

Ecole doctorale

Systèmes Intégrés en Biologie, Agronomie, Géosciences, Hydrosciences, Environnement (SIBAGHE)

Mémoire présenté en vue d'obtenir

L'Habilitation à Diriger des Recherches

**Caractériser, comprendre et modéliser l'architecture, le
développement et le fonctionnement des systèmes racinaires des
arbres tropicaux plantés – Rôle des racines profondes**

Christophe JOURDAN

Cirad – UMR Eco&Sols

Ecologie Fonctionnelle, Biogéochimie des Sols & des agro-écosystèmes

Soutenance le 17 /12 /2014 devant la commission d'examen composée de :

- Catherine Picon-Cochard, Chargée de Recherches, HDR, INRA Theix	Rapporteur
- Catherine Roumet, Chargée de Recherches, CNRS Montpellier	Rapporteur
- Frédéric Danjon, Chargé de Recherches, HDR, INRA Pierroton	Rapporteur
- Mark Bakker, Ingénieur de Recherches, HDR, Bordeaux Sciences Agro	Examineur
- Alain Mollier, Chargé de Recherches, INRA Bordeaux	Examineur
- Loïc Pagès, Directeur de Recherches, HDR, INRA Montfavet	Examineur
- Philippe Hinsinger, Directeur de Recherches, HDR, INRA Montpellier	Président

Tome 1/1

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier les membres du jury pour avoir accepté de lire et critiquer ce travail et d'y apporter un regard extérieur constructif: Catherine Picon-Cochard, Catherine Roumet, Frédéric Danjon, Alain Mollier, Mark Bakker, Loïc Pagès et Philippe Hinsinger.

Je remercie particulièrement Philippe Hinsinger et Jean-Paul Laclau pour les conseils précieux qu'ils m'ont apportés à la relecture de ce mémoire. Ils ont été mes guides scientifiques au cours de ces dernières années à Montpellier ou bien sur le terrain au Brésil, répondant à toutes mes questions et sollicitations et me transmettant beaucoup de conseils sur l'écriture et la réflexion de mon projet de recherche.

La réalisation de ces travaux n'aurait pas été possible sans le soutien de la direction scientifique du CIRAD et notamment du département PERSYST, merci pour votre confiance et votre soutien, notamment par les crédits incitatifs et les financements de thèses dont j'ai pu bénéficier.

Ces presque vingt années de recherche sont associées au travail de très nombreux étudiants très motivés que je ne peux nommer tous ici, mais qui sont listés dans ce mémoire et qui restent dans ma mémoire. Merci à vous tous !

Je remercie tous les collègues avec qui j'ai collaboré depuis mes débuts dans le monde de la recherche. Aussi bien ceux appartenant au "monde de la modélisation" à AMAP que ceux travaillant sur les racines en surface ou en profondeur, ici ou ailleurs. Je ne citerai pas de noms car j'ai trop peur d'en oublier mais ils se reconnaîtront dans les différentes parties de ce mémoire.

Je remercie tous les techniciens et en particulier D. Arnal qui, par leur rigueur, leur esprit d'initiative, leur volonté et leur amitié, m'ont aidé au quotidien dans mes nombreuses expérimentations sur le terrain à l'étranger, comme plus rarement en France. Sans eux, ce travail n'aurait pas été aussi accompli.

A Vanille et Azaïs, mes lumières au quotidien.

Sommaire

Table des matières

Partie I : <i>Curriculum Vitae</i> , publications, encadrement et enseignement	8
1. Parcours scientifique et professionnel.....	9
1.1. Champ de compétence	9
1.2. Formation	9
1.3. Parcours professionnel.....	10
2. Liste des travaux.....	10
3. Activités d'encadrement	22
3.1. Co-encadrement de thèses [DOC].....	22
3.2. Encadrement de Post-Docs [POSD] et CDD [CDD]	26
3.3. Encadrement de Master 1 [MAS1] et 2 [MAS2].....	26
3.4. Encadrement d'ingénieurs [ING], Licence [LIC], IUT/IUP [IUT]	27
4. Animation de la recherche	28
4.1. Participation au montage et à la réalisation des projets de recherche nationaux et internationaux.....	28
4.1.1. Coordination.....	29
4.1.2. Animation d'un WP	29
4.1.3. Participation	29
4.2. Relecture d'articles de 2004 à 2013	31
4.3. Jurys et comités de thèse	31
4.4. Contribution à l'évaluation des personnes	31
4.5. Expertise scientifique et pour des projets nationaux et internationaux.....	32
4.6. Commissions et animation d'équipe	32
4.7. Organisation de colloques, workshops	32
5. Activité de transfert des connaissances	33
5.1. Activité de formation.....	33
5.2. Activité d'enseignement.....	33
5.3. Activité d'expertise scientifique et technique auprès d'entreprises privées et contribution aux ressources propres	33
Partie II : Bilan des activités de recherche (1992-2014).....	35
1. Introduction générale.....	36

2. Décrire, comprendre et modéliser l'architecture et le développement racinaire des arbres tropicaux plantés.....	37
2.1. Cas du palmier à huile	37
2.1.1. Démarche de l'étude choisie.....	37
2.1.2. Principaux résultats.....	41
2.2. Cas des autres plantes pérennes.....	51
2.2.1. Le cocotier et le cacaoyer.....	51
2.2.2. L'eucalyptus.....	56
3. Estimer la productivité racinaire (bNPP) des écosystèmes tropicaux plantés.....	59
3.1. Mises au point méthodologiques.....	60
3.1.1. Méthode (mini)rhizotron.....	60
3.1.2. Logiciel RhizoDigit© : digitalisation et analyse de la dynamique racinaire.....	61
3.1.3. Méthode biomasse racinaire.....	64
3.1.4. Méthode calcul turnover.....	65
3.2. Principaux résultats sur la dynamique racinaire	66
3.3. Principaux résultats sur l'estimation du turnover racinaire.....	69
3.4. Bilan sur la productivité racinaire	71
4. Conclusion	72
Partie III : Projet de recherche	74
1. Vision synthétique du projet et programmation	75
2. Introduction et objectifs du projet de recherche.....	76
3. Etat de l'art.....	80
4. Caractériser le rôle des racines profondes dans ces écosystèmes tropicaux	85
4.1. Contexte et justification	85
4.2. Cadre méthodologique et résultats attendus	87
4.3. Partenaires scientifiques	89
5. Conclusion	90
Partie IV : Références	91

Listes des Figures

Figure 1. Wordle™ des co-auteurs des articles ACL de C. Jourdan.	11
Figure 2. Wordle™ des titres des publications ACL de C. Jourdan.	12
Figure 3. Excavation totale (A) et partielle (B) d'un palmier adulte et rhizotron vertical installé sur un palmier juvénile de 2 ans après plantation (C) en Côte d'Ivoire.	38
Figure 4. Chaîne de traitement de l'information pour la conception du modèle numérique et la création des maquettes tridimensionnelles par simulation. Selon Jourdan (1995b).	39
Figure 5. Unité architecturale racinaire du palmier à huile. Dessin partiel du système racinaire d'un palmier âgé de 10 ans avec les 8 types racinaires. La perche du récolteur mesure 3,5 m. Les x indiquent des mortalités d'axes suivis ou non de réitérations. D'après Jourdan & Rey (1997a).	41
Figure 6. Différents stade de développement du système racinaire. Le stade radicule (A) est rapidement remplacée par le stade R1 juvénile (B) puis par le stade adulte (C: vue de profil, D: vue de dessus). Les R1 et R2 verticales avec les R1 horizontales participent à l'extension de la zone d'exploitation du palmier en profondeur et en surface respectivement (C). L'émission continue racinaire à la base du stipe et le processus de réitération des R1 permettent une exploitation permanente de l'espace proximal (D). Selon Jourdan (1995b).	43
Figure 7. Modélisation des processus : de croissance (A) par une loi binomiale décalée ; de mortalité (B) par un ajustement empirique d'une fonction polynomiale; de ramification (C) par un automate non orienté (chaîne de Markov) ; et du délai à la ramification (D) par une loi binomiale décalée. Selon Jourdan (1995b).	44
Figure 8. Représentation linéaire de l'axe de référence du palmier à huile (A) et sa représentation structurée (B).	46
Figure 9. Photos (colonne de gauche) et simulations (colonne de droite) de systèmes racinaires de palmier à huile âgés de 1 mois (A, détail B), 1 an (C) et 10 ans (D, racines primaires seules). Modifié selon Jourdan (1995), Jourdan & Rey (1997c).	47
Figure 10. Palmeraie virtuelle âgée de 8 ans (densité 143 arbres/ha) avec des systèmes racinaires uniquement composés de racines primaires. Le système aérien a été simulé également par AMAPsim (Lecoustre). Selon Jourdan et Rey (1997c).	48
Figure 11. Simulation d'un palmier âgé de 8 ans avec 2 grilles virtuelles permettant de calculer des cartes d'impacts racinaires virtuels (encart de droite) à comparer aux observations de terrain (encart de gauche). (Jourdan & Rey, 1997c).	48
Figure 12. Simulation d'une plantation (143 arbres/ha) âgée de 7 ans (A) et 5 ans (B) vue de dessus (haut) et de profil (bas) mettant en évidence la compétition pour l'espace des racines primaires seules (A) et des zones absorbantes des racines primaires et secondaires seules (B). Modifié selon Jourdan (1995b) et Jourdan & Rey (1997c).	49
Figure 13. Evolution de la biomasse racinaire du palmier à huile en plantation (143 arbres/ha) obtenue par simulation (ronds) et validation par des observations (croix) dans plusieurs pays avec du matériel végétal différent. (Jourdan, 1995).	50
Figure 14. Schéma de l'unité architecturale racinaire du cocotier (A) et du cacaoyer (B) montrant les différents types de racines qui la composent. Selon Colas (1997).	52
Figure 15. Simulation d'un Cocotier (A) âgé de 7 ans et d'un cacaoyer (B) âgé de 18 mois. La taille du stipe de cocotier atteint 5 m et le tronc de cacaoyer mesure 1,5m. Le diamètre et la profondeur d'enracinement sont de 5 et 4 m pour le cocotier et de 1,5 et 0,5 m pour le cacaoyer, respectivement. Les parties aériennes ont été également simulées par AMAPsim et fournies par I. Mialet-Serra. Selon Colas (1997).	53
Figure 16. Simulation d'une plantation de culture associée cocotier-cacaoyer âgée de 5 ans pour les cocotiers et de 2 ans pour les cacaoyers. L'appareil aérien a été simulé également par AMAPsim et les maquettes ont été fournies par I. Mialet-Serra. Selon Colas (1997).	54
Figure 17. Maquettes numériques 3D de cocotiers entiers âgés de 6, 20, 35, et 60 ans dans les conditions du Vanuatu. Dans le système racinaire, les racines primaires sont uniquement représentées. (Lamanda et al., 2008).	54
Figure 18. Simulation de cocoteraies âgées de 8 (haut), 20 (milieu) et 80 ans (bas) avec la distribution des systèmes racinaires en vue de dessus (à gauche) et l'interception des racines primaires (à droite) par une carte d'impact virtuelle située au milieu de l'interligne (symbolisée par un rectangle jaune, à gauche). Modifié d'après Lamanda (2005).	55
Figure 19. Représentation schématique des systèmes racinaires de l'Eucalyptus en pépinière à 2 mois (A), et au champ à 4 mois (B), 6 mois (C), 1 an (D), 4 ans (E) et 14 ans (F). Selon Thongo M'Bou (2008).	56
Figure 20. Représentation schématique (gauche) et illustration sur une souche âgée de 14 ans (droite) de l'intercalation sur le système racinaire d'Eucalyptus. Selon Thongo M'Bou (2008).	58
Figure 21. Relation entre le diamètre basal et la longueur totale des types racinaires secondaires (R2) et tertiaires (R3) observés à 1 an (A), 4 ans (B) et 14 ans (C). Selon Thongo M'Bou (2008).	59
Figure 22. Simulation tridimensionnelle d'un eucalyptus entier âgé d'un an en vue de profil (A), de dessus (B) et détail des volumes de sol rhizosphériques (C). Jourdan et al. (in prep.).	59

