



Année universitaire

2010-2011



UNIVERSITE DE BORDEAUX I
U.F.R. : Sciences biologiques
UMR INRA/ UR 1263 EPHYSE
Ecophysiologie fonctionnelle et PHYSique de l'Environnement

RAPPORT DE STAGE

Présenté le 20 juin 2011 par

Rim KHLIFA

Dans le cadre du

Master 2
SCIENCES ET TECHNOLOGIES
MENTION STEE
Spécialité ECOLOGIE, parcours FMET

Etablissement de modèles estimant les biomasses et les minéralomasses exportées lors des récoltes de souches de Pin maritime

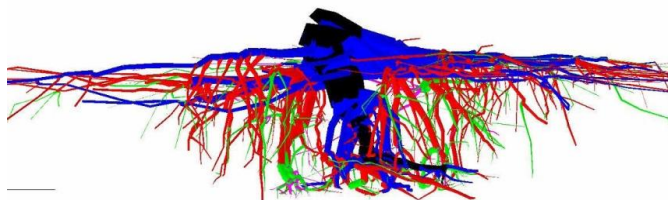


Image numérisée d'une souche de *Pinus pinaster*

Directeur de laboratoire : **D. Loustau**

Maîtres de stage : **P. Trichet, L. Augusto, F. Danjon & C. Meredieu**

Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier Monsieur Denis Loustau pour m'avoir accueilli au sein d'EPHYSE.

Un grand merci également à tous mes maîtres de stage : Pierre Trichet ; Laurent Augusto ; Frédéric Danjon & Céline Meredieu pour leur grande gentillesse, leur disponibilité, leur aide précieuse et pour tout ce que j'ai appris à leur contact tout au long de ce stage. Travailler en leur compagnie fut pour moi un réel plaisir. Je voulais remercier en particulier Mr Trichet et Mr Augusto, pour m'avoir donné la possibilité d'effectuer mon stage de master 2 sur ce sujet très intéressant qui a suffi à confirmer mon désir de poursuivre mes études dans la voie de la recherche en écologie.

Merci également à toutes les personnes du laboratoire pour leur aide et leur bonne humeur quotidienne. Je pense surtout à Bernard Issenhuth mon compagnon de digitalisation, Catherine Lambrot pour sa bonne humeur, sa gentillesse et pour m'avoir laissé manipuler moi-même les échantillons pour la minéralisation. Merci également à Régis Burlett pour son aide et sa gentillesse lors des analyses de carbone. À Antoine et Loïc pour tous ces midis joyeux à la cantine, et à Frédérique Générale et Thierry Labbé pour leur gentillesse tout au long de ce stage.

Finalement, un grand merci une fois de plus à Alexandre pour son soutien précieux au quotidien.

Tous ont contribué à me laisser un excellent souvenir de ce stage !

Sommaire

1. INTRODUCTION	4
2. MATÉRIELS ET MÉTHODES	6
2.1. Site.....	6
2.2. Echantillonnage.....	7
2.2.1. Choix des arbres.....	7
2.2.2. Arrachage des arbres	7
2.3. Analyse chimique des échantillons	9
2.4. Détermination des dimensions des différents compartiments des souches	10
2.5. Analyses statistiques	11
3. RÉSULTATS.....	11
3.1. Relation entre biomasse racinaire et circonférence à 1m30 du sol.....	11
3.2 Répartitions des biomasses et des minéralomasses dans les différents compartiments d'un peuplement	12
3.3. Distribution et concentrations moyennes des nutriments dans la biomasse souterraine	14
4. DISCUSSION.....	17
4.1. Relations allométriques entre biomasses et dimensions des parties souterraines de <i>Pinus pinaster</i>	17
4.2. Distribution des nutriments dans la biomasse souterraine	19
4.2.1. Variations intra et inter compartiments	19
4.2.2. Relation négative entre les teneurs en éléments nutritifs et les dimensions des racines.....	20
5. CONCLUSION &PERSPECTIVES	22
Références Bibliographiques.....	23

1. INTRODUCTION

Le contexte actuel de réchauffement climatique, couplé au souci croissant de trouver un substituant aux énergies fossiles, ont conduit ces dernières années plusieurs régions du globe, et en particulier l'Europe, à agir dans le sens de l'amélioration de leur bilan de carbone. Pour ce faire, et pour tout ce que ce dernier offre comme avantages, le recours au matériau bois pour produire de l'énergie semble représenter un début de solution (Nicholls et al., 2009). Ainsi, la récolte des souches est ajoutée à celle de la récolte des troncs voire de l'ensemble des parties aériennes (branches et feuillage), entraînant une intensification de la récolte forestière.

Cette augmentation de la demande de production de bois via la récolte des souches, s'accompagne de nouvelles préoccupations, telles que le maintien de la capacité des sols à produire de la biomasse au cours des rotations forestières successives tout en maintenant au mieux la qualité des sols, des eaux de surface et de la biodiversité. Il s'agit ainsi d'adopter une politique de gestion durable des forêts. Les sols forestiers français sont pour la plupart acides, pauvres en éléments nutritifs et de fertilité limitée (Badeau et al., 1999 ; Jabiol et al., 2009). Leur productivité dépend de la quantité limitée d'éléments qui circule plus ou moins rapidement dans ces écosystèmes. Par ailleurs, le suivi de l'évolution récente des sols forestiers montre que ces derniers sont susceptibles d'évoluer relativement rapidement, notamment par acidification, compaction, et modification de leur statut organique, ce qui les rend plus ou moins vulnérables. De plus, des bilans de fertilité établis sur des sols d'écosystèmes forestiers spécifiques, mais pouvant être extrapolés aux sols les plus acides, ont montré que la fertilité naturelle des sols était une ressource non renouvelable et que cette dernière diminuait inévitablement avec le temps (Ranger et Turpault, 1999). Les bilans de ces sols sont très rapidement déséquilibrés lorsque les contraintes sylvicoles augmentent (Hopmans et al., 1993). De ce fait, la question des conséquences des récoltes intensives de souches sur la durabilité des écosystèmes forestiers de production est posée.

C'est dans le cadre de cette préoccupation que de plus en plus d'études sont menées dans le but d'évaluer l'impact potentiel que l'intensification de la gestion forestière, et en particulier la récolte des souches, pourrait avoir sur la productivité future des écosystèmes. Cette récolte supplémentaire sert prioritairement à produire plus d'énergie de substitution aux énergies fossiles, à obtenir une meilleure préparation des sols forestiers avant la régénération (plantation ou semis Saarinen, 2006) ainsi que de technique de contrôle des infections par des

champignons ou des insectes (Nicolotti and Gonthier, 2005; Gibbs *et al.* 2002; Rönnberg *et al.*, 2006; Thies and Westlind, 2005; Thor and Stenlid, 2005; Wallertz *et al.*, 2006).

Cependant la récolte de souche pourrait entraîner certains effets indésirables. Ainsi, l'extraction des souches peut conduire à des phénomènes de compactage et d'érosion des sols occasionnées par l'usage d'engins mécaniques lourds (Walmsley et Godbold, 2010; Polomski et Kuhn, 2001), en plus des engins utilisés pour la préparation des sols avant régénération. (Hope, 2007).

En ce qui concerne la biodiversité, on attribue également à la récolte des souches, la modification à long terme de la composition des communautés végétales des sols forestiers où l'on y voit augmenter le risque de prolifération d'espèces non forestières (graminées, plantes herbacées ou encore espèces introduites; Kaye *et al.*, 2008), ainsi que la diminution de la présence d'espèces nitrophiles (Olsson et Staaf, 1995). Par ailleurs, les souches étant des habitats à longue durée pour des organismes très divers (champignons, mousses, lichens, invertébrés et insectes : Caruso *et al.*, 2008; Ferris-Kaan *et al.*, 1993; Hedgren, 2007; Thor, 1998; Jonsson et Jonsell, 1999), certaines études émettent l'hypothèse que leur récolte pourrait avoir un impact plutôt négatif sur la biodiversité puisqu'elle représenterait alors la perte d'un habitat pour toutes ces espèces (Caruso *et al.*, 2008).

