Salix* clones grown in a wastewater purification system. *Biomass and Bioenergy*, 34(6), 897–905.
- Adegbidi, H. G., Briggs, R. D., Volk, T. a., White, E. H., & Abrahamson, L. P. (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., Volk, T. A., White, E. H., & Abrahamson, L. P. (2001). Biomass and nutrient removal by willow clones in experimental bioenergy plantations in New York State. *Biomass and Bioenergy*, 20, 399–411.
- Aylott, M. J., Casella, E., Tubby, I., Street, N. R., Smith, P., & Taylor, G. (2008). Yield and spatial supply of bioenergy poplar and willow short-rotation coppice in the UK. *The New Phytologist*, 178(2), 358–70.
- Baligar, V. C., Fageria, N. K., & He, Z. L. (2007). Communications in Soil Science and Plant Analysis. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, (March 2012), 37–41.
- Bennie, A. T. P. (1991). Growth and mechanical impedance. In Y. Waisel, A. Eshel, & U. Kafkafi (Eds.), *Plant Roots The Hidden Half* (pp. 393–414). Marcel Dekker, Inc.
- Christersson, L. (2010). Wood production potential in poplar plantations in Sweden. *Biomass and Bioenergy*, 34(9), 1289–1299.
- Dimitriou, I. (2005). Performance and Sustainability of Short-Rotation Energy Crops Treated With Municipal and Industrial Residues. Doctoral diss. *Dept. of Short Rotation Forestry, SLU. Acta Universitatis agriculturae Sueciae* vol.2005:44.

- Dimitriou, I., P. Aronsson, P. (2003). Wastewater phytoremediation treatment systems in Sweden using short rotation willow coppice. In: SRC Crops for Bioenergy: New Zealand, pp. 225-228. *Swedish University of Agricultural Sciences*, Uppsala.
- Dimitriou, I., & Aronsson, P. (2004). Nitrogen leaching from short-rotation willow coppice after intensive irrigation with wastewater. *Biomass and Bioenergy*, 26(5), 433–441.
- Dimitriou, I., & Aronsson, P. (2005). Willows for energy and phytoremediation in Sweden. *Unasylva* 221, 56, 47–50.
- Dimitriou, I., & Aronsson, P. (2011). Wastewater and sewage sludge application to willows and poplars grown in lysimeters—Plant response and treatment efficiency. *Biomass and Bioenergy*, 35(1), 161–170.
- Énergie, A. (2007). Commission sur l'avenir de l'agriculture et de l'agroalimentaire québécois, Mémoire présenté par Francis Allard, 1–16.
- Fircks, Y. Von, Ericsson, T., & Sennerby-forsse, L. (2001). Seasonal variation of macronutrients in leaves, stems and roots of *Salix dasyclados* Wimm grown at two nutrient levels. *Biomass and Bioenergy*, 21, 321–334.
- Gilbert, P., Thornley, P., & Riche, A. B. (2011). The influence of organic and inorganic fertiliser application rates on UK biomass crop sustainability. *Biomass and Bioenergy*, 35(3), 1170–1181.
- Gower, S. T., & Vitousek, P. M. (1989). Effects of nutrient amendments on fine root biomass in a primary successional forest in Hawai'i. *Oecologia*, 81(4), 566–568.
- Gross, R., Leach, M., & Bauen, A. (2003). Progress in renewable energy. *Environment International*, 29(1), 105–22.
- Guidi, W., & Labrecque, M. (2009). Effects of High Water Supply on Growth, Water Use, and Nutrient Allocation in Willow and Poplar Grown in a 1-Year Pot Trial. *Water, Air, and Soil Pollution*, 207(1-4), 85–101.

- Gwenzi, W., Veneklaas, E. J., Holmes, K. W., Bleby, T. M., Phillips, I. R., & Hinz, C. (2011). Spatial analysis of fine root distribution on a recently constructed ecosystem in a water-limited environment. *Plant and Soil*, *344*(1-2), 255–272.
- Heaton, R. J., Sims, R. E., & Tungcul, R. O. (2002). The root growth of *Salix viminalis* and *Eucalyptus nitens* in response to dairy farm pond effluent irrigation. *Bioresource Technology*, *81*(1), 1–6.
- Heller, M., Keoleian, G., & Volk, T. A. (2003a). Life cycle assessment of a willow bioenergy cropping system. *Biomass and Bioenergy*, *25*, 147–165.
- Heller, M., Keoleian, G., & Volk, T. A. (2003b). Life cycle assessment of a willow bioenergy cropping system. *Biomass and Bioenergy*, *25*, 147–165.
- Isebrands, J., Host, G., Bollmark, L., & Porter, J. (1996). A strategy for process modelling of short-rotation *Salix* coppice plantations. *Biomass and Bioenergy*, *11*, 245–252.
- Karp, A., Hanley, S. J., Trybush, S. O., Macalpine, W., Pei, M., & Shield, I. (2011). Genetic improvement of willow for bioenergy and biofuels. *Journal of Integrative Plant Biology*, *53*(2), 151–65.
- King, J. S., Albaugh, T. J., Allen, H. L., Buford, M., Strain, B. R., & Dougherty, P. (2002). Below-ground carbon input to soil is controlled by nutrient availability and fine root dynamics in loblolly pine. *New Phytologist*, *154*(2), 389–398.
- Labrecque, M., & Teodorescu, T. I. (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 and Management*, *150*(3), 223–239.
- Labrecque, M., & Teodorescu, T. I. (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*, 135–146.

- Labrecque, M., & Teodorescu, T. I. (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., Teodorescu, T. I., & Daigle, S. (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.
- Mirck, J., Isebrands, J. G., Verwijst, T., & Ledin, S. (2005). Development of short-rotation willow coppice systems for environmental purposes in Sweden. *Biomass and Bioenergy*, 28(2), 219–228.
- Nadelhoffer, K. J., Aber, J. D., & Melillo, J. M. (1985). Fine roots, net primary production, and soil nitrogen availability: a new hypothesis. *Ecology*, 66(4), 1377–1390.
- Pacaldo, R. S., Volk, T. A., Abrahamson, L. P., & Briggs, R. D. (2010). Above- and Below-ground Biomass and Soil Organic Carbon Inventories of Willow Biomass Crops Across a 19 year Chronosequence. In: *Proceedings of the 8th Biennial Short Rotation Woody Crops Operations Working Group—Short Rotation Woody Crops in a Renewable Energy Future: Challenges and Opportunities*, October 17–19, 2010, Syracuse, New York.
- Quaye, A. K., Volk, T. a., Hafner, S., Leopold, D. J., & Schirmer, C. (2011). Impacts of paper sludge and manure on soil and biomass production of willow. *Biomass and Bioenergy*, 35(7), 2796–2806.
- Rytter, R. (1999). Fine-root production and turnover in a willow plantation estimated by different calculation methods. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 14, 526–537.
- Rytter, R. M., & Hansson, A. C. (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.

- Rytter, R.-M., & Rytter, L. (2011). Quantitative estimates of root densities at minirhizotrons differ from those in the bulk soil. *Plant and Soil*, 350(1-2), 205–220.
- Stadnyk, C. N. (2010). *Root dynamics and carbon accumulation of six willow clones in Saskatchewan. M.Sc. Thesis*. University of Saskatchewan, Saskatoon, SK.
- Volk, T. A., Abrahamson, L. P., & White, E. H. (2001). Root dynamics in Willow crops. *Interim Report Prepared for the United States Department of Energy*, 30.
- Volk, T., Abrahamson, L., Nowak, C., Smart, L., Tharakan, P., & White, E. (2006). The development of short-rotation willow in the northeastern United States for bioenergy and bioproducts, agroforestry and phytoremediation. *Biomass and Bioenergy*, 30(8-9), 715–727.

Annexe 1

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

Traitement		Localisation		Biomasse aérienne	
Irrigation	Fertilisation	Bloc	Parcelle	2009	2010
D0	Fertilisé	bloc 1	P1	16.8	33.7
D0	non Fertilisé	bloc 1	P2	9.3	18.5
D0	non Fertilisé	bloc 2	P3	9.3	18.6
D0	Fertilisé	bloc 2	P4	15.6	31.1
D0	non Fertilisé	bloc 3	P5	10.2	20.4
D0	Fertilisé	bloc 3	P6	11.9	23.8
D0	Fertilisé	bloc 4	P7	12.8	25.6
D0	non Fertilisé	bloc 4	P8	9.7	19.4
D1	non Fertilisé	bloc 1	P1	17.3	34.6
D1	Fertilisé	bloc 1	P2	21.3	42.5
D1	Fertilisé	bloc 2	P3	15.7	31.3
D1	non Fertilisé	bloc 2	P4	15.5	31.0
D1	non Fertilisé	bloc 3	P5	16.5	32.9
D1	Fertilisé	bloc 3	P6	19.1	38.2
D1	non Fertilisé	bloc 4	P7	16.2	32.5
D1	Fertilisé	bloc 4	P8	13.2	26.5
D2	non Fertilisé	bloc 1	P1	18.3	36.5
D2	Fertilisé	bloc 1	P2	21.9	43.8
D2	non Fertilisé	bloc 2	P3	14.1	28.2
D2	Fertilisé	bloc 2	P4	22.9	45.8
D2	non Fertilisé	bloc 3	P5	16.0	32.0
D2	Fertilisé	bloc 3	P6	22.3	44.6
D2	non Fertilisé	bloc 4	P7	21.2	42.5
D2	Fertilisé	bloc 4	P8	17.9	35.8
D3	Fertilisé	bloc 1	P1	30.3	60.5
D3	non Fertilisé	bloc 1	P2	19.3	38.7
D3	non Fertilisé	bloc 2	P3	22.1	44.1
D3	Fertilisé	bloc 2	P4	25.4	50.7
D3	Fertilisé	bloc 3	P5	25.9	51.8
D3	non Fertilisé	bloc 3	P6	20.5	40.9
D3	Fertilisé	bloc 4	P7	27.9	55.9
D3	non Fertilisé	bloc 4	P8	16.9	33.9

Note : la biomasse aérienne est représentée respectivement pour les deux années de croissance 2009 ($\text{Mg ha}^{-1} \text{an}^{-1}$) et 2010 (Mg ha^{-1})

Tableau 2: Ratio racines souches (R/S) et rendement en biomasse sèche des racines fines, grosse et totales récupérés au niveau de l'horizon 0-80 cm suite à l'application des divers doses d'irrigation et/ou de la fertilisation chimique

Traitement		Localisation			Biomasse des racines totales récoltées (Mg ha-1)			R /S
Irrigation	Fertilisation	Bloc	Parcelle	Profondeur	Totale racines	Racines fines	Racines grosses	
D0	Fertilisé	bloc 1	P1	0-80	1.595	1.322	0.273	0.047
D0	non Fertilisé	bloc 1	P2	0-80	1.365	1.176	0.189	0.074
D0	non Fertilisé	bloc 2	P3	0-80	2.824	2.048	0.776	0.152
D0	Fertilisé	bloc 2	P4	0-80	4.164	2.705	1.460	0.134
D0	non Fertilisé	bloc 3	P5	0-80	2.573	2.105	0.468	0.126
D0	Fertilisé	bloc 3	P6	0-80	1.978	1.803	0.175	0.083
D0	Fertilisé	bloc 4	P7	0-80	3.046	2.161	0.885	0.119
D0	non Fertilisé	bloc 4	P8	0-80	2.766	2.414	0.352	0.142
D1	non Fertilisé	bloc 1	P1	0-80	1.846	1.540	0.306	0.053
D1	Fertilisé	bloc 1	P2	0-80	1.988	1.621	0.367	0.047
D1	Fertilisé	bloc 2	P3	0-80	0.948	0.801	0.148	0.030
D1	non Fertilisé	bloc 2	P4	0-80	2.722	1.984	0.738	0.088
D1	non Fertilisé	bloc 3	P5	0-80	1.704	1.361	0.343	0.052
D1	Fertilisé	bloc 3	P6	0-80	1.414	1.207	0.207	0.037
D1	non Fertilisé	bloc 4	P7	0-80	1.744	1.487	0.257	0.054
D1	Fertilisé	bloc 4	P8	0-80	1.134	1.025	0.109	0.043
D2	non Fertilisé	bloc 1	P1	0-80	3.737	2.794	0.943	0.102
D2	Fertilisé	bloc 1	P2	0-80	1.615	1.312	0.303	0.037
D2	non Fertilisé	bloc 2	P3	0-80	5.895	2.040	1.075	0.111
D2	Fertilisé	bloc 2	P4	0-80	2.156	1.433	0.723	0.047
D2	non Fertilisé	bloc 3	P5	0-80	1.782	1.448	0.334	0.056
D2	Fertilisé	bloc 3	P6	0-80	1.260	1.082	0.179	0.028
D2	non Fertilisé	bloc 4	P7	0-80	1.939	1.591	0.348	0.046
D2	Fertilisé	bloc 4	P8	0-80	4.086	2.663	1.423	0.114
D3	Fertilisé	bloc 1	P1	0-80	1.580	0.856	0.725	0.026
D3	non Fertilisé	bloc 1	P2	0-80	1.870	1.439	0.431	0.048
D3	non Fertilisé	bloc 2	P3	0-80	1.359	1.089	0.270	0.031
D3	Fertilisé	bloc 2	P4	0-80	2.676	1.791	0.885	0.053
D3	Fertilisé	bloc 3	P5	0-80	0.811	0.749	0.062	0.016
D3	non Fertilisé	bloc 3	P6	0-80	0.817	0.713	0.104	0.020
D3	Fertilisé	bloc 4	P7	0-80	0.688	0.605	0.083	0.012
D3	non Fertilisé	bloc 4	P8	0-80	1.106	0.967	0.139	0.033