Figure 23. Cadre de rhizotron dessiné avec côtes pour fabrication et réalisation au Burkina Faso.....	60
Figure 24. Rhizotrons installés dans une plantation d'eucalyptus au Congo (A), de manguier à la Réunion (B), de caféier au Costa Rica (C) et de palmier à huile en Côte d'Ivoire (D). Minirhizotrons installés sur vigne en France (E), sur eucalyptus au fond d'une fosse de 7 m de profondeur au Brésil (F), sur caféier au Costa Rica (G) et détail du tube avant installation définitive (H).....	61
Figure 25. Logiciel RhizoDigit v.1.3. Capture d'écran de l'onglet Rhizotron (A), de l'onglet Séquences (B), de la fenêtre de saisie (D) et gros plan sur la digitalisation d'une feuille de relevés racinaires sur table à digitaliser à l'aide d'un pointeur (C).	62
Figure 26. Modèle conceptuel des données qui recense les différents paramètres et les liens entre eux.....	63
Figure 27. Schéma d'échantillonnage autour d'un eucalyptus détaillant les 4 méthodes utilisées et photo de la superposition des 4 méthodes sur une tranchée de Voronoï. Selon Levillain et al. (2011) [ACL.34].	65
Figure 28. Evolution de la dynamique de croissance des racines grosses (CR) et fines (FR) des palmiers à huile, cocotiers et eucalyptus au cours du temps (d'après Jourdan et al. (2003) [POS.4]).	67
Figure 29. Variations intra-annuelles (2 à 4 ans d'observations) de la dynamique racinaire de l'Hévéa en Thaïlande (A et B, selon Chairungsee et al. 2013 [ACL.47]), du Palmier à huile au Bénin (C, selon Nodichao et al 2011 [ACL.33]) et de l'Eucalyptus au Congo (D, selon Jourdan et al. 2003 [POS.4]).	68
Figure 30. Relation significative ($r = 0.93$) entre l'élongation moyenne mensuelle racinaire et l'humidité du sol sur 4m de profil de sol dans une plantation d'Eucalyptus au Congo âgée de 2 ans (A, d'après Thongo M'Bou 2011) et le potentiel matriciel du sol dans une plantation d'Hévéa âgée de 13 ans en Thaïlande (B, d'après Chairungsee et al. 2013).	68
Figure 31. Longueur cumulée de racines fines de teck dans le nord du Laos (sous exclusion de pluie ou non): la longueur totale des racines fines inférieures à 1 m de profondeur est environ trois fois plus importante qu'au-dessus (Maeght et al., 2012).	77
Figure 32. Taux de décomposition des racines à différentes profondeurs du sol dans les plantations d'hévéas en Thaïlande qui mettent l'accent sur les processus de dégradation biologique plus importants dans les horizons de surface qu'en profondeur (Gonkhamdee et al., 2009).....	77
Figure 33. Expérience d'exclusion (33%) de pluie dans une plantation d'eucalyptus à Itatinga (Brésil), 222 (a) et 855 (b) jours après la plantation. Les fenêtres à optodes (c, d) sont testées en conditions réelles dans des fosses instrumentées jusqu'à 7m de profondeur (e) dans un essai préliminaire où la dynamique du pH rhizosphérique a été caractérisée (f).	79
Figure 34. Maps (2 cm x 9 cm) of roots, mycorrhizae, pH, total fungi and bacteria in the rhizosphere of pine grown in a microcosm experiment in a top soil inoculated with the ectomycorrhizal fungus <i>Rhizopogon roseolus</i> . Selon Cloutier-Hurteau et al. (submitted).....	83
Figure 35. Schéma conceptuel du projet de recherche.....	84

Liste des Tableaux

Tableau 1. Nombre de publications de C. Jourdan co-signées ou non avec les étudiants encadrés.....	11
Tableau 2. Synthèse des publications de C. Jourdan dans les revues internationales à comité de lecture (ACL) avec facteur d'impact (FI en 2012).....	12
Tableau 3. Synthèse des activités d'encadrement de stagiaires et nombre d'encadrement avec publications co-signées. ...	22
Tableau 4. Caractéristiques des différents types racinaire au sein de l'unité architecturale racinaire du palmier à huile. Légende : W-Ligneux, NW-non ligneux, I-croissance indéfinie, D-croissance définie, *-valeur maximale observée qui peut être dépassée, DS-ramification diffuse et sylleptique, NB-non ramifié, R-symétrie radiale, B-symétrie bilatérale, L-élagage à long terme > 6 mois, M-élagage à moyen terme 1-3 mois, S-élagage à court terme < 1mois. Selon Jourdan (1995b).	42
Tableau 5. Estimation des biomasses, production et turnover des racines fines de plusieurs espèces tropicales plantés étudiés au CIRAD. L'échantillonnage a été réalisé par carottage séquentiel (0-30cm de profondeur) et la méthode de calcul par la matrice décisionnelle a été appliquée.....	70
Tableau 6. Production primaire nette aérienne (aNPP) et souterraine (bNPP) de 6 écosystèmes tropicaux plantés. Les valeurs de production racinaire des Eucalyptus ¹ sont ici estimées par TBCA, celles des Eucalyptus ² , Cafésiers et Hévés le sont par sequential coring, les Cocotiers par rhizotrons. ¹ (Epron et al., 2013), ² (Nouvellon et al. 2006), ³ (Charbonnier et al. 2014 soumis. et Defrenet, 2013 [MAS2.4]), ⁴ (Chairungsee et al., 2013, Satakhun et al., 2013), ⁵ (Navarro et al., 2008), ⁶ (Dufrene, 1989).	71

Partie I : *Curriculum Vitae*, publications, encadrement et enseignement

1. Parcours scientifique et professionnel

Christophe Jourdan, 47 ans, né le 17/01/1967 à Nîmes (30), divorcé, 2 enfants.

Chercheur en écophysiologie végétale, spécialisé dans l'étude des systèmes racinaires des arbres de plantation, dans l'**UMR Eco&Sols** (Ecologie Fonctionnelle et Biogéochimie des Sols et des Agro-écosystèmes) au sein du département **PERSYST** (Performances des systèmes de production et de transformation tropicaux) du **CIRAD** (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement).

Adresse : UMR Eco&Sols - SupAgro - campus de la Gaillarde, Bâtiment 12, 2 place Viala, 34060 Montpellier Cedex 2 France. Téléphone : +33 4 99 61 21 57, Fax : +33 4 99 61 21 19, Email : christophe.jourdan@cirad.fr

1.1. Champ de compétence

Disciplines : Ecophysiologie, Physiologie, Agronomie, Ecologie, Modélisation

Filières au CIRAD : Essences forestières, Palmier à huile, Hévéa, Caféier, Cocotier, Manguiier

Thématiques : Ecosystèmes cultivés tropicaux, Biomasse, Changement climatique

Expertise pays : Bénin, Brésil, Burkina Faso, Congo, Costa Rica, Côte d'Ivoire, Indonésie, Laos, La Réunion, Sénégal, Thaïlande, Vanuatu

Domaines scientifiques : physiologie végétale, architecture végétale, biologie végétale, modélisation mathématique de processus biologiques liés aux plantes ; spécialisé dans l'étude des systèmes racinaires.