Enfin, l'extraction de souches peut représenter un risque pour la fertilité des écosystèmes. En effet, en plus des pertes de nutriments directement induites par la récolte des souches, les perturbations mécaniques des sols provoqueraient de manière indirecte une perte supplémentaire d'éléments nutritifs *via* un lessivage rapide et important de ces derniers (Staaf et Olsson, 1994 ; Zabowski *et al.*, 2008).

Or, pour chaque écosystème, il existe une période de révolution dite « écologique » et qui permet l'équilibre sans fertilisation du bilan de fertilité sans restitutions (Kimmins, 1974; Ranger et Turpault, 1999; Akselsson *et al.*, 2007). Partant de cette notion, il serait donc théoriquement possible pour chaque écosystème de déterminer les composantes de la sylviculture (i.e. choix des essences, traitements, mode de régénération, longueur de la révolution, intensité des récoltes...) qui permettraient de ne pas réduire la capacité des sols à produire de la biomasse. La récolte de souches, et ses modalités pratiques, constituent l'un de ces paramètres permettant une gestion durable. Mais les connaissances sur ce sujet ainsi que sur l'impact réel de la récolte des souches sur la productivité future des écosystèmes sont encore trop limitées, voire inexistantes.

C'est dans ce contexte qu'est développé le programme de recherche auquel contribue mon stage : « Etablissement de modèles estimant les biomasses et les minéralomasses exportées lors des récoltes de souches de Pin maritime ». Mon étude porte plus précisément sur l'extraction de souches dans un massif forestier de *Pinus pinaster* (Pin maritime) localisé dans le Sud-Ouest de la France (*forêt des Landes de Gascogne*). Les objectifs scientifiques et opérationnels de mon stage dans le cadre de ce programme de recherche sont *i*) d'établir des relations allométriques fiables et généralisables à l'ensemble des classes de dimensions du Pin maritime, *ii*) de quantifier les stocks de nutriments associés à la récolte de souches et *iii*) de bâtir des modèles de distribution des nutriments dans la biomasse souterraine des arbres qui puissent ensuite servir à estimer l'impact des récoltes de souches sur le bilan de fertilité des écosystèmes forestiers à base de Pin maritime.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Site

L'étude est réalisée dans les Landes de Gascogne, sur le site de recherche forêt-bois de l'INRA au lieu dit de Pierroton à une trentaine de kilomètres au Sud-ouest de Bordeaux (44°43'24''N, 0°45'27''E).

Cette étude porte sur deux peuplements mono-spécifiques et équiennes de Pin maritime (*Pinus pinaster*, Ait.) âgés respectivement de 18 et 63 ans (peuplements L2010 et M2010).

Le climat est de type atlantique avec une pluviométrie moyenne annuelle de 930 mm et une température moyenne annuelle de 12.5°C (Bert et Danjon, 2006).

Les sols sont plus ou moins hydromorphes et de type podzol humique ou podzol humodurique (présence d'un horizon induré vers 60 cm de profondeur et localement nommé *alios*; Jolivet et *al.*, 2007). Cet horizon constitue une limite physique et/ou chimique à l'enracinement (Lemoine et *al.*, 1988 ; Danjon et *al.*, 2005). Il s'agit de sols sableux acides, pauvres en éléments nutritifs et au pH voisin de 4 dans les horizons supérieurs (Augusto et *al.*, 2010).

2.2. Echantillonnage

2.2.1. Choix des arbres

Un échantillon de 11 arbres a été sélectionné sur le domaine de l'Hermitage de Pierroton avec le C_{130} (circonférence du tronc à 130 cm du sol) comme critère de sélection. Dans le peuplement âgé de 18 ans, sept arbres avaient un C_{130} compris entre 78 et 100 cm et dans le peuplement âgé de 63 ans quatre arbres avec un C_{130} compris entre 125 et 175 cm. Le choix de ces arbres a été décidé par rapport aux données déjà acquises par l'INRA dans l'objectif de compléter les gammes de circonférences peu ou pas représentées. Il est ainsi à noter que les études antérieures avaient souvent porté sur des arbres de dimensions modestes alors que cette étude s'attache à décrire les systèmes racinaires d'arbres d'envergure moyenne à grande.

Pendant la période de repos de la végétation, les racines de structure des systèmes racinaires de ces arbres ont été extraits dans leur intégralité (autant que possible) afin d'être mesurés (pesées pour estimer la biomasse ; digitalisés pour obtenir l'architecture) et analysés (teneurs totales en C, N, P, K, Ca et Mg). Les racines traçantes ont été coupées à environ 3-4 m de la souche. Les racines fines (diamètre < 2 mm) ne font pas l'objet de la présente étude.

2.2.2. Arrachage des arbres

L'arbre est abattu en laissant 75 cm de tronc pour permettre l'arrachage des souches. Une vis indiquant le niveau du sol et le nord a été enfoncée afin de faciliter l'orientation des souches lors des opérations de numérisation du système racinaire. Des vis ont aussi été enfoncées à la verticale dans les racines traçantes près de la souche, avec toutes les têtes de vis au même niveau. Ainsi, nous pouvons réinstaller les systèmes racinaires après arrachage dans la position originale par rapport à l'horizontale et au nord. La végétation herbacée (molinie, ajonc etc...) et la litière ont été enlevées avec un couteau à air (peuplement L2010), des houes et des râtaux dans un rayon de 1,5 m autour des souches.

L'arrachage a été effectué avec une pelle mécanique, en "bêchant" d'abord le sol avec le godet dans les zones sans racine traçantes, puis par traction verticale sur le tronc, en utilisant une chaîne. Pendant la traction, un groupe de 4–10 personnes munies de fourche-bêches, de pelles et de pioches dégageaient les racines principales pour qu'elles ne rompent pas. Lorsqu'une racine principale cassait, elle était repérée et la partie manquante était extraite à la pelle. Une fois toutes les souches arrachées, ces dernières ont été nettoyées au couteau à

air et chargées sur une remorque avec l'aide d'un débardeur en direction de leur lieu de stockage.

Une fois sur place, les systèmes racinaires sont nettoyés avec précaution à l'eau afin de les débarrasser de la terre qu'ils portent avant d'être pesés en frais. Pour ce faire, ces derniers sont d'abord découpés (en fonction de leurs différents compartiments : pivot, racines traçantes, racines plongeantes) à la main à l'aide d'une scie (les tronçonneuses étant déconseillées en raison des contaminations à l'huile qu'ils pourraient occasionner sur les analyses chimiques des échantillons). Au fur et à mesure de la découpe, les racines sont déposées dans différentes « poubelles » en fonction du compartiment qu'elles représentent. Ces dernières sont immédiatement pesées. Pour plus de précision, des balances de 6, 32 et 150 kg sont utilisées en fonction du poids des produits de découpe. Une fois la totalité du poids frais du système racinaire mesurée, des échantillons représentatifs sont extraits, marqués et écorcés avant d'être déposés en étuve à 65°C pour séchage à poids constant (poids sec total, poids sec d'écorce et poids sec du bois). Un ratio (poids sec)/(poids frais) est alors calculé puis rapporté au poids frais total du système racinaire permettant ainsi d'estimer le poids sec total de ce dernier. De la même manière, les proportions massiques relatives d'écorce et de bois dans les échantillons sont également mesurées afin d'en estimer les poids secs à l'échelle du système racinaire entier.



Figure 1 : Photographie du processus d'arrachage des arbres de la parcelle L2010 (février 2011).

2.3. Analyse chimique des échantillons

Pour chaque arbre, de 1 à 3 échantillons (selon la taille de la racine concernée) ont été prélevés sous forme de rondelles de 10 cm d'épaisseur dans chacun des compartiments suivants : *i)* pivot, *ii)* racines plongeantes et *iii)* racines traçantes. Dans certains cas, les racines traçantes ont été subdivisées en deux catégories de taille, créant ainsi une classe nommée "*très grosses racines traçantes*". Pour chaque échantillon, l'écorce et le bois ont été préalablement séparés manuellement, pour être séchés à l'étuve (65°C), pesés et broyés. L'ensemble de ces opérations ont concerné un total de 190 échantillons. Ces derniers ont ensuite été analysés pour déterminer leurs teneurs en carbone (C), azote (N), phosphore (P), potassium (K), calcium (Ca) et magnésium (Mg). Dans des tubes de minéralisation, on pèse précisément les échantillons, ces derniers sont mis en contact de réactifs, puis placés sur un bloc chauffant. Les solutions obtenues devront être claires et limpides. Finalement, selon les éléments ces derniers sont dosés spécifiquement (Tableau I).