Tableau 3: Densité de longueur des racines fines, longueur spécifique des racines fines, superficie spécifique des racines et rendement en biomasse sèche des racines fines, grosse et totales récupérés au niveau de l'horizon 0-20

Traitement		Localisation			Biomasse des racines (Mg ha ⁻¹)			(cm cm ⁻³)	(m g ⁻¹)	(m ² g ⁻¹)	(g cm ⁻³)	-	(μS m ⁻¹)
Irrigation	Fertilisation	Bloc	Parcelle	Profondeur	Fines	Grosses	Totales	DLRF	LSRF	SSR	ρ	pH	Ec
D0	Fertilisé	bloc 1	P1	0-20	0.898	0.191	1.089	1.400	31.2	59.2	0.94	6.96	36.3
D0	non Fertilisé	bloc 1	P2	0-20	1.069	0.172	1.242	2.931	54.8	99.2	1.03	6.81	29
D0	non Fertilisé	bloc 2	P3	0-20	1.786	0.631	2.418	8.084	90.5	127.6	1.08	6.22	33
D0	Fertilisé	bloc 2	P4	0-20	2.633	1.454	4.088	8.489	64.5	85.1	0.97	6.73	32.3
D0	non Fertilisé	bloc 3	P5	0-20	1.880	0.417	2.297	6.220	66.2	99.6	1.01	7	24.6
D0	Fertilisé	bloc 3	P6	0-20	1.803	0.175	1.978	6.346	70.4	122.7	1.08	6.78	22.8
D0	Fertilisé	bloc 4	P7	0-20	1.578	0.206	1.784	6.128	77.7	128.8	1.24	6.77	21.2
D0	non Fertilisé	bloc 4	P8	0-20	2.289	0.300	2.589	7.812	68.3	114.1	1.19	6.96	20.9
D1	non Fertilisé	bloc 1	P1	0-20	1.430	0.300	1.729	5.963	83.4	127.4	1.05	6.47	16.8
D1	Fertilisé	bloc 1	P2	0-20	1.270	0.324	1.594	5.420	85.3	131.3	0.91	6.68	13.3
D1	Fertilisé	bloc 2	P3	0-20	0.723	0.142	0.865	2.941	81.3	133.6	0.86	6.69	19.1
D1	non Fertilisé	bloc 2	P4	0-20	1.900	0.733	2.633	4.939	52.0	77.0	0.95	6.48	15.5
D1	non Fertilisé	bloc 3	P5	0-20	1.361	0.343	1.704	5.227	76.8	116.0	0.97	6.59	11.4
D1	Fertilisé	bloc 3	P6	0-20	1.142	0.194	1.336	5.299	92.8	155.3	1.03	6.59	16.7
D1	non Fertilisé	bloc 4	P7	0-20	1.384	0.253	1.637	6.952	100.5	152.6	1.17	6.38	16.5
D1	Fertilisé	bloc 4	P8	0-20	0.961	0.092	1.052	5.880	122.4	213.4	1.01	6.48	16.9
D2	non Fertilisé	bloc 1	P1	0-20	2.315	0.769	3.084	7.098	61.3	89.2	0.86	6.4	16.6
D2	Fertilisé	bloc 1	P2	0-20	1.023	0.288	1.311	3.913	76.5	114.2	0.97	6.71	18.7
D2	non Fertilisé	bloc 2	P3	0-20	1.861	1.071	5.711	3.957	41.7	57.3	0.98	6.19	19.6
D2	Fertilisé	bloc 2	P4	0-20	1.424	0.723	2.147	3.537	49.7	67.1	0.89	6.41	18.3
D2	non Fertilisé	bloc 3	P5	0-20	1.327	0.303	1.630	3.984	60.1	98.4	0.99	6.54	16.7
D2	Fertilisé	bloc 3	P6	0-20	0.487	0.039	0.525	2.375	97.6	167.1	0.96	6.5	17.7
D2	non Fertilisé	bloc 4	P7	0-20	0.983	0.274	1.257	4.210	85.7	125.9	0.88	6.58	15.5
D2	Fertilisé	bloc 4	P8	0-20	1.951	0.682	2.633	7.185	73.6	104.3	0.96	6.29	13.6
D3	Fertilisé	bloc 1	P1	0-20	0.658	0.671	1.329	0.622	18.9	25.2	1.09	6.27	16.8
D3	non Fertilisé	bloc 1	P2	0-20	1.163	0.345	1.508	3.876	66.7	99.9	0.90	6.76	17.8
D3	non Fertilisé	bloc 2	P3	0-20	1.077	0.269	1.347	3.761	69.8	107.2	0.99	6.83	17.7
D3	Fertilisé	bloc 2	P4	0-20	1.740	0.877	2.616	4.507	51.8	66.0	0.96	7.06	21.3
D3	Fertilisé	bloc 3	P5	0-20	0.738	0.061	0.798	3.763	102.0	175.2	0.98	6.8	17.4
D3	non Fertilisé	bloc 3	P6	0-20	0.696	0.104	0.800	3.575	102.7	160.0	1.04	7.12	17.6
D3	Fertilisé	bloc 4	P7	0-20	0.569	0.083	0.651	2.381	83.7	138.5	0.89	6.49	14.6
D3	non Fertilisé	bloc 4	P8	0-20	0.874	0.121	0.995	3.517	80.5	137.1	0.95	6.75	19.5

Tableau 4: Densité de longueur des racines fines, longueur spécifique des racines fines, superficie spécifique des racines et rendement en biomasse sèche des racines grosse et totales récupérés au niveau de l'horizon 20-40

Traitement		Localisation			Biomasse des racines (Mg ha ⁻¹)			(cm cm ⁻³)	(m g ⁻¹)	(m ² g ⁻¹)	(g cm ⁻³)	-	(μS cm ⁻¹)
Irrigation	Fertilisation	Bloc	Parcelle	Profondeur	Fines	Grosses	Totales	DLRF	LSRF	SSR	ρ	pH	Ec
D0	Fertilisé	bloc 1	P1	20-40	0.160	0.039	0.199	0.257	32.0	64.5	0.97	7.05	20.2
D0	non Fertilisé	bloc 1	P2	20-40	0.047	0.006	0.053	0.120	51.1	105.7	0.93	6.34	25.8
D0	non Fertilisé	bloc 2	P3	20-40	0.165	0.057	0.223	0.417	50.4	89.1	1.03	6.25	33.1
D0	Fertilisé	bloc 2	P4	20-40	0.048	0.003	0.052	0.126	52.1	110.3	0.83	6.49	23.8
D0	non Fertilisé	bloc 3	P5	20-40	0.190	0.039	0.229	0.382	40.2	81.2	1.09	5.92	25.5
D0	Fertilisé	bloc 3	P6	20-40	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0		1.08	6.94	17.1
D0	Fertilisé	bloc 4	P7	20-40	0.325	0.063	0.388	0.627	38.6	79.9	1.01	6.79	17.8
D0	non Fertilisé	bloc 4	P8	20-40	0.125	0.052	0.177	0.165	26.3	45.2	1.05	6.64	20.4
D1	non Fertilisé	bloc 1	P1	20-40	0.108	0.006	0.114	0.371	68.7	132.6	0.84	6.74	17.1
D1	Fertilisé	bloc 1	P2	20-40	0.154	0.016	0.170	0.455	58.9	116.4	0.78	6.69	15.6
D1	Fertilisé	bloc 2	P3	20-40	0.026	0.005	0.030	0.047	36.6	89.4	0.82	6.85	15.2
D1	non Fertilisé	bloc 2	P4	20-40	0.016	0.001	0.017	0.027	33.8	85.0	1.00	6.72	12.2
D1	non Fertilisé	bloc 3	P5	20-40	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0		1.00	6.24	11.8
D1	Fertilisé	bloc 3	P6	20-40	0.054	0.012	0.066	0.080	29.7	64.2	0.88	6.84	12
D1	non Fertilisé	bloc 4	P7	20-40	0.009	0.000	0.009	0.015	34.3	81.7	0.97	6.61	14
D1	Fertilisé	bloc 4	P8	20-40	0.064	0.018	0.082	0.097	30.1	70.7	0.88	6.89	16.2
D2	non Fertilisé	bloc 1	P1	20-40	0.479	0.174	0.654	0.973	40.6	69.5	0.97	6.94	15.7
D2	Fertilisé	bloc 1	P2	20-40	0.098	0.002	0.101	0.260	52.8	111.3	0.90	6.56	18.9
D2	non Fertilisé	bloc 2	P3	20-40	0.079	0.003	0.081	0.045	11.4	27.2	0.96	6.48	18.4
D2	Fertilisé	bloc 2	P4	20-40	0.008	0.000	0.008	0.033	78.8	176.4	0.86	6.72	16.8
D2	non Fertilisé	bloc 3	P5	20-40	0.121	0.031	0.152	0.130	21.5	45.3	0.93	6.58	15.3
D2	Fertilisé	bloc 3	P6	20-40	0.236	0.121	0.357	0.316	26.8	50.2	0.93	6.63	21.7
D2	non Fertilisé	bloc 4	P7	20-40	0.200	0.035	0.235	0.412	41.3	72.4	0.93	6.51	14.6
D2	Fertilisé	bloc 4	P8	20-40	0.561	0.395	0.956	1.068	38.1	53.1	0.99	6.55	16.9
D3	Fertilisé	bloc 1	P1	20-40	0.161	0.054	0.214	0.224	27.8	60.3	0.91	6.53	18.5
D3	non Fertilisé	bloc 1	P2	20-40	0.072	0.006	0.078	0.169	47.2	96.3	0.90	6.86	14.3
D3	non Fertilisé	bloc 2	P3	20-40	0.011	0.001	0.012	0.018	31.9	75.8	1.00	6.96	17.9
D3	Fertilisé	bloc 2	P4	20-40	0.011	0.001	0.011	0.025	48.5	118.7	0.97	7.23	19.6
D3	Fertilisé	bloc 3	P5	20-40	0.012	0.001	0.013	0.016	26.5	74.2	0.99	7.05	16.8
D3	non Fertilisé	bloc 3	P6	20-40	0.013	0.001	0.014	0.039	57.3	117.6	1.03	7.06	14.6
D3	Fertilisé	bloc 4	P7	20-40	0.014	0.000	0.014	0.027	39.2	94.2	0.94	6.81	12.4
D3	non Fertilisé	bloc 4	P8	20-40	0.075	0.016	0.092	0.188	49.9	97.5	0.90	6.84	11.9

Tableau 5: Densité de longueur des racines fines, longueur spécifique des racines fines, superficie spécifique des racines et rendement en biomasse sèche des racines grosse et totales récupérés au niveau de l'horizon 40-60

Traitement		Localisation			Biomasse des racines (Mg ha ⁻¹)			(cm cm ⁻³)	(m g ⁻¹)	(m ² Kg ⁻¹)	(g cm ⁻³)	-	(μS cm ⁻¹)
Irrigation	Fertilisation	Bloc	Parcelle	Profondeur	Fines	Grosses	Totales	DLRF	LSRF	SSR	ρ	pH	Ec
D0	Fertilisé	bloc 1	P1	40-60	0.208	0.037	0.244	0.255	24.6	54.1	1.05	6.2	18.5
D0	non Fertilisé	bloc 1	P2	40-60	0.060	0.010	0.070	0.132	43.9	92.3	1.10	6.6	27.5
D0	non Fertilisé	bloc 2	P3	40-60	0.062	0.071	0.133	0.128	41.2	67.2	1.11	7.03	21.9
D0	Fertilisé	bloc 2	P4	40-60	0.023	0.002	0.025	0.060	52.2	107.7	0.87	6.76	20.9
D0	non Fertilisé	bloc 3	P5	40-60	0.035	0.012	0.047	0.084	48.1	94.5	1.09	7.18	19.8
D0	Fertilisé	bloc 3	P6	40-60	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0		0.83	7.05	13.5
D0	Fertilisé	bloc 4	P7	40-60	0.244	0.616	0.860	0.116	9.5	11.5	1.06	5.84	24.1
D0	non Fertilisé	bloc 4	P8	40-60	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0		1.09	6.69	14
D1	non Fertilisé	bloc 1	P1	40-60	0.002	0.000	0.002	0.025	22.8	449.0	1.01	6.64	17.8
D1	Fertilisé	bloc 1	P2	40-60	0.124	0.017	0.141	0.703	113.0	193.8	1.16	6.99	14.4
D1	Fertilisé	bloc 2	P3	40-60	0.051	0.001	0.053	0.178	69.5	134.0	1.19	7.14	16.2
D1	non Fertilisé	bloc 2	P4	40-60	0.039	0.003	0.043	0.046	23.3	70.5	1.08	7.2	13.1
D1	non Fertilisé	bloc 3	P5	40-60	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0		1.24	6.99	13.3
D1	Fertilisé	bloc 3	P6	40-60	0.012	0.000	0.012	0.030	51.3	104.3	1.03	6.87	12.2
D1	non Fertilisé	bloc 4	P7	40-60	0.095	0.003	0.098	0.431	91.1	158.3	1.16	6.87	16.1
D1	Fertilisé	bloc 4	P8	40-60	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0		1.14	6.6	23
D2	non Fertilisé	bloc 1	P1	40-60	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0		1.06	7.15	15.8
D2	Fertilisé	bloc 1	P2	40-60	0.102	0.007	0.108	0.161	31.8	60.5	1.15	6.85	21.9
D2	non Fertilisé	bloc 2	P3	40-60	0.101	0.001	0.102	0.111	22.0	48.7	1.02	6.95	14.9
D2	Fertilisé	bloc 2	P4	40-60	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0		1.02	6.94	16.3
D2	non Fertilisé	bloc 3	P5	40-60	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0		0.88	7.03	18.4
D2	Fertilisé	bloc 3	P6	40-60	0.274	0.016	0.290	0.466	34.0	66.4	0.97	7.02	21
D2	non Fertilisé	bloc 4	P7	40-60	0.326	0.030	0.355	0.567	34.8	77.6	0.95	6.36	13.9
D2	Fertilisé	bloc 4	P8	40-60	0.151	0.346	0.497	0.087	11.5	12.3	0.98	6.59	12.3
D3	Fertilisé	bloc 1	P1	40-60	0.004	0.000	0.004	0.016	92.7	190.6	1.03	6.75	13.7
D3	non Fertilisé	bloc 1	P2	40-60	0.204	0.080	0.284	0.328	32.1	57.0	1.11	6.85	15.7
D3	non Fertilisé	bloc 2	P3	40-60	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0		1.01	7.16	10.6
D3	Fertilisé	bloc 2	P4	40-60	0.033	0.007	0.041	0.099	60.1	113.1	1.06	7.16	20.4
D3	Fertilisé	bloc 3	P5	40-60	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0		1.22	7.15	18.2
D3	non Fertilisé	bloc 3	P6	40-60	0.003	0.000	0.003	0.011	77.7	155.1	0.93	6.92	19.8
D3	Fertilisé	bloc 4	P7	40-60	0.023	0.000	0.023	0.041	35.5	80.6	1.08	6.95	16.2
D3	non Fertilisé	bloc 4	P8	40-60	0.002	0.000	0.002	0.004	54.9	134.5	1.08	6.89	11.2