1.2. Formation

1995 Doctorat en Sciences, Spécialité Biologie des Systèmes Intégrés, agronomie, environnement, Discipline Physiologie, Option Bases de la Production Végétale, Université Montpellier II, mention très honorable avec les félicitations du jury.

1991 Diplôme d'Etude Approfondies (DEA) Bases de la production végétale, Option Amélioration des plantes, Université Montpellier II (USTL), mention AB

1990 Maîtrise Biologie des Organismes et des Populations, Option Biologie Végétale, Université Montpellier II (USTL), mention AB

1990 Licence Biologie des Organismes, Université Montpellier II (USTL), mention B

1988 Math Spé Bio, lycée Thiers, Marseille

1987 Math Sup Bio, lycée Thiers, Marseille

1986 Baccalauréat série C, Lycée Charles Gide, Uzès

1.3. Parcours professionnel

01/2011 - ... : CDI au CIRAD-PERSYST, **UMR Eco&Sols**, basé à Montpellier SupAgro, chercheur en Ecophysiologie spécialisé dans les systèmes racinaires des arbres tropicaux plantés

01/2005 – 12/2010 : CDI au CIRAD-CP (12/2006) puis CIRAD-PERSYST (01/2007), **UR Ecosystème de Plantations**, basé à Montpellier, chercheur en Ecophysiologie spécialisé dans le système racinaire de l'eucalyptus, hévéa, caféier

03/1997 – 12/2004 : CDI au CIRAD-CP, **UR Cocotier**, basé à Montpellier et affecté temporairement (2 fois 4 mois) au Vanuatu, chercheur en Ecophysiologie spécialisé dans le système racinaire du cocotier

04/1996 - 02/1997 : CDI au CIRAD-CP, **UR Palmier à huile**, basé à Montpellier, chercheur en Ecophysiologie spécialisé dans le système racinaire du palmier à huile

10/1995 - 04/1996 : CDD (6 mois) au CIRAD-DG, **Unité AMAP**, basé à Montpellier, chercheur en Modélisation de l'architecture des plantes

10/1994 – 09/1995 : Contrat (1 an) d'**Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (ATER)** pour enseigner en DEUG à l'université Montpellier II

10/1991 – 09/1994 : Contrat (3 ans) de **Moniteur** (64h/an d'enseignement en DEUG) à l'université Montpellier II

10/1991 – 09/1994 : Contrat (3 ans) de **Doctorat** financé par le Ministère de la Recherche et de la Technologie à l'université Montpellier II

2. Liste des travaux

J'ai classé l'ensemble de mes publications (hors rapports d'études et de missions) depuis le début de ma carrière en utilisant la nomenclature de l'AERES, en différenciant les articles publiés dans les revues à comité de lecture avec facteur d'impact (ACL), des revues sans facteur d'impact (ACLN), des chapitres d'ouvrage (CHA), des communications orales (COM) ou posters (POS) présentés dans des conférences nationales ou internationales, des mémoires académiques (MEM), des logiciels (SOFT), des productions multimédias (MEDIA) ou articles de vulgarisation (VULG).

Au total, j'ai cosigné 147 publications dont 47 articles dans des revues internationales à comité de lecture avec facteur d'impact (ACL) dont 34 avec des étudiants que j'encadrais (**Tableau 1**). Ces 47 articles ont été écrits avec plus de 150 co-auteurs différents mais les noms les plus cités sont des chercheurs qui font partie de mon équipe (**Figure 1**).

J'ai cosigné 82 publications à des congrès sous forme de communications orales (69) et posters (13) dont 47 avec les étudiants encadrés (**Tableau 1**). Je possède un H-index de 16, avec un nombre total de citations de 839 et une moyenne de 12,7 citations par article (<https://www.scopus.com/authid/detail.url?origin=AuthorEval&authorId=7005740556>).

Les systèmes racinaires des plantations de palmier à huile, de cocotier et d'acacia sortent ensuite avec architecture, croissance, développement, distribution, biomasse, eau et modélisation comme mots clés. Une analyse avec mot-clés donnerait sans doute plus de détails sur les processus et traits racinaires.

Les noms des étudiants que j'ai encadré ou co-encadré et avec qui j'ai co-signé des publications sont soulignés dans la liste ci-après.

Articles publiés dans les revues à facteur d'impact [ACL]

2013

[ACL.47] - Chairungsee N., Gay F., Thaler P., Kasemsap P., Thanisawanyangkura S., Chantuma A. and C. Jourdan 2013. Impact of tapping and soil water status on fine root dynamics in a rubber tree plantation in Thailand. *Frontiers in Plant Science, Function. Ecology*, 4, Art.538. <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2013.00538>

[ACL.46] - Laclau J.-P., E.A. da Silva, G.R. Lambais, M. Bernoux, G. le Maire, J.L. Stape, J.-P. Bouillet, J.L.M. Gonçalves, C. Jourdan and Y. Nouvellon 2013. Dynamics of soil exploration by fine roots down to a depth of 10 m throughout the entire rotation in Eucalyptus grandis plantations. *Frontiers in Plant Science, Function. Ecology*, 4, Art.243. <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2013.00243>

[ACL.45] - Pierret, A., Gonkhamdee, S., Jourdan, C., Maeght, J.-L. 2013 IJ_Rhizo: an open-source software to measure scanned images of root samples. *Plant and Soil*, pp. 1-9 (Article online). <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-013-1795-9>

[ACL.44] - Laclau, J.-P., Nouvellon, Y., Reine, C., Gonçalves, J.L.M., Krushe, A.V., Jourdan, C., le Maire, G., Bouillet, J.-P. 2013. Mixing Eucalyptus and Acacia trees leads to fine root over-yielding and vertical segregation between species. *Oecologia* 172 (3), 903-913. <http://dx.doi.org/10.1007/s00442-012-2526-2>

[ACL.43] - Mao Z., Bonis M.L., Rey H., Saint-André L., Stokes A., Jourdan C. 2013. Which processes drive fine root elongation in a natural mountain forest ecosystem? *Plant Ecology and Diversity*, 6 (2): 231-243. [20130618]. <http://dx.doi.org/10.1080/17550874.2013.788567>

[ACL.42] - Mao Z., Jourdan C., Bonis M-L., Pailler F., Rey H., Saint-André L. and Stokes A. 2013 Modelling root demography in heterogeneous mountain forests and applications for slope stability analysis. *Plant and Soil*, 1-26 (Article online). <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-012-1324-2>

[ACL.41] - Thwe AA., Vercambre G., Gautier H., Pagès L., Jourdan C., Gay F., Kasemsap P., 2013. Dynamic shoot and root growth at different developmental stages of tomato (*Solanum lycopersicum* Mill.) under acute ozone stress, *Scientia Horticulturae*, 150, 317-325. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2012.11.015>.

[ACL.40] - Brunner I., Bakker M., Björk R., Hirano Y., Lukac M., Aranda X., Børja I., Eldhuset T., Helmisaari H., Jourdan C., Konôpka B., López B., Miguel Pérez C., Persson H. and Ostonen I. 2013 Fine-root turnover rates of European forests revisited: an analysis of data from sequential coring and ingrowth cores. *Plant and Soil*, 1-16. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-012-1313-5>

2012

[ACL.39] - Putranto R-A., Sanier C., Leclercq J., Duan C., Rio M., Jourdan C., Thaler P., Sabau X., Argout X. and Montoro P. 2011 Differential gene expression in different types of *Hevea brasiliensis* roots. *Plant Science* In Press. <http://dx.doi.org/10.1016/j.plantsci.2011.08.005>

[ACL.38] - Bonneu A., Dumont Y., Rey H., Jourdan C., Fourcaud T. 2012. A minimal continuous model for simulating growth and development of plant root systems. *Plant and soil*, 354 (1-2): 211-227. [20120514]. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-011-1057-7>

[ACL.37] - Mao Z., Saint-André L., Genet M., Mine F.X., Jourdan C., Rey H., Courbaud B., Stokes A. 2012. Engineering ecological protection against landslides in diverse mountain forests: Choosing cohesion models. *Ecological engineering*, 45: 55-69. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.03.026>

2011

[ACL.36] - Christina M., Laclau J.P., Gonçalves J.L.M., Jourdan C., Nouvellon Y., Bouillet J.P. 2011. Almost symmetrical vertical growth rates above and below ground in one of the world's most productive forests. *Ecosphere*, 2 (3): art.27 [10] p. <http://www.esajournals.org/doi/pdf/10.1890/ES10-00158.1>

[ACL.35] - Da Silva E.V., Bouillet J.P., De Moraes Gonçalves J.L., Abreu Junior C.H., Trivelin P.C.O., Hinsinger P., Jourdan C., Nouvellon Y., Stape J.L., Laclau J.P. 2011. Functional specialization of Eucalyptus fine roots: contrasting potential uptake rates for nitrogen, potassium and calcium tracers at varying soil depths. *Functional ecology*, 25 (5): 996-1006. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2435.2011.01867.x>

