



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

GANA Cécilia

MASTER FAGE

Biologie et Écologie pour la Forêt, l'Agronomie et l'Environnement

Spécialité

Fonctionnement et Gestion des Écosystèmes

**Allocation du carbone vers le compartiment souterrain dans des plantations
pures et mixtes de peupliers et de robiniers**

Mémoire de stage, soutenu à Nancy le 04/09/2012



Encadrants : Nicolas Marron (Chargé de Recherche) ; Caroline Plain (Ingénieure d'Étude) ; Daniel Epron (Professeur).

Structure d'accueil : INRA rue d'Amance 54280 Champenoux
UMR-UHP 1137 Écologie et Écophysiologie Forestières

Sommaire

| | |
|---|----|
| Remerciements | 3 |
| Introduction | 4 |
| L'organisme d'accueil et ses missions | 5 |
| Matériel et méthodes | 6 |
| A. Présentation du site | 6 |
| 1. Situation..... | 6 |
| 2. Données météorologiques..... | 6 |
| 3. Composition et paramètres du sol | 7 |
| B. Arrangement du dispositif | 7 |
| C. Matériel végétal | 7 |
| D. Mesures..... | 8 |
| 1. Flux de CO ₂ à la surface du sol | 8 |
| 2. Croissance du système racinaire..... | 9 |
| 3. Litières | 9 |
| 4. Biomasse aérienne, racinaire et suivi de croissance | 9 |
| E. Calculs et analyses | 9 |
| 1. Flux de carbone vers le compartiment souterrain..... | 9 |
| 2. Analyses statistiques..... | 10 |
| Résultats | 10 |
| A. Biomasse végétale et croissance aérienne | 10 |
| B. Respiration du sol | 11 |
| C. Croissance racinaire..... | 14 |
| D. TBCF | 14 |
| Discussion | 15 |
| A. Dynamique de croissance des espèces..... | 15 |
| a. Croissance aérienne..... | 15 |
| b. Dynamique racinaire | 15 |
| B. Flux de carbone au niveau des parties souterraines..... | 16 |
| a. Flux de CO ₂ du sol | 16 |
| b. Flux de carbone vers le compartiment souterrain (TBCF)..... | 17 |
| Conclusion | 17 |
| Bibliographie | 18 |
| Annexes | 20 |

Remerciements

Je remercie M. André Granier directeur de l'UMR écophysiologie et écologie forestière pour m'avoir acceptée en tant que stagiaire.

Je tiens à remercier mes 3 encadrants : Caroline Plain, Daniel Epron et Nicolas Marron pour leur disponibilité, leur patience, leurs précieux conseils et leur aide tout au long du stage.

Je remercie également Masako Dannoura qui m'a montré les techniques de traitement d'image pour les suivis de croissance racinaire.

Merci à Erwin Dallé pour son aide sur le terrain et sa sympathie.

Un merci particulier à la thésarde Charlotte Grossiord pour ses conseils et sa bonne humeur.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce projet.

Introduction

Un des objectifs de l'union européenne pour 2020 est d'atteindre 20 % de sa consommation d'énergie issue de l'énergie renouvelable (Council of the Union, 8/9 March 2007, note 7224/1/07). L'augmentation des surfaces consacrées aux plantations d'arbres à des fins de production de biomasse tels que les TCR ou TTCR (taillis à courte et très courte rotation) pourraient être envisagées pour atteindre ce résultat.

Les TCR et TTCR sont des plantations d'arbres à croissance rapide, tels que les peupliers, saules, robiniers ou eucalyptus, à fortes densités (environ 1400 tiges/ha pour les TCR et de 7500 à 15 000 tiges/ha pour les TTCR). Ces plantations sont souvent établies sur des sites marginaux, pauvres en nutriments, les terres plus riches étant réservées en priorité à l'agriculture. Or, le peuplier, considéré comme une des essences poussant le plus rapidement sous climat tempéré, qui a fait l'objet de nombreuses études et dont le génome a été entièrement séquencé (Tuskan et al. 2006), est une espèce exigeante en termes de besoins en eau et en nutriments. L'accroissement annuel en azote (pour la biomasse racinaire et aérienne) dans une plantation de 4 ans de peupliers hybrides est d'environ 350 kg.ha⁻¹ ; de ce fait, beaucoup de cultures nécessitent l'ajout de fertilisants (Stettler et al. 1996).

Un des intérêts principaux des plantations mixtes est de pallier à ce besoin en azote en couplant une espèce fixatrice d'azote (comme le robinier) avec une espèce non fixatrice. Par comparaison avec le peuplier, le robinier est beaucoup moins exigeant en nutriments et plus tolérant vis-à-vis de la sécheresse. De nombreuses études, effectuées par exemple avec des mélanges d'espèces non fixatrice/fixatrice tels que eucalyptus/acacia ; peuplier/aulne, ont montré que les plantations mixtes sont plus productives que les monocultures (Forrester et al. 2004 ; Kelt 2006 ; Sayyad et al. 2006). Cependant, même si l'espèce fixatrice d'azote peut jouer un rôle positif sur la production de biomasse d'une plantation, il arrive parfois que cette espèce se fasse rapidement éliminer par l'espèce non fixatrice d'azote, en raison du fort taux de compétition existant dans ces plantations, comme au Brésil, par exemple, dans les plantations mixtes eucalyptus/acacia (Nouvellon et al. 2012).

Une large partie du carbone assimilée lors de la photosynthèse est transportée vers les parties souterraines de l'arbre (utilisée pour la production de racines et d'exsudats, la respiration racinaire, les échanges avec les mycorhizes etc.). Cette proportion de carbone arrivant au sol représente plus de 30 % de la production primaire brute (Gower et al. 1996 ; Ryan et al. 1997). Ce carbone, qui va jouer un rôle dans la séquestration du CO₂ atmosphérique (les parties souterraines n'étant pas exportées hors de la plantation) ne sera donc pas utilisé pour la croissance des parties aériennes dans un premier temps, mais sera primordial pour la reprise de croissance au printemps et pour le redéploiement des parties aériennes des plants suite à une coupe, dans le cas d'une gestion en taillis.

De nombreuses études ont montré qu'il existait un effet de la fertilisation ou de la compétition sur l'allocation du carbone dans les plantations d'arbres (Chang et al. 1996 ; Ericsson et al. 1996 ; Giardina et al. 2002 ; Nilsson et al. 1993 ; Rifai et al. 2010 ; Rodriguez et al. 2008). Néanmoins, seules quelques études se sont penchées sur l'effet d'un mélange espèce non fixatrice/fixatrice d'azote sur ce paramètre (avec le mélange eucalyptus/acacia) (Bauhus et al. 2000 ; Forrester et al. 2006). Le flux de carbone alloué vers les parties souterraines est estimé par la prise en compte des entrées (chutes de litières, carbone minéral et organique du sol, carbone contenu dans la biomasse racinaire) et des sorties (flux de CO₂ à la surface du sol, érosion, lixiviation et flux de CH₄) de carbone du système « plantation » (Giardina et al. 2002). Le flux de carbone à la surface du sol représente une quantité importante de CO₂ rejeté dans l'atmosphère, c'est d'ailleurs le second composant majeur du cycle global du carbone (Raich et al. 1992). Ce flux de carbone est généré, d'une part, par la respiration des racines (ou respiration autotrophe) présente au niveau du sol et d'autre part, par la présence des

microorganismes du sol (respiration hétérotrophe). La respiration du sol est influencée par différents paramètres, comme la température ou l'humidité du sol (Epron et al. 1999 ; Luan et al. 2012 ; Russel et al. 1998).

Le mélange peuplier/robinier, n'a encore jamais fait l'objet d'une étude en milieu tempéré. Cette étude est réalisée dans le but de comparer les espèces et de mieux comprendre les interactions présentes au sein de ces plantations (facilitation ou compétition) afin de déterminer si un tel mélange est efficace en termes de séquestration de carbone (dans les parties souterraines) ou de production de biomasse. Dans cette perspective, les effets du mélange sur le flux de carbone vers le compartiment souterrain seront analysés et les résultats seront comparés à des données de croissance aérienne, afin d'observer d'éventuelles modifications au niveau de ces paramètres.

L'organisme d'accueil et ses missions

Ce stage a été effectué au sein de l'unité mixte de recherche écologie et écophysiologie forestières (EEF), dans l'équipe « Fonctionnement intégré de l'arbre et de l'écosystème », associant des personnels INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) et de l'université Henri Poincaré (Université de Lorraine). L'INRA est un établissement public à caractère scientifique et technologique (EPST) qui mène des recherches scientifiques afin de répondre à des questionnements concernant des préoccupations d'ordre planétaire, tels que l'épuisement des ressources fossiles, la valorisation des territoires, l'environnement, etc. L'UMR EEF, basée sur les campus de Champenoux et de la faculté des sciences de Vandœuvre-lès-Nancy, dirigée par André Granier, mène des programmes de recherche grâce à trois équipes scientifiques (Physiologie et diversité de la réponse aux contraintes ; Fonctionnement intégré de l'arbre et de l'écosystème ; Phytoécologie forestière). Ces équipes étudient principalement les effets dus aux contraintes du milieu, qu'elles soient actuelles (sécheresse, excès d'eau, température, etc.) ou futures, liées aux changements globaux. L'équipe Fonctionnement intégré de l'arbre et de l'écosystème, dirigée par Daniel Epron, conduit des programmes de recherches multiples, allant du fonctionnement hydrique des arbres, de l'allocation du carbone dans l'arbre et dans le sol, à l'influence des changements globaux sur le fonctionnement carboné des tourbières à sphaignes. Ce stage s'inscrit dans la thématique d'étude des cycles biogéochimiques dans les taillis à courte et très courte rotation. L'objectif de ces recherches est de comprendre la dynamique inter- et intra-rotations et l'allocation de l'azote et du carbone dans ces plantations très intensives afin de prévenir les risques d'appauvrissement du milieu liés aux exportations massives.

