



HAL
open science

Analyse de la biomasse racinaire d'Abies concolor en Sierra Nevada grâce à la technologie LiDAR et au traitement d'images

Estelle Eumont

► **To cite this version:**

Estelle Eumont. Analyse de la biomasse racinaire d'Abies concolor en Sierra Nevada grâce à la technologie LiDAR et au traitement d'images: étude liée au programme Southern Sierra Critical Zone Observatory. Sciences de la Terre. 2011. hal-01877563

HAL Id: hal-01877563

<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01877563>

Submitted on 20 Sep 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



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-theses-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>

Master 2 Géosciences
« Sols, Eaux et Environnement »

RAPPORT DE STAGE

Analyse de la biomasse racinaire d'*Abies concolor* en Sierra Nevada grâce à la technologie LiDAR et au traitement d'images

Etude liée au programme

Southern Sierra Critical Zone Observatory

Maître de stage : Jan HOPMANS (et Peter Hartsough)

Tuteur universitaire : Jacques RANGER (et Anne POSZWA)

Estelle EUMONT

Année 2010-2011

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord le Prof. Jan HOPMANS pour m'avoir accueillie dans son laboratoire. J'y ai passé un excellent moment, rencontré des personnes sympathiques et vécu une expérience très enrichissante sur tous les points de vue. Je n'aurais pas pu faire ce stage et mener ce projet sans lui.

Je remercie aussi grandement Pete HARTSOUGH, post-doctorant, pour m'avoir aiguillée et dirigée durant tout ce projet. J'ai adoré interagir avec lui, être à la recherche constante d'explications et de solutions, passer des journées mémorables sur le terrain et hors-labo. Je le remercie pour sa disponibilité et je n'oublie pas sa très grande amicalité. Je lui décerne la palme du meilleur boss !

Ahmad MORADI, post-doctorant, a aussi été un élément important dans ce projet, je le remercie pour m'avoir aidé, soutenu et motivé pendant mon travail. Je suis impatiente de le revoir au meeting de l'AGU en décembre prochain.

Je n'aurais pas appris aussi vite à utiliser le logiciel I-Site Studio sans les astuces et les réponses à mes questions données par Scott SCHIELE de la société Maptek.

Je pense aussi à Tamir KAMAI : il m'a posé quelques colles qui m'ont fait retourner dans des livres de Mathématiques, non sans maux de tête mais qui furent bénéfiques dans mes recherches. Il m'a aussi permis de faire mes premiers pas avec Matlab.

Je remercie aussi toutes les personnes du laboratoire avec qui ces quelques mois sont passés trop vite, à commencer par Armen, mon voisin de bureau, puis Maziar (non, je ne veux toujours pas de café !), Pai (la plus sympa des *undergraduate*), Jean-Jacques pour sa visite du Mondavi Institute, Eric, Katya, Paolo, Joerg, Shahid et Luis.

Je n'oublie pas Matt MEADOWS, hydrologue responsable du site CZO, Christine et toutes les autres personnes de l'UC Merced, UC Irvine, UC Berkeley que j'ai pu rencontrer.

Un merci aussi au Prof. Susan USTIN pour ses cours d'*Environmental Remote Sensing*, et sa gentillesse.

J'ai adoré mon sujet de stage, découvrir les paysages de Californie, l'UC Davis et tous ses vélos, et bien sûr toutes les personnes que j'y ai rencontré. J'ai hâte d'y retourner.

SOMMAIRE

DESCRIPTION DE L'UC DAVIS/LABORATOIRE DU PROF. JAN HOPMANS	1
CHAPITRE I : INTRODUCTION	2
INTRODUCTION BIBLIOGRAPHIQUE	2
CONTEXTE ET OBJECTIFS DU STAGE	3
CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES	4
1. SITE D'ETUDE.....	4
2. EXCAVATION DU SYSTEME RACINAIRE ET ACQUISITION DES DONNEES LIDAR	6
3. MODELISATION DES RACINES GROSSIERES AVEC MAPTEK I-SITE STUDIO.....	6
4. REPARTITION DES GROSSES RACINES.....	7
5. COLLECTE DES DONNEES SUR LES RACINES FINES ET EXPLOITATION	8
6. RATIO BIOMASSE SOUTERRAINE/BIOMASSE AERIENNE	11
CHAPITRE III : RESULTATS	13
1. RESULTATS DE L'EXCAVATION ET APERÇU DES DONNEES LIDAR	13
2. MODELE DE LA MOITIE « RACINES GROSSIERES » CREE AVEC MAPTEK I-SITE STUDIO	13
3. DISTRIBUTION DES GROSSES RACINES EN FONCTION DE LA PROFONDEUR.....	14
4. PARAMETRES CALCULES SUR LES RACINES FINES	15
5. RATIO BIOMASSE SOUTERRAINE/BIOMASSE AERIENNE	18
CHAPITRE IV : DISCUSSION.....	19
1. MODELE 3D CREE AVEC MAPTEK I-SITE STUDIO	19
2. DISTRIBUTION DES GROSSES RACINES EN FONCTION DE LA PROFONDEUR.....	20
3. PARAMETRES DES RACINES FINES DE L'ARBRE.....	20
4. RATIO BIOMASSE SOUTERRAINE/BIOMASSE AERIENNE	22
CHAPITRE V : CONCLUSION.....	23
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	24
ANNEXES	26

LISTE DES TABLEAUX ET DES FIGURES

Figure 1. Photo du bâtiment « Plant & Environmental Science » de l'UC Davis (à gauche) et du laboratoire Hopmans (à droite)	1
Figure 2. Carte montrant la localisation du Critical Zone Observatory (CZO), lieu de cette étude (E. Eumont) ..	4
Figure 3. Carte du bassin versant où se trouve l'arbre étudié. Le maillage correspond aux emplacements de mesures utilisés lors de sondages de hauteurs de neige ou d'humidité du sol. (E. Eumont).....	5
Figure 4. Visualisation sous I-Site Studio des données points de la moitié excavée "grosses racines".....	6
Figure 5. Exemple d'une copie écran de la vue en plan du modèle réalisé sous I-Site Studio.....	8
Figure 6. Vue depuis le tronc après assemblage des 4 photographies originales	9
Figure 7. Rubans adhésifs rouges montrant l'emplacement des mesures de diamètre faites sur le terrain	9
Figure 8a. Photo de l'arbre excavé et de l'installation des cordes permettant la prise de photo	10
Figure 8b. Photo montrant l'installation de l'appareil photo visant le sol sur la corde tendue.....	10
Figure 9. Représentation schématique du calcul de biomasse du tronc d' <i>Abies concolor</i>	12
Figure 10. Vue des 6 scans effectués autour de l'arbre	13
Figure 11. Représentation du modèle final créé avec Maptex I-Site Studio par E. Eumont. Les parties vertes correspondent aux parties de racines coupées reconstruites après estimation.	14
Figure 12. Distribution du volume (a) et de la surface (b) des grosses racines en fonction de la profondeur	15
Figure 13. Evolution de la densité de longueur racinaire et du diamètre moyen en fonction de la distance d'éloignement du tronc	15
Figure 14. Evolution du volume racinaire (a) et de la surface racinaire (b).....	16
Figure 15. Transect 1 : 3 photographies au total sont regroupées, les racines ont été marquées au feutre rouge puis l'ensemble a été divisé en segments de 40 cm, le premier débutant à la base des racines (tronc).....	16
Figure 16. Zoom sur les 4 premiers segments du transect 2 (0 à 160 cm du tronc).....	17
Figure 17. Evolution de la densité de longueur racinaire en fonction de la distance à partir du tronc (0 à 4 m)..	17
Figure 18. Racines "cachées" dont les données LiDAR sont incomplètes ou inexistantes.....	19
Figure 19. L'arbre excavé en Août 2010 (à gauche) et en Juin 2011 (à droite). Photos. P. Hartsough et E. Eumont	21
Table 1. Résultats de ratio biomasse souterraine/aérienne pour des espèces et des climats comparables à notre étude.....	22

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Carte des différents types de sol rencontrés dans le bassin versant Providence et ses environs.....	I
Annexe 2 : Liste de commandes utilisées pour obtenir la distribution racinaire des grosses racines (volume et surface) en fonction de la profondeur	II
Annexe 3 : Liste de commandes utilisées pour intégrer les résultats de la distribution racinaire des grosses racines	III
Annexe 4 : Liste de commandes utilisées pour les calculs sur les images de racines fines.....	IV
Annexe 5 : Tableaux de résultats sur les calculs des racines fines des 4 photographies originales.....	V
Annexe 6a : Tableaux de résultats sur les calculs des racines fines des photographies prises en Juillet 2011.....	VI
Annexe 6b : Tableaux de résultats sur les calculs des racines fines des photographies prises en Juillet 2011 (suite).....	VII
Annexe 7 : Cartes SIG réalisées après les Snow et Soil Moisture Surveys 2010/2011.....	VIII

LISTE DES ABREVIATIONS

ACP : Analyse en Composantes Principales

AGU : *American Geophysical Union*

CAD : *Computer-Aided Design* (CAO : Conception Assistée par Ordinateur, en français)

CZO : *Critical Zone Observatory*

CZT-1 : *Critical Zone Tree #1*

Diam. : Diamètre

GPR : *Ground Penetrating Radar*

GPS : *Global Positioning System*

LiDAR : *Light Detection And Ranging*

MNT : Modèle Numérique de Terrain

RL : *Root lenght* (Longueur racinaire, en français)

SIG : Système d'Information Géographique (GIS, en anglais)

Surf. : Surface

TLIDAR : *Terrestrial LiDAR*

Vol. : Volume

Description de l'UC Davis/Laboratoire du Prof. Jan Hopmans

L'Université de Californie à Davis est une université de recherche publique faisant partie des dix "U.C." de l'Etat de Californie. A l'origine, l'U.C. Davis était une extension de l'U.C. Berkeley et était considérée comme une "université ferme", d'où son orientation actuelle très tournée vers l'agriculture, la viticulture et l'environnement en général.

J'ai choisi d'effectuer mon stage dans cette université en tenant compte du fait que l'U.C. Davis est réputée pour son savoir-faire et la qualité de ses recherches dans le domaine environnemental/agricultural. Le campus étant proche de la fameuse région de la Napa Valley, l'UC Davis possède aussi un département de viticulture et d'œnologie basé dans les bâtiments du Robert Mondavi Institute. Davis est aussi une ville idéalement localisée, entre la baie de San Francisco et la capitale de l'Etat de Californie, Sacramento.

Mes 6 mois de stage se sont déroulés dans le laboratoire de physique du sol du Prof. Jan Hopmans (Fig. 1), laboratoire faisant partie du Département Sol, Air, et Ressources en Eau de l'université. Les employés du laboratoire sont des chargés de recherche, des post-doctorants, des doctorants, des étudiants en Master et en Licence. Ils travaillent sur divers sujets de physique du sol et d'hydrologie tels que :

- la gestion et l'amélioration de méthodes d'irrigation,
- la modélisation de flux d'eau dans le sol et dans les processus d'absorption par les plantes en utilisant le logiciel Hydrus,
- la visualisation de l'étendue du système racinaire de plantes par scanner à neutrons, ou encore
- l'optimisation d'instruments mesurant les propriétés du sol et de l'eau.



Figure 1. Photographies du bâtiment « Plant & Environmental Science » de l'UC Davis (à gauche) et du laboratoire Hopmans (à droite).

Chapitre I : Introduction

Introduction bibliographique

L'étude des racines d'arbres représente un sujet majeur dans les recherches forestières pour plusieurs raisons. L'une d'elles est que les racines établissent le lien par lequel un arbre puise ses besoins dans le sol, à savoir de l'eau et des nutriments. Etudier les racines peut aussi aider à expliquer, par exemple, pourquoi une espèce pousse sur tel sol, sous tel climat particulier (Santantonio, Hermann et al. 1977). Les systèmes racinaires se mettent en place en fonction de plusieurs contraintes qui sont soit génétiques soit environnementales. L'âge de l'arbre, la densité d'arbres et l'état sanitaire sont parmi les paramètres qui influencent la croissance du système racinaire (Atkinson 2000). La biomasse racinaire peut être définie selon ses caractéristiques (par exemple, volume, longueur, masse, diamètre), chacune d'elles étant déterminées selon différentes méthodes, directes ou indirectes (Vogt, Vogt et al. 1998).

S'il est relativement facile d'étudier la biomasse aérienne des arbres forestiers, il est assez difficile d'étudier leur biomasse souterraine. L'excavation du système racinaire tout entier semble être la seule façon d'étudier plus précisément ce type de biomasse, mais il est presque impossible de ne pas endommager ou de casser des racines avec cette méthode. Plusieurs techniques ont été utilisées afin d'excaver les racines des arbres, les plus communes étant la méthode hydraulique (Rizzo and Gross 2000; Gautam, Mead et al. 2003) et la méthode pneumatique (Gross and Julene 2002; Gerhold and Johnson 2003). La méthode pneumatique (par air comprimé) semble être la façon la plus appropriée pour causer un minimum de dommages au cours de l'excavation racinaire. Cette méthode est également la moins coûteuse (Gross and Julene 2002) et la plus facile du point de vue gestion des déchets (Rizzo and Gross 2000).