Tableau I : Tableau récapitulatif de la méthode employée pour la minéralisation par voie humide.

Element à analyser	Contenant	Quantité d'élément pesée	Réactifs	Mise en réaction	Technique d'analyse	Remarques
C	Tubes de minéralisation de 75 ml	350 à 600 mg	5ml d'acide sulfurique (H2SO4)+ 5ml de peroxyde d'hydrogène (H2O2) à 30%	4 heures à 370°C puis ajout de 75ml d'eau permutée	Analyseur élémentaire NC Flash EA1112	réactions souvent violentes!
N					Colorimétrie à l'autoanalyseur (BD 40 TECHNICON II)	
P					Spectrométrie d'absorption atomique (Varian Spectr AA-20)	
K						
Ca						
Mg						

Il est à noter que des échantillons de quatre arbres de 50 ans (peuplement Bilos50) issus d'une étude antérieure sur les racines de Pins maritimes (Bert et Danjon, 2006) ont été utilisés dans la présente étude. Ils ont été analysés pour l'ensemble des éléments du tableau I.

2.4. Détermination des dimensions des différents compartiments des souches

L'architecture des systèmes racinaires des arbres de 18 ans (peuplement L2010) a été numérisée en 3 dimensions (3D). Ceci visait à reconstituer le poids total et la minéralomasse totale, à partir de la densité et des teneurs d'échantillons prélevés dans différents compartiments de la structure (Bert et Danjon 2006). Un numériseur à champ magnétique à basse fréquence piloté par le logiciel PiafDigit 1.0 a été utilisé. Finalement, la vérification des données et l'analyse ont été réalisées avec le logiciel Open-Alea, puis le logiciel R (cf. Danjon et Reubens 2008 pour tous les aspects méthodologiques).

(A)



(B)



Figure 2 : Photographies illustrant les moyens d’obtention de données architecturales de souches **(A)** système qui compose le digitaliseur magnétique. (Photo INRA Clermont-Ferrand), **(B)** image virtuelle d’un système racinaire de *Pin pinaster* digitalisé (arbre L4601).

2.5. Analyses statistiques

Les statistiques descriptives (moyennes ; écartypes ; erreurs standards) ont été réalisées sous le modèle MIXED, avec l'origine des arbres (i.e. les deux peuplements) et l'identité des arbres étudiés comme variables aléatoires.

Les différences significatives entre classes (e.g. classes de racines) ont été testées sous le régime du modèle linéaire généralisé, après vérification de la normalité (test de Shapiro-Wilk) et de l'homogénéité de la variance (test de Bartlett).

Ces calculs, ainsi que les régressions non linéaires, ont été effectués avec le logiciel SAS (v9.2).

3. RÉSULTATS

3.1. Relation entre biomasse racinaire et circonférence à 1m30 du sol

A partir de pesées réalisées sur le poids frais total des racines récoltées et sur des poids secs d'échantillons provenant des différents compartiments constituant les racines, des biomasses racinaires totales et par compartiment ont pu être estimées à l'échelle d'un individu. Ces biomasses obtenues sont ensuite mises en relation avec les circonférences à 1m30 du sol (C_{130}) des arbres correspondants. La figure 3 reporte pour l'ensemble des arbres étudiés l'existence de relations allométriques fiables par compartiment, où la biomasse croît avec la circonférence (C_{130}) selon une relation de type « puissance ». Ces relations ont permis

d'estimer la biomasse racinaire de plusieurs peuplements étudiés par application de ces relations à chaque arbre du peuplement (cf. § 3.2).

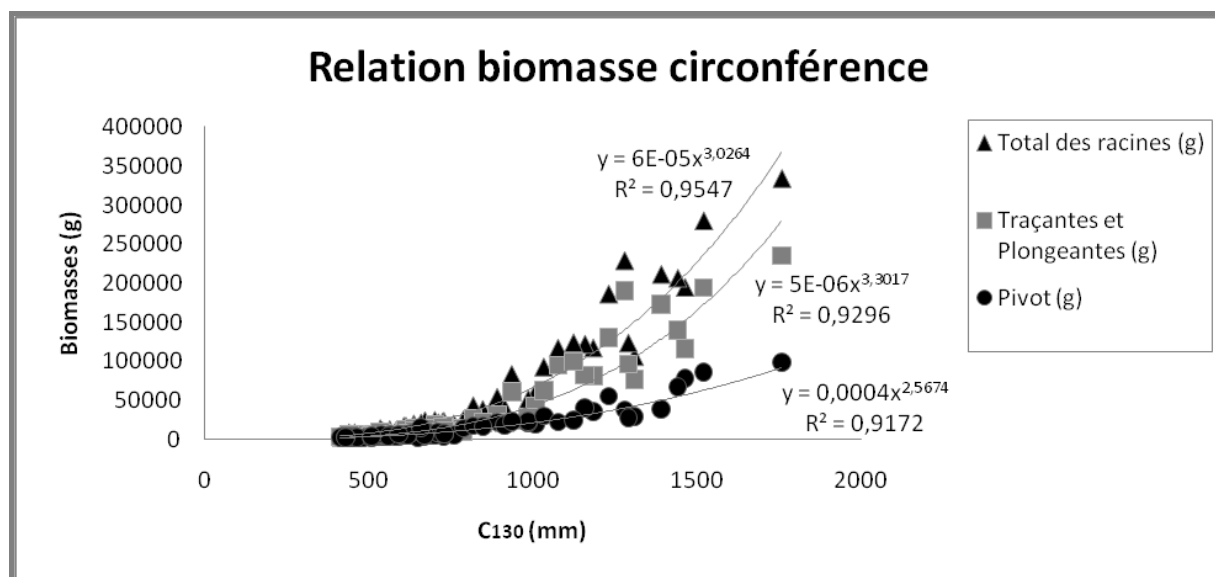


Figure 3 : Relation entre la biomasse (g) et la circonférence à 1m30 du sol (mm) pour différents compartiments constitutifs des systèmes racinaires.

3.2 Répartitions des biomasses et des minéralomasses dans les différents compartiments d'un peuplement

Les biomasses estimées à l'échelle des peuplements ainsi que les analyses chimiques des minéraux étudiés lors de ce stage (L2010, M2010, Bilos50), ajoutées aux données déjà acquises (peuplements de Berganton et L2004) ont permis d'obtenir des biomasses et des concentrations moyennes en éléments nutritifs par compartiment pour les parties aériennes et les racines (Tableau II). Les biomasses des différents compartiments aériens sont calculées en utilisant les modèles de Shaiek et al. (2011). La multiplication des concentrations par la biomasse de leurs compartiments respectifs permet d'obtenir les minéralomasses de ces compartiments.

Tableau II : Biomasses aérienne et racinaire et contenu en azote des cinq peuplements de l'étude.

<i>Peuplement</i>	L2010	L2004	M2010	Berganton	Bilos
âge (ans)	18	12	63	16	50
D130 moyen (m)	0,23	0,16	0,45	0,19	0,38
ST (m ² /ha)	26,89	25,31	41,37	23,19	25,20
Densité (t/ha)	627,98	1 250,00	257,14	817,50	223,00
<i>Compartiments</i>	<i>Biomasses (t/ha)</i>				
Branches	23,35	23,08	26,83	19,83	17,10
Tronc	58,69	43,18	161,60	42,46	86,07
Total PA	82,05	66,26	188,43	62,29	103,17
Pivot (t/ha)	9,43	4,46	13,04	-	7,82
TP (t/ha)	5,79	5,62	34,92	-	21,00
Total Racines	15,22	10,09	47,95	-	28,82
Total Arbre	97,27	76,35	236,38	62,29	131,99
	<i>Minéralomasse d'azote (kg/ha)</i>				
Branches	137,43	145,54	130,93	98,20	86,55
Tronc	75,95	58,83	188,47	55,70	103,87
Total PA	213,38	204,37	319,39	153,90	190,42
Pivot	10,69	6,39	18,96	.	8,75
TP	14,49	12,30	54,62	.	28,87
Total Racines	25,18	18,70	73,58	17,60	37,62
Total Arbre	238,56	223,07	392,98	171,50	228,03

La figure 4, montre que ces peuplements sont composés en moyenne de 83 % de biomasse aérienne et de 17% de biomasse racinaire. Les racines traçantes et les racines plongeantes représentent plus de biomasse souterraine que les compartiments pivots. Les minéralomasses de ces différents compartiments suivent globalement la même tendance de distribution que leurs biomasses respectives.