Ce stage a été réalisé dans le cadre d'un projet financé par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) : Intens&fix (Intensification écologique des écosystèmes de plantations forestières ; modélisation biophysique et évaluation socio-économique de l'association d'espèces fixatrices d'azote) orienté vers la production de biomasse dans les plantations mixtes, démarré le 03/01/2011 pour une durée de 48 mois. Le projet est interinstitutionnel, porté par des équipes du Nord (CIRAD : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, INRA, IRD : Institut de Recherche pour le Développement, Association Française d'Agroforesterie) et du Sud (l'Université de Sao Paulo au Brésil et le Centre de Recherche sur la Durabilité et la productivité des Plantations Industrielles de Pointe-Noire, République du Congo). Il est coordonné par l'Unité mixte de recherche Eco&Sols. Quatre zones géographiques sont concernées par ces recherches : le Brésil (Itatinga), le Congo (Pointe-Noire), le Languedoc (Restinclières) et le Centre et Nord de la France (Saint-Cyr-en-Val). Le projet Intens&Fix vise à l'intensification écologique des plantations forestières via l'association d'espèces fixatrices d'azote. L'objectif est d'accroître

durablement la production des plantations forestières et la disponibilité d'azote et phosphore dans le sol.

Matériel et méthodes

A. Présentation du site

1. Situation

Le site se situe sur le lieu-dit : « La Ferme des Courtes » (47,80 N ; 1,97 E), à St-Cyr-en-Val, près d'Orléans, dans le département du Loiret (Figure 1).



Figure1. Situation géographique du site « La Ferme des Courtes ».

La parcelle est située en bordure de plateau dominant légèrement la vallée du Morchène, sur des alluvions de hautes terrasses de la Loire.

2. Données météorologiques

Des données météorologiques sont acquises depuis 2011 sur le site : pression atmosphérique (grâce à un capteur de pression atmosphérique disposé au niveau de la plantation), température et humidité de l'air (par une thermorésistance et un hygromètre), précipitations (grâce à un pluviomètre) (Figure 2), vitesse du vent (par un anémomètre), taux de rayonnement photosynthétiquement actif (via des capteurs PAR).

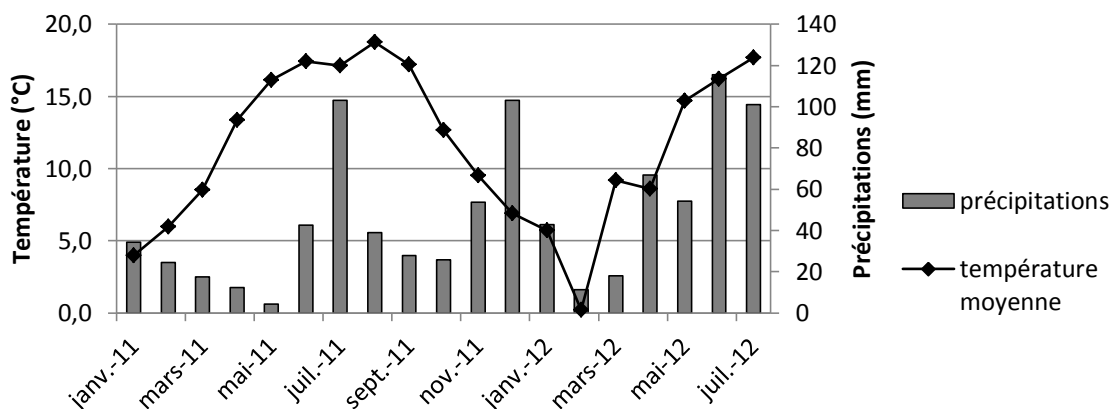


Figure 2. Températures moyennes et précipitations mensuelles sur le site de St-Cyr-en-Val de janvier 2011 à juillet 2012.

3. Composition et paramètres du sol

Des prélèvements de sol ont été effectués sur différents horizons afin de déterminer le contenu en carbone et azote, ainsi que la texture et le pH du sol (Tableau I).

Tableau I. Moyennes (\pm erreur standard) des teneurs en argiles, limons, sables, matière organique (MO), carbone organique (CO), azote total (N tot), rapport carbone/azote (C/N) et pH du sol pour l'horizon 1 : 0-15cm, l'horizon 2 : 15-30 cm et l'horizon 3 : 30-45cm.

| | Moyenne Horizon 1 | Moyenne Horizon 2 | Moyenne Horizon 3 |
|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Argiles (g/kg) | 91,3 \pm 13,1 | 90,1 \pm 21,5 | 102,0 \pm 39,0 |
| Limons (g/kg) | 226,7 \pm 24,4 | 214,4 \pm 39,1 | 211,0 \pm 60,5 |
| Sables (g/kg) | 682,0 \pm 27,9 | 695,4 \pm 58,8 | 687,0 \pm 97,8 |
| MO (g/kg) | 16,8 \pm 5,0 | 14,7 \pm 3,8 | 8,4 \pm 3,0 |
| CO (g/kg) | 9,7 \pm 2,9 | 8,5 \pm 2,2 | 4,9 \pm 1,7 |
| N tot (g/kg) | 0,8 \pm 0,2 | 0,7 \pm 0,2 | 0,4 \pm 0,1 |
| C/N | 11,7 \pm 0,8 | 11,6 \pm 0,6 | 12,0 \pm 1,6 |
| pH | 5,6 \pm 0,3 | 6,0 \pm 0,5 | 6,3 \pm 0,5 |

Des données concernant l'humidité du sol ont été acquises, mesurées par des sondes placés dans le sol et mesurant l'humidité de 0 à 30 cm. La température du sol est mesurée par des thermocouples situés à 10 cm de profondeur à proximité des chambres de mesure de respiration du sol.

L'alimentation électrique du site est assurée par un panneau solaire, installé fin juin 2011, permettant de subvenir aux besoins électriques de l'instrumentation.

B. Arrangement du dispositif

La plantation de St-Cyr-en-Val est constituée d'un mélange de peupliers et de robiniers plantés le 31 mars 2011. La densité est d'environ 1400 tiges/ha (1428 tiges/ha). La superficie du site est d'environ 6900 m². La plantation comporte deux blocs. Chaque bloc est constitué d'une parcelle unitaire (PU) de robiniers purs, d'une PU de peupliers purs et d'une PU de mélange des deux espèces en alternance par ligne (Annexe 1).

Une distance de 2 mètres sépare chaque plant entre eux sur une même ligne et une distance de 3,5 mètres sépare les plants entre deux lignes (Figure 3).

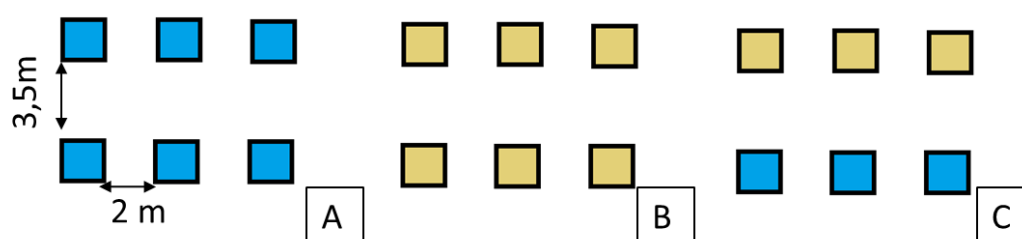


Figure 3. Schéma de la disposition des plants. A : PU de peupliers purs. B : PU de robiniers purs et C : PU de mélange peupliers/robiniers.

Les peupliers purs du bloc 2 sont situés dans une zone inondable à l'extrémité Est de la parcelle (Annexe 2).

C. Matériel végétal

Des boutures de 20 cm de peupliers euraméricains (*Populus x euramericana*, obtenu par le croisement : *Populus deltoides* x *Populus nigra*) représentés par le clone Dorskamp et des plants racinés de 1 an de robinier (*Robinia pseudoacacia*) de variété Nyirzeg ont été plantés sur la parcelle (Annexe 2). Au total, la plantation regroupe 981 arbres : 487 dans le bloc 1 dont 241 peupliers et 246 robiniers ; 494 dans le bloc 2 dont 253 peupliers et 241 robiniers.

Tout au long de l'expérimentation, un inventaire de la mortalité est effectué, les arbres morts sont remplacés par de nouvelles boutures ou plants racinés. Au total 24 robiniers purs, 24 peupliers purs, 28 robiniers en mélange et 1 peuplier en mélange sont morts.

D. Mesures

1. Flux de CO₂ à la surface du sol

Des mesures de flux de CO₂ au niveau du sol ont été effectuées grâce à un système de chambres automatiques couplées à un analyseur de gaz à infrarouge (LI-840) (Annexe 3). Les 19 embases (5 par espèce et par traitement, dont 1 en commun pour les deux espèces, dans le mélange) sur lesquelles les chambres automatiques se positionnent, ont été disposées dans l'espace de Voronoï (correspondant à l'espace élémentaire défini par la demi-distance entre un arbre et son voisin, dont on retiendra un quart de la surface pour l'échantillonnage) (Figure 4), au pied de différents arbres, de manière à couvrir la variabilité spatiale (Annexe 1).