Des méthodes de type électriques constituent une façon d'étudier les systèmes racinaires sans excaver, et sont de plus non-destructives. Butnor, Doolittle et al. (2001) ont utilisé une autre méthode, le radar à pénétration de sol ("Ground Penetrating Radar" ou GPR), pour étudier les racines des arbres. Bien qu'elle ne nécessite pas de travaux d'excavation, cette méthode a été jugée inefficace sur site à topographie accidentée, comme c'est le cas pour les forêts de montagnes. Nadeshkina et Cermak (2003) ont par ailleurs trouvé que cette méthode n'apporte pas de visualisation des racines fines, ce qui est évidemment un problème car ces racines représentent une surface de contact importante avec le sol. Plus récemment, la méthode d'impédance de terre a été développée au cours d'études racinaires et permet de mesurer l'absorption racinaire de surface (Aubrecht, Stanfölk et al. 2006; Urban, Bequet et al. 2010). La spectroscopie d'impédance électrochimique est une autre méthode non-invasive développée par Repo, Laaukkanen et al. (2005) pour mesurer la croissance racinaire.

Le LiDAR ("Light Detection And Ranging") est une technologie de télédétection par laser qui a été largement utilisée dans des études forestières. L'instrument utilisé en aéroporté permet de mesurer des paramètres tels que la hauteur de la canopée comme indication de la maturité forestière (Weber and Boss 2009) ou de la densité de carbone (Gonzalez, Asner et al. 2010). Le LiDAR terrestre a été utilisé récemment afin

d'évaluer l'architecture des arbres et des mesures de canopée (Côté, Fournier et al. 2011). En 2006, Gartner et Denier (2006) ont réalisé pour la première fois une étude pilote de modélisation 3D d'un système racinaire en utilisant la numérisation par laser. Ils ont trouvé l'utilisation du scanner prometteur pour l'analyse de racines. Toutefois, leur étude n'a porté que sur une partie des racines de l'arbre entier car il ne s'agissait que d'un projet pilote.

Le principe du LiDAR

Le LiDAR est une technologie de télédétection optique qui permet de mesurer la distance à un point d'interception au sol basée sur le délai entre l'émission et la réception d'impulsions laser. Il s'agit d'un capteur actif qui émet des impulsions d'énergie de courte longueur d'onde (rouge ou proche infrarouge). Les données recueillies par LiDAR sont présentées comme des nuages de points ; chaque point a des coordonnées à 3 dimensions. Afin de modéliser ces données, les nuages de points doivent être référencés avec un logiciel de type CAD ("Computer-Aided Design").

Comme mentionné par Jensen, il est important de connaître l'emplacement exact de l'instrument LiDAR à tout moment pendant la collecte des données grâce à l'utilisation d'un GPS (Jensen 2000). De cette façon, les différentes données peuvent ensuite être assemblées et traitées. Les résultats finaux ont des coordonnées x, y, z précises qui sont très importants pour les étapes suivantes.

Le LiDAR est une technologie relativement nouvelle qui a déjà révolutionné la collecte de modèles numériques de terrain (MNT). Il possède une large gamme d'applications pratiques : en archéologie, sismologie, géographie et météorologie (cartographie des zones inondables). Parmi ses avantages, le LiDAR est relativement peu coûteux, facile à utiliser et léger, en particulier lorsque l'instrument est utilisé de façon "terrestre" (et non par aéroporté dans un avion) car il est posé sur un trépied.

Contexte et objectifs du stage

Les scientifiques du programme Southern Sierra Critical Zone Observatory étudient l'impact du réchauffement climatique en zone de transition neige-pluie sur la végétation présente dans un bassin versant de la Sierra National Forest. De nombreuses études y sont conduites continuellement, notamment sur l'évolution de l'humidité dans le sol tout au long de l'année et ces conséquences sur la végétation.

Mon projet de stage s'intéresse au système racinaire de l'espèce dominante du site d'étude, le sapin du Colorado, et vise à mieux comprendre les résultats des études hydrologiques menées par le passé et qui sont toujours d'actualité. Avec nos résultats, nous avons pu obtenir une vue précise de l'architecture de l'arbre et ainsi localiser l'importance des différentes racines dans le sol. Ce projet apporte aussi des éléments de choix et des pistes pour des recherches qui seront conduites prochainement sur le site.

Chapitre II : Matériels et Méthodes

1. Site d'étude

L'étude a été réalisée dans la Sierra National Forest, dans le sud du massif de la Sierra Nevada (37.068070° N, -119.194447° W), situé à environ 80 km de Fresno, en Californie aux Etats-Unis (Fig. 2 et 3). L'altitude du site d'étude est d'environ 2000 m au-dessus du niveau moyen de la mer, avec une température annuelle moyenne de 8°C et une précipitation annuelle moyenne de 1310 mm par an notée de 2004 à aujourd'hui (Hunsaker, Whitaker et al. 2010; Bales, Conklin et al. 2011).

L'Observatoire en Zone Critique ou « Critical Zone Observatory » (CZO) est localisé dans le bassin versant de Kings River (plus précisément dans le bassin de Providence Creek), à une altitude de transition pluie/neige. Les chercheurs y étudient les effets du réchauffement climatique, car de plus chaudes températures ont pour conséquence de transformer la neige en pluie, et donc la transition neige/pluie changerait de position pour se retrouver à une altitude plus élevée voir même disparaître. Ceci produirait des effets sur la végétation, avec des espèces adaptées à la haute altitude/en zone neigeuse qui disparaîtraient probablement et transiteraient vers des altitudes plus hautes et froides.

La Sierra National Forest est parfois appelée la « Sierra de travail » (« Working Sierra »), de par sa proximité avec les parcs nationaux de Yosemite et Sequoia qui sont plus touristiques. C'est une forêt de type mixte/feuillus-résineux. Les différentes espèces d'arbres rencontrées sont le pin à

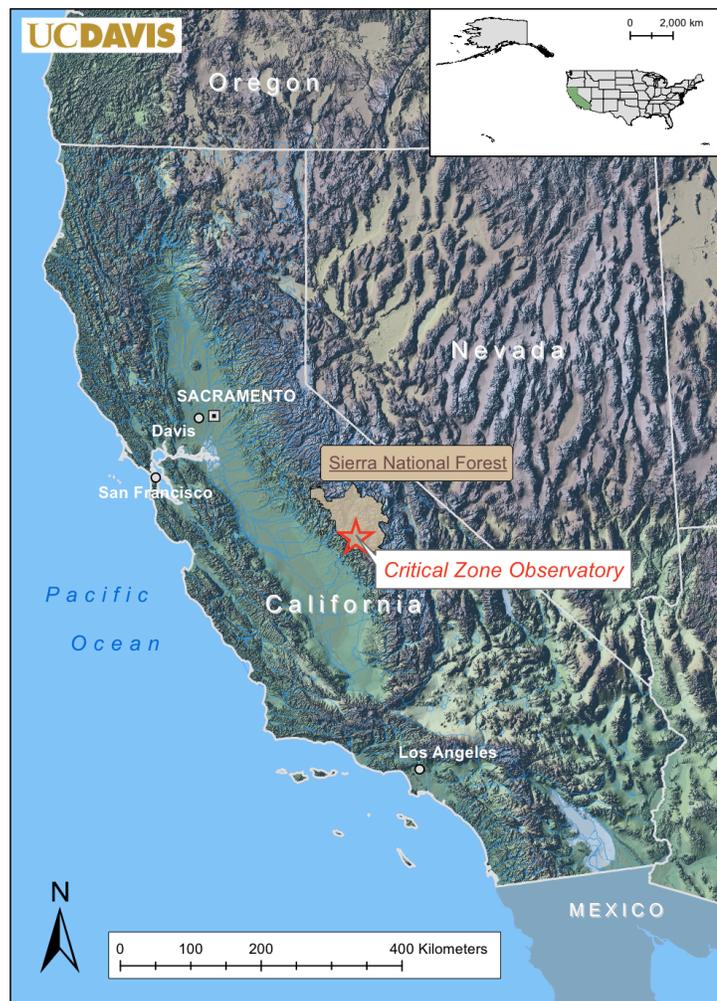


Figure 2. Carte montrant la localisation du Critical Zone Observatory (CZO), lieu de cette étude (E. Eumont).

sucre (*Pinus lambertiana*), le chêne noir de Californie (*Quercus kelloggii*), le cèdre à encens (*Calocedrus*), le sapin du Colorado (*Abies concolor*) à 90% dominant, et le pin ponderosa (*Pinus ponderosa*).

L'arbre choisi est un sapin du Colorado *Abies concolor* ((Gord. & Glend.) Lindl.) d'environ 60 ans qui a fait l'objet d'une précédente étude infructueuse visant à quantifier l'extension du système racinaire en utilisant la méthode GPR (Ground Penetrating Radar). Cet arbre a été choisi en raison de sa proximité avec "CZT-1", un autre sapin du Colorado actuellement instrumenté avec différents capteurs mesurant les flux d'eau dans le sol avoisinant. Ces arbres font partie du programme CZO. La proximité des deux arbres et leur similarité font de notre arbre un bon candidat pour une meilleure compréhension des résultats de CZT-1. L'arbre est dans une légère pente vers le Sud-Est.

Le sol est limoneux-sableux à sableux-limoneux et repose sur une roche granitique située à une profondeur très variable selon l'endroit. Dans le cas présent, la roche-mère se situe à environ 160 cm de profondeur. Des racines fines sont observées le long du profil, mais de moins en moins présentes en profondeur. La présence de morceaux de granite altéré dans l'horizon C a été observée. Nasta, Huynh et al. (2011) ont par ailleurs déterminé des caractéristiques plus approfondies sur ce sol. Les autres types de sol rencontrés dans le bassin versant et ses environs sont en Annexe 1.

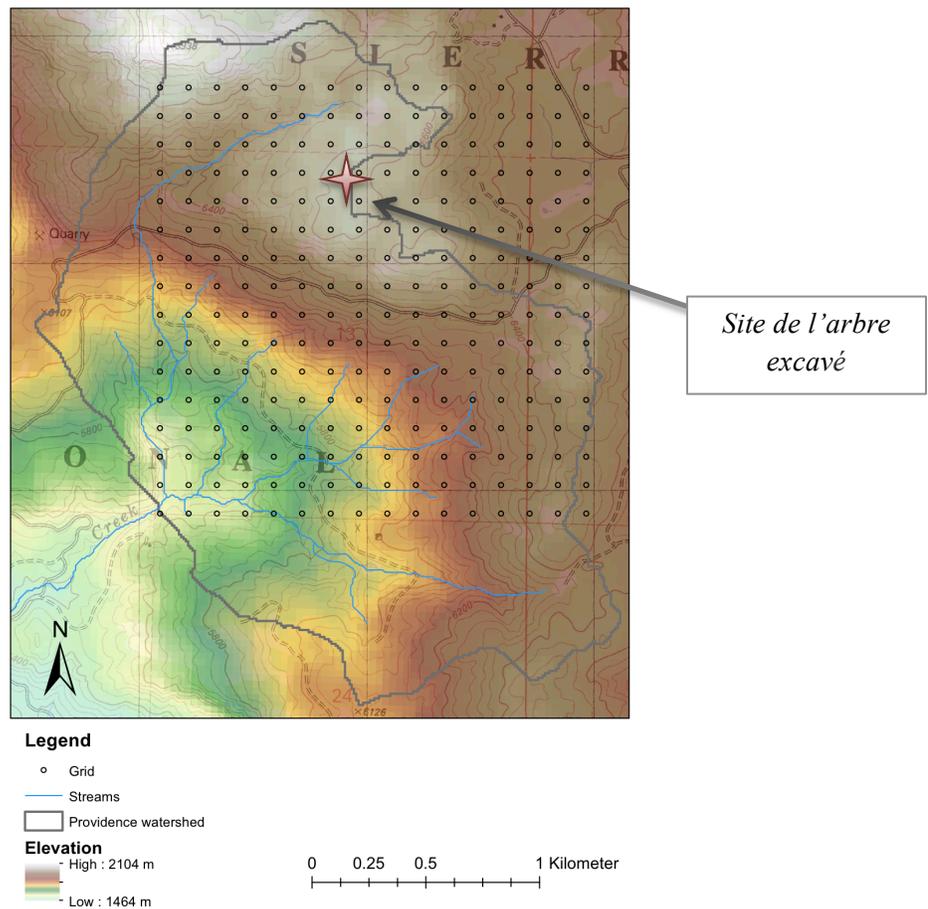


Figure 3. Carte du bassin versant où se trouve l'arbre étudié. Le maillage correspond aux emplacements de mesures utilisés lors de sondages de hauteurs de neige ou d'humidité du sol. (E. Eumont)

2. Excavation du système racinaire et acquisition des données LiDAR

Les opérations ayant eu lieu avant ma période de stage (Août et Octobre 2010), je n'ai pas eu la chance d'y assister. La description sera donc brève mais utile à la compréhension du projet.

L'excavation du système racinaire a été faite principalement grâce à un compresseur de type Air-Spade et a été divisée en 2 parties. La première moitié du système racinaire entier a été excavée sur 50 cm de profondeur et visait à garder l'ensemble des racines. L'autre moitié de l'arbre a été excavée jusqu'à atteindre les racines les plus profondes. Sur cette dernière moitié, les racines fines (diamètre inférieur à 5 mm) ont été coupées afin de ne garder que les grosses racines (diamètre supérieur à 5 mm). En Octobre 2010, le système racinaire a été scanné par un instrument LiDAR à 6 positions différentes autour de l'arbre. La géolocalisation précise de chaque position a été référencée par GPS. Les 6 scans permettent ainsi d'obtenir un nuage de points complet qui peut être exploité grâce à un logiciel de modélisation.