Tableau 6: Densité de longueur des racines fines, longueur spécifique des racines fines, superficie spécifique des racines et rendement en biomasse sèche des racines fines, grosse et totales récupérés au niveau de l'horizon 60-80

Traitement		Localisation			Biomasse des racines (Mg ha ⁻¹)			(cm cm ⁻³)	(m g ⁻¹)	(m ² Kg ⁻¹)	(g cm ⁻³)	-	(μS cm ⁻¹)
Irrigation	Fertilisation	Bloc	Parcelle	Profondeur	Fines	Grosses	Totales	DLRF	LSRF	SSR	ρ	pH	Ec
D0	Fertilisé	bloc 1	P1	60-80	0.057	0.006	0.063	0.123	43.3	91.9	0.94	7.28	22.5
D0	non Fertilisé	bloc 1	P2	60-80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0		0.85	6.67	32.1
D0	non Fertilisé	bloc 2	P3	60-80	0.034	0.016	0.050	0.088	51.4	88.2	1.10	6.72	24.4
D0	Fertilisé	bloc 2	P4	60-80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0		0.79	7.22	25.1
D0	non Fertilisé	bloc 3	P5	60-80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0	0.0	1.28	7.08	14.5
D0	Fertilisé	bloc 3	P6	60-80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0		0.85	6.88	17.6
D0	Fertilisé	bloc 4	P7	60-80	0.014	0.000	0.014	0.056	81.8	162.1	0.81	5.99	21.4
D0	non Fertilisé	bloc 4	P8	60-80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0		0.98	6.03	16.1
D1	non Fertilisé	bloc 1	P1	60-80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0		0.92	7.33	12.5
D1	Fertilisé	bloc 1	P2	60-80	0.072	0.010	0.082	0.109	30.4	65.3	0.94	6.88	16.7
D1	Fertilisé	bloc 2	P3	60-80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0		0.99	7.16	17.4
D1	non Fertilisé	bloc 2	P4	60-80	0.028	0.000	0.029	0.086	60.4	122.1	0.91	6.79	17.2
D1	non Fertilisé	bloc 3	P5	60-80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0		1.06	6.97	14.5
D1	Fertilisé	bloc 3	P6	60-80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0		1.24	7.02	14.9
D1	non Fertilisé	bloc 4	P7	60-80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0		0.82	6.54	14.2
D1	Fertilisé	bloc 4	P8	60-80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0		0.99	6.85	12.4
D2	non Fertilisé	bloc 1	P1	60-80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0		1.10	7.3	16.7
D2	Fertilisé	bloc 1	P2	60-80	0.090	0.005	0.095	0.053	11.7	29.8	1.24	6.56	30.7
D2	non Fertilisé	bloc 2	P3	60-80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0		0.97	6.97	20.2
D2	Fertilisé	bloc 2	P4	60-80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0		1.26	6.92	19.8
D2	non Fertilisé	bloc 3	P5	60-80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0		1.20	6.95	14.4
D2	Fertilisé	bloc 3	P6	60-80	0.085	0.002	0.087	0.051	11.9	27.0	1.13	6.91	17.1
D2	non Fertilisé	bloc 4	P7	60-80	0.083	0.009	0.092	0.109	26.4	51.6	1.13	6.56	19.3
D2	Fertilisé	bloc 4	P8	60-80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0		1.19	6.72	12.2
D3	Fertilisé	bloc 1	P1	60-80	0.033	0.000	0.033	0.100	60.3	127.0	0.97	7.13	22.3
D3	non Fertilisé	bloc 1	P2	60-80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0		1.22	7.42	22.5
D3	non Fertilisé	bloc 2	P3	60-80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0		0.89	7.33	16.7
D3	Fertilisé	bloc 2	P4	60-80	0.007	0.000	0.007	0.030	80.7	163.9	0.86	7.34	14.9
D3	Fertilisé	bloc 3	P5	60-80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0		1.22	7.22	19.6
D3	non Fertilisé	bloc 3	P6	60-80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0		0.77	6.93	15
D3	Fertilisé	bloc 4	P7	60-80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0		0.98	6.85	18.2
D3	non Fertilisé	bloc 4	P8	60-80	0.017	0.001	0.018	0.049	58.5	126.8	0.94	6.99	14.5

Annexe 2

Résultats des analyses de variance effectuées sur les données des rendements en biomasse sèche de la partie aérienne (Aboveground biomass), sur le ratio racines-souches (R/S), sur les rendements en biomasse sèche des racines fines totale (Total Fine Roots Biomass), sur les rendements en biomasse sèche des racines grosses totale (Total Coarse Root Biomass) et sur les rendements en biomasse sèche des racines totales (Total root Biomass) récupérés au niveau de l'horizon 0-80 cm et ce suite à l'application des divers doses d'irrigation et/ou de la fertilisation chimique.

Above ground Biomass (Mg ha⁻¹)

Tout le modèle
Résumé de l'ajustement

R carré	0,555086
R carré ajusté	0,42532
Écart-type résiduel	2,74526
Moyenne de la réponse	17,91228
Observations (ou sommes pondérées)	32

Tests de coefficients fixes

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Degré(s) ominateur	Rapport F	Prob. > F
Irrigation	3	3	9	102,6465	<,0001*
Fertilisation	1	1	3	20,4560	0,0202*
Irrigation*Fertilisation	3	3	9	2,0204	0,1816

Irrigation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0,050$

Niveau	Moyenne des moindres carrés
D3 A	23,533811
D2 B	19,322397
D1 C	16,847598
D0 D	11,945327

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Fertilisation

t de Student des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0,050$

Niveau	Moyenne des moindres carrés
Fertilisé A	20,052774
non Fertilisé B	15,771792

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Irrigation*Fertilisation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0,050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
D3,Fertilisé	A	27,364855
D2,Fertilisé	B	21,245437
D3,non Fertilisé	B	19,702766
D2,non Fertilisé	B C	17,399358
D1,Fertilisé	B C	17,324264
D1,non Fertilisé	B C	16,370932
D0,Fertilisé	C D	14,276542
D0,non Fertilisé	D	9,614112

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Total Fine Root biomass (Mg ha⁻¹)

Tout le modèle
Résumé de l'ajustement

R carré	0,096495
R carré ajusté	-0,16703
Écart-type résiduel	0,545767
Moyenne de la réponse	1,54161
Observations (ou sommes pondérées)	32

Tests de coefficients fixes

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Degré(s) de liberté du dénominateur	Rapport F	Prob. > F
Irrigation	3	3	9	5,1698	0,0238*
Fertilisation	1	1	3	3,8230	0,1455
Irrigation*Fertilisation	3	3	9	0,3676	0,7783

Irrigation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0,050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
D0	A	1,9668240
D2	A B	1,7953803
D1	A B	1,3781571
D3	B	1,0260806

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Fertilisation

t de Student des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0,050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
non Fertilisé	A	1,6372811

Niveau		Moyenne des moindres carrés
Fertilisé	A	1,4459399

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Irrigation*Fertilisation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0,050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
D0,Fertilisé	A	1,9977645
D2,non Fertilisé	A	1,9683664
D0,non Fertilisé	A	1,9358835
D2,Fertilisé	A	1,6223941
D1,non Fertilisé	A	1,5929229
D1,Fertilisé	A	1,1633913
D3,non Fertilisé	A	1,0519514
D3,Fertilisé	A	1,0002098

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Total Coarse root Biomass C-RB (Mg ha⁻¹)

Tout le modèle
 Résumé de l'ajustement

R carré	0.300148
R carré ajusté	0.096024
Écart-type résiduel	0.354085
Moyenne de la réponse	0.471157
Observations (ou sommes pondérées)	32

Tests de coefficients fixes

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Degré(s) de liberté du dénominateur	Rapport F	Prob. > F
Irrigation	3	3	9	2.4235	0.1329
Fertilisation	1	1	3	0.2811	0.6327
Irrigation*Fertilisation	3	3	9	0.7038	0.5733

Irrigation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
D2	A	0.66583636
D0	A	0.57201999
D3	A	0.33746023
D1	A	0.30931257

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Fertilisation

t de Student des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
Fertilisé	A	0.50027067
non Fertilisé	A	0.44204390

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Irrigation*Fertilisation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
D0,Fertilisé	A	0.69787014
D2,non Fertilisé	A	0.67496420
D2,Fertilisé	A	0.65670852
D0,non Fertilisé	A	0.44616983
D3,Fertilisé	A	0.43871506
D1,non Fertilisé	A	0.41083617
D3,non Fertilisé	A	0.23620541
D1,Fertilisé	A	0.20778897

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Total root Biomass RB (Mg ha⁻¹)

Tout le modèle
 Résumé de l'ajustement

R carré	0.145337
R carré ajusté	-0.10394
Écart-type résiduel	0.876776
Moyenne de la réponse	2.012771
Observations (ou sommes pondérées)	32

Tests de coefficients fixes

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Degré(s) de liberté du dénominateur	Rapport F	Prob. > F
Irrigation	3	3	9	4.1743	0.0414*
Fertilisation	1	1	3	0.4874	0.5353
Irrigation*Fertilisation	3	3	9	0.5056	0.6880

Irrigation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
D0	A	2.5388440

Niveau		Moyenne des moindres carrés
D2	AB	2.4612308
D1	AB	1.6874697
D3	B	1.3635408

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Fertilisation

t de Student des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
non Fertilisé	A	2.0793321
Fertilisé	A	1.9462106

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Irrigation*Fertilisation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
D0,Fertilisé	A	2.6956346
D2,non Fertilisé	A	2.6433589
D0,non Fertilisé	A	2.3820534
D2,Fertilisé	A	2.2791027
D1,non Fertilisé	A	2.0037591
D3,Fertilisé	A	1.4389248
D1,Fertilisé	A	1.3711803
D3,non Fertilisé	A	1.2881568

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Root / Shoot

Tout le modèle
Résumé de l'ajustement

R carré	0.6907
R carré ajusté	0.600487
Écart-type résiduel	0.025948
Moyenne de la réponse	0.064383
Observations (ou sommes pondérées)	32

Tests de coefficients fixes

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Degré(s) de liberté du dénominateur	Rapport F	Prob. > F
Irrigation	3	3	9	12.7541	0.0014*
Fertilisation	1	1	3	6.1658	0.0890
Irrigation*Fertilisation	3	3	9	0.2568	0.8547

Irrigation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
D0	A	0.10970046
D2	B	0.06757207
D1	B	0.05043568
D3	B	0.02982568

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Fertilisation

t de Student des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
non Fertilisé	A	0.07418632
Fertilisé	A	0.05458063

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Irrigation*Fertilisation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
D0,non Fertilisé	A	0.12359577
D0,Fertilisé	A B	0.09580516
D2,non Fertilisé	A B C	0.07853507
D1,non Fertilisé	A B C	0.06167072
D2,Fertilisé	B C	0.05660908
D1,Fertilisé	B C	0.03920065
D3,non Fertilisé	C	0.03294373
D3,Fertilisé	C	0.02670764

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Annexe 3

Résultats des analyses de variance Multivariées et Univariées sur les variables morphologiques des racines (Fine Roots Biomass, Coarse Root Biomass, Total root Biomass, Fine Root Length Density, Specific Fine Root Length et Specific Root Area) aux différents horizons de profondeur (0-20, 20-40, 40-60 et 60-80) suite à l'application des divers doses d'irrigation et/ou de la fertilisation chimique.