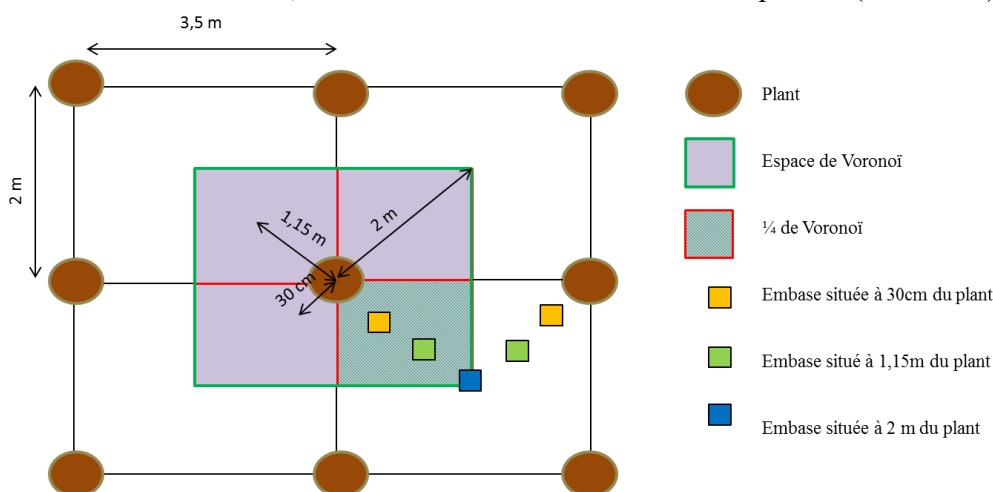


Figure 4. Disposition des embases dans le 1/4 de Voronoï

Ces mesures, enregistrées toutes les 5 secondes pour chaque chambre, sur une durée de 5 minutes, sont obtenues en mV et doivent donc être converties en ppm ($\mu\text{mol/mol}$) par tranche de 5 minutes. La pente de la relation entre l'accumulation de CO₂ dans la chambre et le temps est calculée de manière à obtenir une quantité de CO₂ en ppm/sec. Le flux de CO₂ à la surface du sol (en $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) est ensuite calculé grâce à la formule suivante :

$$\text{Flux de CO}_2 = \frac{a \times P \times V}{R \times T \times S}$$

a : pente

P : pression atmosphérique (Pa)

V : volume de la chambre (m^3)

R : constante des gaz parfaits (= 8,314472)

T : température (K)

S : surface de l'embase (m^2)

Des mesures manuelles ont été réalisées en complément de ces mesures automatiques, tous les 15 jours, à partir du 1^{er} mars 2012, de manière à tester la variabilité spatiale : un dispositif de 9 embases a été installé, pour chaque espèce, par bloc et par traitement, soit un total de 66 embases (12 embases étant communes aux deux espèces dans le mélange), pour les mesures manuelles de respiration du sol.

2. Croissance du système racinaire

Un suivi de la croissance racinaire a été réalisé grâce à l'installation, peu après la plantation (avril 2011), de boîtes transparentes, appelées « rhizoboxes », disposées dans le sol (Annexe 5) et permettant l'insertion d'un scanner qui servira à photographier les racines. Les rhizoboxes sont disposées dans l'espace de Voronoï, suivant le même schéma que celui des chambres automatiques (Figure 4), au pied de plusieurs arbres, pour couvrir la variabilité spatiale. Au total, 24 rhizoboxes ont été installées sur la plantation (3 pour chaque espèce, par traitement et par bloc), permettant d'effectuer régulièrement (tous les 15 jours en saison de végétation) des photos des racines aux différents endroits de la plantation (Annexe 1). Quelques séries de mesures plus rapprochées, espacées de 2 ou 3 jours, ont été réalisées lorsque la croissance racinaire était très rapide. Une fois acquises, les images sont « seuillées » (via l'éditeur d'image GIMP, version 2.6.11), c'est-à-dire mises en noir et blanc, de manière à ce que les racines apparaissent en noir et le fond en blanc, puis traitées grâce au logiciel « ImageJ » (version 1.45s) et au plugin « SmartRoot » (version 3.42) permettant de tracer chaque racine et indiquant leur longueur. Ce qui permet ainsi de calculer les vitesses d'élongation des racines de peuplier et de robinier. Les racines suivies sont celles apparaissant à plusieurs dates et dont l'apex est visible entièrement, ne sortant pas du cadre de l'image (de manière à pouvoir calculer leur élongation totale).

3. Litières

Des litières aériennes ont été récoltées grâce à des filets (Annexe 6), au mois de septembre de l'année 2011, installés sur les 16 arbres abattus en janvier 2012. Les échantillons ont été pesés, puis séchés et broyés afin d'estimer leur teneur en carbone.

Des échantillons de litière au sol ont été prélevés dans des quadrats de 30x30cm, au mois de juin de l'année 2012, au total 66 prélèvements ont été effectués à proximité de chaque embase pour les mesures manuelles de respiration du sol, couvrant ainsi la variabilité spatiale de la plantation. Ces prélèvements ont été pesés individuellement puis regroupés en 8 échantillons (un par espèce, par bloc et par traitement) en vue d'une analyse de leur teneur en carbone.

4. Biomasse aérienne, racinaire et suivi de croissance

Des données de biomasse ont été obtenues suite à l'abattage de 32 arbres au cours de l'année 2012 : 16 (4 pour chaque espèce et chaque traitement) au mois de janvier et 16 en juillet 2012. Les arbres abattus ont été sélectionnés d'après les histogrammes de fréquences des circonférences obtenus suite à des inventaires globaux, de manière à ce que la sélection soit représentative de la variabilité au sein de la plantation. Tous les organes des arbres ont été séchés puis pesés pour déterminer les masses sèches totales. Les organes étaient divisés en 11 catégories : branches sylleptiques (ordre 1 et 2), tige, racines (fines et grossières), bouture, nodules, bourgeons axillaires, feuilles, pousse terminale, apex. Les branches ont été subdivisées en branches inférieures et supérieures et découpés en 3 ou 4 parties, de même que les racines et la tige. Des échantillons de parties aériennes et racinaires ont été prélevés, puis broyés afin d'analyser leur teneur en carbone total. De plus, un suivi de croissance en circonférence et en hauteur est effectué pendant la saison de végétation (environ tous les 15 jours) sur 160 plants sélectionnés dans les zones de suivis de croissance situées au centre de chaque PU (Annexe 2).

E. Calculs et analyses

1. Flux de carbone vers le compartiment souterrain

Le flux de carbone vers le compartiment souterrain est déterminé grâce à l'équation suivante, prenant en compte les entrées et sorties de carbone (d'après Giardina et al. 2002) :

Comme les entrées de carbone dans les parties souterraines sont égales aux sorties,

$$F_S + F_E = TBCF + F_A - (\Delta C_S + \Delta C_R + \Delta C_L) / \Delta t$$

Donc,

$$TBCF \text{ (kg.m}^{-2}\text{.an}^{-1}\text{)} = F_S + F_E - F_A + (\Delta C_S + \Delta C_R + \Delta C_L) / \Delta t$$

TBCF: Total Belowground Carbon Flux (flux carbone vers le compartiment souterrain)

F_E : perte de carbone par érosion, lixiviation ou flux de CH_4

F_S : flux de CO_2 à la surface du sol (« respiration du sol »)

F_A : chutes de litières (feuilles, branches,...)

C_S : variations de carbone contenu dans la partie minérale du sol

C_R : variations de carbone contenu dans la biomasse racinaire

C_L : variations de carbone contenu dans la litière du sol (carbone organique)

2. Analyses statistiques

Les données ont été analysées à l'aide du programme R (version 2.13.1). Les données ont été soumises à des analyses de variance (ANOVA) à deux facteurs pour la croissance en hauteur et les flux cumulés de CO_2 (traitement / espèce) et des ANOVA à 2 facteurs à mesures répétées (traitement / espèce) pour les mesures manuelles et automatiques de flux de CO_2 . Le seuil de risque est placé à 5% (*), 1% (**) et 0,1% (***).

Résultats

A. Biomasse végétale et croissance aérienne

Lors de la première année de croissance, les robiniers sont significativement plus hauts que les peupliers, d'après l'ANOVA à 2 facteurs (espèce et traitement). Les vitesses de croissance ne montrent pas de différences entre les traitements ou espèces (Tableau II). À partir de la deuxième année de croissance, les robiniers et les peupliers ont des hauteurs moyennes semblables (Figure 5).

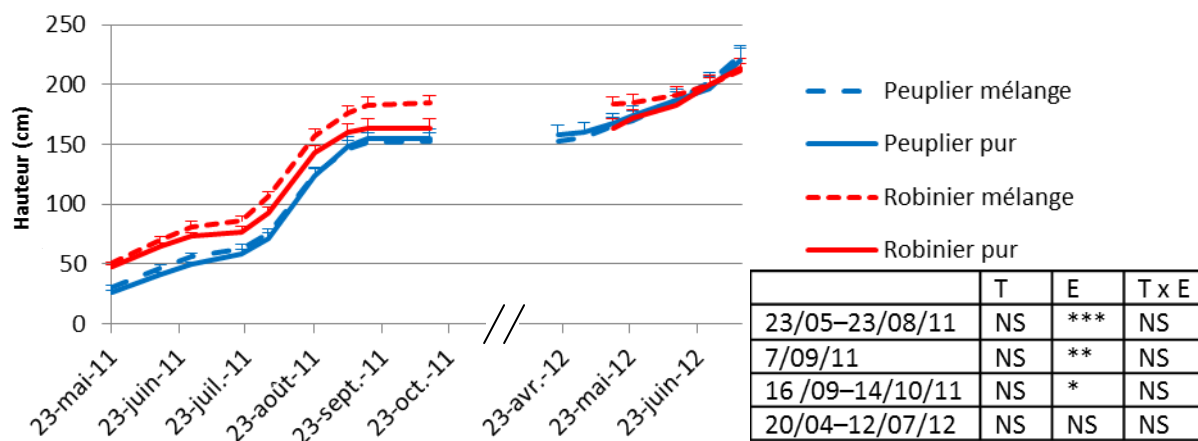


Figure 5. Moyenne des hauteurs des peupliers et robiniers purs et en mélange en fonction du jour de l'année. Les barres verticales indiquent les erreurs standards. L'ANOVA à deux facteurs (espèce : E x traitement : T) réalisée à plusieurs dates montre les effets de l'espèce à $p < .05$ (*), $p < .01$ (**) et $p < .001$ (***) et NS pour non significatif.