3. Modélisation des racines grossières avec Maptek I-site Studio

Afin de faire des calculs de volume et surface, il est nécessaire de traiter les nuages de points et de générer une surface à partir d'eux.

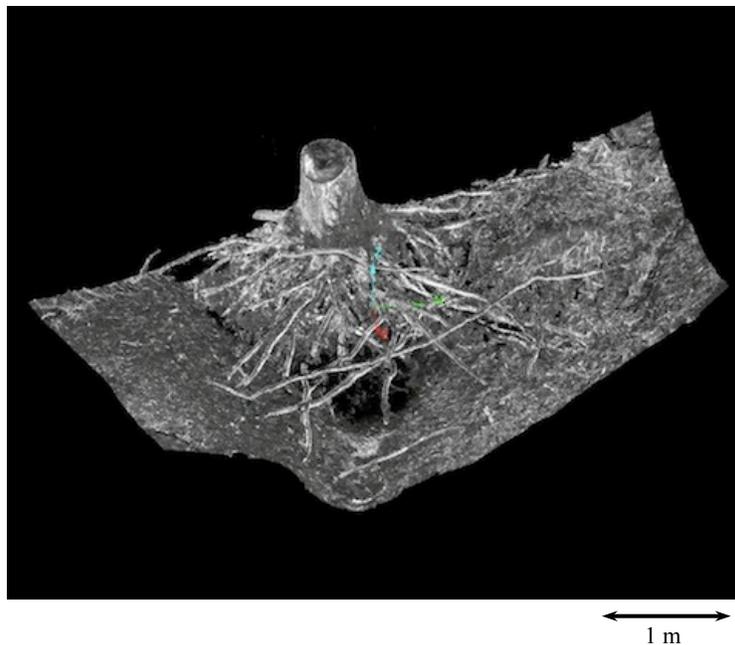


Figure 4. Visualisation sous I-Site Studio des données points de la moitié excavée "grosses racines".

La première partie du traitement a été effectuée sur la zone des racines grossières, qui représente donc la moitié de l'arbre (Fig. 4). Le logiciel Studio I-Site de Maptek a été utilisé pour construire le modèle du système

racinaire à partir des points de données numérisées. Nous avons estimé qu'une racine est grossièrement de forme cylindrique, et avec cette hypothèse, chaque racine a été modélisée en joignant plusieurs cercles créés sur différents segments de la racine. Le logiciel génère automatiquement un cercle lorsqu'un groupe de points sélectionnés est de forme circulaire. Les jointures entre deux racines distinctes ont été créées en joignant 2 cercles présents sur chaque morceau de racine. En utilisant cette méthode, chaque racine a été ensuite jointe au tronc de l'arbre.

Lors de l'excavation, quelques racines grossières ont été partiellement coupées dans le but d'atteindre les racines plus profondes et les racines en dessous du tronc. Ces parties coupées ont été reconstruites avec le logiciel après calcul du taux moyen de diminution de diamètre des racines qui a permis d'extrapoler les longueurs manquantes.

Comme nous nous étions intéressés aux calculs de surface et de volume des racines, il était important d'avoir un modèle géométriquement fermé. Par conséquent des efforts ont été faits dans ce travail pour fragmenter les segments de racines qui s'intersectaient les uns des autres, et de supprimer les fragments inutiles qui viendraient parasiter les calculs postérieurs.

I-site studio peut calculer le volume et la surface d'une forme, et grâce à cet outil nous avons pu collecter les valeurs de chaque segment de racine. La somme de ces valeurs a donc donné le volume et la surface totale des racines grossières pour la moitié de l'arbre. En multipliant par 2 ces résultats, nous avons extrapolé le volume et la surface totale de l'arbre entier, en supposant que la distribution des racines est symétrique dans l'autre moitié non calculée.

4. Répartition des grosses racines

En utilisant le modèle du système racinaire créé avec I-Site Studio, nous avons pu aussi étudier la variation de la distribution des racines en fonction de la profondeur. Le logiciel dispose d'un outil de vue en coupe qui présente une section plane du modèle racinaire. Nous avons fixé le point de vue de la première section dans le plan du niveau du sol (profondeur = 0 cm) et avons ensuite sauvegardé la capture d'écran sous format image (.jpeg). Pour rendre le traitement d'image plus facile, nous avons changé les paramètres du logiciel pour présenter un modèle noir sur un fond blanc. Nous avons ensuite reproduit la même opération en diminuant la profondeur par incréments de 2,5 cm jusqu'à atteindre l'extrémité de la racine la plus profonde (Fig. 5).

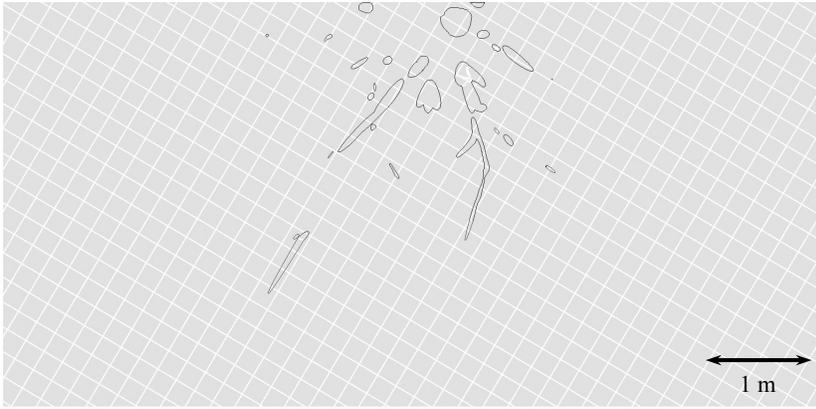


Figure 5. Exemple d'une copie écran de la vue en plan du modèle réalisé sous I-Site Studio (ici, à 45 cm de profondeur).

Les différentes images ont été recadrées afin qu'elles aient toutes la même taille et ne contiennent les données que pour la moitié de l'arbre. Ces images ont été

traitées grâce au logiciel Matlab[®] avec un algorithme créé pour remplir les sections de racines de couleur noire et ensuite compter le nombre de pixels remplis (en noir) pour chaque profondeur d'image. Après avoir calculé la taille de chaque pixel en centimètres, le volume et la surface correspondants, il est facile d'obtenir une distribution de la répartition racinaire (volume et surface) en fonction de la profondeur (Annexe 2).

Mais même avec un intervalle de 2,5 cm de profondeur, cette méthode implique une perte d'information, car les données entre 2 captures d'écran n'ont pas été considérées. Toutefois, nous avons intégré nos résultats afin d'évaluer le volume racinaire estimé entre chaque intervalle de profondeur (Annexe 3). La somme de ces intégrations apportera un volume et une surface totale de racines grossières qui seront comparés avec les valeurs calculées précédemment avec le logiciel.

5. Collecte des données sur les racines fines et exploitation

Nous avons d'abord pensé à modéliser les racines fines en utilisant la même méthode que pour les racines grossières, mais cela s'est avéré extrêmement difficile car les racines fines sont beaucoup plus entrelacées que leurs homologues grossières. Cela signifie, par exemple, que l'étape de fragmentation serait très fastidieuse. Pour cette raison, nous utilisons une approche différente pour étudier les racines fines, sans l'aide des données LiDAR. Comme décrit par Richner et al. (Richner, Liedgens et al.), il est possible d'analyser l'architecture des racines à partir d'analyse d'image. Malgré le fait que la méthode Richner soit couramment utilisée pour les plantes relativement petites cultivées in vitro, nous avons appliqué cette méthode à des photographies prises sur le terrain des racines du sapin. Pendant l'excavation, quatre photographies ont été prises depuis le sommet du tronc coupe, en contre-plongée, et montrent l'étendue des racines à proximité du tronc. Ces quatre photographies couvrent la superficie d'un cercle d'environ 1,2 m de rayon à partir du tronc, et montrent les racines fines et grossières (Fig. 6).

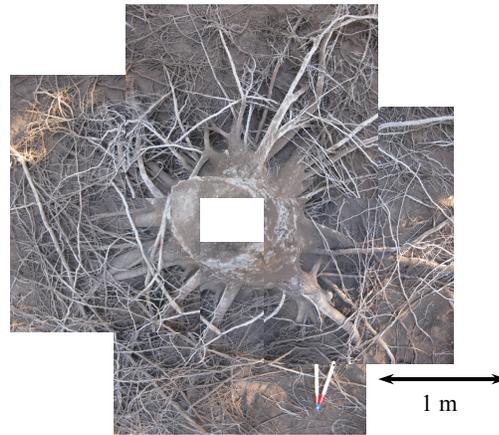


Figure 6. Vue depuis le tronc après assemblage des 4 photographies originales.

Nous avons créé des masques pour chacune des 4 photographies afin de couvrir les grosses racines. La zone de chevauchement de deux photographies voisines a également été masquée afin de ne garder l'information que sur une seule d'entre elles. Chaque image est ensuite divisée en 3 segments de 40 cm de largeur, le premier segment débutant à partir du bord du tronc. En bref, les images ont été segmentées de 0 à 40 cm, 40 à 80 cm et 80 cm à 120 cm du tronc. Nous avons utilisé le logiciel ImageJ pour calculer la taille de pixel sur chaque photo en connaissant le diamètre de certaines racines à partir de mesures faites sur le terrain (Fig. 7).



Figure 7. Rubans adhésifs rouges montrant l'emplacement des mesures de diamètre faites sur le terrain.

ImageJ est un programme libre écrit en Java qui est très efficace et facile à utiliser pour le traitement et l'analyse d'image. Un nouvel algorithme a été appliqué pour extraire les données à partir de ces images, comme le diamètre moyen et la longueur des racines fines. Cet algorithme utilise des fonctions différentes pour traiter les images (Annexe 4). Il effectue une analyse en composantes principales (ACP), suivie d'une segmentation par seuil pour assigner à chaque pixel une couleur noire ou blanche (racine/sol). La segmentation par seuil est une étape essentielle car elle permet de différencier les racines de la terre dans chaque image (Richner, Liedgens et al.

2000). Le contraste de ces images était correct car les racines ont eu le temps de sécher et donc les racines et le sol semblent bien définis. Après segmentation par seuil, l'étape suivante est un processus de squelettisation des racines. La squelettisation est une opération qui érode lentement les pixels représentant les racines. Le résultat donne un squelette de racine représenté par une ligne de la largeur d'un pixel et qui a approximativement la même longueur que la racine d'origine (Smit, Sprangers et al. 1994).

Nous avons déterminé la longueur des racines avec la formule suivante :

$$L = N * R$$

où N est le nombre de pixels constituent le squelette, et
R la résolution de l'image en centimètres par pixel.

Nous avons choisi de ne pas utiliser la formule décrite par Smit (1994) qui utilisent un facteur de correction, car Matlab prend déjà en compte le fait que deux pixels adjacents peuvent être joints en diagonale.

La prochaine étape consiste à totaliser le nombre de pixels perpendiculaires à la racine du squelette et de là, nous avons pu calculer le diamètre moyen racinaire. Cette étape consiste en quelque sorte à inverser l'étape de squelettisation. Grâce au diamètre et à la longueur racinaire, il est ensuite aisé de calculer le volume racinaire.



Quelques mois après l'excavation, nous avons mesuré les diamètres de racines à de multiples points et noté l'emplacement des mesures sur chaque photographie. Plusieurs nouvelles photos ont été prises parallèlement au niveau du sol, à environ 2 mètres au-dessus du sol, afin d'avoir une vue de toutes les racines fines et d'obtenir des résultats plus éloignés qu'à un mètre du tronc. Pour cela, nous avons installé deux cordes au-dessus de l'arbre excavé, en utilisant deux arbres sélectionnés environnants afin que les cordes passent au dessus du tronc (Fig. 8a).

Figure 8a. Photographie de l'arbre excavé et des cordes permettant la prise de photos.

Cette installation nous a permis de positionner une caméra sur la corde tendue, l'appareil visant le sol et les racines (Fig. 8b).

Figure 8b. Photographie montrant l'installation de l'appareil photo visant le sol sur la corde tendue.



Des photographies des racines fines ont été prises à partir du tronc, puis nous avons déplacé la caméra par incréments de 1 mètre en s'éloignant du tronc jusqu'à atteindre la plus longue des racines. Le même processus a été fait sur deux transects différents. Nous avons ensuite assemblé les photographies de chaque transect afin de n'obtenir qu'une seule image. Chaque transect a été divisé par segments de 40 cm de largeur et 160 ou 180 cm de longueur pour les transects 1 et 2 respectivement. Malheureusement, le contraste était de mauvaise qualité et ne permettait pas de distinguer nettement les racines du sol, ceci en raison de l'effet de détérioration au cours du temps. Il a donc été impossible de traiter les images telles qu'elles, directement avec Matlab. Par conséquent, nous avons pris une approche différente en imprimant physiquement les images des transects, puis en colorant manuellement les racines avec un marqueur rouge et enfin en numérisant les images. Comme le diamètre moyen des racines fines est relativement petit, nous avons omis ce paramètre et toutes les racines ont été colorées en traçant une ligne de même largeur (celle du marqueur). Le diamètre moyen et le volume racinaire n'ont donc pas été déterminés. Nous avons calculé la longueur des racines et la densité de longueur de racine sur chaque segment des 2 transects et reporté la moyenne des résultats des deux transects sur un graphique.