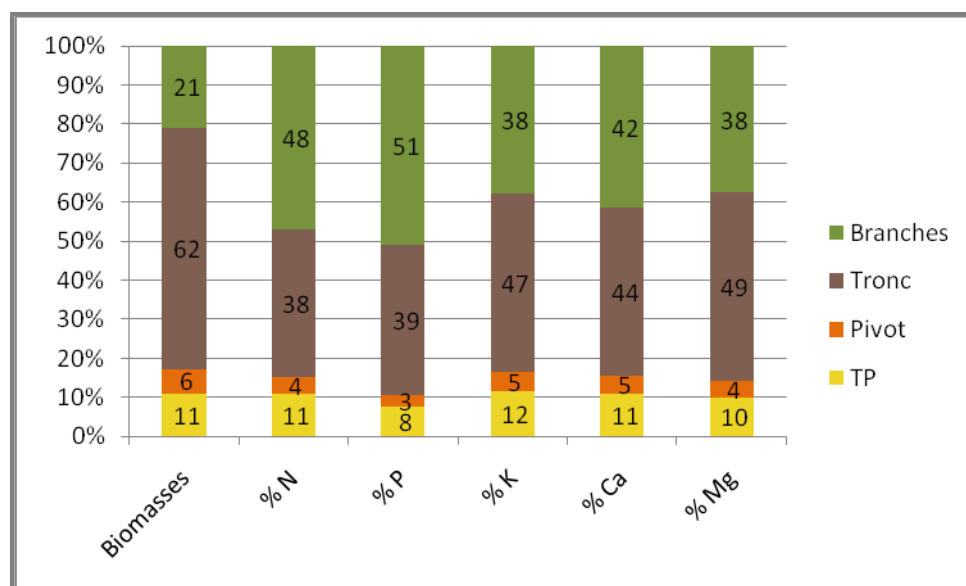


Figure 4 : Répartition par compartiment des biomasses et minéralomasses des cinq peuplements étudiés. L'intitulé « branches » regroupe les branches et les aiguilles. Les racines sont représentées par le compartiment pivot et par le compartiment TP = racines traçantes et racines plongeantes.

3.3. Distribution et concentrations moyennes des nutriments dans la biomasse souterraine

Tableau III : Ce tableau indique les concentrations moyennes en nutriments des trois compartiments racinaires. Les teneurs limites maximales et minimales sont indiquées pour un niveau de confiance de 95%. Les lettres désignent les différences significatives entre les compartiments pour un élément donné à $P < 0.001$.

Compartiments	C (mg.g ⁻¹)	N (mg.g ⁻¹)	P (mg.g ⁻¹)	K (mg.g ⁻¹)	Ca (mg.g ⁻¹)	Mg (mg.g ⁻¹)
<i>Pivot</i>	484,49 ^a (478.06 – 490.91)	1,19 ^a (1.05 – 1.33)	0,09 ^a (0.08 – 0.10)	0,84 ^a (0.72 – 0.96)	0,83 ^a (0.76- 0.90)	0,26 ^a (0.24 – 0.28)
<i>Plongeantes</i>	481,22 ^a (476.88 – 485.55)	1,97 ^c (1.62 – 2.31)	0,14 ^b (0.11 – 0.16)	1,29 ^b (1.08 – 1.51)	0,93 ^{ab} (0.81 – 1.05)	0,4 ^b (0.34 – 0.45)
<i>Traçantes</i>	481,79 ^a (477.85- 485.74)	1,6 ^b (1.44 – 1.76)	0,1 ^a (0.09 – 0.11)	0,87 ^a (0.76 – 0.97)	1,1 ^b (0.99 – 1.20)	0,37 ^b (0.34 – 0.40)

Comme indiqué dans le tableau III, le carbone apparaît dans tous les compartiments racinaires comme étant l'élément largement majoritaire par rapport aux autres minéraux. Plus globalement, en termes de concentrations en nutriments, les compartiments semblent se classer de la manière suivante : racines plongeantes $\geq$ racines traçantes $\geq$ pivot.

Les échantillons racinaires destinés à l'analyse ont été mesurés (rayons pour les rondelles de bois, épaisseur pour l'écorce). On peut ainsi déterminer la relation entre le rayon des rondelles obtenues et leurs teneurs en minéraux. La figure 5 montre que les teneurs des éléments nutritifs N,P,K,Ca et Mg, diminuent lorsque le rayon de la racine augmente. Cette relation négative est indépendante de sa fonction (traçante, plongeante ou pivot) ainsi que du type de tissu envisagé (écorce ou bois).

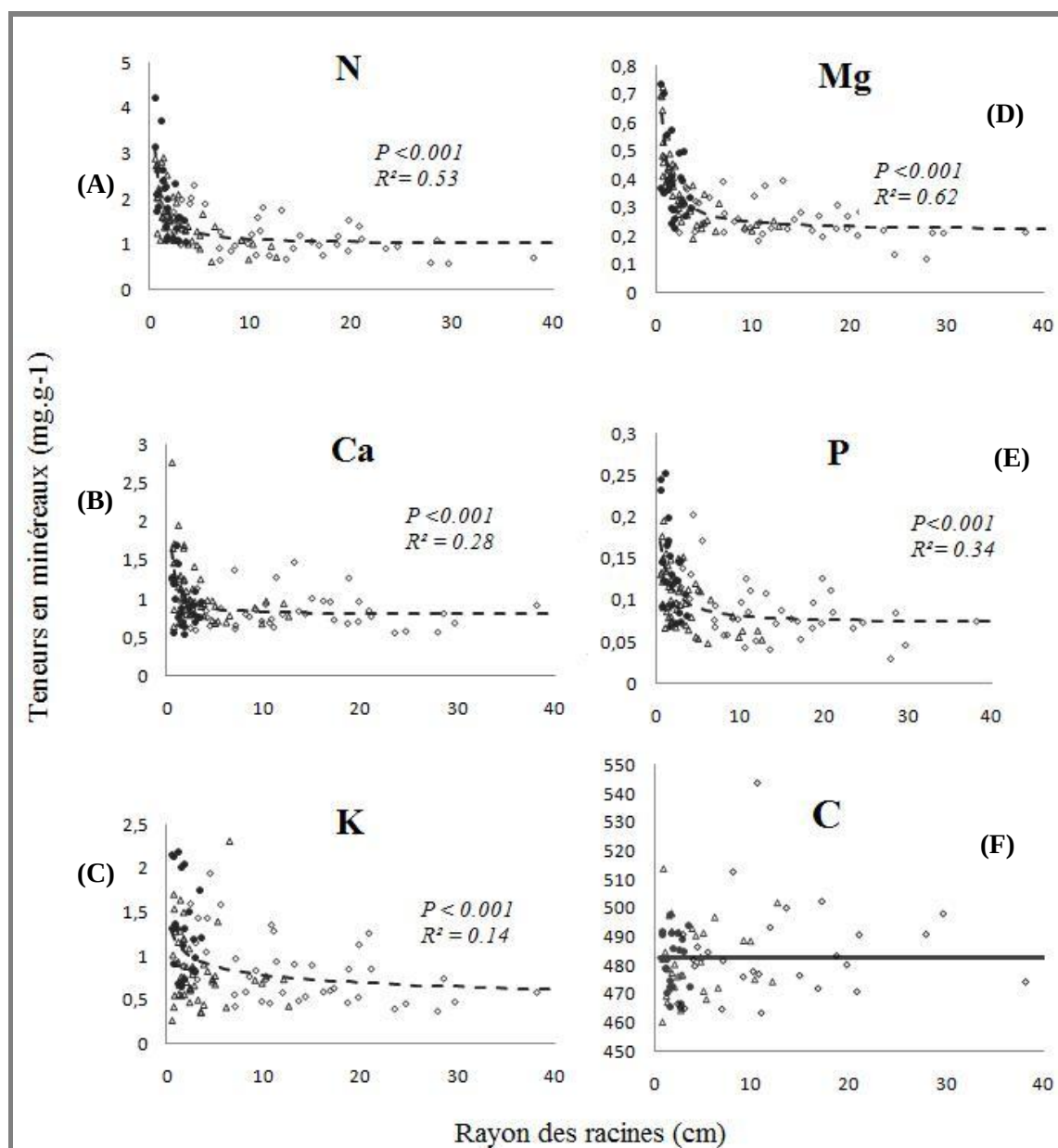


Figure 5 : Relation entre teneurs en éléments nutritifs (mg.g⁻¹) et rayon des racines (cm). Les compartiments représentés sont : le pivot = rectangles ; les racines plongeantes = cercles pleins ; les racines traçantes = triangles. Les paramètres ayant servis à l'établissement des fonctions de régression figurent dans le tableau IV.