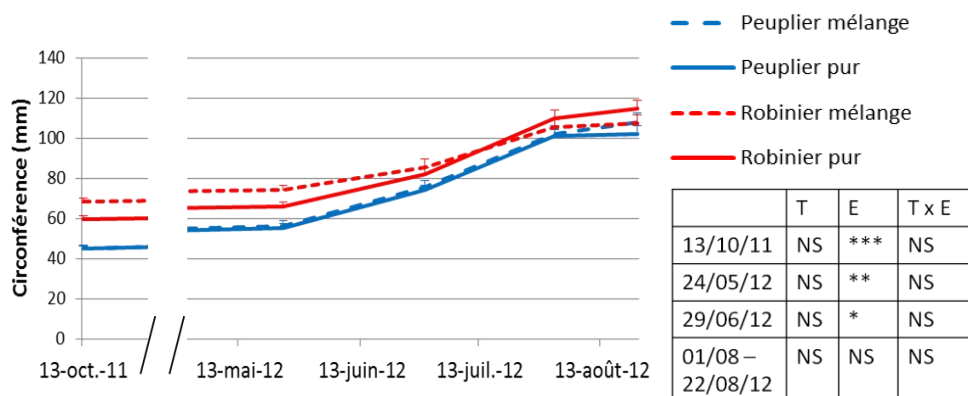


Figure 6. Moyenne des circonférences des peupliers et robiniers purs et en mélange en fonction du jour de l'année. Les erreurs standards sont indiquées par les barres verticales. L'ANOVA à deux facteurs (espèce : E x traitement : T) réalisée à plusieurs dates montre les différences significatives à $p < .05$ (*), $p < .01$ (**) et $p < .001$ (***) entre les circonférences des peupliers et robiniers mais aucun effet du traitement (NS).

Les circonférences des robiniers sont plus élevées que celles des peupliers (Figure 6). Il n'existe pas d'effet du traitement sur les circonférences des peupliers et robiniers. Au 1 août et au 22 août, les robiniers et les peupliers ont des circonférences identiques.

Tableau II. Vitesse de croissance en hauteur et en circonférence des robiniers et peupliers en mélange ou en plantation pure pour la première année de plantation, calculée sur la période du 23 mai au 14 octobre 2011. Les ANOVA à deux facteurs (espèce : E x traitement : T) ne montrent aucune différence significative (NS) entre les vitesses de croissance en hauteur de la première année mais indiquent un effet de l'espèce sur les vitesses de croissance en circonférence.

| | Vitesse de croissance en hauteur (cm/jour) | | Vitesse de croissance en circonférence (cm/jour) | |
|------------------|--|---|--|--|
| Peuplier mélange | 1,05 | <div>T : NS E : NS E x T : NS</div> | 0,54 | <div>T : NS E : * E x T : NS</div> |
| Peuplier pur | 1,11 | | 0,53 | |
| Robinier mélange | 1,15 | | 0,31 | |
| Robinier pur | 1,02 | | 0,46 | |

Les peupliers purs présentent des vitesses de croissance en circonférence 2 fois plus grandes que les robiniers en mélange. D'une manière générale, les peupliers croissent plus rapidement en largeur que les robiniers (Tableau II).

B. Flux de CO₂ à la surface du sol

La figure 7 montre l'évolution de la respiration du sol au cours du temps sur la période du 16/08/2011 au 30/12/2011. L'ANOVA à 2 facteurs (espèce et traitement) indique qu'il n'existe aucune différence significative entre les différents traitements et espèces.

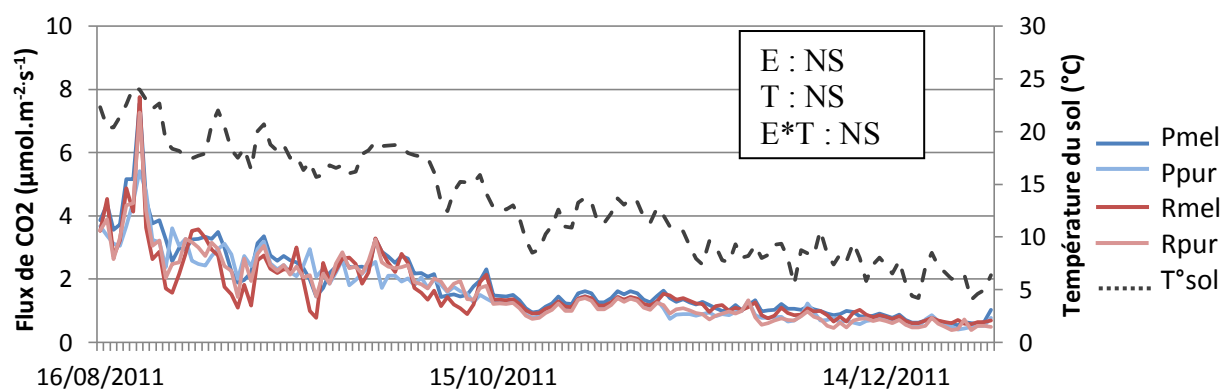


Figure 7. Évolution journalière des températures du sol ($T^{\circ}\text{sol}$) et des flux de CO_2 dans les différentes modalités (P : peuplier, R : robinier ; mel : mélange) sur la période du 16/08/11 au 31/12/11. L'ANOVA à 2 facteurs (espèce : E et traitement : T) n'indique aucun effet des deux facteurs (NS pour non significatif).

La figure 8 représentant l'évolution journalière des flux de CO_2 dans les différentes modalités sur la période du 01/01/12 au 03/08/2012, ne montre aucun effet des facteurs traitement ou modalité.

Le flux de CO_2 du sol est plus important en été (atteignant un flux de 7 à 8 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ de CO_2 pour 2011 et 9 à 10 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ pour 2012) et diminue en automne pour atteindre son minimum en hiver (0 à 0,5 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ de CO_2). La courbe des flux suit la même tendance que celle des températures du sol.

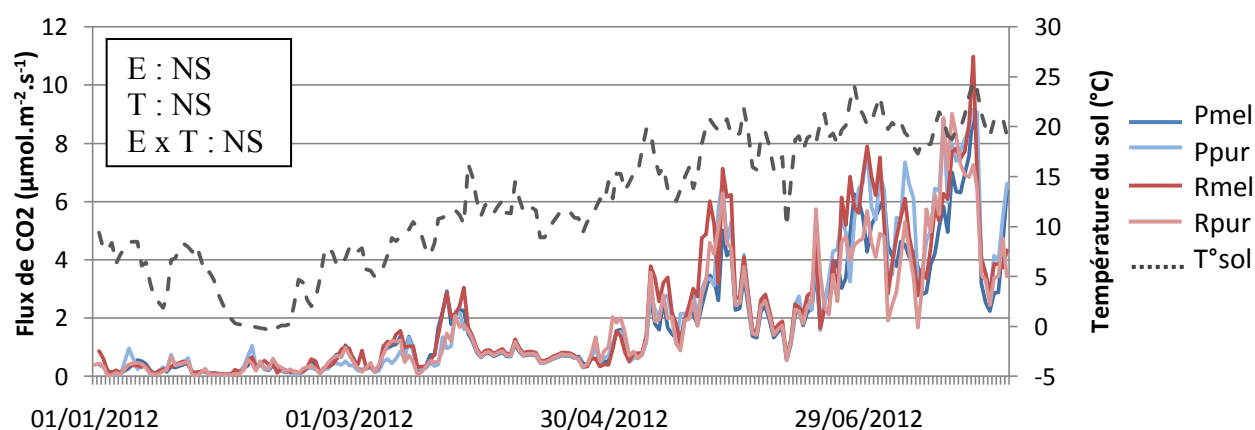


Figure 8. Évolution journalière des températures du sol ($T^{\circ}\text{sol}$) et des flux de CO_2 dans les différentes modalités (P : peuplier, R : robinier ; mel : mélange) sur la période du 01/01/12 au 03/08/12. L'ANOVA à 2 facteurs (espèce : E et traitement : T) indique l'effet de l'interaction des deux facteurs et l'effet date à $p < .001$ (***) et NS pour non significatif.

Les flux cumulés de CO_2 sur la période du 16/08/2011 au 03/08/12 ne présentent pas de différences significatives entre les traitements et entre les espèces, ces flux représentent environ 650 g de carbone par m^2 (Figure 9).

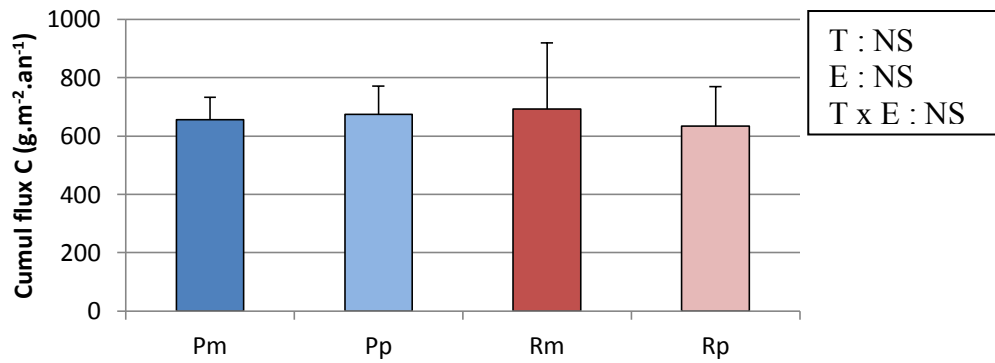


Figure 9. Flux cumulés de CO₂ sur la période du 16/08/11 au 3/08/12. Les barres verticales indiquent les écarts types. D'après l'ANOVA à deux facteurs, aucun des facteurs (traitement : T et espèce : E) n'est significatif (NS).