Les résultats des 3 premiers segments (0 à 120 cm) ont été comparés avec les résultats obtenus à partir des 4 photographies "originales" (prises au moment de l'excavation) et un taux de dégradation de densité de longueur des racines a été calculé. Ce taux a ensuite été appliqué pour estimer la densité de longueur racinaire d'origine pour les segments au-delà de 120 cm.

Afin d'estimer le volume et la surface des racines fines pour l'arbre entier, nous avons déterminé la surface de chaque segment circulaire extrapolé autour de l'arbre. Par exemple, sur le premier segment de 0 à 40 cm, le rayon du segment circulaire est égal à 40 cm ajoutés à la moitié du diamètre du tronc au niveau du sol. Nous avons soigneusement exclu la surface du tronc dans les calculs définitifs du premier segment. La longueur totale des racines a été déterminée en utilisant les valeurs de densité de longueur précédemment estimées, et la surface circulaire de chaque segment. Nous avons utilisé les valeurs moyennes de diamètre calculées à partir des photographies originales sur les 3 premiers segments. Comme le diamètre moyen n'a pas été calculé au-delà de 120 cm, nous avons utilisé le diamètre obtenu pour le segment 80-120 cm comme diamètre moyen des autres segments au-delà de 120 cm. Connaissant tous ces paramètres, nous avons pu calculer le volume et la surface totale des racines fines pour chaque segment, et enfin estimer les valeurs totales de l'arbre entier.

6. Ratio biomasse souterraine/biomasse aérienne

Après extrapolation du volume des racines fines et grossières pour l'arbre entier, nous sommes passés à l'estimation de sa biomasse aérienne.

Le volume du tronc est supposé être de forme conique pour les conifères. Ainsi, connaissant la hauteur de l'arbre et son diamètre à 50 cm du niveau du sol, nous avons estimé son volume. Nous avons choisi d'utiliser le diamètre à 50 cm au-dessus du niveau du sol, car le diamètre de l'arbre augmente plus abruptement en se rapprochant du sol. Compte tenu du diamètre du tronc au niveau du sol, nous avons d'abord calculé le volume du morceau de cône que représente le volume entre le niveau du sol et 50 cm de hauteur (Fig. 9). Au-dessus de 50 cm de hauteur, nous avons estimé un cône correspondant à la hauteur du reste de l'arbre.

Selon Westman (1987), la biomasse des branches et des aiguilles d'*Abies concolor* du sud de la Sierra Nevada représente environ 20% de sa biomasse aérienne totale. La biomasse branches/aiguilles de notre arbre a été estimée selon les résultats de Westman. Enfin, la somme du volume du tronc, des branches et des aiguilles a été comparée au volume des racines, ce qui nous donne un ratio biomasse souterraine/biomasse aérienne (Comeau and Kimmins 1989; Xiao and Ceulemans 2004).

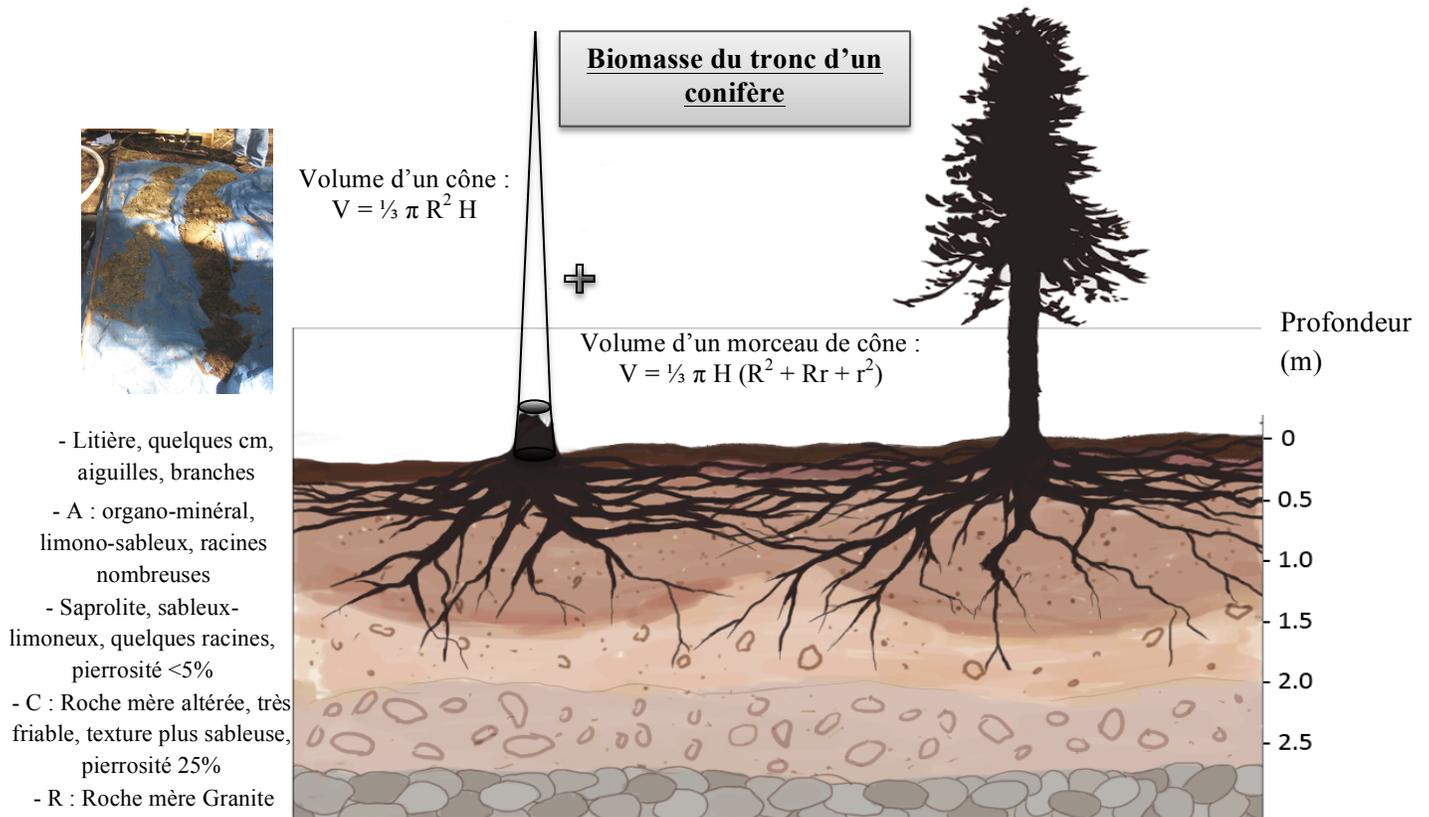


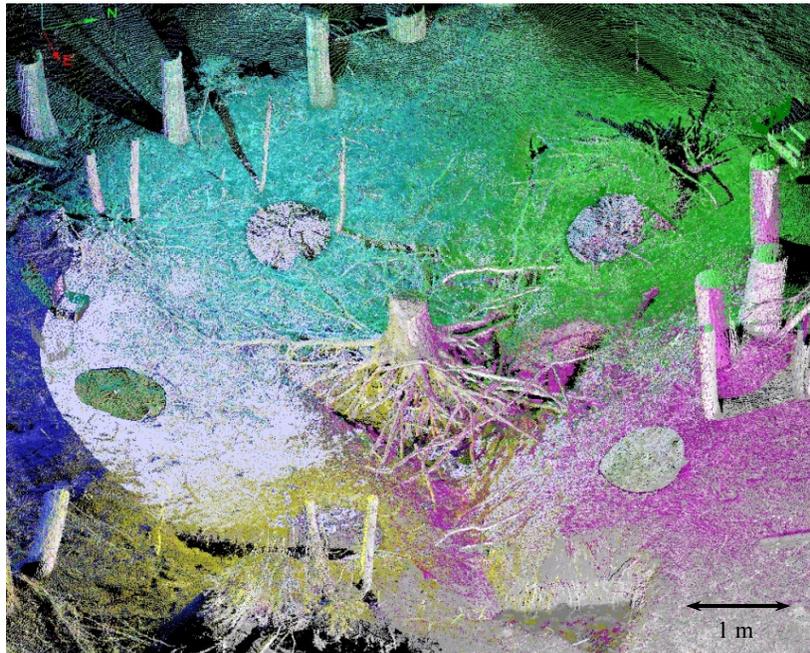
Figure 9. Profil de sol et représentation schématique du calcul de biomasse du tronc d'*Abies concolor* (Adapté d'après Katya Roudneva, échelle variable).

Chapitre III : Résultats

1. Résultats de l'excavation et aperçu des données LiDAR

La technique d'excavation pneumatique semble avoir conservé le système racinaire en causant un minimum de dommages.

Les différents scans obtenus grâce au LiDAR ont donné une bonne vision en 3D du système racinaire exploitable avec le logiciel I-site Studio. Les six scans ont été effectués tout autour de l'arbre, et chacun des scans apporte une vision du système racinaire (Fig. 10). La combinaison de tous les scans forme un ensemble des points nécessaire pour analyser le système racinaire. Pour l'analyse des grosses racines de la moitié de l'arbre, les racines en dessous du tronc n'ont pas pu être facilement identifiées car elles étaient cachées par des racines plus proches de l'équipement LiDAR et ont donc fait écran.



**Figure 10. Vue des 6 scans effectués autour de l'arbre.
Chaque couleur représente un ensemble de point d'un même scan.**

2. Modèle de la moitié « racines grossières » créé avec Maptek I-site Studio

Le modèle final représentant les racines grossières d'une moitié de l'arbre semblait être assez réaliste, bien que les parties de racines extrapolées aient ajouté une certaine erreur acceptable pour l'ensemble du modèle (Fig. 11).

Le volume total des racines grossières pour la moitié de l'arbre est de $0,27 \text{ m}^3$, et le volume total des

parties extrapolées, $0,016 \text{ m}^3$. La combinaison de ces deux nombres donne un volume total estimé à environ $0,29 \text{ m}^3$. L'arbre entier a alors un volume total estimé à $0,58 \text{ m}^3$.

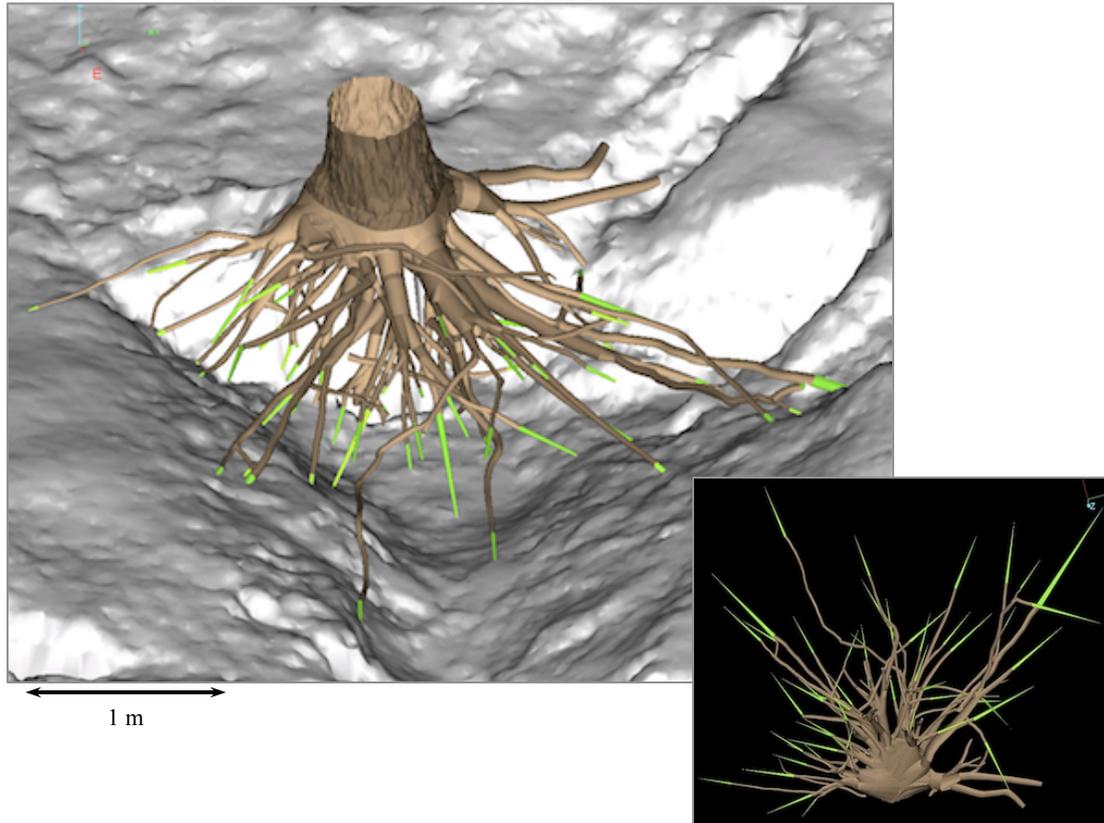


Figure 11. Représentation du modèle final créé avec Maptek I-Site Studio par E. Eumont. Les parties vertes correspondent aux parties de racines coupées reconstruites après estimation.

La surface des racines grossières est de $12,22 \text{ m}^2$ et la surface des racines coupées extrapolée est de $2,48 \text{ m}^2$. La surface totale pour le demi-arbre est alors de $14,7 \text{ m}^2$. En extrapolant ce chiffre à l'arbre entier, la surface totale pour les racines grossières est de $29,39 \text{ m}^2$.