Pour obtenir ces courbes de régressions, deux types de modèles ont été appliqués selon l'élément considéré. Ainsi, les éléments des graphiques (A), (B), (D) et (E) de la figure 5, répondent à l'équation du modèle **M2 : Teneur dans les racines = $(\alpha \cdot T + \beta) / (T + \gamma)$** . Où T représente le rayon de la racine. Le modèle M2 n'ayant pas pu être paramétré pour le potassium (graphique (C) figure 5), une autre régression a été utilisée : modèle **M1 (Teneur dans les racines = $\alpha \times T^\beta$)**.

Pour l'élément carbone, aucune tendance n'est observée (graphique (F) figure 5) .

Le tableau IV reprend pour chaque élément étudié, les coefficients α , β , γ ainsi que le type de régression appliqué.

Tableau IV : Récapitulatif des coefficients et des modèles utilisés pour l'établissement des relations de régressions entre les teneurs et les rayons des racines.

Elément	Modèle	α	β	γ
N	2	0,9910	1,3877	0,0959
		0.8194-1.1627	0.3410-2.4344	0.2888-0.4807
P	2	0,0712	0,1509	0,5969
		0.0556-0.0869	-0.0137-0.3154	0.4876-1.6813
K	1	1,1515	-0,1679	—
		1.0244-1.2786	-0.2486--0.0872	—
Ca	2	0,7936	0,3220	-0,0627
		0.6942-0.8930	-0.3791-1.0231	0.5433-0.4178
Mg	2	0,2182	0,3883	0,2886
		0.1867-0.2497	0.1501-0.6266	0.1444-0.7216

4. DISCUSSION

4.1. Relations allométriques entre biomasses et dimensions des parties souterraines de *Pinus pinaster*

Plusieurs études ont permis de développer des équations allométriques mettant en relation les biomasses des arbres et leurs dimensions (diamètre basal des branches, diamètre du tronc à hauteur de poitrine, etc. ; Parresol, 1999 ; Dieter et Elsasser, 2002 ; Porté et al., 2002). Ce type de relation est bien connu en ce qui concerne les parties aériennes du pin maritime. Ils sont en revanche beaucoup plus rares en ce qui concerne les parties souterraines des arbres en raison des temps de travail cumulé très élevés nécessaires à l'extraction de leurs systèmes racinaires (en moyenne 6 jours de travail par système racinaire extrait dans le cadre de notre étude). De plus, dans le cas du pin maritime, les relations allométriques existantes donnent pour un même C_{130} , des biomasses différentes (Figure 6).

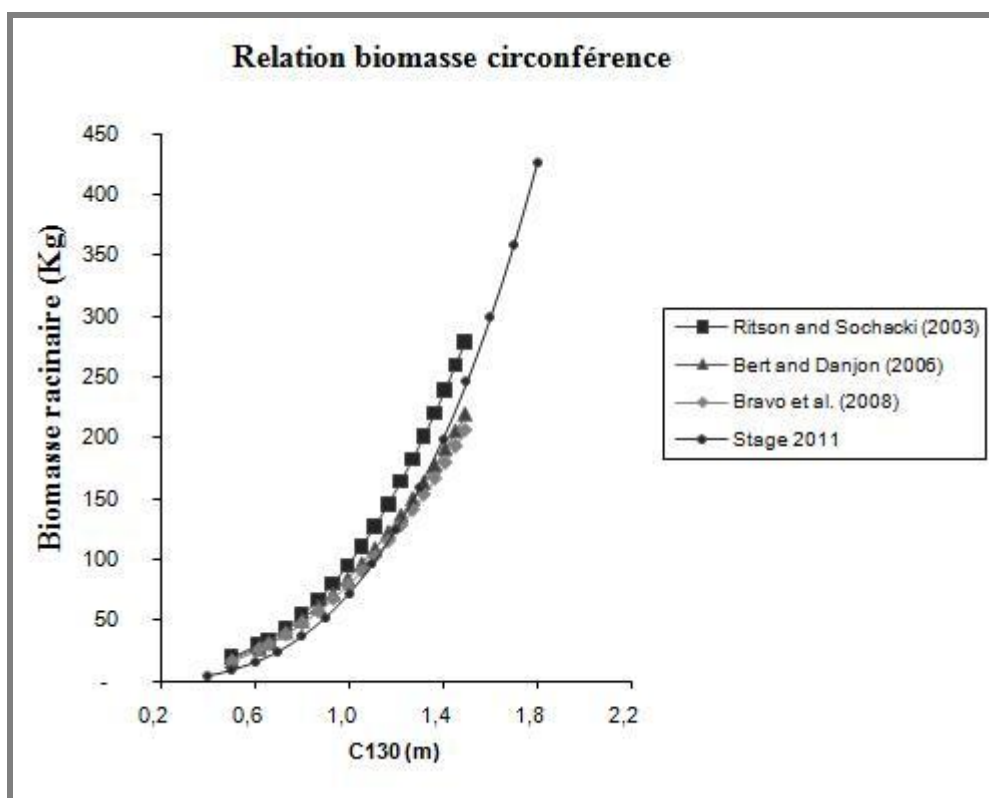


Figure 6 : Relations allométriques entre biomasses et circonférences issues de différentes études réalisées sur le pin maritime ainsi que de l'étude réalisée lors du stage 2011.

L'établissement de relations allométriques fiables et valides pour une large gamme de taille des pins maritimes landais constitue ainsi une avancée pratique notable. Ces modèles se sont avérés très satisfaisants pour établir des prédictions de biomasses par compartiment à l'échelle d'un peuplement ou d'un individu. Or, l'évaluation des minéralomasses des éléments nutritifs (contenu en éléments nutritifs par compartiments d'un arbre ou d'un peuplement), est généralement basée sur ces relations allométriques (Bert et Danjon, 2006).

Le travail effectué lors de ce stage a permis de développer ce type de relations allométriques pour les parties souterraines du pin maritime en utilisant le C_{130} . Cela concerne les compartiments principaux des biomasses souterraines à savoir le pivot d'une part ($r^2 = 0.92$) et les racines traçantes et plongeantes d'autre part ($r^2 = 0.93$). Lorsque le modèle regroupe la totalité des biomasses racinaires sans distinction de compartimentation, le coefficient de détermination r^2 passe à 0.96. Dans l'étude réalisée ici, il apparaît que la biomasse racinaire représente en moyenne environ 20% de la biomasse totale de l'arbre. Les pivots et les racines traçantes et plongeantes en représentent respectivement 6.2 et 13.8 %. Les biomasses des deux compartiments sont équivalentes pour des peuplements constitués d'arbres de taille inférieure ou égale à environ 750 mm de circonférence à 1m30 du sol. Au-delà de cette taille, et pour une même circonférence, la biomasse des racines traçantes et plongeantes sera plus importante que celle du pivot (allant jusqu'à environ 33% de biomasse en plus). Il serait donc intéressant de déterminer le contenu en minéraux de ces compartiments (minéralomasses) en fonction de leurs biomasses. Ceci afin de simuler le flux d'éléments et de biomasses prélevés pour tous les types de récoltes de souches possibles. La durée de ce stage n'a pas permis d'aller au bout de ces investigations, une modélisation architecturale basée sur la digitalisation (3D) étant en cours (Figure 7). Cette dernière permet la reconstitution des biomasses à l'échelle de tout le système racinaire. Le couplage de ce modèle architectural avec des modèles de distribution des nutriments permettrait d'évaluer ces pertes en éléments nutritifs lors de l'extraction de l'un ou l'autre de ces compartiments, d'une partie d'un compartiment (avec ou sans partie inférieure du pivot, avec plus ou moins de racines traçantes et plongeantes etc.) voire du système racinaire entier.