Concernant la variabilité spatiale, il n'existe pas de différences significatives entre les traitements ou les espèces (Figure 10).

La figure 11 montre la relation exponentielle qui existe entre les flux de CO₂ et la température du sol (exemple donné avec les mesures de la chambre 5).

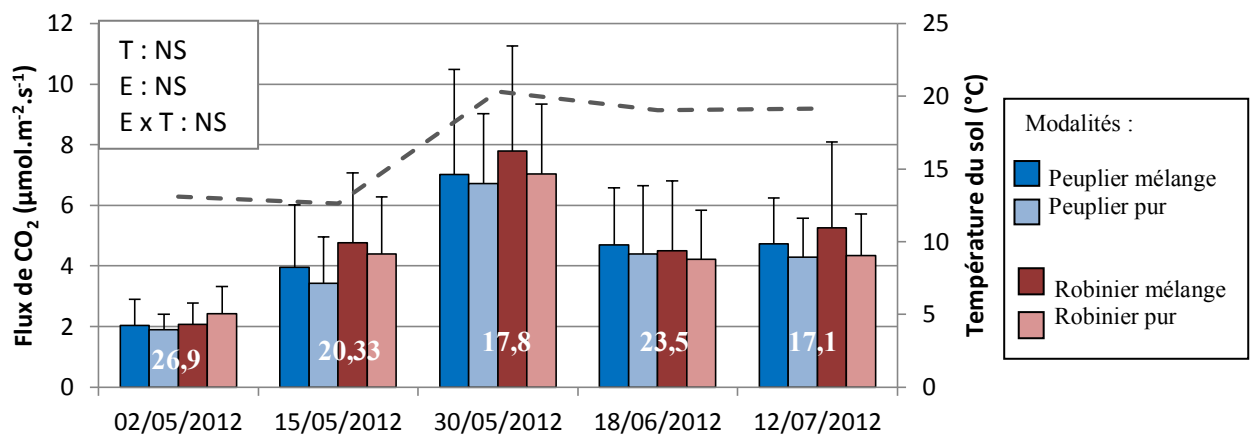


Figure 10. Flux de CO₂ (mesures manuelles) dans les différentes modalités et température du sol. L'ANOVA à 2 facteurs (traitement : T et espèce : E) indique qu'il n'y a pas d'effet de ces 2 facteurs (NS). Les barres verticales indiquent les écarts types. Les chiffres en blanc correspondent aux valeurs d'humidité du sol (%).

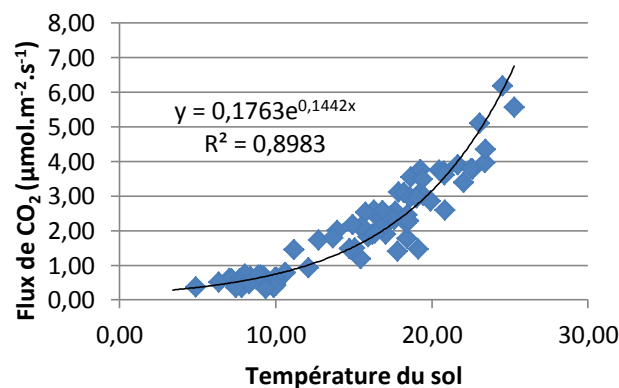


Figure 11. Flux de CO₂ (de la chambre 5) en fonction de la température du sol (à 1 -10cm) pour les mesures acquises du 16/08/11 au 31/12/11.

C. Croissance racinaire

La croissance de 18 racines a pu être suivie grâce au traitement des images obtenues par les rhizoboxes. 2 racines ont été suivies dans les peupliers en mélange, 6 pour les peupliers purs, 3 pour les robiniers en mélange et 5 pour les robiniers purs. Le peu de données acquises ne permet donc pas d'effectuer de test statistique.

La vitesse de croissance des racines de peupliers en mélange ($\sim 3 \text{ cm.j}^{-1}$) est 6 fois plus élevée que celle des peupliers purs ($\sim 0,5 \text{ cm.j}^{-1}$) et 2 à 3 fois plus élevée que celle des robiniers ($\sim 0,8 \text{ cm.j}^{-1}$ en mélange et $\sim 1,5 \text{ cm.j}^{-1}$ en traitement pur) (Figure 12).

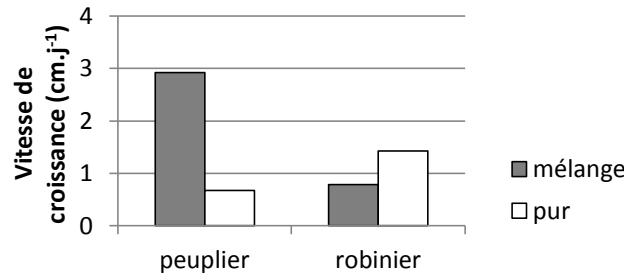


Figure 12. Vitesse de croissance des racines de peupliers et robiniers en fonction du traitement (pur/mélange).

D. Flux de carbone vers le compartiment souterrain (TBCF)

Aucune donnée de biomasse n'ayant pu être obtenue pour août 2011, les valeurs de biomasse racinaire ont été considérées comme nulles. La croissance des plants n'ayant démarré qu'au printemps 2011, les biomasses racinaires du mois d'août de cette même année étaient probablement proches de 0 (et donc négligeables). La variation de carbone au niveau des racines (ΔC_R) a donc été calculée uniquement à partir des biomasses de juillet 2012. De plus, les variations du stock de carbone minéral du sol (C_S), ainsi que les sorties de carbone du système liées à l'érosion, la lixiviation ou aux flux de CH_4 (F_E) ont été considérés comme négligeables.

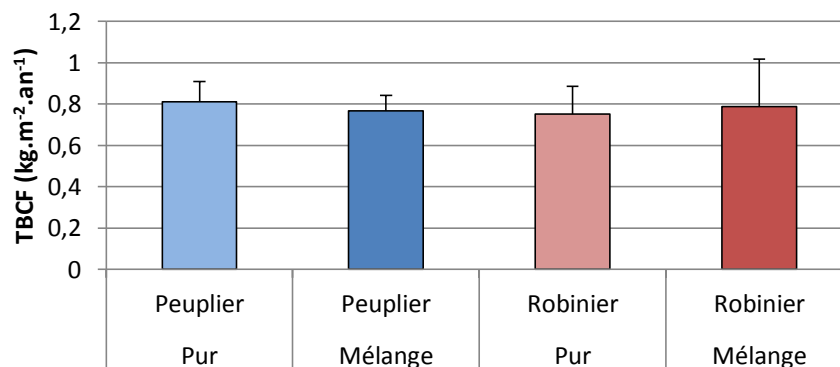


Figure 13. Total Belowground Carbon Flux dans les différentes modalités. Les barres verticales indiquent les écarts types calculés à partir de la somme des variances de chaque paramètre rentrant en compte dans l'équation de TBCF.

D'après la figure 13, le flux du carbone vers les parties souterraines est moins important pour les robiniers purs ($\sim 0,75 \text{ kg de carbone.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$) et plus important pour les peupliers purs ($\sim 0,81 \text{ kg de carbone.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$) mais cette différence est très faible, compte tenu des écarts types.

Discussion

Les objectifs de cette étude étaient de comparer les deux espèces et d'analyser l'effet du mélange sur le flux de carbone vers les parties souterraines et sur la croissance. Les résultats observés montrent qu'il n'existe aucune différence entre les traitements à ce stade. Aussi, seules les différences entre les deux espèces ont pu être observées et seront donc discutées.

A. Dynamique de croissance des espèces

a. Croissance aérienne

D'après les résultats observés, la hauteur des robiniers au cours de la première année de plantation est plus importante que celle des peupliers. Malgré des vitesses de croissance en diamètre plus élevées chez les peupliers, les robiniers présentent des vitesses de croissance en hauteur plus importantes. Les robiniers ont également des circonférences plus importantes que les peupliers. Il a été montré, dans une plantation mixte espèce fixatrice/non fixatrice d'eucalyptus et falcataria que les arbres les plus grands croissent généralement plus vite mais que cette tendance peut être modifiée par des interactions entre la disponibilité en nutriments et l'intensité de compétition ou facilitation (Boyden et al. 2005). Le robinier semble être une espèce plus résistante à la sécheresse que le peuplier, ces deux espèces, plantées en monoculture, sur un même site, ayant une réserve utile en eau faible pour les plantes (90 mm.m⁻¹ de profondeur), présentaient des différences de production de biomasse, avec une biomasse deux fois plus importante chez le robinier que chez le peuplier (Grünwald et al. 2009). Les peupliers de Saint-Cyr-en-Val ont donc peut-être souffert de la sécheresse de 2011, ce qui expliquerait cette différence entre les deux espèces. De plus, les robiniers plantés en mars 2011 étaient des plants racinés, ce qui peut aussi expliquer leur avancement au niveau de la croissance en hauteur et circonférence pour la première année de croissance, par rapport aux peupliers issus de boutures qui n'avaient donc pas encore développés de système racinaire. Par ailleurs, la production de biomasse des robiniers semble être toujours élevée (en comparaison avec d'autres espèces à croissance rapide comme le peuplier ou le saule) quelles que soient les conditions de culture (sécheresse ou non), cette espèce présente donc des avantages pour la production de biomasse (Grünwald et al. 2009). Cependant, le peuplier, cultivé dans de bonnes conditions, peut atteindre une production similaire à celle du robinier (Grünwald et al. 2007). C'est donc le pédoclimat qui va déterminer laquelle des deux espèces sera la plus productive. Cet effet a pu être constaté avec le mélange eucalyptus/acacia, les deux espèces pouvant contribuer à la production de biomasse dans certains cas, comme en Australie (Forrester et al. 2004). Dans d'autres cas (et pour des pédoclimats différents, comme au Brésil), l'acacia était rapidement éliminé dans le mélange (Nouvellon et al. 2012).