Variable Fine Root Biomass (Mg ha-1)

Manova (Mesures Multivariées)

Inter-sujets

Somme

Tout entre

Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	3.1476314	1.2877	22	9	0.3606

Constante

Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	28.368868	255.3198	1	9	<.0001*

Bloc

Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	0.2943466	0.8830	3	9	0.4857

Irrigation

Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	1.6046032	4.8138	3	9	0.0288*

Bloc*Irrigation

Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	0.9311452	0.9311	9	9	0.5414

Fertilisation

Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	0.1092571	0.9833	1	9	0.3473

Bloc*Fertilisation

Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	0.0857355	0.2572	3	9	0.8544

Irrigation*Fertilisation

Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	0.1225437	0.3676	3	9	0.7783

Intra-sujets

Contraste

Profondeur Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	32.498186	75.8291	3	7	<.0001*

Anova (Mesures Univariées)

Compte tenu qu'il y avait presque pas de racines dans les carottes au-delà de 40 cm de profondeur les analyses de variance ont été fait juste pour les données des horizons 0-20 cm et 20-40 cm, et ce pour l'ensemble des variables dépendantes étudiés.

Fine Root Biomass at 0-20 cm depth:

Résumé de l'ajustement

R carré	0.095279
R carré ajusté	-0.1686
Écart-type résiduel	0.525669
Moyenne de la réponse	1.343487
Observations (ou sommes pondérées)	32

Tests de coefficients fixes

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Degré(s) de liberté du dénominateur	Rapport F	Prob. > F
Irrigation	3	3	9	3.8780	0.0495*
Fertilisation	1	1	3	4.5917	0.1215
Irrigation*Fertilisation	3	3	9	0.4364	0.7323

Irrigation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau	Moyenne des moindres carrés
D0 A	1.7421182
D2 A B	1.4212445
D1 A B	1.2712594
D3 B	0.9393276

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Fertilisation

t de Student des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau	Moyenne des moindres carrés
non Fertilisé A	1.4621390
Fertilisé A	1.2248359

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Irrigation*Fertilisation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés

$\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
D0,non Fertilisé	A	1.7561136
D0,Fertilisé	A	1.7281229
D2,non Fertilisé	A	1.6212565
D1,non Fertilisé	A	1.5185616
D2,Fertilisé	A	1.2212326
D1,Fertilisé	A	1.0239572
D3,non Fertilisé	A	0.9526244
D3,Fertilisé	A	0.9260308

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Fine Root Biomass at 20-40 cm depth

Tout le modèle

Résumé de l'ajustement

R carré	-0.00146
R carré ajusté	-0.29356
Écart-type résiduel	0.133871
Moyenne de la réponse	0.113851
Observations (ou sommes pondérées)	32

Tests de coefficients fixes

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Degré(s) de liberté du dénominateur	Rapport F	Prob. > F
Irrigation	3	3	9	5.4934	0.0202*
Fertilisation	1	1	3	0.1056	0.7666
Irrigation*Fertilisation	3	3	9	0.0384	0.9893

Diagramme des résidus en fonction des valeurs prévues

Irrigation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés

$\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
D2	A	0.22271107
D0	A B	0.13267539
D1	B	0.05393649
D3	B	0.04607949

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Fertilisation

t de Student des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
Fertilisé	A	0.12073896
non Fertilisé	A	0.10696226

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Irrigation*Fertilisation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
D2,Fertilisé	A	0.22572791
D2,non Fertilisé	A	0.21969422
D0,Fertilisé	A	0.13346569
D0,non Fertilisé	A	0.13188508
D1,Fertilisé	A	0.07463823
D3,Fertilisé	A	0.04912399
D3,non Fertilisé	A	0.04303499
D1,non Fertilisé	A	0.03323475

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Variable Coarse Root Biomass (Mg ha-1)**Manova (Mesures Multivariées)****Inter-sujets**

Somme

Tout entre

Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	2.9739578	1.2166	22	9	0.3972

Constante

Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	6.2954305	56.6589	1	9	<.0001*

Bloc

Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	0.9968427	2.9905	3	9	0.0883

Irrigation

Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	0.6532667	1.9598	3	9	0.1907

Bloc*Irrigation					
Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	0.8086568	0.8087	9	9	0.6216
Fertilisation					
Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	0.0240369	0.2163	1	9	0.6529
Bloc*Fertilisation					
Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	0.2565476	0.7696	3	9	0.5394
Irrigation*Fertilisation					
Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	0.234607	0.7038	3	9	0.5733

Intra-sujets
Contraste

Profondeur

Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	8.46950	19.7622	3	7	0.0009*

36

Anova (Mesures Univariées)

Coarse Root Biomass at 0-20 cm depth:

Tout le modèle
Résumé de l'ajustement

R carré	0.300717
R carré ajusté	0.096759
Écart-type résiduel	0.28581
Moyenne de la réponse	0.393937
Observations (ou sommes pondérées)	32

Tests de coefficients fixes

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Degré(s) de liberté du dénominateur	Rapport F	Prob. > F
Irrigation	3	3	9	1.3628	0.3151
Fertilisation	1	1	3	0.0427	0.8495
Irrigation*Fertilisation	3	3	9	1.1270	0.3888

Irrigation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau	Moyenne des moindres carrés

Niveau		Moyenne des moindres carrés
D2	A	0.51852911
D0	A	0.44337087
D3	A	0.31631102
D1	A	0.29753611

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Fertilisation

t de Student des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
non Fertilisé	A	0.40037109
Fertilisé	A	0.38750246

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Irrigation*Fertilisation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
D2,non Fertilisé	A	0.60416794
D0,Fertilisé	A	0.50647697
D2,Fertilisé	A	0.43289028
D3,Fertilisé	A	0.42279699
D1,non Fertilisé	A	0.40722664
D0,non Fertilisé	A	0.38026476
D3,non Fertilisé	A	0.20982504
D1,Fertilisé	A	0.18784559

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Coarse Root Biomass at 20-40 cm depth

Tout le modèle
 Résumé de l'ajustement

R carré	-0.27958
R carré ajusté	-0.65279
Écart-type résiduel	0.082788
Moyenne de la réponse	0.03621
Observations (ou sommes pondérées)	32

Tests de coefficients fixes

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Degré(s) de liberté du dénominateur	Rapport F	Prob. > F
--------	------------------------	---------------------	-------------------------------------	-----------	-----------

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Degré(s) de liberté du dénominateur	Rapport F	Prob. > F
Irrigation	3	3	9	3.6791	0.0560
Fertilisation	1	1	3	0.5274	0.5202
Irrigation*Fertilisation	3	3	9	0.3567	0.7857

Irrigation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
D2	A	0.09519516
D0	A	0.03238120
D3	A	0.01000378
D1	A	0.00725995

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Fertilisation

t de Student des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
Fertilisé	A	0.04564140
non Fertilisé	A	0.02677864

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Irrigation*Fertilisation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
D2,Fertilisé	A	0.12968842
D2,non Fertilisé	A	0.06070190
D0,non Fertilisé	A	0.03852721
D0,Fertilisé	A	0.02623520
D3,Fertilisé	A	0.01397222
D1,Fertilisé	A	0.01266977
D3,non Fertilisé	A	0.00603534
D1,non Fertilisé	A	0.00185013

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents

Variable Total Root Biomass (Mg ha⁻¹)**Manova (Mesures Multivariées)**

Inter-sujets

Somme

Tout entre					
Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	2.6353913	1.0781	22	9	0.4791
Constante					
Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	12.750635	114.7557	1	9	<.0001*
Bloc					
Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	0.6412374	1.9237	3	9	0.1963
Irrigation					
Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	1.0176731	3.0530	3	9	0.0846
Bloc*Irrigation					
Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	0.5637216	0.5637	9	9	0.7970
Fertilisation					
Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	0.0680914	0.6128	1	9	0.4538
Bloc*Fertilisation					
Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	0.1157147	0.3471	3	9	0.7922
Irrigation*Fertilisation					
Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	0.2289531	0.6869	3	9	0.5824
Intra-sujets					
Contraste					
Profondeur					
Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	13.2613	30.9432	3	7	0.0002*

51

Anova (Mesures Univariées)

Total Root Biomass at 0-20 cm depth

Tout le modèle
Résumé de l'ajustement

R carré	-0.56581
R carré ajusté	-1.0225
Écart-type résiduel	1.017404
Moyenne de la réponse	1.824303

Observations (ou sommes pondérées) 32

Tests de coefficients fixes

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Degré(s) de liberté du dénominateur	Rapport F	Prob. > F
Irrigation	3	3	9	2.9025	0.0939
Fertilisation	1	1	3	13.3517	0.0354*
Irrigation*Fertilisation	3	3	9	0.9267	0.4666

Irrigation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau	Moyenne des moindres carrés
D2 A	2.2872878
D0 A	2.1854891
D1 A	1.5687955
D3 A	1.2556386

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Fertilisation

t de Student des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau	Moyenne des moindres carrés
non Fertilisé A	2.0362672
Fertilisé B	1.6123383

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Irrigation*Fertilisation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau	Moyenne des moindres carrés
D2,non Fertilisé A	2.9204527
D0,Fertilisé A	2.2345998
D0,non Fertilisé A	2.1363783
D1,non Fertilisé A	1.9257882
D2,Fertilisé A	1.6541229
D3,Fertilisé A	1.3488278
D1,Fertilisé A	1.2118027
D3,non Fertilisé A	1.1624495

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Total Root Biomass at 20-40 cm depth

Tout le modèle
Résumé de l'ajustement

R carré	-0.08367
R carré ajusté	-0.39973
Écart-type résiduel	0.210912
Moyenne de la réponse	0.150061
Observations (ou sommes pondérées)	32

Tests de coefficients fixes

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Degré(s) de liberté du dénominateur	Rapport F	Prob. > F
Irrigation	3	3	9	4.9704	0.0265*
Fertilisation	1	1	3	0.2293	0.6648
Irrigation*Fertilisation	3	3	9	0.0660	0.9766

Irrigation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
D2	A	0.31790622
D0	A B	0.16505659
D1	B	0.06119644
D3	B	0.05608327

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Fertilisation

t de Student des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
Fertilisé	A	0.16638036
non Fertilisé	A	0.13374091

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Irrigation*Fertilisation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
D2,Fertilisé	A	0.35541633
D2,non Fertilisé	A	0.28039612
D0,non Fertilisé	A	0.17041229
D0,Fertilisé	A	0.15970089

Niveau		Moyenne des moindres carrés
D1,Fertilisé	A	0.08730800
D3,Fertilisé	A	0.06309620
D3,non Fertilisé	A	0.04907033
D1,non Fertilisé	A	0.03508488

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Variable Fine Root Length Density (cm cm⁻³)

Manova (Mesures Multivariées)

Inter-sujets					
Somme					
Tout entre					
Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	4.8073427	1.9666	22	9	0.1473
Constante					
Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	37.095451	333.8591	1	9	<.0001*
Bloc					
Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	0.2950967	0.8853	3	9	0.4847
Irrigation					
Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	1.562559	4.6877	3	9	0.0309*
Bloc*Irrigation					
Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	2.4449161	2.4449	9	9	0.0995
Fertilisation					
Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	0.0852459	0.7672	1	9	0.4039
Bloc*Fertilisation					
Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	0.3750194	1.1251	3	9	0.3894
Irrigation*Fertilisation					
Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	0.0445056	0.1335	3	9	0.9376
Intra-sujets					
Contraste					

Profondeur Test	Valeur	F exact	Degré(s) de liberté du numérateur	Degré(s) de liberté du dénominateur	Prob.>F
Test F	59.052736	137.7897	3	7	<.0001*

Anova (Mesures Univariées)

Fine Root Length Density at 0-20 cm depth

Résumé de l'ajustement

R carré	0.817598
R carré ajusté	0.764397
Écart-type résiduel	1.193493
Moyenne de la réponse	4.759147
Observations (ou sommes pondérées)	32

Tests de coefficients fixes

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Degré(s) de liberté du dénominateur	Rapport F	Prob. > F
Irrigation	3	3	9	1.8950	0.2009
Fertilisation	1	1	3	2.6051	0.2049
Irrigation*Fertilisation	3	3	9	0.0345	0.9908

Irrigation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau	Moyenne des moindres carrés
D0	A 5.9262634
D1	A 5.3276002
D2	A 4.5323927
D3	A 3.2503301

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Fertilisation

t de Student des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau	Moyenne des moindres carrés
non Fertilisé	A 5.1316269
Fertilisé	A 4.3866663

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Irrigation*Fertilisation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
D0,non Fertilisé	A	6.2616686
D1,non Fertilisé	A	5.7702742
D0,Fertilisé	A	5.5908583
D1,Fertilisé	A	4.8849262
D2,non Fertilisé	A	4.8122271
D2,Fertilisé	A	4.2525584
D3,non Fertilisé	A	3.6823376
D3,Fertilisé	A	2.8183225

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Fine Root Length Density at 20-40 cm depth

Tout le modèle
Résumé de l'ajustement

R carré	0.327207
R carré ajusté	0.130975
Écart-type résiduel	0.249559
Moyenne de la réponse	0.222759
Observations (ou sommes pondérées)	32

Tests de coefficients fixes

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Degré(s) de liberté du dénominateur	Rapport F	Prob. > F
Irrigation	3	3	9	2.8296	0.0988
Fertilisation	1	1	3	0.0191	0.8989
Irrigation*Fertilisation	3	3	9	0.0643	0.9774

Irrigation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
D2	A	0.40452492
D0	A	0.26168993
D1	A	0.13658341
D3	A	0.08823800

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Fertilisation

t de Student des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
Fertilisé	A	0.22856576
non Fertilisé	A	0.21695236

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Irrigation*Fertilisation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés

$\alpha=$

0.050

Niveau		Moyenne des moindres carrés
D2,Fertilisé	A	0.41916892
D2,non Fertilisé	A	0.38988092
D0,non Fertilisé	A	0.27087967
D0,Fertilisé	A	0.25250018
D1,Fertilisé	A	0.16976289
D3,non Fertilisé	A	0.10364495
D1,non Fertilisé	A	0.10340392
D3,Fertilisé	A	0.07283104

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Variable Specific Fine Root Length (m g⁻¹)

Manova (Mesures Multivariées)

Pour les variables de la longueur spécifique des racines fines (Specific Fine Root Length ou SFRL), il n'est pas convenable de mettre la valeur `0` pour les carottes qui ne contenaient pas des racines, en effet le SFRL (m/g) qui est une mesure de la longueur des racines fines par la masse sèche de ces mêmes racines, Si on n'a pas de racine ceci est équivalent à mettre 0/0 ce qui est mathématiquement pas correcte. Et donc pour le but des statistiques un point sera mis (.) au lieu de la valeur 0 dans le cas où il n'y a pas de racines. Ceci dit lors de la Manova on a été contraint un problème relié aux degrés de libertés qui est causé par les données manquantes, (contrairement à la valeur "0" les points "." ne sont pas considérées comme des données) et donc la présente analyse on avait 22 degrés de liberté et seulement 24 données (8 manquantes) et les 2 degrés restants sont insuffisantes pour supporter ma Manova. Donc ce cas on a outrepassé la Manova et on a fait des analyses Univariées.