[ACL.34] - Levillain J., Thongo M'Bou A., Deleporte P., Saint André L., Jourdan C. 2011. Is the simple auger coring method reliable for below-ground standing biomass estimation in *Eucalyptus* forest plantations?. *Annals of botany*, 108 (3): 221-230. <http://dx.doi.org/10.1093/aob/mcr102>

[ACL.33] - Nodichao L., Chopart J.L., Roupsard O., Vauclin M., Ake S., Jourdan C. 2011. Genotypic variability of oil palm root system distribution in the field. Consequences for water uptake. *Plant and soil*, 341 (1-2): 505-520. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-010-0663-0>

[ACL.32] - Hinsinger P., Brauman A., Devau N., Gérard F., Jourdan C., Laclau J.P., Le Cadre E., Jaillard B., Plassard C. 2011. Acquisition of phosphorus and other poorly mobile nutrients by roots. Where do plant nutrition models fail? *Plant and Soil*, 348 (1-2): 29-61. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-011-0903-y>

2010

[ACL.31] - Thongo M'Bou A., Saint-André L., De Grandcourt A., Nouvellon Y., Jourdan C., Mialoundama F.,

- Epron D. 2010. Growth and maintenance respiration of roots of clonal *Eucalyptus* cuttings: Scaling to stand-level. *Plant and soil*, **332** (1-2): 41-53. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-009-0272-y>
2009
- [ACL.30] - **Charles-Dominique T., Mangenet T., Rey H., Jourdan C., Edelin C.** 2009. Architectural analysis of root system of sexually vs. vegetatively propagated yam (*Dioscorea rotundata* Poir.), a tuber monocot. *Plant and soil*, **317** (1-2) : 61-77. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-008-9788-9>
- [ACL.29] - **Roupsard O., Le Maire G., Nouvellon Y., Dautat J., Jourdan C., Navarro M., Bonnefond J.M., Saint-André L., Mialet-Serra I., Hamel O., Rouzière A., Bouillet J.P.** 2009. Scaling-up productivity (NPP) using light or water use efficiencies (LUE, WUE) from a two-layer tropical plantation. *Agroforestry systems*, **76** (2): 409-422. <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-008-9191-9>
- [ACL.28] - **Da Silva E.V., De Moraes Gonçalves J.L., De Freitas Coelho S.R., Moreira e Moreira R., De Miranda Mello S.L., Bouillet J.P., Jourdan C., Laclau J.P.** 2009. Dynamics of fine root distribution after establishment of monospecific and mixed-species plantations of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium*. *Plant and soil*, **325** (1-2): 305-318. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-009-9980-6>
2008
- [ACL.27] - **Alpizar E., Dechamp E., Lapeyre-Montes F., Guilhaumon C., Bertrand B., Jourdan C., Lashermes P., Etienne H.** 2008. *Agrobacterium rhizogenes*-transformed roots of Coffee (*Coffea arabica*): Conditions for long-term proliferation, and morphological and molecular characterization. *Annals of botany*, **101** (7): 929-940. <http://dx.doi.org/10.1093/aob/mcn027>
- [ACL.26] - **Thongo M'Bou A., Jourdan C., Deleporte P., Nouvellon Y., Saint-André L., Bouillet J.P., Mialoundama F., Mabila A., Epron D.** 2008. Root elongation in tropical *Eucalyptus* plantations: Effect of soil water content. *Annals of Forest Science*, **65** (5): 609. <http://dx.doi.org/10.1051/forest:2008038>
- [ACL.25] - **Roupsard O., Dautat J., Nouvellon Y., Deveau A., Feintrenie L., Saint-André L., Mialet-Serra I., Braconnier S., Bonnefond J.M., Berbigier P., Epron D., Jourdan C., Navarro M., Bouillet J.P.** 2008. Cross-validating Sun-shade and 3D models of light absorption by a tree-crop canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, **148** (4): 549-564. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.11.002>
- [ACL.24] - **Jourdan C., Silva E.V., Gonçalves J.L.M., Ranger J., Moreira M.R., Laclau J.P.** 2008. Fine root production and turnover in Brazilian *Eucalyptus* plantations under contrasting nitrogen fertilization regimes. *Forest ecology and management*, **256** (3): 396-404. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2008.04.034>
- [ACL.23] - **Laclau J.P., Bouillet J.P., Gonçalves J.L.M., Silva E.V., Jourdan C., Cunha M.C.S., Moreira M.R., Saint-André L., Maquère V., Nouvellon Y., Ranger J.** 2008. Mixed-species plantations of *Acacia mangium* and *Eucalyptus grandis* in Brazil: 1. Growth dynamics and aboveground net primary production. *Forest ecology and management*, **255** (12): 3905-3917. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2007.10.049>
- [ACL.22] - **Marsden C., Nouvellon Y., Thongo M'Bou A., Saint-André L., Jourdan C., Kinana A., Epron D.** 2008. Two independent estimations of stand-level root respiration on clonal *Eucalyptus* stands in Congo: Up scaling of direct measurements on roots versus the trenched-plot technique. *New Phytologist*, **177** (3): 676-687. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02300.x>
- [ACL.21] - **Navarro M., Jourdan C., Sileye T., Braconnier S., Mialet-Serra I., Saint-André L., Dautat J., Nouvellon Y., Epron D., Bonnefond J.M., Berbigier P., Rouzière A., Bouillet J.P., Roupsard O.** 2008. Fruit development, not GPP, drives seasonal variation in NPP in a tropical palm plantation. *Tree Physiology*, **28** (11): 1661-1674. <http://dx.doi.org/10.1093/treephys/28.11.1661>
- [ACL.20] - **Mialet-Serra I., Clément-Vidal A., Roupsard O., Jourdan C., Dingkuhn M.** 2008. Whole-plant adjustments in coconut (*Cocos nucifera*) in response to sink-source imbalance. *Tree physiology*, **28** (8): 1199-1209. <http://dx.doi.org/10.1093/treephys/28.8.1199>
- [ACL.19] - **Lamanda N., Dautat J., Jourdan C., Martin P., Malézieux E.** 2008. Using 3D architectural models to assess light availability and root bulkiness in coconut agroforestry systems. *Agroforestry systems*, **72** (1): 63-74. <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-007-9068-3>
- [ACL.18] - **Bouillet J.P., Laclau J.P., Gonçalves J.L.M., Moreira M.Z., Trivelin P.C.O., Jourdan C., Silva E.V., Piccolo M.C., Tsai S.M., Galiana A.** 2008. Mixed-species plantations of *Acacia mangium* and *Eucalyptus grandis* in Brazil: 2. Nitrogen accumulation in the stands and biological N₂ fixation. *Forest Ecology and Management*, **255** (12): 3918-3930. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2007.10.050>
2007
- [ACL.17] - **Tobin B., Cermak J., Chiatante D., Danjon F., Di Iorio A., Dupuy L., Eshel A., Jourdan C., Kallikokski T., Laiho R., Nadezhdina N., Nicoll B., Pagès L., Silva J., Spanos I.** 2007. Towards developmental modelling of tree root systems. *Plant Biosystems*, **141** (3): 481-501. <http://dx.doi.org/10.1080/11263500701626283>
2006
- [ACL.16] - **Costes E., Garcia-Villanueva E., Jourdan C., Regnard J.L., Guédon Y.** 2006. Co-ordinated growth between aerial and root systems in young apple plants issued from *In vitro* culture. *Annals of botany*, **97** : 85-96. <http://dx.doi.org/10.1093/aob/Fmci003>
- [ACL.15] - **Roupsard O., Bonnefond J.M., Irvine M., Berbigier P., Nouvellon Y., Dautat J., Taga S., Hamel O., Jourdan C., Saint-André L., Mialet-Serra I., Labouisse J.P., Epron D., Joffre R., Braconnier S., Rouzière A., Navarro M., Bouillet J.P.** 2006. Partitioning energy and evapo-transpiration above and below a tropical palm canopy. *Agricultural and forest meteorology*, **139** (3-4): 252-268. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.07.006>
- [ACL.14] - **Epron D., Nouvellon Y., Deleporte P., Ifo S., Kazotti J.G.M., Thongo M'Bou A., Mouvondy W.J., Saint-André L., Roupsard O., Jourdan C., Hamel O.** 2006. Soil carbon balance in a clonal *Eucalyptus* plantation in Congo: effects of logging on carbon inputs and soil CO₂ efflux. *Global change biology*, **12** (6): 1021-1031.