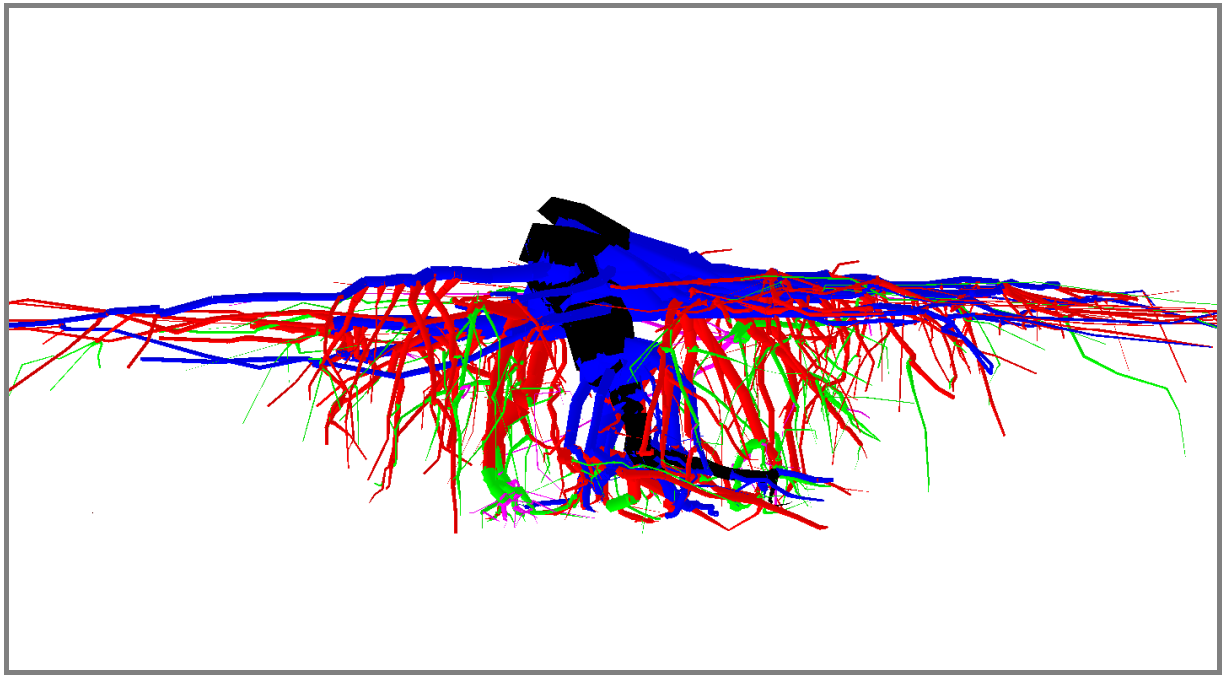


Figure 7 : Schéma en vue de côté de la reconstitution en 3D (AMAPmod) des compartiments racinaires du pin L4601. Les couleurs caractérisent les différents ordres de ce système racinaire.

4.2. Distribution des nutriments dans la biomasse souterraine

4.2.1. Variations intra et inter compartiments

L'analyse des concentrations en éléments nutritifs des différents compartiments racinaires des pins maritimes étudiés a révélé l'existence d'une variation de concentrations entre les compartiments constitutifs de ces arbres, ainsi qu'à l'intérieur même d'un compartiment donné. Cela avait été déjà montré pour le carbone dans l'arbre entier (Bert et Danjon, 2006) et pour les éléments N, P, K, Ca et Mg dans les parties aériennes. (Augusto et al., 2008). Lors de ce stage, les analyses ont montré que les racines plongeantes sont plus concentrées en éléments nutritifs (au moins en ce qui concerne les éléments N, P et K) que les racines traçantes et les pivots. Le pivot est pour tous les éléments (sauf pour ce qui est du carbone pour lequel aucune tendance n'apparaît le compartiment le moins concentré en éléments nutritifs).

Toujours dans la suite logique de travaux précédents (Bert et Danjon, 2006 ; Augusto et al., 2008), les concentrations entre les tissus d'un même compartiment varient également. Ces concentrations augmentent du centre du compartiment étudié (duramen), vers sa périphérie (l'écorce : qui dans le cas de notre étude sur le pin maritime incluait le phloème ;

ce dernier est une zone riche en glucides et très active d'un point de vue cellulaire) où elles atteignent leur maximum. Bergstrom (2003) explique cela par l'absence d'activités physiologiques dans le duramen du tronc, et par les changements structuraux et chimiques intervenant lors de la formation du bois de cœur. Ceci explique le fait que les écorces sont apparues ici comme étant plus concentrées que les aubiers (données non présentées). Dans les cas des branches du pin maritime, cela s'explique par le fait que la proportion d'écorce diminue au profit de celle de l'aubier lorsque le diamètre de la branche augmente. Par ailleurs, Augusto et al. (2008) mentionnent également un phénomène de translocation des nutriments du cerne de l'année n-1 à celui de l'année en cours (Saint-André et al., 2002). La proportion du cerne d'aubier de l'année en cours au sein d'un compartiment diminuant avec son développement, les teneurs en nutriments tendent également à diminuer. Au cours de ce stage, nous avons observé des courbes de distribution des nutriments dans les compartiments souterrains analogues à celles concernant les compartiments aériens (tronc ou branches) et leurs tissus (écorce et aubier ; résultats non présentés). En résumé, les teneurs en éléments nutritifs sont plus élevées lorsque le tissu est fin que lorsqu'il est épais. Par voie de conséquence, la racine est d'autant plus riche en nutriments qu'elle est fine.

4.2.2. Relation négative entre les teneurs en éléments nutritifs et les dimensions des racines

Pour tous les éléments mesurés (excepté pour le carbone), une relation négative est apparue entre ces deux variables. La teneur en éléments nutritifs augmente lorsque le rayon de la racine diminue. Une étude réalisée sur des racines de Douglas (Douglas-Fir) par Santantonio et al. (1977) permet d'obtenir des résultats très similaires. Ces relations ont permis d'appliquer aux compartiments racinaires, deux modèles précédemment établis par Augusto et al. (2008) sur les parties aériennes du pin maritime. Ces modèles permettent de prédire la concentration en éléments nutritifs en fonction de la dimension de l'échantillon envisagé.

Ceci a permis de mettre en évidence que cette relation négative entre la teneur en éléments nutritifs et la dimension des racines est indépendante du type de compartiment. Cette relation étant également indépendante de l'âge en ce qui concerne les branches du pin maritime (Augusto et al., 2008), on pourrait faire l'hypothèse qu'elle le soit aussi dans le cas des racines, mais cela reste à vérifier.

Pour ce qui est des éléments étudiés lors de ce stage (Figure 5), il apparaît que le modèle 2 donne un bon coefficient de détermination pour l'azote et le magnésium

(respectivement $r^2 = 0.53$ et $r^2 = 0.62$ pour $P < 0.001$). Les valeurs plus basses de ces coefficients de détermination pour le phosphore et le calcium (respectivement $r^2 = 0.34$ et $r^2 = 0.28$ pour $P < 0.001$) s'expliquent quant à elles par le fait que les teneurs mesurées sont peu dispersées (surtout en ce qui concerne le Ca). Toutefois, la distribution des valeurs simulées par rapport aux valeurs mesurées est satisfaisante (Figure 5), écartant donc l'hypothèse d'une relation peu fiable. Dans le cas du potassium, le modèle 2 à trois paramètres n'a pas pu être utilisé. Il a donc été question de lui appliquer le modèle 1 représentant une fonction puissance moins pertinente d'un point de vue biologique (absence de valeurs limites réalistes), expliquant ainsi le faible coefficient de détermination ($r^2 = 0.14$; $P < 0.001$) qui lui a été attribué.