Au cours de la deuxième année de croissance, les hauteurs des robiniers et des peupliers s'équilibrent et deviennent quasi identiques. La circonférence des robiniers reste cependant significativement plus élevée que celle des peupliers au début de l'année 2012 mais cet écart tend à diminuer. À partir du mois d'août, aucune différence de circonférence entre les deux espèces n'apparaît. La croissance des robiniers a été fortement ralentie par le gel du début de l'année 2012. En effet, certains robiniers sont morts et ceux ayant résisté ont, pour la plupart, perdu leurs bourgeons terminaux, ce qui a donc limité leur croissance en hauteur. Les deux espèces semblent avoir des morphologies très différentes, le peuplier avec un port vertical, élancé et le robinier avec un port plus étalé, ce qui peut expliquer aussi cette limitation de croissance en hauteur du robinier en faveur d'une croissance des branches secondaires.

b. Dynamique racinaire

L'étude du développement racinaire est essentielle car il contribue au cycle du carbone et de l'azote. La dynamique racinaire (production, mort, décomposition) est directement liée à la

dynamique du carbone dans la plantation. La durée de vie des racines fines chez le peuplier est de 30 à 300 jours (dépendant de la variété, de l'âge de la plantation et des facteurs environnementaux du sol) ; le turnover des racines fines représente une très petite part du pool du carbone du sol mais reste important pour maintenir ou améliorer le niveau de carbone dans une plantation de peuplier (Block 2006). Il existe peu de données dans la bibliographie relatives à la croissance racinaire du peuplier et du robinier ; néanmoins, de nombreux auteurs s'accordent à dire que la croissance racinaire des peupliers est très rapide, dépassant 10 mm par jour (Block et al. 2006 ; Stettler et al. 1996). Les résultats obtenus par le système de rhizoboxes indiquent également que la croissance des racines de peuplier est très rapide (jusqu'à 30 mm.j⁻¹ en mélange). La forte vitesse de croissance racinaire des peupliers en mélange, en comparaison avec les autres modalités est peut-être due au hasard ; en effet, peu de données ont pu être acquises au niveau de ces rhizoboxes (trop de racines présentes rendant le suivi difficile, racine sortant du cadre entre deux mesures etc.). Les robiniers situés en mélange présentent les plus faibles valeurs de croissance racinaire mais des valeurs de croissance des parties aériennes plus élevées que les peupliers. Les deux espèces semblent avoir un développement différent de leur système racinaire : les peupliers semblent avoir moins de racines que les robiniers. De plus, les robiniers plantés en mars 2011 étaient des plants racinés, ce qui peut aussi expliquer leur avancement au niveau du développement racinaire, par rapport aux peupliers issus de boutures qui n'avaient donc pas encore développé de système racinaire.

B. Flux de carbone au niveau des parties souterraines

a. Flux de CO₂ du sol

Il existe une relation de type exponentielle entre les flux de CO₂ du sol et la température du sol (Epron et al. 1999 ; Luan et al. 2012 ; Russel et al. 1998), cette relation est bien visible sur les données obtenues dans cette étude, par les mesures automatiques et manuelles (Figure 14). Ainsi, lorsque la température est élevée, les flux de CO₂ à la surface du sol sont plus importants. Néanmoins, d'autres paramètres physiques (comme l'humidité du sol), ainsi que le type d'espèces, leur phénologie et leur mélange peuvent influencer sur la respiration du sol. Les flux de CO₂ augmentent avec l'humidité du sol : plus le sol est humide, plus les flux de CO₂ sont importants (cette relation atteint un palier à partir d'une forte humidité du sol), (Epron et al. 2004 ; Mo et al. 2005). Concernant les mesures manuelles, il n'existe pas de différence significative entre les différents traitements ou espèces sur la plantation (malgré un gradient d'humidité présent au sein de la plantation, avec des zones inondables situées à l'extrémité est du dispositif). Cependant, on peut constater une augmentation des flux de CO₂ entre le 02/05/2012 et le 15/05/2012 malgré une température et une humidité du sol inférieure. Dans certains cas, quand l'humidité du sol est très importante, les flux de CO₂ à la surface du sol sont faibles. Ce cas peut être observé avec des sols hydromorphes, lors des périodes d'engorgement (Vincent et al. 2006). Le sol de Saint-Cyr-en-Val ayant tendance à s'engorger à certaines périodes de l'année, il est probable que les faibles valeurs de flux observées le 02 mai soient dues à un effet d'engorgement, inhibant la respiration du sol. Les mesures automatiques ont permis d'étudier l'évolution des flux de CO₂ au cours du temps. Ces flux atteignant un maximum en été et un minimum en hiver. Il a été montré que les flux de CO₂ du sol diminuaient avec l'âge dans des plantations de peupliers (Yan et al. 2011 ; Zhang et al. 2011). Cependant, ces deux études comparaient les respirations moyennes des plantations à des âges plus avancés que la plantation de Saint-Cyr-en-Val (respectivement 2, 7 et 12 ans et 2, 8 et 15 ans). A Saint-Cyr-en-Val, les flux de CO₂ de la deuxième année de croissance semblent atteindre des valeurs plus élevées en été que ceux de la première année de croissance, ces flux vont donc peut-être continuer à augmenter chaque année pendant la durée du projet. Toutefois, la comparaison entre les flux de la première année et ceux de la

deuxième année n'est pas représentative car les mesures n'ont pas été effectuées sur la même période de l'année. La poursuite de ces mesures permettra donc de connaître la façon dont les flux de CO₂ évoluent dans les premières années suivant la plantation.

b. Flux de carbone vers le compartiment souterrain (TBCF)

Les valeurs de TBCF ont été calculées grâce aux données de biomasse racinaire, aux flux de CO₂ du sol et aux teneurs en carbone du sol et des litières.

Le flux de carbone à la surface du sol représente une composante majeure dans le calcul du flux de carbone vers les parties souterraines (Giardina et al. 2002). Au site de Saint-Cyr-en-Val, les flux de CO₂ à la surface du sol représentent environ 80% du TBCF. Ces flux en surface étant plus importants dans les traitements peupliers purs et robiniers en mélange, leur TBCF est donc plus élevé. Les robiniers purs qui présentaient le flux de CO₂ à la surface du sol le moins important ont le TBCF le plus bas. L'écart entre les valeurs de TBCF des peupliers purs et des robiniers purs est faible. Ce carbone arrivant dans les parties souterraines est ainsi rapidement restitué vers l'atmosphère via la respiration du sol. Les valeurs de TBCF obtenues dans cette étude sont inférieures à celles observées dans des plantations d'arbre à croissance rapide en région tropicales où la croissance est continue (1,5 à 2 kg.m⁻².an⁻¹ pour des plantations d'eucalyptus) (Binkley et al. 2008 ; Giardina et al. 2002). Néanmoins, elles sont comparables à celles observées dans des plantations en région tempérée (0,6 à 1 kg.m⁻².an⁻¹ pour des plantations de pin) (Litton et al. 2007). Ces valeurs diminuent lorsque la plantation devient plus âgée (Binkley et al. 2008 ; Giardina et al. 2002). La plantation de Saint-Cyr-en-Val étant encore très jeune, avec une vitesse de croissance des arbres très élevée, les valeurs de TBCF sont donc importantes et devraient diminuer dans les prochaines années.

Néanmoins, certains paramètres n'ont pas été pris en compte dans cette étude. En effet, les variations du stock de carbone minéral du sol (ΔC_S), ainsi que les sorties de carbone du système liés à l'érosion, la lixiviation ou aux flux de CH₄ (F_E) ont été considérés comme négligeables. Sur de courtes périodes (à l'échelle de l'année, dans cette étude) et en comparaison avec la forte respiration du sol, ces valeurs représentent une infime partie du TBCF (les mécanismes de minéralisation du carbone étant, par exemple, plus lents que ceux de la respiration). De plus, les teneurs en carbone à T₀ étaient similaires dans les différentes parcelles unitaires et aucune variation d'altitude ou d'inclinaison du sol n'est présente au sein de la plantation. Par ailleurs, il est probable que les flux de méthane soient plus importants dans la partie inondable du dispositif (favorisant les réactions anaérobies des bactéries du sol et donc l'émission de CH₄). Sur de plus longues périodes et selon le pédoclimat ou la situation géographique de la plantation (si elle est située, par exemple, dans une région avec une forte érosion), ces paramètres doivent être pris en compte car ils peuvent contribuer significativement à des variations de TBCF.

Ces études doivent donc se faire sur des périodes plus longues (de l'ordre de 3 à 4 ans au minimum), pour être plus représentatives des variations des stocks de carbone du compartiment souterrain dans la plantation.