Anova (Mesures Univariées)

Specific Fine Root Length at 0-20 cm depth

Tout le modèle

Résumé de l'ajustement

R carré	0.866763
R carré ajusté	0.827903
Écart-type résiduel	12.07754
Moyenne de la réponse	73.13766
Observations (ou sommes pondérées)	32

Tests de coefficients fixes

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Degré(s) de liberté du dénominateur	Rapport F	Prob. > F
Irrigation	3	3	9	1.4941	0.2811

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Degré(s) de liberté du dénominateur	Rapport F	Prob. > F
Fertilisation	1	1	3	0.0389	0.8562
Irrigation*Fertilisation	3	3	9	3.5299	0.0616

Irrigation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
D1	A	86.826891
D3	A	72.015590
D2	A	68.274532
D0	A	65.433614

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Fertilisation

t de Student des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
Fertilisé	A	73.718983
non Fertilisé	A	72.556331

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Irrigation*Fertilisation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
D1,Fertilisé	A	95.474680
D3,non Fertilisé	A	79.913136
D1,non Fertilisé	A	78.179101
D2,Fertilisé	A	74.355602
D0,non Fertilisé	A	69.939625
D3,Fertilisé	A	64.118045
D2,non Fertilisé	A	62.193463
D0,Fertilisé	A	60.927603

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Specific Fine Root Length at 20-40 cm depth

Tout le modèle
 Résumé de l'ajustement

R carré	0.461273
R carré ajusté	0.304144

Écart-type résiduel	15.30031
Moyenne de la réponse	38.20796
Observations (ou sommes pondérées)	32

Tests de coefficients fixes

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Degré(s) de liberté du dénominateur	Rapport F	Prob. > F
Irrigation	3	3	9	0.1776	0.9089
Fertilisation	1	1	3	0.0077	0.9356
Irrigation*Fertilisation	3	3	9	1.9616	0.1904

Irrigation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
D3	A	41.049748
D2	A	38.914138
D1	A	36.521821
D0	A	36.346126

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Fertilisation

t de Student des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
Fertilisé	A	38.531173
non Fertilisé	A	37.884744

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Irrigation*Fertilisation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
D2,Fertilisé	A	49.132775
D3,non Fertilisé	A	46.596574
D0,non Fertilisé	A	42.018547
D1,Fertilisé	A	38.815289
D3,Fertilisé	A	35.502922
D1,non Fertilisé	A	34.228353
D0,Fertilisé	A	30.673705
D2,non Fertilisé	A	28.695501

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Variable Specific Root Area ($\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$)

Manova (Mesures Multivariées)

Le même problème se pose pour les variables de la surface spécifique des racines (Specific Root Area ou SRA) puisque le SRA ($\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$) qui est une mesure de la superficie des racines par la masse sèche de ces mêmes racines. Ici aussi on va se limiter aux analyses Univariées

Anova (Mesures Univariées)

Specific Root Area at 0-20 cm depth

Tout le modèle

Résumé de l'ajustement

R carré	0.834694
R carré ajusté	0.78648
Écart-type résiduel	20.9806
Moyenne de la réponse	113.0282
Observations (ou sommes pondérées)	32

Tests de coefficients fixes

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Degré(s) de liberté du dénominateur	Rapport F	Prob. > F
Irrigation	3	3	9	1.3806	0.3103
Fertilisation	1	1	3	0.0426	0.8497
Irrigation*Fertilisation	3	3	9	2.7108	0.1076

Irrigation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés

$\alpha=0.050$

Niveau	Moyenne des moindres carrés
D1	A 131.02596
D3	A 113.62494
D0	A 104.52816
D2	A 102.93362

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Fertilisation

t de Student des différences des moyennes des moindres carrés

$\alpha=0.050$

Niveau	Moyenne des moindres carrés
Fertilisé	A 114.28903
non Fertilisé	A 111.76730

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Irrigation*Fertilisation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
D1,Fertilisé	A	143.80912
D3,non Fertilisé	A	126.03673
D1,non Fertilisé	A	118.24279
D2,Fertilisé	A	113.18988
D0,non Fertilisé	A	110.11234
D3,Fertilisé	A	101.21314
D0,Fertilisé	A	98.94398
D2,non Fertilisé	A	92.67735

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents

Specific Root Area at 20-40 cm depth

Tout le modèle
 Résumé de l'ajustement

R carré	0.491241
R carré ajusté	0.329363
Écart-type résiduel	26.43621
Moyenne de la réponse	85.19677
Observations (ou sommes pondérées)	30

Tests de coefficients fixes

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Degré(s) de liberté du dénominateur	Rapport F	Prob. > F
Irrigation	3	3	9.133	0.8883	0.4829
Fertilisation	1	1	2.992	0.0576	0.8259
Irrigation*Fertilisation	3	3	9.152	2.0511	0.1761

Irrigation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
D1	A	93.513239
D3	A	91.818955
D0	A	80.158863
D2	A	75.678779

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Fertilisation

t de Student des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
Fertilisé	A	87.451643
non Fertilisé	A	83.133275

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Irrigation*Fertilisation

HSD de Tukey des différences des moyennes des moindres carrés
 $\alpha=0.050$

Niveau		Moyenne des moindres carrés
D1,non Fertilisé	A	101.83180
D2,Fertilisé	A	97.74755
D3,non Fertilisé	A	96.79638
D3,Fertilisé	A	86.84153
D1,Fertilisé	A	85.19467
D0,non Fertilisé	A	80.29491
D0,Fertilisé	A	80.02282
D2,non Fertilisé	A	53.61000

Les niveaux non connectés par la même lettre sont largement différents.

Annexe 4

Régression Multiple

Résultats des analyses de la régression multiple entre :

Les variables dépendantes : rendements de la biomasse aérienne (Aboveground biomass), rendements de la biomasse des racines totales (Total Root Biomass), rendements de la biomasse des racines fines totales (Total Fine Root Biomass) et ratio racine souche (Root/Shoot ratio).

Les variables indépendantes Irrigation, Fertilisation, densité apparente du sol (Soil Bulk Density), pH du sol (Soil pH), et l'électroconductivité du sol (Soil Ec).

Aboveground biomass (Mg ha⁻¹)

Résumé de l'ajustement

R carré	0.804729
R carré ajusté	0.767177
Écart-type résiduel	5.15336
Moyenne de la réponse	35.82457
Observations (ou sommes pondérées)	32

Analyse de la variance

Source	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	5	2845.5557	569.111	21.4297
Résidus	26	690.4851	26.557	Prob. > F
Total	31	3536.0407		<.0001*

Estimations des coefficients

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Prob.> t
Constante	29.508628	46.9559	0.63	0.5352
Irrigation	0.0042258	0.000579	7.30	<.0001*
Fertilisation	0.0830921	0.022213	3.74	0.0009*
Bulk density (g/cm ³)	5.0210301	18.89173	0.27	0.7925
pH	-3.063572	5.959007	-0.51	0.6115
Ec (µS/cm)	0.2291811	0.321893	0.71	0.4828

Tests des coefficients

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
irrigation	1	1	1415.7347	53.3090	<.0001*
Fertilisation	1	1	371.6022	13.9926	0.0009*
Bulk density (g/cm ³)	1	1	1.8760	0.0706	0.7925
pH	1	1	7.0192	0.2643	0.6115
Ec (µS/cm)	1	1	13.4622	0.5069	0.4828

Total Root Biomass (Mg ha⁻¹)
Résumé de l'ajustement

R carré	0.231021
R carré ajusté	0.08314
Écart-type résiduel	0.887078
Moyenne de la réponse	2.012771
Observations (ou sommes pondérées)	32

Analyse de la variance

Source	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	5	6.146573	1.22931	1.5622
Résidus	26	20.459576	0.78691	Prob. > F
Total	31	26.606149		0.2057

Estimations des coefficients

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Prob.> t
Constante	7.3578611	8.08279	0.91	0.3710
irrigation	-5.64e-5	0.0001	-0.57	0.5762
Fertilisation	-0.003056	0.003824	-0.80	0.4314
Bulk density (g/cm ³)	-0.66125	3.251943	-0.20	0.8405
pH	-0.840251	1.025758	-0.82	0.4201
Ec (µS/cm)	0.0743256	0.055409	1.34	0.1914

Tests des coefficients

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
irrigation	1	1	0.2521939	0.3205	0.5762
Fertilisation	1	1	0.5027211	0.6389	0.4314
Bulk density (g/cm ³)	1	1	0.0325363	0.0413	0.8405
pH	1	1	0.5280205	0.6710	0.4201
Ec (µS/cm)	1	1	1.4159104	1.7993	0.1914

Total Fine Root Biomass (Mg ha⁻¹)
Résumé de l'ajustement

R carré	0.323858
R carré ajusté	0.19383
Écart-type résiduel	0.537726
Moyenne de la réponse	1.54161
Observations (ou sommes pondérées)	32

Analyse de la variance

Source	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
--------	---------------------	------------------	-------------	-----------

Source	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	5	3.600905	0.720181	2.4907
Résidus	26	7.517883	0.289149	Prob. > F
Total	31	11.118788		0.0570

Estimations des coefficients

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Prob.> t
Constante	4.7781283	4.899602	0.98	0.3384
irrigation	-8.332e-5	6.039e-5	-1.38	0.1795
Fertilisation	-0.002444	0.002318	-1.05	0.3013
Bulk density (g/cm ³)	0.0281456	1.971253	0.01	0.9887
pH	-0.511337	0.621791	-0.82	0.4184
Ec (µS/cm)	0.0327275	0.033588	0.97	0.3388

Tests des coefficients

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
irrigation	1	1	0.55035694	1.9034	0.1795
Fertilisation	1	1	0.32158195	1.1122	0.3013
Bulk density (g/cm ³)	1	1	0.00005895	0.0002	0.9887
pH	1	1	0.19554498	0.6763	0.4184
Ec (µS/cm)	1	1	0.27452711	0.9494	0.3388

Root/ Shoot ratio**Résumé de l'ajustement**

R carré	0.571719
R carré ajusté	0.489358
Écart-type résiduel	0.028605
Moyenne de la réponse	0.064383
Observations (ou sommes pondérées)	32

Analyse de la variance

Source	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	5	0.02840007	0.005680	6.9416
Résidus	26	0.02127479	0.000818	Prob. > F
Total	31	0.04967485		0.0003*

Estimations des coefficients

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Prob.> t
Constante	0.1697158	0.260643	0.65	0.5207
irrigation	-1.011e-5	3.213e-6	-3.15	0.0041*
Fertilisation	-0.000276	0.000123	-2.24	0.0338*
Bulk density (g/cm ³)	-0.053317	0.104864	-0.51	0.6154
pH	-0.006875	0.033077	-0.21	0.8370

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Prob.> t
Ec (µS/cm)	0.0022813	0.001787	1.28	0.2130

Tests des coefficients

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
irrigation	1	1	0.00811022	9.9115	0.0041*
Fertilisation	1	1	0.00410919	5.0219	0.0338*
Bulk density (g/cm ³)	1	1	0.00021152	0.2585	0.6154
pH	1	1	0.00003535	0.0432	0.8370
Ec (µS/cm)	1	1	0.00133395	1.6302	0.2130

Annexe 5

Régression Multiple

Résultats des analyses de la régression multiple entre :

Les variables dépendantes : rendements de la biomasse des racines fines (Fine Root Biomass), rendements de la biomasse des racines grosses (Coarse Root Biomass), rendements de la biomasse des racines totales (Total Root Biomass), densité de longueur des racines fines (Fine Root Length Density), longueur spécifique des racines fines (Specific Fine Root Length) et superficie spécifique des racines (Specific Root Area)

Les variables indépendantes : Irrigation, Fertilisation, densité apparente du sol (Soil Bulk Density), pH du sol (Soil pH), et l'électroconductivité du sol (Soil Ec).