Ce modèle permet donc d'associer pour chaque diamètre de racine une teneur en élément nutritif qui lui correspond. Ainsi, selon les cas, ce dernier pourra être associé aux autres modèles précédemment établis (celui des biomasses et celui des architectures racinaires) afin d'être en mesure d'estimer les différentes minéralomasses du système racinaire. Il sera alors possible de faire des estimations de ces minéralomasses par compartiments à l'échelle d'un peuplement. Deux situations pour déterminer la minéralomasse d'un élément nutritif sont possibles : la première, où aucune tendance de variation de concentration intra compartiment n'a été observée comme c'est le cas ici pour le carbone par exemple, il suffira d'associer les concentrations moyennes par compartiment de cet élément à l'estimation des biomasses de ces compartiments. Dans la deuxième situation où cette fois une variation de concentration a été observée (ici tous les autres éléments), l'estimation des minéralomasses est possible en associant ce modèle à celui issu de l'architecture racinaire qui permet d'obtenir pour tous les diamètres du système racinaire les biomasses qui leur sont associées. Ainsi pour un diamètre et une biomasse connus dans chaque compartiment, on pourra associer une teneur en élément nutritif. Ceci nous permettra d'en obtenir sa minéralomasse.

Ce travail a également permis d'observer que les racines traçantes et plongeantes sont plus riches en éléments nutritifs que le pivot. Ceci s'explique par le fait qu'elles contiennent proportionnellement plus de racines relativement fines (et donc riches en éléments nutritifs) que le pivot.

5. CONCLUSION & PERSPECTIVES

Cette étude fait apparaître qu'il est possible de mettre au point (et de relier entre eux) des modèles permettant d'estimer des biomasses et des minéralomasses de tous les compartiments d'un arbre.

Cela a également permis d'observer que les systèmes racinaires semblent répondre aux mêmes lois physiologiques que celles des parties aériennes (utilisation pour les racines du modèle ayant servi pour les branches chez le pin maritime) mais l'acquisition d'autres données sont nécessaires afin d'affiner cela. Compte tenu des difficultés techniques liées à l'étude des systèmes racinaires et du fait qu'il s'agisse de méthodes destructives, la mise au point de tels modèles faisant intervenir des paramètres simples (tels que les dimensions des arbres) pourraient s'avérer précieuse pour la poursuite de l'étude du fonctionnement de ces compartiments souterrains qui sont encore mal connus.

Dans le cadre de la présente étude, une fois ces modèles aboutis, ils devraient permettre une connaissance assez précise et réaliste de la distribution des minéralomasses dans tout le système racinaire. Cela permettra d'une part d'estimer les pertes d'éléments nutritifs lors de l'extraction des souches (et donc de pouvoir en évaluer les conséquences sur le bilan de fertilité des écosystèmes forestiers), et d'autre part de fournir des conseils de gestion forestière aux sylviculteurs afin d'essayer de trouver un compromis entre la production de bois-énergie et le maintien de la fertilité de l'écosystème sur le long terme. Compte tenu des résultats obtenus lors de ce stage, un exemple de compromis pourrait d'ores et déjà être proposé. Celui de n'extraire que le pivot racinaire, ce dernier étant le compartiment le moins concentré en nutriments. De plus, des études (Hope 2007; Polonski et Kuhn, 2001; Hakkila, 2004 ; Staaf et Olsson, 1994; Zabowski et al., 2008) ont rapporté que les extractions de souches avaient un impact potentiellement négatif sur la productivité future des écosystèmes (du fait des détériorations physiques et biogéochimiques que les engins mécaniques nécessaires à l'extraction occasionnent sur les sols). L'extraction du pivot seul, présenterait donc l'avantage de perturber un volume moindre de sol, ce qui réduirait les risques d'impacts potentiels sur la productivité future de ces écosystèmes.

Références Bibliographiques

- ✚ Akselsson C., Westling O., Sverdrup H. & Gundersen P. (2007) Nutrient and carbon budgets in forest soils as decision support in sustainable forest management. *Forest Ecology & Management* **238**, 167-174.
- ✚ Augusto L., Meredieu C., Bert D., Trichet P., Porté A., Bosc A., Lagane F., Loustau D., and Pellerin S., Danjon F., Ranger J. & Gelpe J. (2008) Improving models of forest nutrient export with equations that predict the nutrient concentration of tree compartments. *Annals of forest science* **65**, 808.
- ✚ Augusto L., Bakker M.R., Morel C., Meredieu C., Trichet P., Badeau V., Arrouays D., Plassard C., Achat D.L., Gallet-Budynek A., Merzeau D., Canteloup D., Najjar M. & Ranger J. (2010) Is 'grey literature' a reliable source of data to characterize soils at the scale of a region? A case study in a maritime pine forest in southwestern France. *European Journal Of Soil Science* **61**, 807-822.
- ✚ Badeau V., Dambrine E., & Walter C. (1999) Propriétés des sols forestiers français : résultats du premier inventaire systématique. *Etude et Gestion des Sols* **6**, 165-180.
- ✚ Bergstrom B. (2003) Chemical and structural changes during heartwood formation in *Pinus sylvestris*. *Forestry* **76**, 45–53.
- ✚ Bert D. & Danjon F. (2006) Carbon concentration variations in the roots, stem and crown of mature *Pinus pinaster* (Ait.). *Forest Ecology & Management* **222**, 279–295.
- ✚ Caruso A., Rudolphi J., Thor G. (2008) Lichen species diversity and substrate amounts in young planted boreal forests: A comparison between slash and stumps of *Picea abies*. *Biological conservation* **141**, 47-55.
- ✚ Danjon F., Fourcaud T., Bert D. (2005) Root architecture and windfirmness of mature *Pinus pinaster* (Ait.). *New Phytologist* **168**, 387–400
- ✚ Danjon F. & Reubens B. (2008) Assessing and analyzing 3D architecture of woody root systems, a review of methods and applications in tree and soil stability, resource acquisition and allocation. *Plant & Soil* **303**, 1-34.
- ✚ Dieter, M. & Elsasser, P. (2002) Carbon stocks and carbon stock changes in the tree biomass of Germany's forests. *Forstwiss. Centralbl* **121**, 195–210.

- ✚ Ferris-Kaan R., Lonsdale D. & Winter T. (1993) The Conservation Management of Deadwood in Forests . Forest Research , Farnham, Surrey . *Forestry Commission Research Note* **241** .
- ✚ Gibbs J.N., Greig B.J.W. & Pratt J.E. (2002) Fomes root rot in Thetford Forest, East Anglia: past, present and future . *Forestry (Oxford)* **75**, 191 – 202 .
- ✚ Hedgren P.O. (2007) Early arriving saproxylic beetles (Coleoptera) and parasitoids (Hymenoptera) in low and high stumps of Norway spruce . *Forest Ecology & Management* **241** (1/3), 155- 161.
- ✚ Hope G.D. (2007) Changes in soil properties, tree growth, and nutrition over a period of 10 years after stump removal and scarification on moderately coarse soils in interior British Columbia. *Forest Ecology & Management* **242** (2/3), 625 – 635.
- ✚ Hopmans P., Stewart H.T.L & flinn DW. (1993) Impacts Of Harvesting On Nutrients In A Eucalypt Ecosystem In Southeastern.Australia. *Forest Ecology & Management* **59**, 29-51.
- ✚ Jabiol B., Levy G., Bonneau M., Brethes A. (2009) Comprendre les sols pour mieux les gérer. Agro-ParisTech-Engref (Ed), Nancy, Fr.624 p
- ✚ Jolivet C., Augusto L., Triche P., Arrouays D. (2007) Les sols du massif for des Landes de Gascogn formation, histoire, propriétés et variabilité spatiale. *Revue Forestiere Francaise (Nancy)* **59**, 7-30.
- ✚ Jonsson B.G. & Jonsell M. (1999) Exploring potential biodiversity indicators in boreal forests. *Biodiversity and Conservation* **8**, 1417–1433.
- ✚ Kaye T.N., Blakeley-Smith M. & Thies W.G. (2008) Long-term effects of post-harvest stump removal and N-fertilization on understory vegetation in Western USA forests. *Forest Ecology & Management* **256**, 732 – 740 .
- ✚ Kimmins J.P. (1974) Sustained yield, timber mining, and the concept of ecological rotation, a British Columbian view . *For. Chron.* **50**, 27 – 31.
- ✚ Lemoine B., Ranger J., & Gelpe J. (1988) Distributions qualitative et quantitative des éléments nutritifs dans un jeune peuplement de pin maritime (Pinus pinaster). *Annals of forest science* **45**, 95–116.
- ✚ Nicholls D., Monserud R.A., Dykstra D.P. (2009) International bioenergy synthesis- Lessons learned and opportunities for the western United States. *Forest Ecology & Management* **257**, 1647-1655.