<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01146.x>

2005

[ACL.13] - **Mialet-Serra I., Clément A., Sonderegger N., Roupsard O., Jourdan C., Labouisse J.P., Dingkuhn M.** 2005. Assimilate storage in vegetative organs of coconut (*Cocos nucifera*). *Experimental agriculture*, **41**: 161-174. <http://dx.doi.org/10.1017/S0014479704002467>

[ACL.12] - **Saint-André L., Thongo M'Bou A., Mabiala A., Mouvondy W.J., Jourdan C., Roupsard O., Deleporte P., Hamel O., Nouvellon Y.** 2005. Age-related equations for above- and below-ground biomass of a *Eucalyptus* hybrid in Congo. *Forest ecology and management*, **205** (1-3): 199-214. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2004>.<http://dx.doi.org/10.006>

2004

[ACL.11] - **Bonneau X., Husni M., Philippe R., Somchit N., Jourdan C., Lubis N.** 2004. Discovery of a factor limiting yields in a coconut plantation on peat: The insect pest *Sufetula* spp. *Experimental agriculture*, **40** (1): 53-64. <http://dx.doi.org/10.1017/S0014479703001455>

[ACL.10] - **Epron D., Nouvellon Y., Roupsard O., Mouvondy W.J., Saint-André L., Joffre R., Jourdan C., Bonnefond J.M., Berbigier P., Hamel O.** 2004. Spatial and temporal variations of soil respiration in a *Eucalyptus* plantation in Congo. *Forest ecology and management*, **202** (1-3): 149-160. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2004.07.019>

[ACL.9] - **Saint-André L., Thongo A., Mabiala A., Mouvondy W., Jourdan C., Roupsard O., Deleporte P., Hamel O., Nouvellon Y.** 2004. A complete set of weighted equations taking stand age into account for above- and below-ground biomass of an *Eucalyptus* hybrid in Congo. *Forest Ecology and Management*, **205**: 199-214. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2004.10.006>

2002

[ACL.8] - **Bouillet J.P., Laclau J.P., Arnaud M., Thongo M'Bou A., Saint-André L., Jourdan C.** 2002. Changes with age in the spatial distribution of roots of *Eucalyptus* clone in Congo: impact on water and nutrient uptake. *Forest ecology and management*, **171** (1-2): 43-57. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00460-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00460-7)

2000

[ACL.7] - **Jourdan C., Michaux-Ferrière N., Perbal G.** 2000. Root system architecture and gravitropism in the oil palm. *Annals of Botany*, **85** (6): 861-868. <http://dx.doi.org/10.1006/anbo.2000.1148>

1997

[ACL.6] - **Jourdan C., Rey H.** 1997. Architecture and development of the oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) root system. *Plant and Soil*, **189**: 33-48. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1004290024473>

[ACL.5] - **Jourdan C., Rey H.** 1997. Modelling and simulation of the architecture and development of the oil-palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) root system: I. The model. *Plant and Soil*, **190** (2): 217-233. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1004218030608>

[ACL.4] - **Jourdan C., Rey H.** 1997. Modelling and simulation of the architecture and development of the oil-palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) root system: II. Estimation of root parameters using the RACINES postprocessor. *Plant and Soil*, **190** (2): 235-246. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1004270014678>

1996

[ACL.3] - **Jourdan C.** 1996. A hard day's work on the cyber-farm. *New Scientist*, **2060** (1996/12/14): 11 (1 p).

1995

[ACL.2] - **Jourdan C., Rey H., Guédon Y.** 1995. Architectural analysis and modelling of the branching process of the young oil-palm root system. *Plant and Soil*, **177**: 63-72. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1004290024473>

1992

[ACL.1] - **Jourdan C., Enjalric F., Lardet L., Michaux-Ferrière N., Berger A., Carron M.P.** 1992. Caractéristiques hydriques et histologiques de vitroplants d'*Hevea brasiliensis* (Müll.-Arg.) en cours de micropropagation. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Série 3. Sciences de la Vie*, **315** : 395-401.

Articles publiés dans les revues à comité de lecture, sans facteur d'impact [ACLN]

[ACLN.3] - **Roupsard O., Lamanda N., Jourdan C., Navarro M., Mialet-Serra I., Dauzat J., Sileye T.** 2008. Coconut carbon sequestration, Part 1 / Highlights on carbon cycle in coconut plantations. *Cord*, **24** (1): 1-15.

[ACLN.2] - **Nodichao L., Aké S., Jourdan C.** 2007. Effect of potassium and middle water deficit on relative transpiration rate and potassium absorption of six genotypes of oil palm at young stage. *Agronomie africaine*, **19** (2) : 151-160.

[ACLN.1] - **Nodichao L., Aké S. et Jourdan C.,** 2008. Développement du système racinaire chez le palmier à huile selon l'origine génétique et le régime hydropotassique du sol. *Agronomie Africaine*, **20** (3), 277-289.

Chapitres d'ouvrage [CHA]

[CHA.3] - **Roupsard O., Le Maire G., Nouvellon Y., Dauzat J., Jourdan C., Navarro M., Bonnefond J.M., Saint-André L., Mialet-Serra I., Hamel O., Rouzière A., Bouillet J.P.** 2010. Scaling-up productivity (NPP) using light or water use efficiencies (LUE, WUE) from a two-layer tropical plantation. In: Jose Shibu (ed.). *Agroforestry for commodity production: ecological and social dimensions*. Dordrecht: Springer [Pays-Bas], p. 145-158.

[CHA.2] - **Jourdan C., Rey H and Guédon Y.** 1995. Modelling of the branching process of the root system of young oil palm seedlings. A Markovian approach. In: Eds F Baluska, M Ciamporova, O Gasparikova and P W Barlow. *Structure and Function of Roots*. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 113-119.

[CHA.1] - **Jourdan C., Enjalric F., Lardet L., Michaux-Ferrière N., Berger A., Carron M.P.** 1994. Micropropagation d'*Hevea brasiliensis* : caractéristiques hydriques = Micropropagation of *Hevea brasiliensis*:

hydric characteristics. In: Teisson Claude (ed.). *La culture in vitro de plantes tropicales*. Montpellier: CIRAD, p.27-30.

Communications orales [COM] et posters [POS]

[POS.13] – **Magnier B., Aberkane A., Borianne P., Montesinos P. and C. Jourdan 2014** Multiscale crest line extraction based on half gaussian kernels. ICASSP (IEEE International Conference on acoustics, speech and signal processing. May 4-9, Firenze, Italy. http://www.icassp2014.org/technical_program.html

[COM.69] – **GASTALDI E., TOUCHALEAUME F., CHEVILLARD A., BERGER B., JOURDAN C., COLL P., TOUSSAINT M., RODRIGUES C. 2013.** Agronomic performances of biodegradable films as an alternative to polyethylene mulches in vineyards. 18th International Symposium GIESCO, 7-11/07/2013, Porto, Portugal. [Talk]

[COM.68] – **Jourdan C., Aholoukpé H., Pujianto and J-P. Caliman 2013.** Does oil-palm root system uniformly distribute in standard plantation? ICOPE, international workshop on “Sustainable management of soils under palm plantings”. 7-8 November 2013, Hotel Aryaduta, Medan, Indonesia. [Talk] http://icope-series.com/workshops_detail/2

[COM.67] - **Hinsinger, P.; Cloutier-Hurteau, B.; Jourdan, C.; Laclau, J.P. 2012** The Roots of our soils. In: *Roots to the Future. Proceedings of the 8th Symposium of the International Society of Root Research.* 26-29 June 2012, University of Dundee, Scotland. [Invited talk]

[POS.12] - **Mao, Z.; Bonis, M.L.; Rey, H.; Saint-Andre, L.; Stokes, A.; Jourdan, C. 2012** Which processes drive fine root elongation in natural forest ecosystem ? In: *Roots to the Future. Proceedings of the 8th Symposium of the International Society of Root Research.* 26-29 June 2012, University of Dundee, Scotland. [Poster]

[COM.66] - **Mao Z., C. Jourdan, M.L. Bonis, F. Pailler, H. Rey, L. Saint-André, A. Stokes 2012.** Seasonality of root demography and its impact on root reinforcement in mountain forests at different altitudes. “Soil Bio- and Eco-engineering. The Use of Vegetation to Improve Slope Stability” Vancouver, Canada, 23-27 July 2012. [Talk].

[COM.65] - **Stokes A., H. Rey, C. Jourdan, T. Fourcaud 2012.** Modelling and Upscaling of (the Hidden Half of) Vegetation for Ecological Engineering Applications. 3rd International Conference: Rhizosphere, Perth, Australia. September 2012. [Keynote Talk].

[POS.11] - **Waithaisong, K., Robin, A., Jourdan, C, Villeneuve, M, and Plassard, C. 2012** Diversité des champignons ectomycorhiziens en plantations forestières (eucalyptus monoculture, acacia monoculture, association des deux espèces) au Congo. Journées francophones sur les Mycorhizes, 2-7 September, Nancy, France. [Poster]

[POS.10] - **Wang Y., J. Kim, C. Jourdan, H. Rey, A. Stokes, Z. Mao 2012** Using rhizotrons to estimate the dynamics of additional cohesion. “Soil Bio- and Eco-engineering. The Use of Vegetation to Improve Slope Stability” Vancouver, Canada, 23-27 July 2012. [Poster]

[COM.64] - **Costa Rodrigues G., Delgado Rojas J.S., Rouspard O., Leroy T., Pot D., Moreira M.Z., Verdeil J.L., Dauzat J., Jourdan C., Carvalho Andrade A., Marraccini P. 2011.** Resultados preliminares da plasticidade fenotípica em plantas de café (*Coffea arabica* cv. Rubi e Iapar59) submetidas ao déficit hídrico em condições de campo = Preliminary results on phenotypic plasticity of coffee (*Coffea arabica* cv. Rubi and Iapar59) plants in response to water constraint under field conditions. In: Ed. Afonso Junior, P.C. *Anais do VII Simposio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, Araxa, Brasil, 22 a 25 de Agosto de 2011: resumos expandidos.* Brasília : Embrapa Café, [5] p. Simposio de Pesquisa dos Cafés do Brasil. 7, 2011-08-22/2011-08-25, Araxa, Brésil.