Variable Fine Root Biomass (Mg ha⁻¹)

Fine root biomass at 0-20 cm depth

Résumé de l'ajustement

R carré	0.322765
R carré ajusté	0.192528
Écart-type résiduel	0.494013
Moyenne de la réponse	1.343487
Observations (ou sommes pondérées)	32

Analyse de la variance

Source	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	5	3.0241118	0.604822	2.4783
Résidus	26	6.3452776	0.244049	Prob. > F
Total	31	9.3693895		0.0580

Estimations des coefficients

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Prob.> t
Constante	5.6357423	2.854486	1.97	0.0591
Irrigation	-0.000165	6.487e-5	-2.54	0.0175*
Fertilisation	-0.002375	0.00176	-1.35	0.1888
Bulk density (g/cm ³)	-0.654624	1.149358	-0.57	0.5739
pH	-0.388033	0.37716	-1.03	0.3130
Ec (µS/cm)	-0.016953	0.023653	-0.72	0.4799

Tests des coefficients

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
Irrigation	1	1	1.5724565	6.4432	0.0175*
Fertilisation	1	1	0.4445553	1.8216	0.1888
Bulk density (g/cm ³)	1	1	0.0791680	0.3244	0.5739

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
pH	1	1	0.2583239	1.0585	0.3130
Ec ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1	1	0.1253785	0.5137	0.4799

Fine root biomass at 20-40 cm depth

Résumé de l'ajustement

R carré	0.124135
R carré ajusté	-0.05834
Écart-type résiduel	0.138237
Moyenne de la réponse	0.121441
Observations (ou sommes pondérées)	30

Analyse de la variance

Source	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	5	0.06500097	0.013000	0.6803
Résidus	24	0.45863051	0.019110	Prob. > F
Total	29	0.52363148		0.6427

Estimations des coefficients

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Prob.> t
Constante	0.5955457	0.902693	0.66	0.5157
Irrigation	-1.545e-6	1.53e-5	-0.10	0.9204
Fertilisation	0.0006688	0.00059	1.13	0.2679
Bulk density (g/cm^3)	0.5586046	0.41623	1.34	0.1921
pH	-0.143888	0.12431	-1.16	0.2585
Ec ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	-0.003475	0.008184	-0.42	0.6749

Tests des coefficients

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
Irrigation	1	1	0.00019473	0.0102	0.9204
Fertilisation	1	1	0.02457932	1.2862	0.2679
Bulk density (g/cm^3)	1	1	0.03441864	1.8011	0.1921
pH	1	1	0.02560283	1.3398	0.2585
Ec ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1	1	0.00344537	0.1803	0.6749

Variable Coarse Root Biomass

Coarse root biomass at 0-20 cm depth

Résumé de l'ajustement

R carré	0.229508
R carré ajusté	0.081336
Écart-type résiduel	0.315278
Moyenne de la réponse	0.393937

Observations (ou sommes pondérées) 32

Analyse de la variance

Source	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	5	0.7698201	0.153964	1.5489
Résidus	26	2.5844021	0.099400	Prob. > F
Total	31	3.3542222		0.2095

Estimations des coefficients

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Prob.> t
Constante	3.9602361	1.821724	2.17	0.0390*
Irrigation	8.4191e-6	4.14e-5	0.20	0.8404
Fertilisation	-0.000312	0.001123	-0.28	0.7834
Bulk density (g/cm3)	-0.558272	0.733517	-0.76	0.4535
pH	-0.525726	0.240702	-2.18	0.0382*
Ec (µS/cm)	0.023524	0.015095	1.56	0.1312

Tests des coefficients

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
Irrigation	1	1	0.00411045	0.0414	0.8404
Fertilisation	1	1	0.00766788	0.0771	0.7834
Bulk density (g/cm3)	1	1	0.05757816	0.5793	0.4535
pH	1	1	0.47418265	4.7704	0.0382*
Ec (µS/cm)	1	1	0.24139933	2.4286	0.1312

Coarse root biomass at 20-40 cm depth

Résumé de l'ajustement

R carré	0.171428
R carré ajusté	-0.00119
Écart-type résiduel	0.077859
Moyenne de la réponse	0.038624
Observations (ou sommes pondérées)	30

Analyse de la variance

Source	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	5	0.03010117	0.006020	0.9931
Résidus	24	0.14548952	0.006062	Prob. > F
Total	29	0.17559069		0.4427

Estimations des coefficients

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Prob.> t
Constante	0.2019415	0.508422	0.40	0.6947
Irrigation	6.1585e-6	8.619e-6	0.71	0.4818

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Prob.> t
Fertilisation	0.0005503	0.000332	1.66	0.1105
Bulk density (g/cm ³)	0.4164928	0.234433	1.78	0.0883
pH	-0.087659	0.070015	-1.25	0.2226
Ec (µS/cm)	-0.001029	0.004609	-0.22	0.8253

Tests des coefficients					
Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
Irrigation	1	1	0.00309514	0.5106	0.4818
Fertilisation	1	1	0.01664527	2.7458	0.1105
Bulk density (g/cm ³)	1	1	0.01913373	3.1563	0.0883
pH	1	1	0.00950241	1.5675	0.2226
Ec (µS/cm)	1	1	0.00030206	0.0498	0.8253

Variable Total Root Biomass

Total root biomass at 0-20 cm

Résumé de l'ajustement

R carré	0.230276
R carré ajusté	0.082252
Écart-type résiduel	1.015604
Moyenne de la réponse	1.824303
Observations (ou sommes pondérées)	32

Analyse de la variance

Source	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	5	8.022970	1.60459	1.5557
Résidus	26	26.817727	1.03145	Prob. > F
Total	31	34.840697		0.2076

Estimations des coefficients

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Prob.> t
Constante	13.518393	5.868318	2.30	0.0295*
Irrigation	-0.000104	0.000133	-0.78	0.4425
Fertilisation	-0.004437	0.003618	-1.23	0.2311
Bulk density (g/cm ³)	-0.923612	2.362876	-0.39	0.6991
pH	-1.62162	0.775374	-2.09	0.0464*
Ec (µS/cm)	0.0303367	0.048626	0.62	0.5381

Tests des coefficients

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
Irrigation	1	1	0.6274032	0.6083	0.4425
Fertilisation	1	1	1.5509103	1.5036	0.2311
Bulk density (g/cm ³)	1	1	0.1575962	0.1528	0.6991

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
pH	1	1	4.5115375	4.3740	0.0464*
Ec ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1	1	0.4014672	0.3892	0.5381

Total root biomass at 20-40 cm

Résumé de l'ajustement

R carré	0.140329
R carré ajusté	-0.03877
Écart-type résiduel	0.210692
Moyenne de la réponse	0.160065
Observations (ou sommes pondérées)	30

Analyse de la variance

Source	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	5	0.1739091	0.034782	0.7835
Résidus	24	1.0653876	0.044391	Prob. > F
Total	29	1.2392967		0.5715

Estimations des coefficients

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Prob.> t
Constante	0.7974872	1.375822	0.58	0.5676
Irrigation	4.6138e-6	2.332e-5	0.20	0.8449
Fertilisation	0.0012191	0.000899	1.36	0.1876
Bulk density (g/cm^3)	0.9750973	0.634389	1.54	0.1374
pH	-0.231548	0.189465	-1.22	0.2335
Ec ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	-0.004504	0.012473	-0.36	0.7212

Tests des coefficients

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
Irrigation	1	1	0.00173717	0.0391	0.8449
Fertilisation	1	1	0.08167848	1.8400	0.1876
Bulk density (g/cm^3)	1	1	0.10487711	2.3626	0.1374
pH	1	1	0.06630065	1.4936	0.2335
Ec ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1	1	0.00578775	0.1304	0.7212

Variable Fine Root length density

Fine Root length density at 0-20 cm

Résumé de l'ajustement

R carré	0.368742
R carré ajusté	0.247347
Écart-type résiduel	1.712922
Moyenne de la réponse	4.812835

Observations (ou sommes pondérées) 32

Analyse de la variance

Source	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	5	44.56201	8.91240	3.0375
Résidus	26	76.28665	2.93410	Prob. > F
Total	31	120.84866		0.0273*

Estimations des coefficients

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Prob.> t
Constante	17.56385	9.897532	1.77	0.0877
Irrigation	-0.00065	0.000225	-2.89	0.0077*
Fertilisation	-0.006334	0.006103	-1.04	0.3089
Bulk density (g/cm ³)	1.15107	3.985238	0.29	0.7750
pH	-1.27575	1.307749	-0.98	0.3383
Ec (µS/cm)	-0.136843	0.082013	-1.67	0.1072

Tests des coefficients

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
Irrigation	1	1	24.522430	8.3577	0.0077*
Fertilisation	1	1	3.160917	1.0773	0.3089
Bulk density (g/cm ³)	1	1	0.244777	0.0834	0.7750
pH	1	1	2.792270	0.9517	0.3383
Ec (µS/cm)	1	1	8.168802	2.7841	0.1072

Fine Root length density at 20-40 cm

Résumé de l'ajustement

R carré	0.074098
R carré ajusté	-0.1188
Écart-type résiduel	0.289819
Moyenne de la réponse	0.242603
Observations (ou sommes pondérées)	30

Analyse de la variance

Source	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	5	0.1613276	0.032266	0.3841
Résidus	24	2.0158801	0.083995	Prob. > F
Total	29	2.1772077		0.8547

Estimations des coefficients

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Prob.> t
Constante	1.3294555	1.892522	0.70	0.4891
Irrigation	-6.489e-6	0.000032	-0.20	0.8414
Fertilisation	0.0008589	0.001236	0.69	0.4939

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Prob.> t
Bulk density (g/cm ³)	0.6271163	0.872638	0.72	0.4793
pH	-0.242685	0.26062	-0.93	0.3610
Ec (µS/cm)	-0.003764	0.017157	-0.22	0.8282

Tests des coefficients

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
Irrigation	1	1	0.00343652	0.0409	0.8414
Fertilisation	1	1	0.04054285	0.4827	0.4939
Bulk density (g/cm ³)	1	1	0.04337914	0.5164	0.4793
pH	1	1	0.07283217	0.8671	0.3610
Ec (µS/cm)	1	1	0.00404298	0.0481	0.8282

Variable Specific fine root length**Specific fine root length at 0-20 cm depth**

Résumé de l'ajustement

R carré	0.17255
R carré ajusté	0.013425
Écart-type résiduel	21.91215
Moyenne de la réponse	60.38943
Observations (ou sommes pondérées)	32

Analyse de la variance

Source	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	5	2603.252	520.650	1.0844
Résidus	26	12483.697	480.142	Prob. > F
Total	31	15086.949		0.3922

Estimations des coefficients

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Prob.> t
Constante	-58.7975	126.6118	-0.46	0.6462
Irrigation	-0.001079	0.002877	-0.37	0.7108
Fertilisation	0.0409275	0.078068	0.52	0.6045
Bulk density (g/cm ³)	44.817701	50.98021	0.88	0.3874
pH	16.703522	16.72907	1.00	0.3273
Ec (µS/cm)	-1.746242	1.049127	-1.66	0.1080

Tests des coefficients

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
Irrigation	1	1	67.4781	0.1405	0.7108
Fertilisation	1	1	131.9634	0.2748	0.6045
Bulk density (g/cm ³)	1	1	371.0785	0.7729	0.3874

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
pH	1	1	478.6767	0.9969	0.3273
Ec ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1	1	1330.2187	2.7705	0.1080

Specific fine root length at 20-40 cm depth

Résumé de l'ajustement

R carré	0.204961
R carré ajusté	0.039328
Écart-type résiduel	14.79129
Moyenne de la réponse	36.00455
Observations (ou sommes pondérées)	30

Analyse de la variance

Source	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	5	1353.6471	270.729	1.2374
Résidus	24	5250.7742	218.782	Prob. > F
Total	29	6604.4213		0.3227

Estimations des coefficients

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Prob.> t
Constante	51.180697	96.58735	0.53	0.6011
Irrigation	4.0543e-7	0.001637	0.00	0.9998
Fertilisation	-0.066623	0.063096	-1.06	0.3015
Bulk density (g/cm^3)	-108.2434	44.53625	-2.43	0.0229*
pH	11.168376	13.3011	0.84	0.4094
Ec ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	0.8429747	0.875645	0.96	0.3453

Tests des coefficients

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
Irrigation	1	1	1.34143e-5	0.0000	0.9998
Fertilisation	1	1	243.9290	1.1149	0.3015
Bulk density (g/cm^3)	1	1	1292.3733	5.9071	0.0229*
pH	1	1	154.2471	0.7050	0.4094
Ec ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1	1	202.7614	0.9268	0.3453

Variable Specific root Area

Specific root area at 0-20 cm depth

Résumé de l'ajustement

R carré	0.164185
R carré ajusté	0.003451
Écart-type résiduel	35.22146

Moyenne de la réponse 113.0313
 Observations (ou sommes pondérées) 32

Analyse de la variance

Source	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	5	6335.944	1267.19	1.0215
Résidus	26	32254.338	1240.55	Prob. > F
Total	31	38590.282		0.4254

Estimations des coefficients

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Prob.> t
Constante	-92.75632	203.5151	-0.46	0.6523
Irrigation	-0.002008	0.004625	-0.43	0.6678
Fertilisation	0.0481004	0.125486	0.38	0.7046
Bulk density (g/cm ³)	58.38287	81.9453	0.71	0.4825
pH	31.282586	26.89022	1.16	0.2553
Ec (µS/cm)	-2.792968	1.68636	-1.66	0.1097

Tests des coefficients

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
Irrigation	1	1	233.7730	0.1884	0.6678
Fertilisation	1	1	182.2717	0.1469	0.7046
Bulk density (g/cm ³)	1	1	629.7056	0.5076	0.4825
pH	1	1	1678.9258	1.3534	0.2553
Ec (µS/cm)	1	1	3402.8746	2.7430	0.1097

Specific root area at 20-40 cm depth

Résumé de l'ajustement

R carré 0.200434
 R carré ajusté 0.033858
 Écart-type résiduel 30.00032
 Moyenne de la réponse 85.19677
 Observations (ou sommes pondérées) 30

Analyse de la variance

Source	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	5	5414.767	1082.95	1.2033
Résidus	24	21600.454	900.02	Prob. > F
Total	29	27015.221		0.3376

Estimations des coefficients

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Prob.> t
Constante	47.884892	195.9025	0.24	0.8090
Irrigation	0.0002469	0.003321	0.07	0.9413

Terme	Estimation	Écart-type	Rapport t	Prob.> t
Fertilisation	-0.074802	0.127973	-0.58	0.5643
Bulk density (g/cm ³)	-200.1977	90.3303	-2.22	0.0364*
pH	29.090638	26.97785	1.08	0.2916
Ec (µS/cm)	1.866257	1.776019	1.05	0.3038

Tests des coefficients

Source	Nombre de coefficients	Degré(s) de liberté	Somme des carrés	Rapport F	Prob. > F
Irrigation	1	1	4.9755	0.0055	0.9413
Fertilisation	1	1	307.4976	0.3417	0.5643
Bulk density (g/cm ³)	1	1	4420.8191	4.9119	0.0364*
pH	1	1	1046.5100	1.1628	0.2916
Ec (µS/cm)	1	1	993.8002	1.1042	0.3038

Annexe 6

Tableau 1 : Anova des concentrations de macronutriments dans les feuilles aux cours de chaque première année de croissance pour chaque rotation suite au traitement d'irrigation par l'eau usée et à la fertilisation.