La plus longue racine après estimation de la longueur des racines coupées atteint presque 480 cm . Le diamètre moyen de ces racines est de $7,9 \text{ cm}$. Le volume de sol excavé (racines non comprises) est de $16,9 \text{ m}^3$.

3. Distribution des grosses racines en fonction de la profondeur

Pour chaque image à incrément de $2,5 \text{ cm}$ de profondeur, nous avons calculé le volume et la surface des racines. Ces valeurs calculées pour chaque image ont été tracées sur un graphique (Fig. 12). La densité des racines atteint un maximum à environ 35 cm de profondeur et diminue ensuite lentement jusqu'à 140 cm .

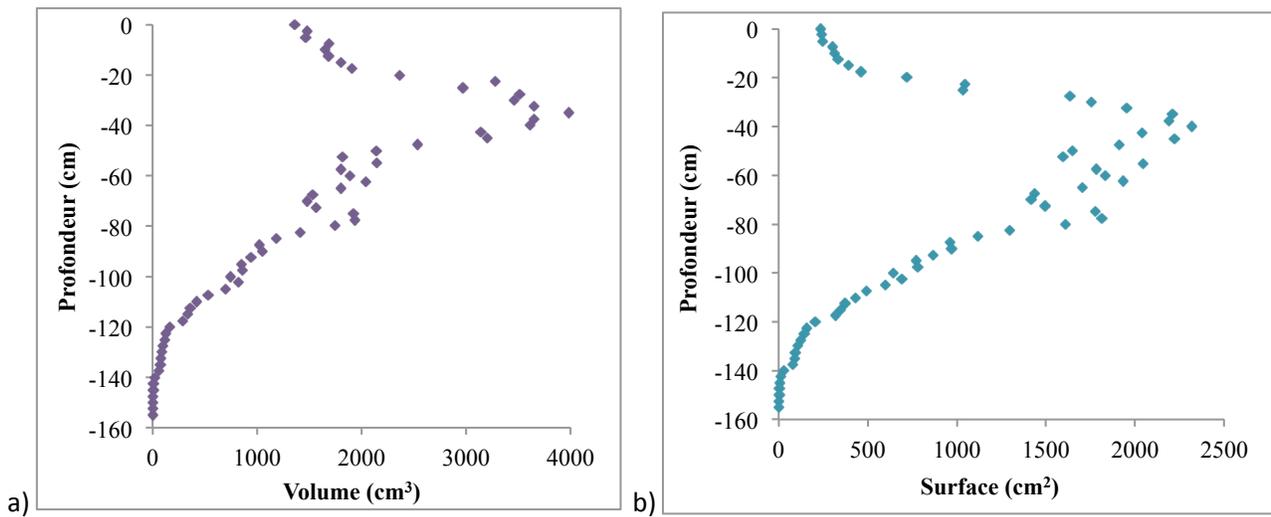


Figure 12. Distribution du volume (a) et de la surface (b) des grosses racines en fonction de la profondeur.

Après intégration, le volume total des racines est de $0,22 \text{ m}^3$. Ce résultat peut être comparé au volume total de $0,29 \text{ m}^3$ trouvé après sommation du volume de chaque racine calculé manuellement à partir du logiciel I-Site Studio, ce qui conduit à une différence de 24%. La surface totale racinaire intégrée est de $14,3 \text{ m}^2$, or nous avons déterminé une valeur de $14,7 \text{ m}^2$ avec le logiciel, ce qui conduit à une différence de 2,6% entre les deux résultats.

4. Paramètres calculés sur les racines fines

Les données obtenues par LiDAR ont permis d'acquérir certaines informations. Les racines fines atteignent une longueur maximale proche de 5 m, ce qui est logiquement plus long que pour les grosses racines. Le volume de sol excavé dans la partie excavée racines fines est estimé à $15,26 \text{ m}^3$.

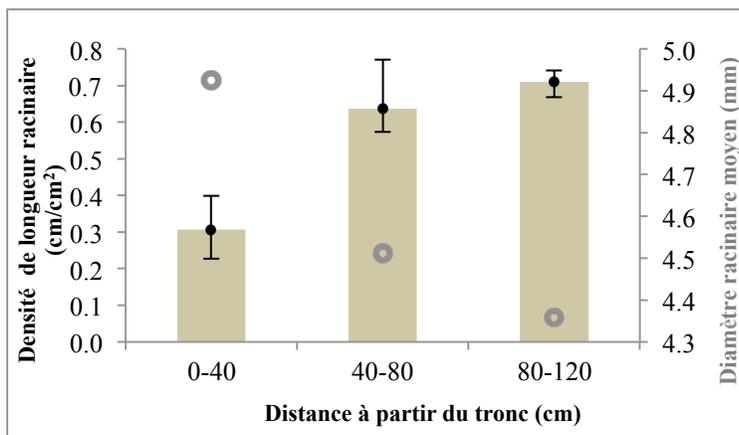


Figure 13. Evolution de la densité de longueur racinaire et du diamètre moyen en fonction de la distance d'éloignement du tronc.

Nos résultats sur les 4 images originales couvrant une surface au sol de 1,2 m de rayon autour du tronc montrent un diamètre racinaire moyen de 4,93 mm, 4,51 mm et 4,36 mm pour les segments 0-40 cm, 40-80 cm et 80-120 cm respectivement. La densité de longueur des racines fines (cm/cm^2) augmente rapidement à mesure qu'elles s'éloignent du tronc, passant de 0,307, 0,637 à 0,71 cm/cm^2 (Fig. 13 et annexe 5).

Le volume et la surface des racines fines augmentent de la même façon avec des valeurs qui quasi-doublent de 0-40 à 40-80 cm, et augmentent plus lentement de 40-80 à 80-120 cm (Fig. 14).

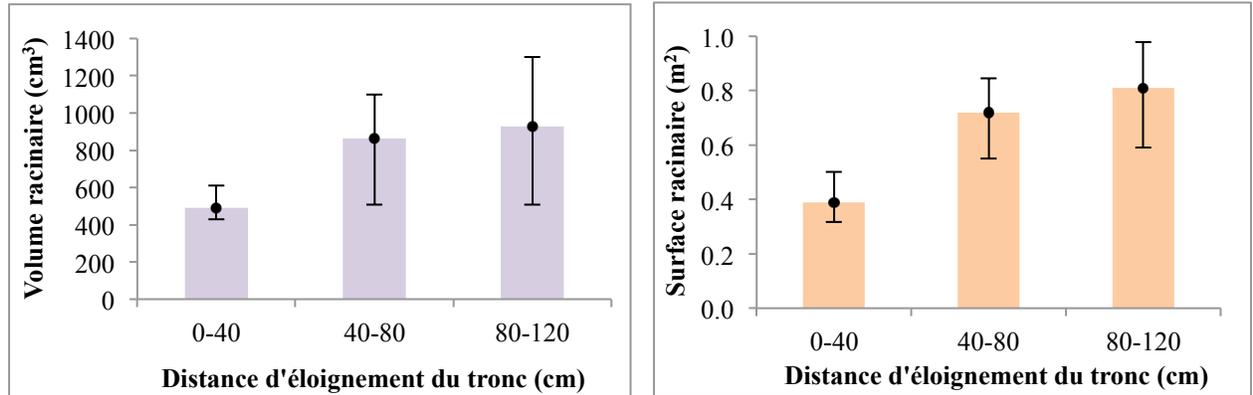


Figure 14. Evolution du volume racinaire (a) et de la surface racinaire (b) en fonction de la distance à partir du tronc.

Concernant les photographies prises quelques mois après l'excavation, le résultat, une fois scanné et les racines coloriées, est visible en figure 15 et 16.

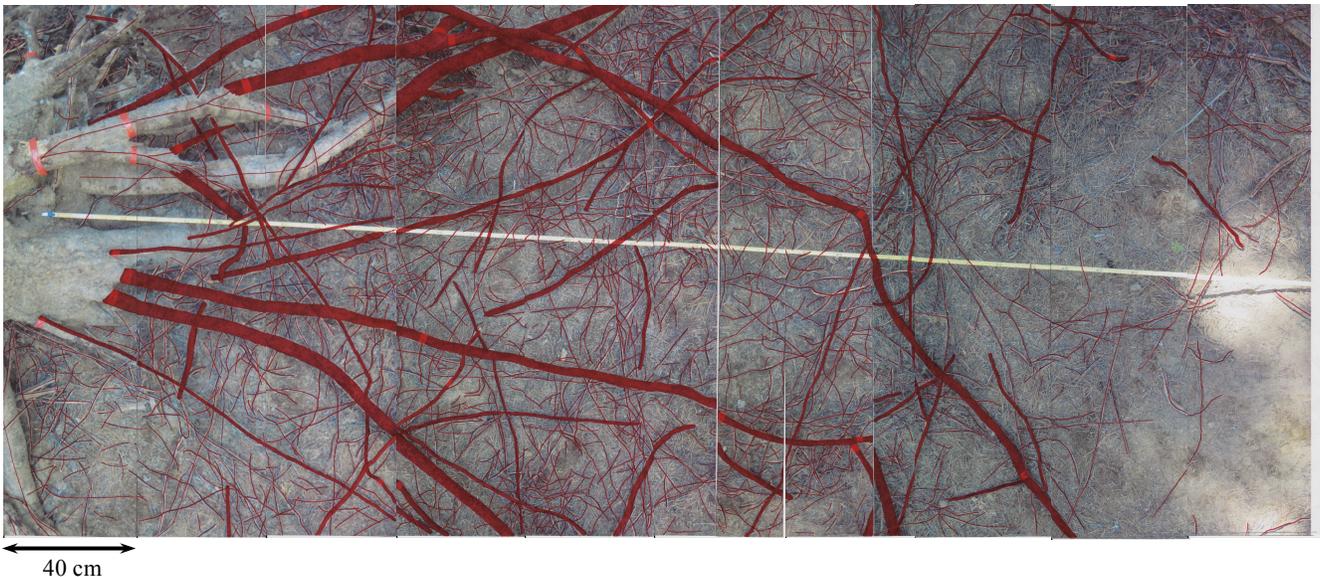


Figure 15. Transect 1 : 3 photographies au total sont regroupées, les racines ont été marquées au feutre rouge puis l'ensemble a été divisé en segments de 40 cm, le premier débutant à la base des racines (tronc).



Figure 16. Zoom sur les 4 premiers segments du transect 2 (0 à 160 cm du tronc).

Nous avons calculé la densité de longueur de racine (cm/cm^2) sur chaque segment de 40 cm des 2 transects (Annexes 6a et b) et la moyenne de ces résultats est représentée sur un graphique (Fig. 17).

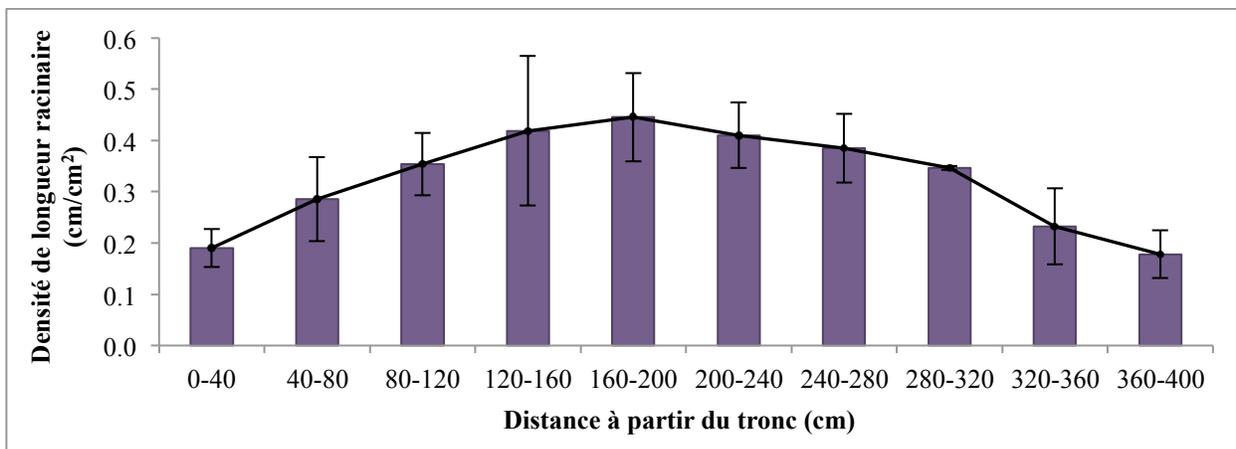


Figure 17. Evolution de la densité de longueur racinaire en fonction de la distance à partir du tronc.

La densité de longueur de racine est en constante augmentation de 0 à 160-200 cm, atteignant une valeur moyenne supérieure à $0,445 \text{ cm/cm}^2$, puis diminue jusqu'au dernier segment. En comparant avec les valeurs des images originales, nous avons trouvé un taux de dégradation de 53% de 0 à 40 cm, 55,1 et 50,1% pour les deux segments suivants. Après utilisation de ce taux pour estimer la densité de longueur de racine supplémentaire au-delà de 120 cm du tronc présents au moment de l'excavation, les résultats ont été inférieurs à nos prévisions. Notre taux de dégradation estimé manuellement en "fittant" la courbe de densité de longueur racinaire en fonction de la distance à partir tronc est de 80%.