[COM.63] - **Rey H., Barczy J.F., Jourdan C. 2011.** DigR: how to model root system in its environment? 1 - The model [Abstract]. *IBC2011. XVIII International Botanical Congress, 23-30 July 2011, Melbourne, Australia.* s.l.: s.n., p. 176-177 International Botanical Congress. 18, 2011-07-23/2011-07-30, Melbourne, Australie. [20111116]. http://www.ibc2011.com/downloads/IBC2011_Abstract_Book.pdf

[COM.62] - **Rodrigues G.C., Rojas J.S.D., Rouspard O., Leroy T., Pot D., Moreira M.Z., Verdeil J.L., Dauzat J., Jourdan C., Andrade A.C., Marraccini P. 2011.** Preliminary results on phenotypic plasticity of coffee (*Coffea arabica* Cv. Rubi and Iapar59) plants in response to water constraint under field conditions. In: *ASIC. 23rd International Conference on Coffee Science (ASIC 2010), October 03-08, 2010, Bali, Indonesia.* s.l.: s.n., p. 698-703 International Conference on Coffee Science. 23, 2010-10-03/2010-10-08, Bali, Indonésie.

[POS.9] - **Rouspard O., Gomez Delgado F., Charbonnier F., Benegas L., Taugourdeau S., Kinoshita R., Moussa R., Dreyer E., Lacoite A., Rapidel B., Pérez A., Barquero A., Rivera Wilson C., Navarro M., Jourdan C., Le Maire G., Thaler P., Bonnefond J.M., Harmand J.M., Vaast P. 2011.** The CAFNET/Coffee-Flux project: evaluating water, carbon and sediment Ecosystem Services in a coffee agroforestry watershed of Costa Rica: [Poster]. In: *ASIC. 23rd International Conference on Coffee Science (ASIC 2010), October 03-08, 2010, Bali, Indonesia.* s.l.: s.n., 1 p. International Conference on Coffee Science. 23, 2010-10-03/2010-10-08, Bali, Indonésie.

[COM.61] - **Bonneu A., Dumont Y., Jourdan C., Rey H., Fourcaud T. 2010.** Splitting advection, diffusion and reaction processes in a continuous model of root growth. In: Dejong Theodore M. (ed.), Da Silva David (ed.). *Proceedings of the 6th International Workshop on Functional-Structural Plant Models, FSPM 2010, September 12-17, 2010, University of California, Davis (USA).* Davis: University of California, p. 194-196 International Workshop on Functional-Structural Plant Models. 6, 2010-09-12/2010-09-17, Davis, Etats-Unis. [20101122]. http://www.plantsciences.ucdavis.edu/symposium/2010/fspm/pdf/Proceedings_FSPM2010_printversion.pdf

[POS.8] - **Levillain J., Thongo M'Bou A., Jourdan C., Saint-André L. 2010.** Estimations of fine root biomass in eucalyptus plantations. A comparison of 4 sampling methods: [Poster]. *Carbo Africa Open Conference, 17-19 March 2010, Pointe Noire, Congo.* s.l.: s.n., 1 p. CarboAfrica Open Conference, 2010-03-17/2010-03-19, Pointe Noire, Congo.

[COM.60] - **Mialet-Serra I., Clément-Vidal A., Legros S., Caliman J.P., Siregar F.A., Jourdan C., Dingkuhn M. 2010.** Non-structural carbohydrate pools in vegetative organs of two tropical palms: The coconut and the oil

- palms: [Abstract]. In: 05/2010. *International Symposium on the Biology of the Palm Family, Montpellier, France, 05-05*. s.l.: s.n., 1 p. International Symposium on the Biology of the Palm Family, 2010-05-05/2010-05-07, Montpellier, France.
- [COM.59] - Nouvellon Y., Rounsard O., Bonnefond J.M., Epron D., Stape J.L., Saint-André L., da Rocha H., Hamel O., Bouillet J.P., Thongo Mbou A., Kinana A., Mabilia A., Le Maire G., Marsden C., Jourdan C., Laclau J.P.**, 2010. Carbon sequestration, water-use, and water-use efficiencies in eucalypt plantations in Congo (and Brazil). In: Open Science Conference "Toward a biophysical carbon accounting in Africa and perspectives for REDD and CDM", 2010-03-17/2010-03-19, Pointe-Noire, Congo.
- [COM.58] - Zhun M.; Stokes, A.; Jourdan, C.; Rey, H.; Courbaud, B.; Saint-André, L.** 2010. How the spatial variation of tree roots affects slope stability. [Abstract]. In : EGU General Assembly 2010, held 2-7 May, 2010 in Vienna, Austria, p.15293
- [COM.57] - Mialet-Serra I., Clément-Vidal A., Legros S., Caliman J.P., Siregar F.A., Jourdan C., Dingkuhn M.** 2010. Non-structural carbohydrate pools in vegetative organs of two tropical palms: The coconut and the oil palms: [Abstract]. In: 05/2010, Montpellier, France. International Symposium on the Biology of the Palm Family, 05-05. s.l.: s.n., 1 p. International Symposium on the Biology of the Palm Family, 2010-05-05/2010-05-07, Montpellier, France.
- [COM.56] - Bouillet J.P., Levillain J., Deleporte P., Gonçalves J.L.M., Nouvellon Y., Gava J.L., Silva C.R., Leite F.P., Moreira M.Z., Thongo M'Bou A., Galiana A., Trivelin P.C.O., Jourdan C., Laclau J.P.** 2010. Ecological intensification of the silviculture in Eucalyptus plantations in Brazil and Congo through *Acacia mangium* association. In: Wery Jacques (ed.), Shili-Touzi I. (ed.), Perrin A. (ed.). *Proceedings of Agro 2010: the XIth ESA Congress, August 29th - September 3rd, 2010, Montpellier, France*. Montpellier : Agropolis international, p. 279-280 ESA Congress. 11, 2010-08-29/2010-09-03, Montpellier, France.
- [COM.55] - Saint-André L., Nouvellon Y., Laclau J.P., Gomat H., Bikindou F., Thongo Mbou A., Versini A., D'Annunzio R., Derrien D., Zeller B., Ranger J., Levillain J., Lemaire G., Jourdan C., Deleporte P., Bouillet J.P.**, 2010. E-Dendro. A soil-plan model operating at stand scale to assess the impact of silviculture on the biogeochemical cycles of planted forest ecosystems. In: Open Science Conference "Toward a biophysical carbon accounting in Africa and perspectives for REDD and CDM", 2010-03-17/2010-03-19, Pointe-Noire, Congo.
- [COM.54] - Thongo A., Ndeko A., Villar E., Levillain J., Gion J.M., Jourdan C.**, 2010. Root plasticity of two eucalyptus clones under drought conditions in Congo. In: Open Science Conference "Toward a biophysical carbon accounting in Africa and perspectives for REDD and CDM", 2010-03-17/2010-03-19, Pointe-Noire, Congo.
- [COM.53] - Nouvellon, Y., Stape, J.-L., Bonnefond, J.-M., Bouillet, J.-P., Saint-André, L., Hamel, O., Epron, D., Le Maire, G., Rounsard, O., Da Rocha, H., Gonçalves, J.L.M., Marsden, C., Jourdan, C., Laclau, J.-P.**, 2009. Carbon sequestration and water-use by eucalypt plantations in Congo and Brazil. In: Communications at the International Conference "Knowledge-based management of tropical rainforests", Cayenne, French Guyana, November 22-28.
- [COM.52] - Jourdan C., Ndeko A., Levillain J. et A. Thongo**, 2008. Plasticité racinaire chez l'eucalyptus au champ sous contrainte hydrique au Congo. Communication au Groupe d'Etude de l'Arbre (GEA), « Plasticité phénotypique des arbres », 2-3/10/2008, CIRAD, Montpellier, France.
- [COM.51] - Bouillet J.P., Laclau J.P., Gonçalves J.L.M., Moreira M.Z., Trivelin P.C.O., Jourdan C., Galiana A.** 2008. Mixed-species plantations of *Acacia mangium* and *Eucalyptus grandis* in Brazil. In: Sadanandan Nambiar E.K. (ed.). *Site management and productivity in tropical plantation forests: Proceedings of Workshops in Piracicaba (Brazil) 22-26 November 2004 and Bogor (Indonesia) 6-9 November 2006*. Jakarta: CIFOR, p. 157-172. Workshop on Site Management and Productivity in Tropical Plantation Forest, 2004-11-22/2004-11-26, Piracicaba, Brésil.
- [COM.50] - Montoro P., Carron M.P., Clément-Demange A., Jourdan C., Nurhaimi-Haris, Sumarmadji, Sumaryono.** 2008. Integration of biotechnologies for rubber tree improvement. What about rootstock clones?. In: Eds. M. Supriadi, H. suryaningtyas, Siswanto, Nurhaimi Haris, sumaryono. *International Rubber Research and Development Board Workshop on Rubber Plant Materials, Bogor, Indonesia, 28-29 October 2008*. Medan: IRRI, p. 135-138 International Rubber Research and Development Board Workshop on Rubber Plant Materials, 2008-10-28/2008-10-29, Bogor, Indonésie.
- [COM.49] - Marraccini P., C. Jourdan, T. Leroy, J.-M. Gion**, 2008. Etude de la plasticité phénotypique des cafeiers en conditions de stress hydrique. Communication au Groupe d'Etude de l'Arbre (GEA), « Plasticité phénotypique des arbres », 2-3/10/2008, CIRAD, Montpellier, France.
- [COM.48] - Marraccini P., Rodrigues G.C., Andrade A.C., Leroy T., Pot D., Jourdan C., Gion J.M.** 2008. A project on the analysis of phenotypic plasticity in response to water constraint in coffee plants growing in field conditions: [Abstract]. In: ASIC. *22nd International Conference on Coffee Science, 14-19 september 2008, Campinas, Brasil*. Campinas: ASIC, 1 p. International Conference on Coffee Science. 22, 2008-09-14/2008-09-19, Campinas, Brésil.
- [POS.7] - Marraccini P., Rodrigues G.C., Rocha O.C., Guerra A.F., Andrade A.C., Leroy T., Pot D., Jourdan C., Gion J.M.** 2008. Analysis of phenotypic plasticity in response to water constraints in coffee plants growing under field conditions: [Poster]. In: ASIC. *22nd International Conference on Coffee Science, 14-19 september 2008, Campinas, Brasil*. Campinas: ASIC, 1 p. International Conference on Coffee Science. 22, 2008-09-14/2008-09-19, Campinas, Brésil.
- [COM.47] - Ndeko A., S. Terrier, E. Villar, M. Laurens, A. De Grancourt, J.-L. Verdeil, P. Deleporte, A. Saya, C. Jourdan, J.-M. Gion**, 2008. Analyse de la plasticité phénotypique de deux clones d'eucalyptus en réponse à une contrainte hydrique au champ. Communication au Groupe d'Etude de l'Arbre (GEA), « Plasticité phénotypique des arbres », 2-3/10/2008, CIRAD, Montpellier, France.