Traitements	Niveaux	mg g ⁻¹		mg g ⁻¹		mg g ⁻¹		mg g ⁻¹		mg g ⁻¹	
		N		P		K		Ca		Mg	
		2009	2011	2009	2011	2009		2009	2011	2009	2011
		Moy	Moy	Moy	Moy	Moy	Moy	Moy	Moy	Moy	Moy
Irrigation	D0	19,5 <i>b</i>	16,8 <i>ab</i>	3,30 <i>a</i>	2,36 <i>a</i>	16,3 <i>a</i>	19,4 <i>a</i>	25,2 <i>a</i>	23,4 <i>b</i>	1,34 <i>a</i>	1,23 <i>a</i>
	D1	24,6 <i>a</i>	19,5 <i>a</i>	3,21 <i>a</i>	1,89 <i>b</i>	20,0 <i>a</i>	20,6 <i>a</i>	23,2 <i>a</i>	28,0 <i>a</i>	1,50 <i>a</i>	1,34 <i>a</i>
	D2	27,3 <i>a</i>	15,9 <i>b</i>	3,19 <i>a</i>	2,18 <i>ab</i>	17,5 <i>a</i>	20,4 <i>a</i>	26,0 <i>a</i>	25,7 <i>ab</i>	1,51 <i>a</i>	1,09 <i>a</i>
	D3	29,3 <i>a</i>	18,0 <i>ab</i>	3,00 <i>a</i>	1,97 <i>b</i>	19,0 <i>a</i>	21,5 <i>a</i>	24,3 <i>a</i>	27,9 <i>a</i>	1,41 <i>a</i>	1,28 <i>a</i>
Fertilisation	F	27,5 <i>a</i>	16,9 <i>a</i>	3,23 <i>a</i>	2,14 <i>a</i>	17,7 <i>a</i>	20,9 <i>a</i>	25,2 <i>a</i>	27,2 <i>a</i>	1,40 <i>a</i>	1,19 <i>a</i>
	NF	22,8 <i>a</i>	18,2 <i>a</i>	3,12 <i>a</i>	2,06 <i>b</i>	18,7 <i>a</i>	20,0 <i>a</i>	24,1 <i>a</i>	25,3 <i>a</i>	1,48 <i>a</i>	1,28 <i>a</i>
Irrig x Fert	D0-F	24,6 <i>ab</i>	18,2 <i>abc</i>	3,51 <i>a</i>	2,29 <i>a</i>	15,6 <i>a</i>	20,6 <i>a</i>	28,1 <i>a</i>	25,3 <i>ab</i>	1,50 <i>a</i>	1,18 <i>a</i>
	D0-NF	14,5 <i>b</i>	15,3 <i>c</i>	3,09 <i>a</i>	2,42 <i>a</i>	17,1 <i>a</i>	18,2 <i>a</i>	22,2 <i>a</i>	21,6 <i>b</i>	1,19 <i>a</i>	1,28 <i>a</i>
	D1-F	26,6 <i>ab</i>	17,0 <i>abc</i>	3,47 <i>a</i>	2,03 <i>ab</i>	19,0 <i>a</i>	21,1 <i>a</i>	24,5 <i>a</i>	28,6 <i>a</i>	1,40 <i>a</i>	1,34 <i>a</i>
	D1-NF	22,6 <i>ab</i>	21,9 <i>a</i>	2,96 <i>a</i>	1,75 <i>b</i>	20,9 <i>a</i>	20,1 <i>a</i>	22,0 <i>a</i>	27,4 <i>a</i>	1,61 <i>a</i>	1,34 <i>a</i>
	D2-F	28,5 <i>ab</i>	16,8 <i>abc</i>	3,01 <i>a</i>	2,03 <i>ab</i>	18,0 <i>a</i>	20,5 <i>a</i>	23,5 <i>a</i>	26,7 <i>a</i>	1,44 <i>a</i>	1,03 <i>a</i>
	D2-NF	26,1 <i>a</i>	15,0 <i>c</i>	3,36 <i>a</i>	2,34 <i>a</i>	17,1 <i>a</i>	20,3 <i>a</i>	28,4 <i>a</i>	24,8 <i>ab</i>	1,57 <i>a</i>	1,16 <i>a</i>
	D3-F	30,4 <i>a</i>	15,6 <i>bc</i>	2,92 <i>a</i>	2,20 <i>ab</i>	18,4 <i>a</i>	21,3 <i>a</i>	24,7 <i>a</i>	28,3 <i>a</i>	1,28 <i>a</i>	1,20 <i>a</i>
	D3-NF	28,2 <i>a</i>	20,5 <i>ab</i>	3,09 <i>a</i>	1,74 <i>b</i>	19,5 <i>a</i>	21,6 <i>a</i>	24,0 <i>a</i>	27,6 <i>a</i>	1,54 <i>a</i>	1,35 <i>a</i>
Anova p-values	Irr	0,0008*	0,0271*	0,4059	0,0146*	0,0093*	0,2729	0,2817	0,0011*	0,3644	0,3401
	Fert	0,1964	0,2929	0,38	0,0285*	0,4607	0,3676	0,4633	0,1161	0,4948	0,3886
	Irr x Fert	0,4134	0,0002*	0,0882	0,0160*	.	0,1478	.	0,6296	0,0104*	0,9449

Table 2 : Anova des concentrations de macronutriments dans le sol au niveau de profondeur 0-20 cm à la fin de chaque rotation suite au traitement d'irrigation par l'eau usée et à la fertilisation.

		Profondeur 0-20 cm																											
Traitements	Niveaux	mg kg ⁻¹		mg kg ⁻¹		mg kg ⁻¹		mg kg ⁻¹		mg kg ⁻¹		mg kg ⁻¹		%															
		N-NH ₄ ⁺		N-NO ₃ ⁻		P-disponible		K		Ca		Mg		M.O															
		2010	2012	2010	2012	2010	2012	2010	2012	2010	2012	2010	2012	2010	2012														
		Moy	Moy	Moy	Moy	Moy	Moy	Moy	Moy	Moy	Moy	Moy	Moy	Moy	Moy	Moy													
Irrigation	D0	3,03	a	0,72	b	1,74	b	1,06	a	104	ab	91	ab	53	a	34	b	1523	a	858	a	71	a	69	a	3,36	a	3,13	a
	D1	3,28	a	2,02	a	2,43	b	0,51	a	80	c	67	b	44	a	44	b	1138	a	794	a	59	a	51	a	3,35	a	3,18	a
	D2	3,47	a	4,59	a	4,60	a	1,61	a	112	a	99	a	54	a	69	a	1146	a	1093	a	78	a	70	a	3,41	a	3,50	a
	D3	2,37	a	2,88	a	4,75	a	1,34	a	81	bc	71	b	45	a	69	a	991	a	872	a	61	a	66	a	3,26	a	3,25	a
Fertilisation	F	2,82	a	2,77	a	3,39	a	1,33	a	94	a	82	a	50	a	64	a	1113	a	915	a	66	a	64	a	3,34	a	3,39	a
	NF	3,25	a	2,33	a	3,38	a	0,93	a	94	a	82	a	48	a	44	b	1286	a	893	a	69	a	64	a	3,35	a	3,14	a
Irrig x Fert	D0-F	3,01	a	0,77	bc	1,80	b	1,24	ab	98	abc	87	a	47	a	38	bc	1303	a	787	a	66	a	68	a	3,41	a	3,18	a
	D0-NF	3,04	a	0,66	c	1,69	b	0,88	ab	109	ab	95	a	59	a	30	c	1743	a	929	a	76	a	70	a	3,31	a	3,08	a
	D1-F	2,99	a	1,74	abc	2,38	b	0,61	ab	79	c	67	a	47	a	51	bc	1080	a	729	a	56	a	49	a	3,30	a	3,30	a
	D1-NF	3,58	a	2,29	abc	2,49	b	0,40	b	80	bc	66	a	40	a	38	bc	1195	a	859	a	61	a	54	a	3,41	a	3,06	a
	D2-F	2,91	a	6,43	a	4,69	a	2,05	a	115	a	100	a	53	a	86	a	1042	a	1165	a	78	a	66	a	3,39	a	3,65	a
	D2-NF	4,02	a	2,75	ab	4,52	a	1,17	ab	109	ab	98	a	54	a	51	abc	1250	a	1021	a	79	a	74	a	3,44	a	3,36	a
	D3-F	2,37	a	2,14	ab	4,68	a	1,43	ab	83	bc	75	a	53	a	79	a	1027	a	979	a	62	a	74	a	3,26	a	3,43	a
	D3-NF	2,37	a	3,62	a	4,83	a	1,25	ab	79	bc	68	a	37	a	58	ab	956	a	765	a	60	a	59	a	3,26	a	3,07	a
p values	Irrig	0,1919		0,0009*		<,0001*		0,0816		0,0033*		0,0140*		0,265		<,0001*		0,1471		0,0617		0,0594		0,126		0,3462		0,2176	
	Fert	0,3959		0,6785		0,9643		0,0679		0,806		0,9214		0,583		0,0359*		0,2408		0,5235		0,4426		0,965		0,8481		0,1975	
	Irr x Fert	0,5087		0,394		0,9599		0,627		0,346		0,3637		0,328		0,27		0,5239		0,3221		0,3836		0,302		0,6597		0,9493	

Les valeurs présentées sont les moyennes (moy, n=8 irrigation, n=16 fertilisation) de chaque traitement. Les niveaux de Significativité (p-values) de l'irrigation, la fertilisation et irrigation x fertilisation sont montrés. Différents lettres indiquent une différence significative selon le test HSD de Tukey pour le facteur irrigation and le test-t pour le facteur fertilisation ($p \leq 0.05$). NH₄⁺ et P-disponible ont subis une transformation logarithmique avant d'être intégrés au modèle de l'Anova.

Table 3 : Anova des concentrations de macronutriments dans le sol au niveau de profondeur 20-40 cm à la fin de chaque rotation suite au traitement d'irrigation par l'eau usée et à la fertilisation.

Traitements	Niveaux	Profondeur 20-40													
		mg kg ⁻¹		mg kg ⁻¹		mg kg ⁻¹		mg kg ⁻¹		mg kg ⁻¹		mg kg ⁻¹		%	
		N-NH ₄ ⁺		N-NO ₃ ⁻		P-disponible		K		Ca		Mg		M.O	
		2010	2012	2010	2012	2010	2012	2010	2012	2010	2012	2010	2012	2010	2012
		Moy	Moy	Moy	Moy	Moy	Moy	Moy	Moy	Moy	Moy	Moy	Moy	Moy	Moy
Irrigation	D0	2.59	0.45	1.26	1.22	46	45	46	22	899	346	41	37	2.36	1.83
	D1	2.51	1.30	1.38	0.45	30	38	33	17	728	397	37	22	2.18	1.41
	D2	2.79	1.71	1.80	2.02	72	73	39	21	909	604	60	43	2.84	2.20
	D3	2.20	1.57	1.54	0.79	41	51	33	31	707	529	43	48	2.13	1.52
Fertilisation	F	2.45	1.11	1.45	1.02	44	47	39	26	814	419	46	39	2.40	1.80
	NF	2.60	1.41	1.54	1.22	51	57	37	20	807	519	45	36	2.36	1.68
Irrig x Fert	D0-F	2.85	0.38	1.08	0.81	55	42	50	23	934	230	40	42	2.43	1.95
	D0-NF	2.34	0.53	1.44	1.63	38	47	43	22	864	461	42	32	2.29	1.71
	D1-F	2.51	1.01	1.40	0.61	33	37	35	17	748	346	39	22	2.34	1.21
	D1-NF	2.51	1.60	1.35	0.28	27	39	32	17	708	448	36	23	2.02	1.60
	D2-F	2.54	1.37	1.81	2.02	57	68	35	24	812	505	59	42	2.68	2.16
	D2-NF	3.05	2.06	1.80	2.02	87	78	43	18	1005	703	61	45	3.01	2.24
	D3-F	1.90	1.68	1.50	0.62	30	40	36	40	764	593	46	51	2.14	1.87
	D3-NF	2.50	1.45	1.58	0.95	53	63	30	23	650	465	41	45	2.12	1.17
p values	Irr	0.2363	0.0149*	0.0442*	0.0380*	0.0332*	0.0022*	0.053	0.062	0.2509	0.0291*	0.0216*	0.0077*	0.0440*	0.0051*
	Fert	0.0811	0.155	0.4746	0.8065	0.480	0.2731	0.761	0.112	0.9224	0.4037	0.8581	0.5762	0.8508	0.6916
	Irr x Fert	0.3579	0.6922	0.4857	0.1306	0.0565	0.7748	0.189	0.185	0.3165	0.0198*	0.5397	0.1707	0.1402	0.2014