Conclusion

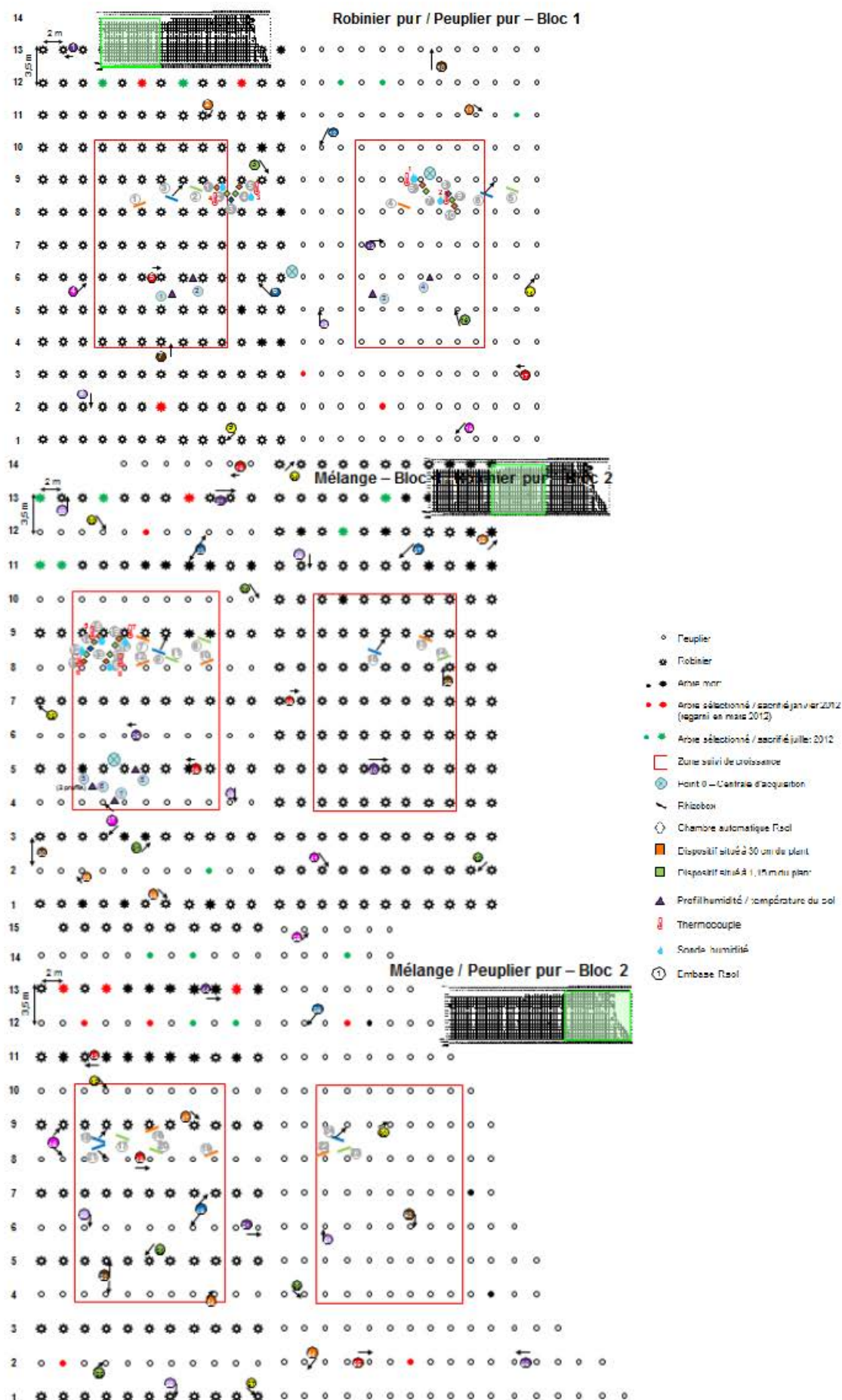
La plantation mixte peupliers/robiniers de Saint-Cyr-en-Val n'étant qu'à sa deuxième année de croissance, il est encore trop tôt pour observer des différences dans les flux du carbone vers les parties souterraines dues à des mécanismes de compétition, facilitation ou diminution de compétition dans les différentes modalités. Seules les différences entre les deux espèces, ayant des morphologies et fonctionnements très différents, ressortent actuellement sur des paramètres de croissance des parties aériennes (hauteur et circonférence). Les robiniers, qui semblent profiter d'avantage du pédoclimat, présentent des hauteurs et circonférences plus

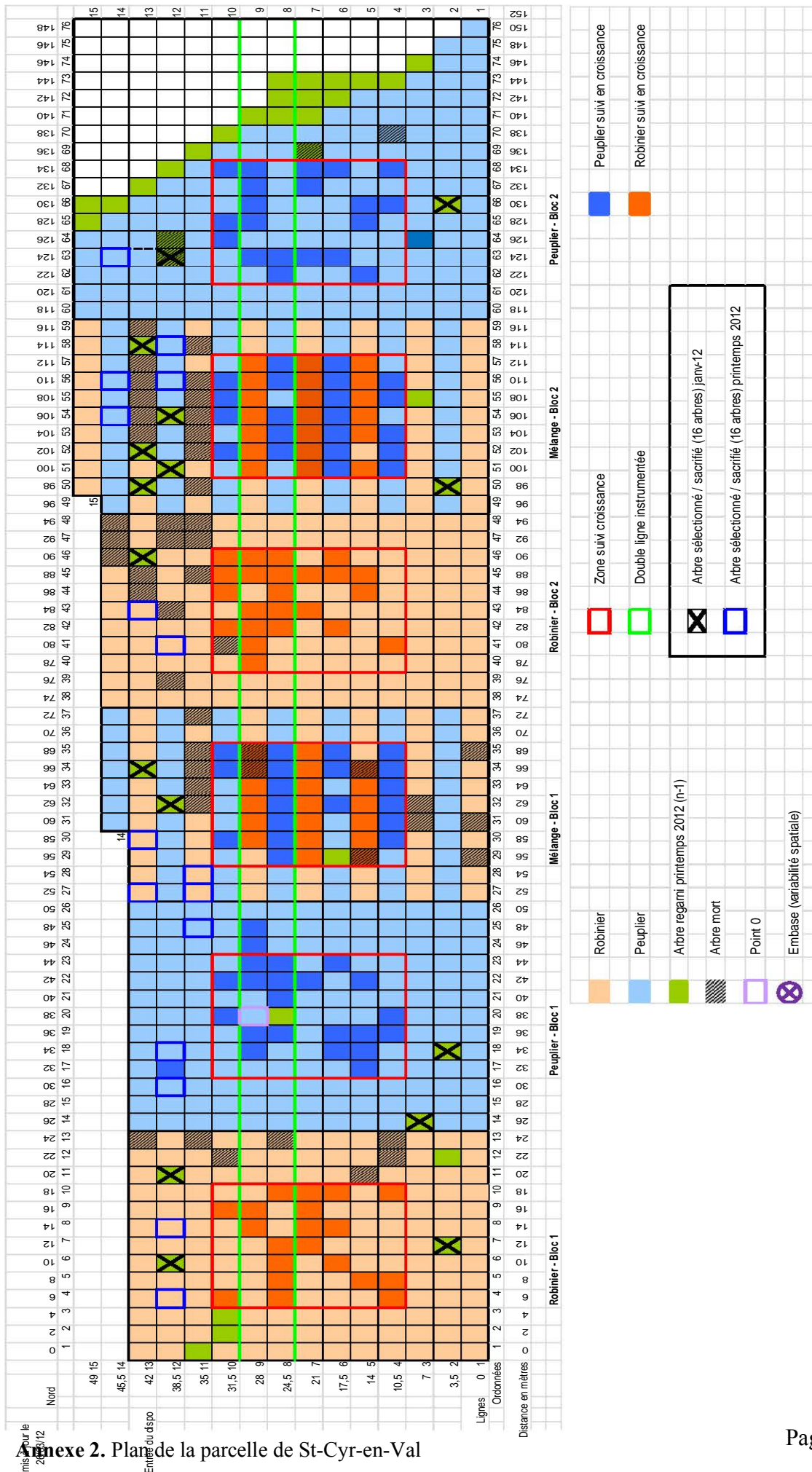
importantes que les peupliers lors de la première année de croissance. Le flux de carbone à la surface du sol représente une composante majeure dans le calcul du flux de carbone vers les parties souterraines, mais il est indispensable de prendre en compte les autres composants du TBCF afin d'éviter toute source d'erreur. Les estimations de TBCF et les données de biomasses couplées à des mesures de respiration des parties aériennes (permettant de déterminer la production primaire nette aérienne) pourront être utilisées pour déterminer la production primaire brute de la plantation. Ces mesures devront se poursuivre durant les années qui suivent afin de mettre en évidence d'éventuels effets des mécanismes d'interaction existant au sein des plantations.