- ✚ Nicolotti G. & Gonthier P. (2005) Stump treatment against Heterobasidion with Phlebiopsis gigantea and some chemicals in Picea abies stands in the western Alps. *Forest Pathology* **35** , 365–374.
- ✚ Olsson B.A. & Staaf H. (1995) Influence of harvesting intensity of logging residues on ground vegetation in coniferous forests .*Journal of Applied Ecology* **32**, 640 -654.
- ✚ Parresol B.R. (1999) Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. *Forest Science* **45** (4), 573–593.
- ✚ Polomski J., Kuhn N. (2001) Root architecture and wind stability of trees. (Wurzelhabitus und Standfestigkeit der Waldbäume). *Forstwissenschaftliches Centralblatt* **120**, 303–317.
- ✚ Porté A., Trichet P., Bert D., Loustau D. (2002) Allometric relationships for branch and tree woody biomass of maritime pine (Pinus pinaster Ait.) *Forest Ecology & Management* **158** (1-3), 71–83.
- ✚ Ranger J., & Turpault M.P. (1999) Input-output nutrient budgets as a diagnostic tool for sustainable forest management . *Forest Ecology & Management* **122**, 139–154.
- ✚ Rönnerberg J., Petrylaité E., Nilsson G. & Pratt J. (2006) Two studies to assess the risk to Pinus sylvestris from Heterobasidion spp. in southern Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research* **21**, 405–413.
- ✚ Saarinen V.M. (2006) The effects of slash and stump removal on productivity and quality of forest regeneration operations preliminary results. In Proceedings of the third annual workshop of Task 31 Sustainable production systems for bioenergy: Impacts on forest resources and utilization of wood for energy October 2003, Flagstaff, Arizona, USA. *Biomass Bioenergy* **30**, 349 – 356.
- ✚ Saint-André L., Laclau J.P., Deleporte P., Ranger J., Gouma R., Saya A., & Joffre R., (2002) A generic model to describe the dynamics of nutrient concentrations within stemwood across an age series of a Eucalyptus hybrid. *Annals of Botany* **90**, 65–76.
- ✚ Santantonio D., Hermann R.K. & Overton W.S. (1977) Root biomass studies in forest ecosystems. *Pedobiologia* **17**, 1-31.
- ✚ Shaeik O., Loustau D., Trichet P., Meredieu C., Bachtobji B., Garchi S & El Aouni M.H. (2011) Generalized biomass equations for the main aboveground biomass components of maritime pine across contrasting environments. *Annals of forest science* **68**, 443–452.

- ✚ Staaf H., & Olsson B.A. (1994) Effects of slash removal and stump harvesting on soil-water chemistry in a clearcutting in South-West Sweden . *Scandinavian Journal of Forest Research* **9**, 305–310.
- ✚ Thies W.G. & Westlind D.J. (2005) Stump removal and fertilization of five *Phellinus weirii* -infested stands in Washington and Oregon affect mortality and growth of planted Douglas-fir 25 year after treatment. *Forest Ecology & Management* **219**, 242–258.
- ✚ Thor G. (1998) Red-listed lichens in Sweden: habitats, threats, protection, and indicator value in boreal coniferous forests. *Biodiversity & Conservation* **7**, 59–72.
- ✚ Thor M. & Stenlid J. (2005) *Heterobasidion annosum* infection of *Picea abies* following manual or mechanized stump treatment. *Scandinavian Journal of Forest Research* **20**, 154-164.
- ✚ Wallertz K., Nordlander G. & Örlander G. (2006) Feeding on roots in the humus layer by adult pine weevil, *Hylobius abietis* . *Journal of Agricultural Entomology* **8**, 273–279.
- ✚ Walmsley J.D. & Godbold D.L. (2010) Stump Harvesting for Bioenergy - A Review of the Environmental Impacts. *Forestry* **83**, 17-38.
- ✚ Zabowski D., Chambreau D., Rotramel N. & Thies W.G. (2008) Long-term effects of stump removal to control root rot on forest soil bulk density, soil carbon and nitrogen content. *Forest Ecology & Management* **255**, 720–727.

Résumé :

Rim KHLIFA, 2011. Etablissement de modèles estimant les biomasses et les minéralomasses exportées lors des récoltes de souches de Pin maritime.

Dans le but de réduire ses émissions de carbone et de promouvoir la filière bois-énergie, l'Europe a désormais recours à la récolte des souches. Bien que cette pratique présente de nombreux avantages, elle pourrait également occasionner certains effets négatifs sur les processus biogéochimiques des sols forestiers, entraînant ainsi un risque potentiel sur le long terme pour la fertilité de ces derniers. Il est donc essentiel d'être en mesure de pouvoir estimer les quantités de biomasses et de minéralomasses associées à l'extraction des souches.

Pour ce faire, 11 pins maritimes ont été étudiés. Leur système racine a été extrait, mesuré, compartimenté, pesé et leur composition minérale analysée. L'architecture du système racinaire a également été étudiée en 3D. Les biomasses et la dendrométrie des arbres, associées à des données déjà acquises, ont été utilisées pour bâtir des relations allométriques ($r^2 \geq 0.96$) utilisant comme variable d'entrée la circonférence du tronc à 130 cm de hauteur. Les teneurs en nutriments (C, N, P, K, Ca et Mg) sont très variables selon la nature du tissu (écorce > aubier) et le compartiment considéré (racine pivot < racine plongeante $\approx$ racine traçante). À l'échelle de la racine entière (écorce + aubier), c'est le rayon de la racine qui détermine principalement les teneurs en N, P, K, Ca et Mg. Les différences entre type de racine est ainsi le résultat de différences de dimension.

À l'échelle de l'arbre et du peuplement, les biomasses de racines de pin maritime représente 17-20 % de la biomasse et du C de l'arbre et 11-17 % des quantités de nutriments.

Le couplage des modèles développés ici (allométrie ; distribution des nutriments) avec des modèles architecturaux (en cours de développement) permettront dans un avenir proche de simuler finement la biomasse racinaire et son contenu nutritif. Cette approche donnera la possibilité d'identifier les modes de gestion des systèmes racinaires qui perturbent le moins l'écosystème.

Mots-clés : Récolte de souches ; Biomasses ; Minéralomasses ; Nutriments ; Exportation ; Dendrométrie ; *Pinus pinaster*

Abstract :

Rim KHLIFA, 2011. Establishment of models that estimate the biomass and nutrient content exports associated with harvests of maritime pine.

In order to reduce its carbon emissions and promote wood energy sector, Europe is now using the stump harvesting. Although this practice has many advantages, it could also cause some negative effects on biogeochemical processes in forest soils. Stump harvest may thus have a negative impact on future productivity of forests. It is therefore essential to be able to estimate the quantities of biomass and nutrient content associated with the extraction of stumps.

To do so, 11 pine trees were studied. Their root system was extracted, measured, compartmentalized, weighed, and their mineral composition was analyzed. Their root system architecture was also studied in 3D. Biomass and dimensions of the trees, combined with data already acquired, were used to build allometric relationships ($r^2 \geq 0.96$) using as input variable the trunk circumference of 130 cm. The contents in nutrients (C, N, P, K, Ca and Mg) are highly variable depending on the tissue (bark > sapwood) and the compartment (taproot > sinkers roots $\approx$ horizontal roots) of the tree. At the root scale (bark + sapwood) it was the radius of the roots that primarily determined the N, P, K, Ca and Mg levels. The differences between roots type was in fact the result of differences in their size.

At the scale of the tree and the stand, the biomass, the carbon content, and the nutrient content of the maritime pine roots, represented respectively 17- 20% and 11- 17% of the entire tree.

The coupling of the models which were developed here (allometry, nutrient distribution) with the architectural models (in progress) will shortly make possible to simulate the roots biomass and its nutrient content. This approach will enable to identify methods of management of the root systems which least disturb the ecosystems.

Key-words: Stump harvesting; Biomass; Nutrients; Exportation; Tree dimensions; *Pinus pinaster*