- [COM.46] - Rouspard O., Nouvellon Y., Laclau J-P., Epron D., Harmand J-M., Vaast P., Hergoualc'h K., Jourdan C., Saint-André L., Thaler P., Lamade E., Gay F., Hamel O. and Bouillet J-P. 2008. Large variability in the partitioning of net primary productivity (NPP) between growth and litter production in major tropical plantations: consequences for ecosystem carbon pools, respiration partitioning and stakes for carbon sequestration methodologies -A review-. International Conference on Processes Controlling Productivity in Tropical Plantations. November 10-14, 2008. Porto Seguro, Bahia, Brazil.
- [COM.45] - Jourdan C., 2008. Modèles d'architecture racinaire et leurs applications en agronomie. Séminaire BABtwo (Bioturbation et Agrégation Biologique dans les sols & sédiments), 29 et 30 mai 2008, SupAgro, Montpellier.
- [COM.44] - Chairungsee N., P. Thaler, C. Jourdan, A. Chuntuma, P. Chuntuma, F. Gay, S.Thanisawanyangkura, K. Sangkhasila and P. Kasemsap., 2008. Above- and belowground biomass and net primary productivity of a rubber tree plantation (*Hevea brasiliensis* Muell.Arg.) in Thailand. Communication à l'IRRDB Natural Rubber Conference, 13-17/10/2008, Kuala Lumpur, Malaysia.
- [COM.43] - Barry-Etienne D., Ricard J.-M., Diette S., Moundy P.-J., Chambieux O., Fiorese D., Jaillard B. and Jourdan C., 2008. Distribution of *Tuber melanosporum mycorrhizas* on root stocks of holm-oaks (*Quercus ilex*) in production. Communication orale au 3ème Congrès International sur la Truffe, 25-28/11/2008, Spoleto, Italie.
- [COM.42] - Levillain J., A. Thongo Mbou, C. Jourdan, L. Saint-André, 2008. Estimations of fine root biomass in eucalyptus plantations. A comparison of 4 sampling methods. Open Science Conference on "Africa and Carbon Cycle: the CarboAfrica project", Accra (Ghana), 25-27 November 2008. (Poster)
- [COM.41] - Bouillet J.P., Goncalves J.L.M., Gava J.L., Silva C.R., Leite F.P., Deleporte P., Moreira MZ, Bassiloua B, Galiana A., Trivelin P, Jourdan C., Laclau J.P. 2007. Stand Growth and Soil Fertility in Mixed-Species Plantations of Eucalyptus and Acacia in Brazil and Congo. In: proceedings Workshop 2.08.03 IUFRO "Eucalyptus and Biodiversity: balancing productivity and sustainability", 22-26 October 2007, Durban, South Africa, 11p.
- [POS.6] - C. Jourdan, O. Rouspard, L. Saint-André and D. Epron. 2007. Below-ground Net Primary Productivity, Root Dynamics and Turnover within a Coconut Palm Chronosequence in Vanuatu, South Pacific. In: Fourth International Symposium on Dynamics of Physiological Processes in Roots of Woody Plants, Bangor, Wales, UK, 16th – 19th September 2007, 1p.
- [COM.40] - Thongo Mbou, A., Epron, D., Jourdan, C., de Grandcourt, A., Saint-André, L., Granier A. 2007. Root respiration of Eucalyptus seedlings: energy-requirement for growth, maintenance and ion uptake. In: proceedings Workshop 2.08.03 IUFRO "Eucalyptus and Biodiversity: balancing productivity and sustainability", 22-26 October 2007, Durban, South Africa.
- [COM.39] - Saint-André L., Laclau J-P., Nouvellon Y., Nzila JDD, Safou-Matondo R., Jourdan C., Rouspard O., Deleporte P., Bouillet J-P. 2007. Synthesis on the trade-offs of C sequestration with water yield and soil fertility after savannah afforestation in Congo. GCP Symposium, Kruger Park, South-Africa 23-25 August 2007.
- [COM.38] - Rouspard O., Dauzat J., Nouvellon Y., Jourdan C., Bonnefond J.M., Berbigier P., Navarro M., Epron D., Saint-André L., Mialet-Serra I., Hamel O., Bouillet J.P. 2007. Partitioning Light and Water Use Efficiencies (LUE, WUE) between cover tree (*Cocos nucifera* L.) and grass under-storey, using eddy covariance, LAI-2000 and Net Primary Productivity (NPP). *Second International Symposium on Multi-Strata agroforestry systems with perennial crops: Making ecosystem services count for farmers, consumers and the environment, September 17-21, 2007 Turrialba, Costa Rica. Oral and posters presentations.* [Online]. Turrialba: CATIE, [11] p. International Symposium on Multi-Strata Agroforestry Systems with Perennial Crops: Making Ecosystem Services Count for Farmers, Consumers and the Environment. 2, 2007-09-17/2007-09-21, Turrialba, Costa Rica. [20071003]. http://web.catie.ac.cr/cd_multiestrata/presentaciones_orales/session1/Partitioning_water.pdf
- [COM.37] - Legros S., Mialet-Serra I., Caliman J.P., Clément-Vidal A., Siregar F.A., Widiastuti L., Jourdan C., Dingkuhn M. 2006. Carbohydrates reserves in 9 years old oil palm: Nature, distribution and seasonal changes. In: IOPRI. *International Oil Palm Conference (IOPC), Bali, Indonesia, 19-23 June 2006.* s.l.: s.n., 11 p. International Oil Palm Conference, 2006-06-19/2006-06-23, Bali, Indonésie.
- [COM.36] - Mialet-Serra I., Clément A., Sonderegger N., Rouspard O., Flori A., Jourdan C., Labouisse J.P., Dingkuhn M. 2006. Assimilate storage in vegetative organs of coconut (*Cocos nucifera*): [Abstract]. In: Adkins Steve W. (ed.), Foale M.A. (ed.), Samosir Y.M.S. (ed.). *Coconut revival: new possibilities for the tree of life: Proceedings of the International Coconut Forum held in Cairns, Australia, 22-24 November 2005.* Canberra : ACIAR, p. 99 International Coconut Forum, 2005-11-22/2005-11-24, Cairns, Australie.
- [COM.35] - Mialet-Serra I., Clément A., Sonderegger N., Prades A., Davrieux F., Jourdan C., Escoute J., Verdeil J.L., Rouspard O., Caliman J.P., Legros S., Siregar F.A., Widiastuti L. 2006. The transitory carbon reserves in two palms: the coconut and the oil palms. *Carbon storage in coconut, oil palm, rubber and mango: origins, dynamics and consequences for plantation management.* [Cd-Rom]. Montpellier : CIRAD, 1 diaporama (59 vues) Final Meeting of ATP Reserves 11/2002 on Carbon Storage in Coconut, Oil Palm, Rubber and Mango, 2006-11-08/2006-11-09, Montpellier, France.
- [COM.34] - Normand F., Jannoyer M., Barantin P., Damour G., Dechazal M., Mialet-Serra I., Clément A., Verdeil J.L., Escoute J., Sonderegger N., Legros S., Lagier S., Jourdan C., Davrieux F. 2006. Nature, location and seasonal changes of nonstructural carbohydrates in mango. *Carbon storage in coconut, oil palm, rubber and mango: origins, dynamics and consequences for plantation management.* [Cd-Rom]. Montpellier : CIRAD, 1 diaporama (20 vues) Final Meeting of ATP Reserves 11/2002 on Carbon Storage in Coconut, Oil Palm, Rubber and Mango, 2006-11-08/2006-11-09, Montpellier, France.
- [POS.5] - Nodichao L. and Jourdan C., 2006. Genetic variability of the root system of the oil palm under drought