Dans l'étape de détermination du volume des racines fines, le volume augmente radialement jusqu'à 280-320 cm avec un résultat de 8041 cm^3 , et décroît par la suite. Les résultats de surface montrent la même tendance avec une valeur maximale de $7,4 \text{ m}^2$. Le volume racinaire représente 8,5% du volume total de la racines, et un volume de racines grossières de 91,5%. La surface des racines fines représente 62,6% de la surface totale des racines.

5. Ratio biomasse souterraine/biomasse aérienne

Le volume du tronc est de $3,29 \text{ m}^3$. Le volume estimé de la biomasse aérienne restante, c'est-à-dire des branches et des aiguilles, est de $0,66 \text{ m}^3$ selon les résultats de Westman. En bref, cela nous amène à un volume total estimé de biomasse aérienne à $3,95 \text{ m}^3$. En comparaison, le volume total des fines racines est de $0,054 \text{ m}^3$, tandis que le volume total des racines grossières est de $0,58 \text{ m}^3$. Cela conduit à un ratio biomasse totale souterraine/aérienne estimé à 0,16.

Chapitre IV : Discussion

1. Modèle 3D créé avec Maptek I-site Studio

Bien que la modélisation ait pris du temps, nous pensons que le résultat donne une bonne représentation du système racinaire réel.

Malgré cela, des erreurs d'estimations sont apparues à plusieurs étapes et sont inévitables. Certaines sont dues à l'aspect géométrique du modèle qui est bien sûr différente de la forme naturelle du système racinaire, alors que certaines se sont produites lors de l'extrapolation des parties coupées (la racine a très bien pu divergé en deux racines par exemple). Nous avons aussi rencontré un autre type d'erreur introduit par Côté, Fournier et al. (2011) qui est l'occlusion-objet, dans notre cas, les racines en dessous du tronc ne sont pas visibles sur les données TLiDAR parce qu'elles étaient cachées par d'autres racines plus près de l'instrument (Fig. 18).



Figure 18. Racines "cachées" dont les données LiDAR sont incomplètes ou inexistantes.

Une des solutions aurait été d'utiliser l'instrument LiDAR sur un bras articulé, comme mentionné par Wagner, Gartner et al. (2010). Alors qu'il est très difficile d'estimer le pourcentage total d'erreur sur le résultat final, nous estimons que ces erreurs sont négligeables. Les valeurs de volume et de surface sont censées ne pas contenir d'erreurs importantes puisqu'elles sont calculées par l'algorithme du logiciel I-Site Studio. Ce logiciel a été facilement utilisable, même si nous avons rencontré quelques limites dues à la petite échelle de notre modèle par rapport aux études dont ce logiciel a été conçu, à savoir essentiellement pour l'exploitation minière. A notre connaissance, cette étude est une nouvelle application pour ce logiciel, par conséquent les commentaires ou problèmes que nous avons rencontrés ont été transmis à Maptek pour amélioration.

2. Distribution des grosses racines en fonction de la profondeur

La distribution racinaire est un paramètre important à connaître car elle est grandement liée au prélèvement d'eau et de nutriments le long du profil du sol. Nos résultats sur les racines grossières montrent que la plus grande densité racinaire se situe autour de 30-35 cm de profondeur pour cet arbre.

Le sursaut visible sur le graphique à environ 80 cm de profondeur est causé par une racine qui se développait parallèlement au niveau du sol à cette même profondeur. Elle est clairement constatée sur la capture d'écran à 80 cm de profondeur. Hormis cela, la courbe de distribution racinaire est assez régulière durant les 30 premiers centimètres de profondeur et à plus basse profondeur (80 à 160 cm). Le développement des racines ne semble pas affecté la distribution des racines dans les horizons sableux mais il apparait stoppé en profondeur par la barrière que constitue la roche-mère granitique. Le principal manque dans cette distribution racinaire est qu'elle n'inclut pas les racines fines.

La différence de 24% concernant les résultats du volume de racines grossières calculés par le logiciel et par intégration de la courbe de distribution racinaire peut être expliquée de différentes façons. Premièrement, notre méthode de détermination racinaire ne comprend pas toutes les données réelles car nous avons utilisé des captures d'écran tous les 2,5 cm, autrement dit, les données entre deux captures d'écran sont considérées linéaires. Deuxièmement, une part d'erreur est aussi possible lors du calcul de la taille des pixels. En effet, nous avons utilisé une moyenne de taille de pixel calculée à partir des différentes images. Les résultats de surface racinaire sont quant à eux très similaires dans les deux cas ce qui assure une bonne confiance sur la valeur finale.

3. Paramètres des racines fines de l'arbre

Les valeurs de densité de longueur racinaire que nous avons calculées sur les images originales montrent la même tendance que les résultats obtenus sur les trois premiers segments des photographies prises plus récemment. Alors que les racines fines sont plus petites à mesure qu'elles s'éloignent du tronc, elles sont aussi plus nombreuses. Cela pourrait conduire à une diminution du volume et de la surface racinaire, mais l'augmentation de la densité de la longueur racinaire est plus importante que la diminution du diamètre de la racine. Les photographies originales nous ont aidé à déterminer le volume des racines, leur surface et leur diamètre, mais malheureusement aucune autre photographie n'a été prise au-delà de 120 cm au moment de l'excavation.

Les nouvelles photographies prises quelques mois après ont néanmoins permis de calculer et connaître la tendance sur l'évolution de la densité de la longueur racinaire après 120 cm.

Notre résultat du taux de dégradation est évidemment faux et sous-estimé, ce qui peut s'expliquer de plusieurs manières. Il est fort possible que des racines aient été colorées par erreur car la distinction entre racines/morceaux de branches/aiguilles était difficile sur les photographies imprimées. Loin du tronc, il n'était pas aisé de distinguer les racines appartenant à notre arbre et les racines d'arbres voisins. Bien que nous ayons pu grossièrement les différencier selon leur orientation et leur diamètre décroissant en s'éloignant du tronc (et différencier celles des arbres voisins par la même méthode), des erreurs de jugement ont pu être faites. Pour toutes ces raisons, la densité de longueur racinaire devrait avoir été plus faible que ce que nous avons calculé. Une autre explication pourrait être que les résultats sur les photographies originales soient sous-estimés par notre algorithme. Par ailleurs, la valeur de taux de dégradation que nous avons utilisé pour adapter la courbe de densité de longueur racinaire signifie que le taux de dégradation est en réalité d'environ 80%. Il était nettement visible sur le site que les racines étaient moins nombreuses qu'au moment de l'excavation. La pluie, la neige, le gel et le temps ont beaucoup affecté le système racinaire excavé (Fig. 19).



**Figure 19. L'arbre excavé en Août 2010 (à gauche) et en Juin 2011 (à droite).
Photographies P. Hartsough et E. Eumont**

Le volume des racines fines ainsi que leur surface atteignent leur maximum à une distance bien plus élevée que celle où la densité de longueur racinaire est maximale.

Comme prévu, même si le volume des racines fines représente une faible proportion de la biomasse souterraine totale, leur surface est la plus considérable et par conséquent joue un rôle majeur sur le processus de prélèvement d'eau. La valeur de diamètre que nous avons utilisée a été volontairement surestimée, cette valeur moyenne devrait logiquement décroître à mesure que les racines s'éloignent du tronc. Cela signifie, en réalité, que la proportion du volume de biomasse racinaire est encore plus faible que ce que nous avons calculé. Leur surface totale est également surestimée dans notre étude, mais nous sommes confiants sur le fait que leur surface totale réelle soit plus grande que la surface totale des racines grossières. Notre étude manque de données

concernant les racines fines à une profondeur inférieure à 50 cm, mais nos résultats montrent certaines tendances qui peuvent être exploitables pour de futures études. Il était impossible de déterminer la distribution des racines fines en fonction de la profondeur, mais il est estimé que leur distribution suit celle des racines grossières.

4. Ratio biomasse souterraine/biomasse aérienne

Le ratio trouvé dans notre étude est en adéquation avec les autres résultats trouvés dans la littérature (Table 1). Nous n'avons pas trouvé de résultats pour des sapins du Colorado en particulier, mais pour des espèces d'arbres comparables croissants sous le même climat. Helmisaari, Makkonen et al. (2002) ont déterminé un ratio biomasse souterraine/aérienne de pins sylvestre matures dans le nord de la Finlande et a calculé un volume racinaire de 13,2% et un volume de biomasse aérienne de 86,8% ce qui conduit à un résultat très semblable au nôtre. D'autres chercheurs ont calculé ce même ratio sur des sapins Douglas d'une quarantaine d'années et ont trouvé des résultats allant de 0,16 à 0,19 (Keyes and Grier 1981) et un résultat de 0,18 pour une autre étude sur la même espèce (Ranger and Gelhaye 2001). Par ailleurs, d'autres méthodes existent pour déterminer ce ratio. La biomasse totale des grosses racines aurait, par exemple, pu être calculée à partir d'une relation avec le diamètre à hauteur de poitrine (Drexhage and Colin 2001; Lavigne and Krasowski 2007)

Table 1. Résultats de ratio biomasse souterraine/aérienne pour des espèces et des climats comparables a notre étude.

Espèce	Age (années)	Biomasse souterraine (%)	Biomasse aérienne (%)	Ratio	Lieu	Réf.
Pins sylvestre	"mature"	13.2	86.8	0.13	Est de la Finlande	Helmisaari et al., 2001
Sapin Douglas (<i>Pseudotsuga menziesii</i>)	40	19	81.2	0.19	Sud-est de Seattle, Washington	Keyes et al., 1981
Sapin Douglas (<i>Pseudotsuga menziesii</i>)	40	16	84.2	0.16	"	"
Pin blanc (<i>Pinus strobus L.</i>)	30	13.9	86.1	0.14	Ontario du Sud, Canada	Peichl et al., 2007
Pin blanc (<i>Pinus strobus L.</i>)	65	18.1	96.7	0.18	"	"

Chapitre V : Conclusion

Les racines grossières représentent la plus importante biomasse souterraine en volume, mais les racines plus fines sont celles qui jouent un rôle majeur dans le prélèvement d'eau et de nutriments par l'arbre. Les résultats calculés sur les racines fines peuvent s'avérer très utiles dans le choix de l'emplacement d'installation de tensiomètres autour d'un arbre similaire.

Alors que la numérisation et la modélisation des données TLiDAR se sont révélées prometteuses pour les études de racines de taille grossière, il subsiste un doute quant à l'application de cette technologie sur les racines fines. L'analyse d'image semble être une meilleure méthode pour évaluer les paramètres des fines racines, car elle est très rapide et facile à utiliser. Il est important de souligner le fait que les photographies doivent être prises dans de bonnes conditions (peu de temps après l'excavation, avoir un bon contraste racines/sol, pas de soleil direct car ombres...). Il aurait aussi été idéal de photographier l'ensemble du système racinaire plutôt que d'extrapoler les résultats d'un transect. En outre, les méthodes employées sont peu destructives et favorisent donc la mise en place d'études complémentaires telles qu'un échantillonnage de racines qui peut être fait juste après la numérisation LiDAR, les mesures et les prises de photographies.

Ce travail a fait l'objet de la rédaction d'un article scientifique, écrit plus détaillé dont je suis l'auteur principal et fait en collaboration avec des collègues du laboratoire. Nous planifions de le proposer à publication cet automne. Il sera aussi présenté à l'AGU Fall Meeting 2011 à San Francisco en décembre prochain.

Bien que mon stage se soit déroulé principalement autour de ce projet, j'ai aussi effectué quelques petites tâches au laboratoire et sur le terrain. Ainsi, j'ai créé quelques cartes avec ArcGIS (Annexe 7), découvert le logiciel HYDRUS, mais j'ai aussi participé au *Snow Survey* en mars (Grossi, 2011), aux *Soil Moisture Surveys* en Avril et Juin, ainsi qu'à plusieurs tâches d'installations ou de maintenance sur le site CZO : installations de tensiomètres, mesures, installation électriques (Leonard, 2011 ; National CZO Program, 2011).

Références bibliographiques

- Atkinson, D. (2000). Root Characteristics: Why and What to Measure? Root Methods: a handbook. A. G. B. A. L. Smit, C. Engelset al., Springer: 1-32.
- Aubrecht, L., Z. Stanfök, et al. (2006). "Electrical measurement of the absorption surfaces of tree roots by the earth impedance method: 1. Theory." Tree Physiology **26**(9): 1105-1112.
- Bales, R. C., M. H. Conklin, et al. (2011). Sampling Strategies in Forest Hydrology and Biogeochemistry. Forest Hydrology and Biogeochemistry: Synthesis 29 of Past Research and Future Directions. D. F. L. e. al.
- Comeau, P. G. and J. P. Kimmins (1989). "Above- and below-ground biomass and production of lodgepole pine on sites with differing soil moisture regimes." Canadian Journal of Forest Research **19**(4): 447-454.
- Côté, J.-F., R. A. Fournier, et al. (2011). "An architectural model of trees to estimate forest structural attributes using terrestrial LiDAR." Environmental Modelling & Software **26**(6): 761-777.
- Drexhage, M. and F. Colin (2001). "Estimating root system biomass from breast, height diameters." Forestry **74**(5): 491-497.
- Gartner, H. and C. Denier (2006). "Application of a 3D Laser scanning device to acquire the structure of whole root systems- A pilot study." TRACE - Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology **4**: 288-294.
- Gautam, M. K., D. J. Mead, et al. (2003). "Biomass and morphology of Pinus radiata coarse root components in a sub-humid temperate silvopastoral system." Forest Ecology and Management **177**(1-3): 387-397.
- Gerhold, H. D. and A. D. Johnson (2003). "Root dimensions of landscape tree cultivars." Journal of Arboriculture **29**(6): 322-326.
- Gonzalez, P., G. P. Asner, et al. (2010). "Forest carbon densities and uncertainties from Lidar, QuickBird, and field measurements in California." Remote Sensing of Environment **114**(7): 1561-1575.
- Gross, R. and M. Julene (2002). "Supersonic Air Jets Preserve Tree Roots in Underground Pipeline Installation." USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-184.
- Grossi, Mark (2011), Sierra's rain-snow zone promises water insight, [En ligne], disponible sur : <http://www.fresnobee.com/2011/03/20/2318242/sierras-rain-snow-zone-promises.html#ixzz1HGJntNt3>. Consulté le 21 mars 2011.
- Helmisaari, H.-S., K. Makkonen, et al. (2002). "Below- and above-ground biomass, production and nitrogen use in Scots pine stands in eastern Finland." Forest Ecology and Management **165**(1-3): 317-326.
- Hunsaker, C. T., T. W. Whitaker, et al. (2010). "Water yield and runoff timing across the rain-snow transition in California's southern Sierra Nevada mountains." Hydrological Processes.
- Jensen, R. J. (2000). Remote Sensing of the Environment: An earth resource perspective, Pearson Prentice Hall.
- Keyes, M. R. and C. C. Grier (1981). "Above- and below-ground net production in 40-year-old Douglas-fir stands on low and high productivity sites." Canadian Journal of Forest Research **11**(3): 599-605.