Bibliographie

- BAUHUS, J., KHANNA, P.K., MENDEN, N. Aboveground and belowground interactions in mixed plantations of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. *Canadian Journal of Forest Resources*. 2000. Vol. 30, p. 1886-1894.
- BINKLEY, D., RYAN, M.G. Net primary production and nutrient cycling in replicated stands of *Eucalyptus saligna* and *Albizia falcataria*. *Forest ecology and management*. 1998. Vol 112, p. 79-85.
- BLOCK, R.M.A., VAN REES, K.C.J., KNIGHT, J.D. A review of fine root dynamics in *Populus* plantations. *Agroforestry Systems*. 2006. Vol. 67, p. 73-84.
- BOYDEN, S., BINKLEY, D., SENOCK, R. Competition and facilitation between *Eucalyptus* and nitrogen-fixing *Falcataria* in relation to soil fertility. *Ecology*. 2005. Vol. 86, n°4, p. 992-1001.
- CHANG, S.X., WEETMAN, G.F., PRESTON, C.M. Understory competition effect on tree growth and biomass allocation on a coastal old-growth forest cutover site in British Columbia. *Forest ecology and management*. 1996. Vol. 83, n° 1-2, p. 1-11.
- EPRON, D., FARQUE, L., LUCOR, E., BADOT, P.M. Soil CO₂ efflux in a beech forest: dependence on soil temperature and soil water content. *Annals of Forest Science*. 1999. Vol. 56, p. 221-226.
- EPRON, D., NOUVELLON, Y., ROUPSARD, O., MOUVONDY, W., MABIALA, A., SAINT-ANDRE, L., JOFFRE, R., JOURDAN, C., BONNEFOND, J.M., BERBIGIER, P., HAMEL, O. Spatial and temporal variations of soil respiration in a *Eucalyptus* plantation in Congo. *Forest Ecology and Management*. 2004. Vol. 202, p. 149-160.
- ERICSSON, T., RYTTER, L., VAPAAVUORI, E. Physiology of carbon allocation in trees. *Biomass and Bioenergy*. 1996. Vol. 11, n° 2-3, p. 115-127.
- FORRESTER, D. I., BAUHUS, J., KHANNA, P.K. Growth dynamics in a mixed-species plantation of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. *Forest ecology and management*. 2004. Vol. 193, n°1-2, p. 81-95.
- FORRESTER, D.I., BAUHUS, J., COWIE, A.L., VANCLAY, J.K. Mixed-species plantations of eucalyptus with nitrogen-fixing trees: a review. *Forest Ecology and Management*. 2006. Vol. 233, n° 2-3, p. 211-230.
- GIARDINA, C.P., RYAN, M.G. Total Belowground Carbon Allocation in a Fast-growing *Eucalyptus* Plantation Estimated Using a Carbon Balance Approach. *Ecosystems*. 2002. Vol. 5, n° 5, p. 487-499.
- GOWER, S.T., PONGRACIC, S., LANDSBERG, J.J. A global trend in belowground carbon allocation: can we use the relationship at smaller scales ? *Ecology*. 1996. Vol. 77, p. 1750-5.
- GRÜNEWALD, H., BRANDT, B.K.V., SCHNEIDER, B.U., BENS, O., KENDZIA, G., HÜTTL, R.F. Agroforestry systems for the production of woody biomass for energy transformation purposes. *Ecological Engineering*. 2007. Vol. 29, p. 319-328.
- GRÜNEWALD, H., BÖHM, C., QUINKENSTEIN, A., GRUNDMANN, P., EBERTS, J., VON WHÜHLISCH, G. *Robinia pseudoacacia* L.: A lesser known tree species for biomass production. *Bioenergy Research*. 2009. Vol. 2, p. 123-133.
- KELTY, M. J. The role of species mixtures in plantation forestry. *Forest Ecology and Management*. 2006. Vol. 233, n°2-3, p. 195-204.
- LITTON, C.M., RAICH, J.W., RYAN, M.G. Carbon allocation in forest ecosystems. *Global Change Biology*. 2007. Vol. 13, p. 2089-2109.
- LUAN, J., LIU, S., ZHU, X., WANG, J., LIU, K. Roles of biotic and abiotic variables in determining spatial variation of soil respiration in secondary oak planted pine forests. *Soil Biology & Biochemistry*. 2012. Vol. 44, p. 143-150.

- MO, W., LEE, M.S., UCHIDA, M., INATOMI, M., SAIGUSA, N., MARIKO, S., KOIZUMI, H. Seasonal and annual variations in soil respiration in a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in Japan. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2005. Vol. 134, p. 81-94.
- NILSSON, U., HÄLLGREN, J.E. Changes in growth allocation owing to competition for light in young fertilized Norway spruce trees. *Forest ecology and management*. 1993. Vol. 62, n° 1-4, p. 157-172.
- NOUVELLON, Y., LACLAU, J.P., EPRON, D., LE MAIRE, G., BONNEFOND, J.M., GONÇALVES, J.L.M., BOUILLET, J.P. Production and carbon allocation in monocultures and mixed-species plantations of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* in Brazil. *Tree Physiology*. 2012. Vol. 00, p. 1-16.
- RAICH, J.W., SCHLESINGER, W.H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*. 1992. Vol. 44B, p. 81-99.
- RIFAI, S.W., MARKEWITZ, D., BORDERS, B. Twenty years of intensive fertilization and competing vegetation suppression in loblolly pine plantations: Impacts on soil C, N, and microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*. 2010. Vol. 42, n° 5, p. 713-723.
- RODR GUE , R., ESPINOSA, M., HOFMANN, G., MARCHANT, M. Needle mass, fine root and stem wood production in response to silvicultural treatment, tree size and competitive status in radiata pine stands. *Forest Ecology and Management*. 2003. Vol. 186, n° 1-3, p. 287-296.
- RUSSELL, C.A., VORONEY, R.P. Carbon dioxide efflux from the floor of a boreal aspen forest. I. Relationship to environmental variables and estimates of C respired. *Canadian Journal of Soil Science*. 1998. Vol. 78, p. 301-310.
- RYAN, M.G., LAVIGNE, M.B., GOWER, S.T., Annual carbon cost of autotrophic respiration in boreal forest ecosystems in relation to species and climate. *Journal of Geophysical research*. 1997. Vol. 102, n°D24, p. 28871-28883.
- SAYYAD, E., HOSSEINI, S.M., MOKHTARI, J., MAHDAVI, R., JALALI, S.G., AKBARINIA, M., TABARI, M. Comparison of Growth, Nutrition and Soil Properties of Pure and Mixed Stands of *Populus deltoides* and *Alnus subcordata*. *Silva Fennica*. 2006. Vol. 40, n°1, p. 27-35.
- STETTLER R.F., BRADSHAW, H.D., JR., HEILMAN, P.E., HINCKLEY, T.M. *Biology of Populus and its implications for management and conservation*. Ottawa: NRC Research Press, 1996. 539 p. ISBN : 0660165066
- TUSKAN, G.A. [et al.]. The genome of black cottonwood, *Populus trichocarpa* (Torr. & Gray). *Science*. 2006. Vol. 313, p. 1596-1604.
- VINCENT, G., SHAHRIARI, A.R., LUCOT, E., BADOT, P.M., EPRON, D. Spatial and seasonal variations in a temperate deciduous forest with fluctuating water table. *Soil Biology & Biochemistry*. 2006. Vol. 38, p. 2527-2535.
- YAN, M., ZHANG, X., ZHOU, G., GONG, J., YOU, X. Temporal and spatial variation in soil respiration of poplar plantations at different developmental stages in Xinjiang, China. *Journal of Arid Environments*. 2011. Vol. 75, p. 51-57.
- ZHANG J., SHANGGUAN, T., MENG, Z. Changes in soil carbon stock over a rotation of poplar plantations in northwest China. *Ecological research*. 2011. Vol. 26, p. 153-161.







Annexe 3. Photographies d'un plant de robinier (A) et de peuplier (B), au 27 juin 2012.



Annexe 4. Photographie des chambres automatiques mesurant la respiration du sol.



Annexe 5. Photographies des « Rhizoboxes » et du dispositif permettant l'acquisition des images de racines.



Annexe 6. Photographie d'un robinier recouvert d'un filet à litière.

Résumé

Les taillis à vocation énergétique à base de peupliers pourraient contribuer à diminuer la consommation de combustibles fossiles. Néanmoins, la durabilité de ces cultures ligneuses intensives repose sur le maintien à long terme de la fertilité des sols. Le développement de plantations mixtes associant une espèce fixatrice d'azote (le robinier) est une solution envisagée pour maintenir la fertilité, mais cela va dépendre en particulier de la compétition pour les ressources édaphiques entre les deux espèces. Dans les peuplements mixtes composés de peupliers et de robiniers, les modifications des statuts hydrique et azoté du sol et les interactions interspécifiques (phénomènes de facilitation et compétition pour les ressources édaphiques) sont susceptibles de modifier fortement (par rapport aux plantations pures) l'allocation du carbone (C) entre les compartiments aérien et souterrain. La plantation de Saint-Cyr-en-Val étant encore jeune, seules des différences de croissance en hauteur et en circonférence entre les deux espèces ont pu être mises en évidence. Les valeurs obtenues lors de l'estimation des flux de carbone vers les parties souterraines ($\sim 0,8 \text{ kg.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$) devraient diminuer dans les années à venir. Ces mesures devront se poursuivre durant les années qui suivent afin de mettre en évidence d'éventuels effets des mécanismes d'interaction régissant au sein des plantations.

Mots clés : Flux total de carbone vers le compartiment souterrain ; Plantation mixte ; Espèce fixatrice d'azote ; Flux de CO_2 du sol ; Biomasse ; *Populus x euramericana* ; *Robinia pseudoacacia* ; Croissance racinaire

Belowground carbon allocation in a mixed-species plantation of *Populus euramericana* and *Robinia pseudoacacia*

Abstract

Fast-growing trees, as poplar, grown in short rotation coppice (SRC) plantations may help reduce fossil fuels consumption. However, the sustainability of these systems is based on soil fertility long-term maintain. The development of mixed-species plantations, associating a nitrogen-fixing species (black locust) is a solution considered to reduce the risk of fertility decline, although, this will depend on competition for soil resources between both species. Indeed, in poplar and black locust mixed-stands, changes in soil water and nitrogen status and intraspecific interactions (facilitation and competition for soil resources) could significantly (compared to pure plantations) carbon allocation between aboveground and belowground compartments. Because of the young age of the plantation studied in Saint-Cyr-en-Val, only differences in circumference and height growth between the two species were found. The values of total belowground carbon flux ($\sim 0.8 \text{ kg.m}^{-2}.\text{y}^{-1}$) should decrease during the coming years. These measurements must continue during the following years in order to eventually observe the effects of interaction mechanisms.

Keywords : Total belowground carbon flux ; Mixed-species plantation ; *Populus x euramericana* ; *Robinia pseudoacacia* ; Nitrogen-fixing species ; Soil CO_2 flux ; Biomass ; Root growth