Les valeurs présentées sont les moyennes (moy, n=8 irrigation, n=16 fertilisation) de chaque traitement. Les niveaux de Significativité (p-values) de l'irrigation, la fertilisation et irrigation x fertilisation sont montrés. Différents lettres indiquent une différence significative selon le test HSD de Tukey pour le facteur irrigation and le test-t pour le facteur fertilisation ($p \leq 0.05$). NH₄⁺ a subis une transformation logarithmique avant d'être intégré au modèle de l'Anova

Tableau 4 : Anova des rendements de la biomasse ($\text{Mg ha}^{-1}\text{an}^{-1}$) ligneuse au cours de deux rotations et suite aux divers traitements d'irrigation et/ou de fertilisation :

Traitements	Niveaux	Mg ha^{-1}		Mg ha^{-1}	
		Première rotation		Deuxième rotation	
		Moy	SD	Moy	SD
Irrigation	D0	23.9 ± 5.9	<i>d</i>	19.9 ± 5.8	<i>b</i>
	D1	33.7 ± 4.9	<i>c</i>	22.9 ± 5.0	<i>b</i>
	D2	38.6 ± 6.5	<i>b</i>	37.2 ± 10.3	<i>a</i>
	D3	47.1 ± 9.1	<i>a</i>	36.4 ± 10.8	<i>a</i>
Fertilisation	F	40.1 ± 11.2	<i>a</i>	32.2 ± 12.0	<i>a</i>
	NF	31.5 ± 8.5	<i>b</i>	26.0 ± 9.8	<i>a</i>
Irrigation * Fertilisation	D0-F	28.6 ± 4.6	<i>cd</i>	21.6 ± 3.8	<i>b</i>
	D0-NF	19.2 ± 0.9	<i>d</i>	18.2 ± 7.5	<i>b</i>
	D1-F	34.6 ± 7.1	<i>bc</i>	25.5 ± 4.9	<i>b</i>
	D1-NF	32.7 ± 1.5	<i>bc</i>	20.2 ± 3.9	<i>b</i>
	D2-F	42.5 ± 4.6	<i>b</i>	44.1 ± 9.8	<i>a</i>
	D2-NF	34.8 ± 6.1	<i>bc</i>	30.3 ± 4.9	<i>ab</i>
	D3-F	54.7 ± 4.5	<i>a</i>	37.7 ± 11.9	<i>ab</i>
	D3-NF	39.4 ± 4.3	<i>b</i>	35.1 ± 11.3	<i>ab</i>
Anova p- values	Irrigation	<.0001*		0.0003*	
	Fertilisation	0.0202*		0.2453	
	Irr x Fert	0.1816		0.5602	

Les valeurs présentées sont les moyennes (moy ± écart type (SD), n=8 irrigation, n=16 fertilisation) de chaque traitement. Les niveaux de Significativité (p-values) de l'irrigation, la fertilisation et irrigation x fertilisation sont montrés Différents lettres indiquent une différence significative selon le test HSD de Tukey pour le facteur irrigation and le test-t pour le facteur fertilisation ($p \leq 0.05$)

Tableau 5 : Les quantités d'eau et les charges d'azote et de phosphore reçues par la plantation aux cours des quatre années de traitements :

Année	Traitements Irrig	Fertilisatio n		Les quantités d'eau		Charge Totale de N		Charge Totale de P	
		N	P	Précip	Irrig + précip	Suite à l'irrig	Totale	Suite à l'irrig	Totale
		kg ha ⁻¹		mm		kg ha ⁻¹		kg ha ⁻¹	
2008	-	-	-	638	-	-	-	-	-
2009	D0 = 0			652	652	-	-	-	-
	D1 = 300				952	89	89	3.5	3.5
	D2 = 393				1045	117	117	4.6	4.6
	D3 = 584	0	0		1236	173	173	6.8	6.8
	D0 = 0				652	-	100	-	60
	D1 = 300				952	89	189	3.5	63.5
	D2 = 393				1045	117	217	4.6	64.6
	D3 = 584	100	60		1236	173	273	6.8	66.8
2010	D0 = 0			771	771	-	-	-	-
	D1 = 414				1185	123	123	4.8	4.8
	D2 = 469				1240	139	139	5.5	5.5
	D3 = 794	0	0		1565	236	236	9.3	9.3
2011	D0 = 0			829	829	-	-	-	-
	D1 = 185				1014	37	37	0.2	0.2
	D2 = 386				1215	78	78	0.4	0.4
	D3 = 634	0	0		1463	128	128	0.7	0.7
	D0 = 0				829	-	100	-	60
	D1 = 185				1014	37	137	0.2	60.2
	D2 = 386				1215	78	178	0.4	60.4
	D3 = 634	100	60		1463	128	228	0.7	6.7
2012	D0 = 0			698	698	-	-	-	-
	D1 = 302				1000	61	61	0.3	0.3
	D2 = 601				1299	121	121	0.7	0.7
	D3 = 926	0	0		1624	187	187	1.0	1.0

Les valeurs présentées sont : Irrig (mm) : les quantités d'eau délivrée aux différentes parcelles suite à l'irrigation par les eaux usées, N et P kg ha⁻¹ : les quantités d'azote et de phosphate apporté par la fertilisation chimique, Précip et Irrig + précip (mm) : les quantités d'eaux respectivement de la précipitation et de l'irrigation et la précipitation, charge totale en N et P suite à l'irrigation (kg ha⁻¹) sont les quantités de N et de P apportés par l'irrigation avec les eaux usées, charge totale (Totale) de N et P (kg ha⁻¹) sont les quantités de N et de P apportés à la fois par l'irrigation avec les eaux usées avec ou sans la fertilisation chimique.

Table 6 : Liste des composés et propriétés chimiques de l'eau analysé au niveau des lysimètres et limite des concertations pour l'eau potable (MENVIQ)

Éléments analysés	Symbole	Unité	Limite
P réactif total (PRT)	P _T	ug l ⁻¹	30
P réactif dissous (PRD)	P _D	ug l ⁻¹	-
N total	N _T	mg l ⁻¹	10
N-NO3	NO ₃	mg l ⁻¹	10
N-NH4	NH ₄	mg l ⁻¹	1-1.5
K	K	mg l ⁻¹	-
Ca	Ca	mg l ⁻¹	-
Mg	Mg	mg l ⁻¹	-
Na	Na	mg l ⁻¹	200
Al	Al	mg l ⁻¹	0.1
B	B	mg l ⁻¹	5
Cu	Cu	mg l ⁻¹	1
Fe	Fe	mg l ⁻¹	0.3
Zn	Zn	mg l ⁻¹	5
Mn	Mn	mg l ⁻¹	0.05
Mo	Mo	mg l ⁻¹	0.04
Cd	Cd	mg l ⁻¹	0.005
Cr	Cr	mg l ⁻¹	0.05
Co	Co	mg l ⁻¹	0.37
Pb	Pb	mg l ⁻¹	0.01
Ni	Ni	mg l ⁻¹	0.07
Cl	Cl	mg l ⁻¹	0.3
Matières en suspension	MES	mg l ⁻¹	25
pH	pH	n.a	6.5-8.5
Électroconductivité	Ec	uS/cm 25	1269
Coliformes. Thermotolérants	Co.T	UFC /100ml	1000
E.coliformes	E.Co	UFC /100ml	10

Le (Tableau 6) présente les éléments analysés pour les échantillons d'eau :

2009 : des analyses de phosphore total dissous (P total ug l^{-1}), de Phosphore réactif (P-PO₄ ug l^{-1}), de Potassium (K mg l^{-1}), de Calcium (Ca mg l^{-1}), de Sodium (Na mg l^{-1}), d'Aluminium (Al mg l^{-1}), de Bore (B mg l^{-1}), de cuivre (Cu mg l^{-1}), de fer (Fe mg l^{-1}), de Zinc (Zn mg l^{-1}), de Manganèse (Mn mg l^{-1}), de Molybdène (Mo mg l^{-1}), de Cadmium (Cd mg l^{-1}), de Chrome (Cr mg l^{-1}), de Cobalt (Co mg l^{-1}), de Plomb (Pb mg l^{-1}), de Nickel (Ni mg l^{-1}), de pH, et d'électroconductivité (uS/cm 25).

2010 : des analyses de phosphore total dissous (P total ug l^{-1}), de Phosphore réactif (P-PO₄ ug l^{-1}), d'Azote total dissous, d'azote ammoniacal (N-NH₄⁺) et de nitrate (N-NO₃⁻ mg l^{-1}).

2011-2012 : des analyses de Phosphore total dissous (P total ug l^{-1}), de Phosphore réactif (P-PO₄ ug l^{-1}), d'Azote total dissous, d'azote ammoniacal (N-NH₄⁺) de nitrate (N-NO₃) (mg l^{-1}), de Potassium (K mg l^{-1}), de Calcium (Ca mg l^{-1}), de Sodium (Na mg l^{-1}), de Magnésium (Mg mg l^{-1}), de pH, et d'électroconductivité (uS/cm 25)

Tableau 7 : Caractérisation chimique de l'eau d'irrigation au cours des deux rotations

Paramètres	Unités	2009-2010	2011-2012
pH	-	8,04	8.11
Électroconductivité	uS cm^{-1}	1269	977
N Total	mg l^{-1}	29,7	20.2
NH ₄ -N	mg l^{-1}	20,8	13.9
NO ₃ -N	mg l^{-1}	0,2	0.02
N Organique	mg l^{-1}	8,7	6.3
PRT	mg l^{-1}	1,17	0.11
PRD	mg l^{-1}	1,08	0.1
K disponible	mg l^{-1}	11,4	10.6
Ca disponible	mg l^{-1}	38,4	24.5
Mg disponible	mg l^{-1}	22,1	9.7

Figure 1 : Schémas des macronutriments et/ou des métaux lourds qui dépassent les limites pour la qualité de l'eau suite au traitement d'irrigation par l'eau usée et à la fertilisation.

Traitement par parcelle				2009		2010				2011					2012		
Bloc	Irrigation	Fertilisation	Parcelle	14-juin	13-oct	15-juin	29-juin	23-juil	18-oct	17-mai	14-juin	30-juin	14-juil	21-sept	06-juin	27-sept	12-nov
bloc 1	D0	Fertilisé	P1	P _T P _D Mn	P _T P _D	P _T	P _T			P _T P _D	P _T						
bloc 1	D0	non Fertilisé	P2			P _T P _D	P _T P _D										
bloc 2	D0	non Fertilisé	P3				P _T P _D										
bloc 2	D0	Fertilisé	P4		P _T P _D					P _T NH ₄	P _T						
bloc 3	D0	non Fertilisé	P5			P _T P _D	P _T P _D										
bloc 3	D0	Fertilisé	P6		P _T P _D		P _T	P _T P _D			P _T						
bloc 4	D0	Fertilisé	P7														
bloc 4	D0	non Fertilisé	P8			P _T P _D					P _T	P _T					
bloc 1	D1	non Fertilisé	P1			P _T P _D	P _T P _D							Na			
bloc 1	D1	Fertilisé	P2	P _T P _D						P _R	P _T						
bloc 2	D1	Fertilisé	P3				P _T			P _T							
bloc 2	D1	non Fertilisé	P4			P _T P _D	P _T P _D	P _T P _D	P _T P _D				P _T	P _T			
bloc 3	D1	non Fertilisé	P5			P _T P _D	P _T P _D										
bloc 3	D1	Fertilisé	P6	P _T P _D	P _T P _D					P _T P _D	P _T					P _T	
bloc 4	D1	non Fertilisé	P7			P _T	P _T P _D				P _T						
bloc 4	D1	Fertilisé	P8	P _T P _D	P _T P _D					P _T							
bloc 1	D2	non Fertilisé	P1			P _T				P _T							
bloc 1	D2	Fertilisé	P2	P _T						P _T							
bloc 2	D2	non Fertilisé	P3			P _T P _D	P _T P _D			P _T	P _T						
bloc 2	D2	Fertilisé	P4	P _T P _D									P _T				
bloc 3	D2	non Fertilisé	P5			P _T P _D	P _T P _D			P _T			P _T				
bloc 3	D2	Fertilisé	P6	P _T P _D Mn	Mn	P _T P _D					P _T						
bloc 4	D2	non Fertilisé	P7			P _T P _D	P _T P _D		NO ₃	P _T						N _T NO ₃	
bloc 4	D2	Fertilisé	P8		P _T P _D		P _T			P _T	P _T						
bloc 1	D3	Fertilisé	P1	P _T			P _T P _D			P _T							
bloc 1	D3	non Fertilisé	P2				P _T P _D			P _T							
bloc 2	D3	non Fertilisé	P3			P _T P _D	P _T P _D	P _T P _D		Na			P _T				
bloc 2	D3	Fertilisé	P4	P _T		P _T	P _T P _D			P _T	P _T						
bloc 3	D3	Fertilisé	P5	P _D	P _T P _D		P _T		N _T NO ₃	P _T							
bloc 3	D3	non Fertilisé	P6			P _T P _D	P _D NO ₃	P _T P _D	P _T P _D								
bloc 4	D3	Fertilisé	P7			P _T				P _T	P _T						
bloc 4	D3	non Fertilisé	P8			P _T P _D	P _T P _D	P _T P _D	N _T NO ₃	P _T							

	Au dessous des limites
	Au dessus des limites
	Pas d'eau dans les lysimètres
	Pas d'analyse