- Lavigne, M. B. and M. J. Krasowski (2007). "Estimating coarse root biomass of balsam fir." Canadian Journal of Forest Research **37**(6): 991-998.
- Leonard, James (2011), "Research Gets to the Root of California's Water Cycle", [En ligne], disponible sur <http://www.ucmerced.edu/news/research-gets-root-californias-water-cycle>. Consulté le 16 août 2011.
- Nadezhdina, N. and J. Cermak (2003). "Instrumental methods for studies of structure and function of root systems of large trees." Journal of Experimental Botany **54**(387): 1511-1521.
- Nasta, P., S. Huynh, et al. (2011). "Simplified Multistep Outflow Method to Estimate Unsaturated Hydraulic Functions for Coarse-Textured Soils." Soil Science Society of America Journal **75**(2): 418-425.
- National CZO Program (2011), Southern Sierra Critical Zone Observatory, [En ligne], disponible sur : <https://snri.ucmerced.edu/CZO>. Consulté le 15 février 2011.
- Ranger, J. and D. Gelhaye (2001). "Belowground biomass and nutrient content in a 47-year-old Douglas-fir plantation." Ann. For. Sci. **58**(4): 423-430.
- Repo, T., J. Laukkanen, et al. (2005). "Measurement of the Tree Root Growth Using Electrical Impedance Spectroscopy." Silva Fennica **39**(2): 159-166.
- Richner, W., M. Liedgens, et al. (2000). Root Image Analysis and Interpretation. Root methods: A Handbook. A. L. Smit, A. G. Bengough, C. Engelset al, Springer: 305-342.
- Rizzo, D. M. and R. Gross (2000). Distribution of Armillaria on pear root systems and a comparison of root excavation techniques. The supporting roots of trees and woody plants: form, function, and physiology. A. Stokes, Kluwer Academic Press: 305-311.
- Santantonio, D., R. K. Hermann, et al. (1977). "Root biomass studies in forest ecosystems." Pedobiologia **17**: 1-31.
- Smit, A. L., J. F. C. M. Sprangers, et al. (1994). "Automated Measurement of Root Length with a 3-Dimensional High-Resolution Scanner and Image-Analysis." Plant and Soil **158**(1): 145-149.
- Urban, J., R. Bequet, et al. (2010). "Assessing the applicability of the earth impedance method for in situ studies of tree root systems." Journal of Experimental Botany **62**(No. 6): 1857-1869.
- Vogt, K. A., D. J. Vogt, et al. (1998). "Analysis of some direct and indirect methods for estimating root biomass and production of forests at an ecosystem level." Plant and Soil **200**(1): 71-89.
- Wagner, B., H. Gärtner, et al. (2010). "Incorporating 2D tree-ring data in 3D laser scans of coarse-root systems." Plant and Soil **334**(1-2): 175-187.
- Weber, T. C. and D. E. Boss (2009). "Use of LiDAR and supplemental data to estimate forest maturity in Charles County, MD, USA." Forest Ecology and Management **258**(9): 2068-2075.
- Westman, W. E. (1987). "Aboveground biomass, surface area, and production relations of red fir (*Abies magnified*) and white fir (*A. concolor*)." Canadian Journal of Forest Research **17**(4): 311-319.
- Xiao, C.-W. and R. Ceulemans (2004). "Allometric relationships for below- and aboveground biomass of young Scots pines." Forest Ecology and Management **203**(1-3): 177-186.

(généré avec EndNote)

ANNEXES

Annexe 3 : Liste de commandes utilisées pour intégrer les résultats de la distribution racinaire des grosses racines.

```

1  % Liste de commandes effectuant l'integration des resultats obtenus
2  % precedemment concernant la distribution racinaire (volume, surface) des
3  % grosses racines.
4
5  load depth;
6
7  for k=0 to -155
8  vol_int(k)=volume_cm3(k-2.5)*2.5-(|volume_cm3(k-2.5)-volume_cm3(k)|./2);
9  vol_tot=sum(vol_int(k));
10 end
11
12 int(volume_cm3,0,-155)
13 Z=cumtrapz(volume_cm3,file_nums);
14 % Rappel : file_nums correspond a des profondeurs differentes.
15

```

The screenshot shows a MATLAB editor window titled "Editor - Untitled*" with a menu bar (File, Edit, Text, Go, Cell, Tools, Debug, Desktop, Window, Help) and a toolbar. The script content is as follows:

```

1  % Liste de commandes effectuant l'integration des resultats obtenus
2  % precedemment concernant la distribution racinaire (volume, surface) des
3  % grosses racines.
4
5  load depth;
6
7  for k=0 to -155
8  vol_int(k)=volume_cm3(k-2.5)*2.5-(|volume_cm3(k-2.5)-volume_cm3(k)|./2);
9  vol_tot=sum(vol_int(k));
10 end
11
12 int(volume_cm3,0,-155)
13 Z=cumtrapz(volume_cm3,file_nums);
14 % Rappel : file_nums correspond a des profondeurs differentes.
15

```

The status bar at the bottom indicates the current position is Ln 15, Col 1, OVR.

Annexe 5 : Tableaux de résultats sur les calculs des racines fines des 4 photographies originales.

IMG_3127

Type of mask	Segment 1	Seg2	Seg3
Root_length_mm	32762	47426	54901
Root_pixels_sum	401857	440972	473920
Root_diameter_mm	4.8684	3.6904	3.4261
Root_volume_m3	0.0006	0.0005	0.0005
Root length/lcm3	0.6638	0.9609	1.1123
Root surface_mm2	501079	549844	590922
Root volume/cm2	7.41341E-08	6.16668E-08	6.15282E-08

IMG_3128

Type of mask	Seg1	Seg2	Seg3
Root_length_mm	18695	47179	57333
Root_pixels_sum	254318	612598	784074
Root_diameter_mm	5.3992	5.1536	5.428
Root_volume_m3	0.00042803	0.00098414	0.0013
Root length/lcm3	0.3788	0.9559	1.1616
Root surface_mm2	317106	763852	977675
Root volume/cm2	5.20318E-08	1.19633E-07	1.5803E-07

IMG_3129

Type of mask	Seg1	Seg2	Seg3
Root_length_mm	22388	51604	60530
Root_pixels_sum	279963	678858	692959
Root_diameter_mm	4.9632	5.2213	4.5438
Root_volume_m3	0.00043314	0.0011	0.00098152
Root length/lcm3	0.4536	1.0455	1.2264
Root surface_mm2	349082	846471	864052
Root volume/cm2	5.2653E-08	1.33717E-07	1.19315E-07

IMG_3130

Type of mask	Seg1	Seg2	Seg3
Root_length_mm	27173	63348	60932
Root_pixels_sum	305901	693551	619245
Root_diameter_mm	4.4682	4.3454	4.0337
Root_volume_m3	0.0004	0.0009	0.0003
Root length/lcm3	0.5505	1.2834	1.2345
Root volume/cm2	5.17936E-08	1.14202E-07	3.30714E-08

Calcul sur les 4 photographies prises après l'excavation.

Distance	Mean Root Length	Min RL	Max RL
0-40	25254.5	18695	32762
40-80	52389.25	47179	63348
80-120	58424	54901	60932

Mean Volume	Min Vol	Max Vol
490.34	428.03	609.85
863.81	507.29	1100
929.22333333	506.15	1300

Mean Surface	Min Surf	Max Surf
0.389	0.317	0.501
0.720	0.550	0.846
0.811	0.591	0.978

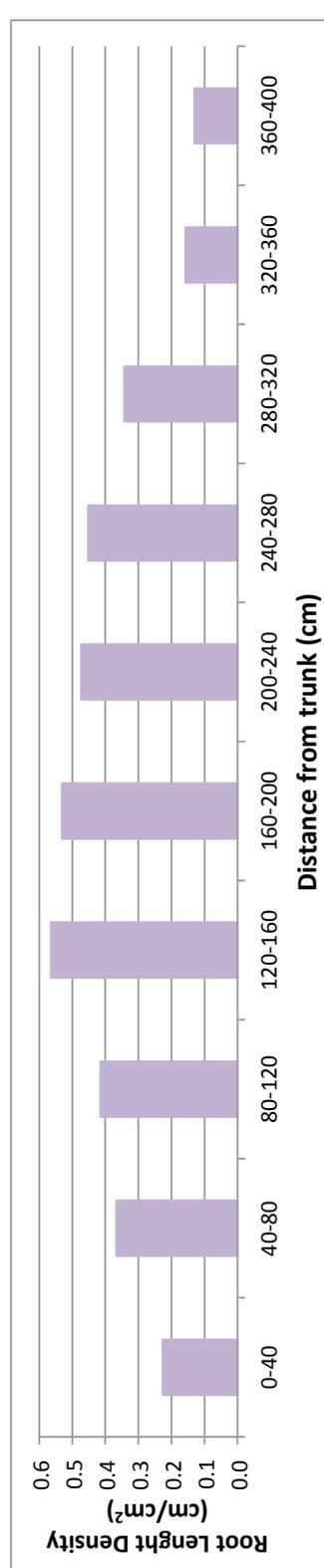
Mean Diameter	Min Diam	Max Diam
4.925	4.468	5.399
4.512	3.690	5.221
4.3579	3.4261	5.428

Distance	Mean RL cm/cm2	Min	Max
0-40	0.306996766	0.227258688	0.398258847
40-80	0.636850079	0.573513648	0.770065973
80-120	0.710209232	0.667383217	0.740696784

Annexe 6a : Tableaux de résultats sur les calculs des racines fines des photographies prises en Juillet 2011.

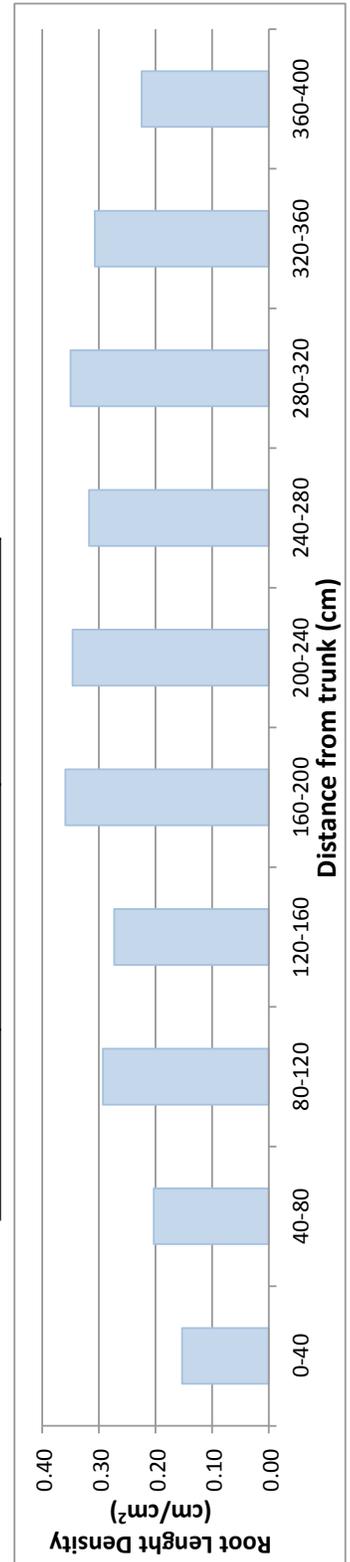
July pictures, Transect 1

	Distance (cm)	Root Length (cm)	RL cm/cm ²
1	0-40	1462.4	0.227
2	40-80	2366.8	0.368
3	80-120	2673.5	0.415
4	120-160	3640.8	0.565
5	160-200	3423.3	0.532
6	200-240	3051.3	0.474
7	240-280	2914.9	0.453
8	280-320	2205.2	0.342
9	320-360	1020.1	0.158
10	360-400	846.3735	0.131



July pictures, Transect 2

	Distance (cm)	Root Length (cm)	RL cm/cm ²
1	0-40	1091.3	0.153
2	40-80	1448.5	0.203
3	80-120	2087.2	0.293
4	120-160	1943	0.273
5	160-200	2558.9	0.359
6	200-240	2466.6	0.346
7	240-280	2262.4	0.318
8	280-320	2494.8	0.350
9	320-360	2186.7	0.307
10	360-400	1598.9	0.225



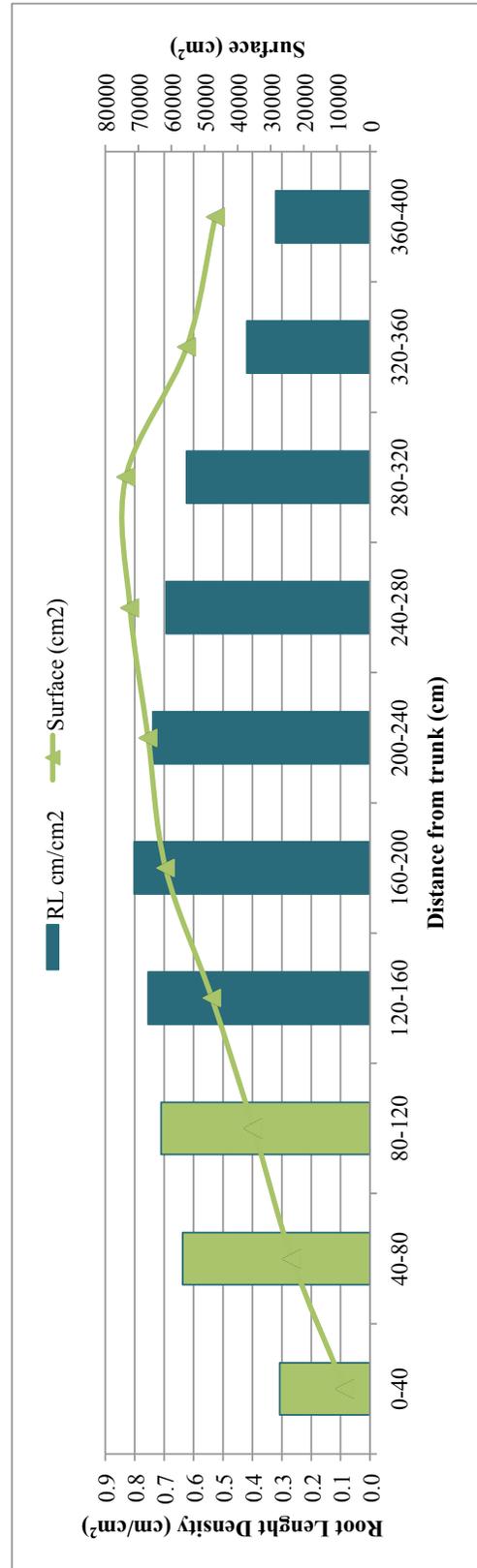
Annexe 6b : Tableaux de résultats sur les calculs des racines fines des photographies prises en Juillet 2011 (suite).

Difference Original/July2011 pics

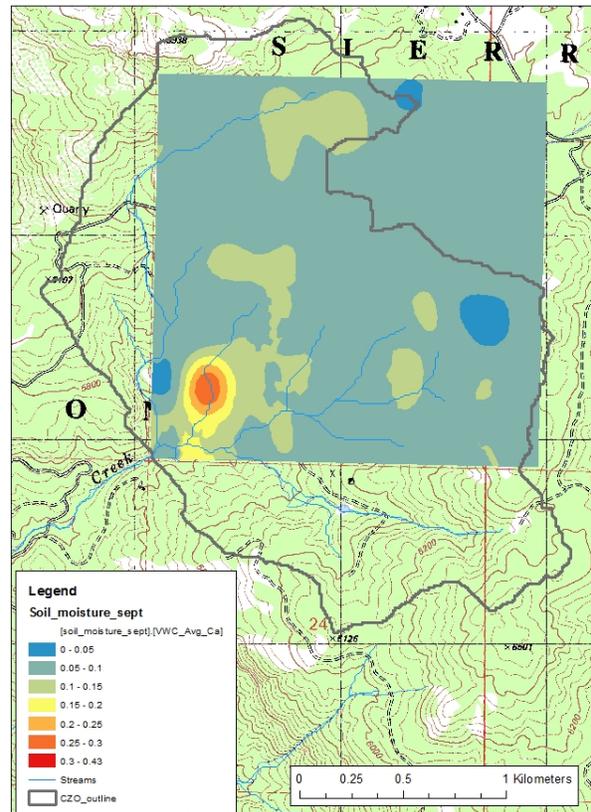
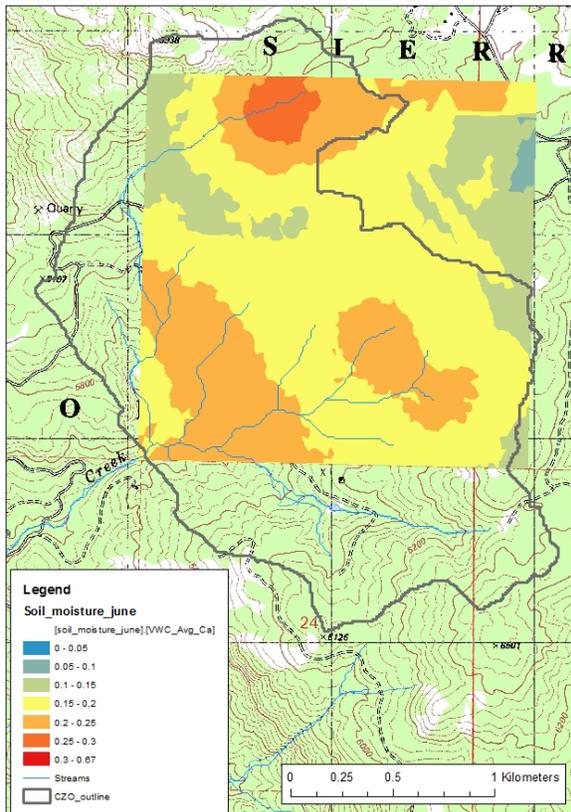
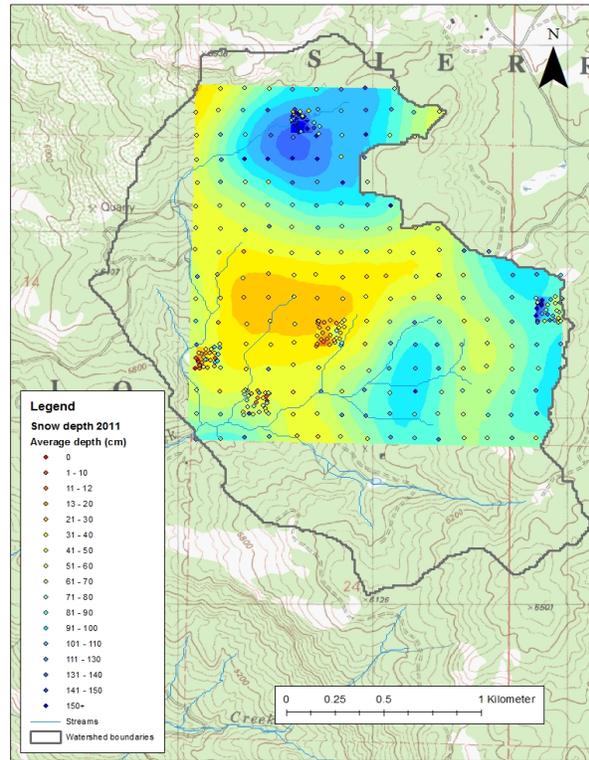
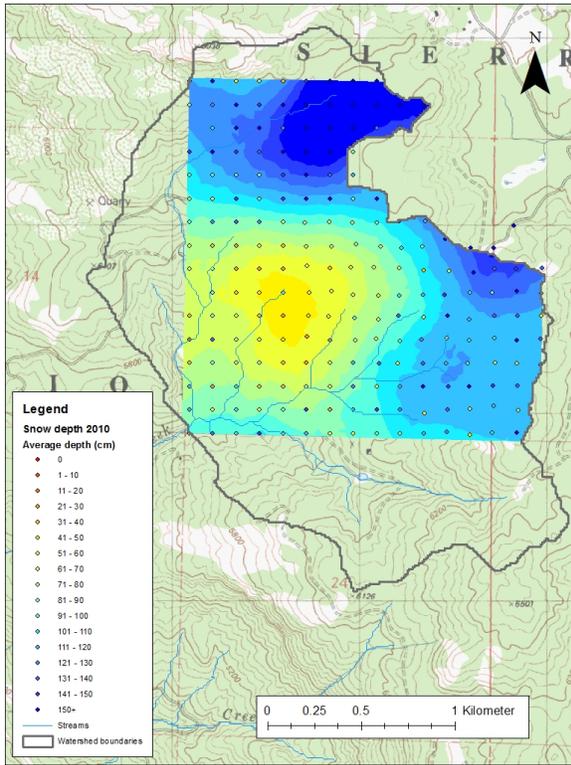
Distance	Original pics		July pics		diff RL	Degradation rate %
	RL cm/cm ²	RL cm/cm ²	RL cm/cm ²	%left		
0-40	0.307	0.190	61.95	0.117	38.05	
40-80	0.637	0.285	44.83	0.351	55.17	
80-120	0.710	0.354	49.86	0.356	50.14	
					avg	
					52.65	

RL Estimation Original pics

Distance	RL cm/cm ²	RL (cm)	Diameter (cm)	Volume cm ³	Surface (cm ²)
0-40	0.307	4938.029	0.492	940.615	7639.900
40-80	0.637	16646.020	0.451	2661.279	23594.203
80-120	0.710	25703.287	0.436	3833.832	35189.719
120-160	0.754	34887.184	0.436	5203.677	47763.160
160-200	0.802	45143.033	0.436	6733.411	61804.183
200-240	0.738	48980.771	0.436	7305.838	67058.332
240-280	0.693	52973.575	0.436	7901.393	72524.779
280-320	0.624	53908.653	0.436	8040.867	73804.971
320-360	0.419	40434.609	0.436	6031.116	55357.999
360-400	0.320	34141.680	0.436	5092.479	46742.508
			sum	53744.507	491479.754



Annexe 7 : Cartes SIG réalisées après les Snow et Soil Moisture Surveys 2010/2011.



Analyse de la biomasse racinaire d'*Abies concolor* en Sierra Nevada grâce à la technologie LiDAR et au traitement d'images

Résumé

Le paramétrage des racines d'un arbre est essentiel pour étudier les flux d'eau et d'énergie dans le sol. Cependant, il est difficile de quantifier la structure tridimensionnelle des racines. La biomasse souterraine d'un sapin du Colorado (*Abies concolor*) dans le bassin versant de l'Observatoire de Zone Critique a été excavée par pression d'air avec un minimum de dommages et étudiée grâce à la technologie de télédétection d'un LiDAR terrestre et à l'analyse d'images. Les racines grossières ont été modélisées grâce à un logiciel de modélisation 3D (Maptex I-Site Studio), initialement conçu pour des applications minières. Le but de cette étude était d'extraire des données telles que longueur racinaire, diamètre, surface, volume et distribution horizontale et verticale des racines. Les racines fines ont été difficiles à traiter avec le logiciel, donc leur étude s'est faite en utilisant des photographies numériques combinées à des outils d'analyse d'image. La distribution des racines grossières diminue logarithmiquement en profondeur de 30 à 155 cm en dessous de la surface du sol. Le ratio biomasse souterraine/biomasse aérienne est d'environ 0,16, avec un volume total racinaire de 0,63 m³ et un volume de biomasse aérienne de 3,95 m³. La densité de longueur des racines grossières augmente radialement en s'éloignant du tronc, jusqu'à environ 180 cm puis diminue jusqu'à 400 cm, où les racines disparaissent. Le LiDAR terrestre s'est révélé très efficace dans l'obtention d'un modèle proche de l'architecture réelle des racines grossières alors que le traitement d'image est meilleur pour quantifier les racines fines.

Mots-clés : excavation racines arbre, biomasse souterraine, LiDAR terrestre, traitement d'images, *Abies concolor*, Forêt Nationale de la Sierra Nevada.

Abstract

Parameterization of tree-roots is essential for studies of water and energy fluxes across land surfaces. However, it is difficult to quantify the three-dimensional structure of roots. The below-ground biomass of a white fir (*Abies concolor*) in the Critical Zone Observatory watershed was excavated by pressurized air with minimal damage and studied using the terrestrial LiDAR remote sensing technology and image processing. Coarse roots were reconstructed digitally with a 3-dimensional modeling software (Maptex I-Site Studio), originally designed for mining applications. The objective of this study was to extract parameters such as root length, diameter, surface, volume and their horizontal and vertical distribution. Fine roots were found difficult to process with the software so these parameters were extracted using digital photography combined with image analysis tools. Coarse root distribution was found to be decreasing logarithmically with depth from 30 to 155 cm below the soil surface. Root/shoot biomass ratio was approximately 0.16, with an estimated root volume of 0.63 m³ and a shoot volume of 3.95 m³. Fine root length density was found to increase radially away from the trunk, until reaching a distance of 180 cm and then decreased out to the edge of the excavation at 400 cm. Terrestrial LiDAR was very effective for obtaining a model close to the actual coarse root architecture while image processing was better for quantifying fine roots.

Key words: tree root excavation, below-ground biomass, Terrestrial LiDAR, image-processing, *Abies concolor*, Sierra National forest