- conditions. Consequences on root distribution and water uptake. IOPC Symposium, Bali, Indonesia, 19-23 June, 2006.
- [COM.33]** - Bouillet J.P., Laclau J.P., Gonçalves J.L.M., Moreira M.Z., Trivelin P., Jourdan C., Galiana A., 2006. Potential for mixed-species plantations to improve stand productivity and soil fertility. The study case of Eucalyptus and Acacia mixed plantations in Brazil. In Proceedings of 7th workshop "Site management and tropical plantation forests", 6-9 November 2006, Cifor, Bogor, Indonesia, 35p.
- [COM.32]** - Saint-André L., Ranger J., D'Annunzio R., Thongo M'Bou A., Deleporte Ph., Nouvellon Y., Laclau J-P., Jourdan C., Bouillet J-P. 2006. Integrating Nutrient Cycling into a Growth and Yield Model calibrated for Eucalyptus Plantations in Congo. In: PMA6 the second international Symposium on Plant Growth Modelling, Simulation, Visualization and application, 13-17 November 2006, Beijing PR China.
- [COM.31]** - Nodichao L., Aké S. et Jourdan C. 2005. Caractères morphophysiologiques racinaires et comportement phénologique du palmier à huile en saison sèche au champ. P. 380-394. In: A. Adjanohoun, Bankolé C., Agbo B. et Igué K. (eds). Recherche agricole pour le développement. Actes 4 de l'atelier scientifique Sud du Bénin. 10-12 décembre 2003, Abomey-Calavi.
- [COM.30]** - Jourdan C., A. Thongo, C. Noel, L. Saint-André, O. Roupsard, Y. Nouvellon, D. Epron and O. Hamel, 2004. Root distribution, growth and biomass within eucalyptus and coconut palm chronosequences. Fiche synthétique, séminaire restitution ATP 13-00, 16-18 novembre 2004, CIRAD, Montpellier, France, 2p.
- [COM.29]** - Garcia-Villanueva, E., E. Costes, and C. Jourdan, 2004. Comparing root and aerial growth dynamics of two apple hybrids ownrooted and grafted on M.9. Proceedings of the 1st International Symposium on Rootstocks for Deciduous Fruit Tree Species, Vols 1 and 2(658): 61-67.
- [COM.28]** - Lamanda N., Dautzat J., Jourdan C., Malézieux E., Martin P. 2004. Using 3D architectural models for evaluation of smallholder coconut-based agroforestry systems : [Abstract]. *Book of abstracts, 1st World congress of agroforestry: Working together for sustainable land-use systems, 27 June - 2 July 2004, Orlando (USA)*. Gainesville: IFAS, p. 188 World Congress of Agroforestry. 1, 2004-06-27/2004-07-02, Orlando, Etats-Unis. [20050331]. <http://conference.ifas.ufl.edu/WCA/Abstracts2.pdf>
- [COM.27]** - Roupsard O., Lamanda N., Bonnefond J.M., Nouvellon Y., Berbigier P., Joffre R., Irvine M., Dautzat J., Jourdan C., Epron D., Mialet-Serra I., Taga S., Sileye T., Hamel O., Rouzière A. 2004. Séquestration de carbone par des plantations de cocotiers au Vanuatu : [Résumé de poster]. *Résumés des présentations. Assises de la recherche française dans le Pacifique (ARFP 2004), Nouméa, 24-27 août 2004*. s.l: s.n, p. 223 Assises de la recherche française dans le Pacifique, 2004-08-24/2004-08-27, Nouméa, Nouvelle-Calédonie.
- [COM.26]** - Nouvellon Y., Roupsard O., Hamel O., Mouvondy W.J., Epron D., Bonnefond J.M., Saint-André L., Jourdan C., Mabilia A., Dautzat J., Laclau J.P., Bouillet J.P., Berbigier P., Irvine M., Mounzeo L. 2004. Measuring carbon and water fluxes from *Eucalyptus* stands in the Congo. In : Nambiar E.K.S. (ed.), Ranger Jacques (ed.), Tiarks A. (ed.), Toma T. (ed.). *Site Management and productivity in tropical plantation forests: Proceedings of Workshops in Congo July 2001 and China February 2003*. [Online]. Jakarta: CIFOR Workshop on Site Management and Productivity in Tropical Plantation Forests, 2001-07-07/2001-07-13, Pointe-Noire, Congo. [20040630]. http://www.cifor.org/publications/pdf_files/Books/StMgnt-tropical/17_Nouvellon.pdf
- [COM.25]** - Epron, D., Nouvellon, Y., Ifo, S., M'Bou, A. T., Jourdan, C., Saint-André, L., Hamel, O., 2004. The partitioning between autotrophic and heterotrophic components of soil respiration changes with stand age in Eucalyptus plantations. CARBOEUROPE / COST 627 Joint Workshop, "partitioning soil CO2 efflux", Villa Orlandi, Capri, Italy, October 2-4 2004.
- [COM.24]** - Hamel O., Roupsard O., Nouvellon Y., Jourdan C., Saint-André L., Joffre R., Bonnefond J.M., Berbigier P., Irvine M., Epron D., Navarro M., Feller C., Bouillet JP. 2004. Séminaire CO2 –Carbone / restitution de l'ATP-Carbone. CIRAD-Montpellier, 16-18 novembre 2004. Communications et CD. CIRAD, IFR-Ecosystem editeurs.
- [COM.23]** - Saint-André L., Thongo M'Bou A., Mabilia A., Mouvondy W., Jourdan C., Roupsard O. Deleporte P., Hamel O., Nouvellon Y. 2004. A complete set of weighted equations taking stand age into account for above- and below-ground biomass of an Eucalyptus hybrid in Congo. Séminaire Carbone. CIRAD forêt – IFR Ecosystem. 16 au 18 novembre, Montpellier. 3pp.
- [COM.22]** - Normand F., Jourdan C. 2004. Le système racinaire du manguier à la Réunion : biomasse et dynamique racinaire. *Réunion annuelle Fihor, Montpellier, 5-9 juillet 2004*. [Cd-Rom]. Montpellier : CIRAD, 14 p. Réunion annuelle FLHOR, 2004-07-05/2004-07-09, Montpellier, France.
- [COM.21]** - Normand F., Damour G., Gabeu P., Dechazal M., Jourdan C., Jannoyer M. 2004. Teneurs en matière sèche et répartition de la biomasse chez le manguier : [Poster]. *Réunion annuelle Fihor, Montpellier, 5-9 juillet 2004*. [Cd-Rom]. Montpellier : CIRAD, 1 p. Réunion annuelle FLHOR, 2004-07-05/2004-07-09, Montpellier, France.
- [COM.20]** - Roupsard O., Lamanda N., Joffre R., Bonnefond JM., Nouvellon Y., Berbigier P., Jourdan C., Epron D., Mialet-Serra I., Taga S., Sileye T, Hamel O., Rouzière A et Bouillet JP. 2004. Séquestration de Carbone par des plantations de cocotiers au Vanuatu. Assises de la recherche Française dans le Pacifique (ARFP 2004). Nouméa, 24-27 août 2004.
- [COM.19]** - Roupsard O., Deveau A., Bonnefond J.M., Nouvellon Y., Berbigier P., Irvine M., Dautzat J., Jourdan C., Epron D., Joffre R., Mialet-Serra I., Taga S., Sileye T. 2003. Couplage et modélisation des flux d'eau et de carbone dans une plantation tropicale pérenne [Abstract]. *Réseau d'étude de l'arbre, La Rochelle, France, 8 - 12 décembre 2003*. s.l: s.n, 1 p. Journées du Réseau d'étude de l'arbre, 2003-12-08/2003-12-12, La Rochelle, France.
- [POS.4]** - Jourdan C., A. Thongo M'Bou, L. Nodichao, C. Noel, M. Maryulius, L. Saint-André, O. Roupsard,

- Y. Nouvellon, R. Joffre, D. Epron, O. Hamel and A. Rouzière, 2003. Fine root dynamics and turnover within tropical perennial plantations. Third International Symposium on Dynamics of Physiological Processes in Woody Roots, 27/09-04/10/2003, Perth, Australia. Poster.
- [COM.18]** - Jourdan, C., Thongo A., Nodichao L., Noel, C., Dechazal M., Saint-André, L., Rouspard, O., Nouvellon, Y., Joffre, R., Epron, D., Hamel, O., Rouzière, A., 2003. Fine root dynamics and turnover within tropical perennial plantations. Secondes rencontres du 'Réseau Ecophysiologie de l'Arbre', 8-12 Décembre 2003, La Rochelle, France.
- [COM.17]** - Hamel O., Nouvellon Y., Rouspard O., Jourdan C., Saint-André L., Joffre R., Bonnefond J.M., Epron D., Thongo A., Mouvondy W.J., Mabilia A., Taga S., Sileye T. 2002. Evaluation de la séquestration de carbone chez deux plantations pérennes tropicales. *Regards croisés sur les changements globaux, Arles, 25-29 novembre 2002 : résumés des présentations de la session par affichage*. Paris : CNES, [1] p. Regards croisés sur les changements globaux, 2002-11-25/2002-11-29, Arles, France.
- [POS.3]** - Nouvellon Y., Bonnefond J.M., Hamel O., Rouspard O., Saint-André L., Mouvondy W.J., Epron D., Irvine M., Berbigier P., Jourdan C., Joffre R., Thongo A., Mabilia A., Deleporte P., Laclau J.P., Bouillet J.P., Marien J.N., Dauzat J. 2002. CO₂ fluxes and carbon sequestration within eucalypt stands in Congo [Poster]. In: 5-8 March 2002 / CarboEurope Cluster. *2nd CarboEurope Meeting, Budapest (Hungary), 4*. Jena: CarboEurope, 1 p. CarboEurope Meeting. 2, 2002-03-04/2002-03-08, Budapest, Hongrie.
- [COM.16]** - Nouvellon Y., Hamel O., Bonnefond J.M., Rouspard O., Saint-André L., Epron D., Irvine M., Berbigier P., Jourdan C., Joffre R., Thongo A., Mouvondy W.J., Mabilia A., Deleporte P., Laclau J.P., Bouillet J.P., Marien J.N., Dauzat J. 2002. CO₂ fluxes and carbon sequestration within eucalypt stands in Congo. *Regards croisés sur les changements globaux, Arles, 25-29 novembre 2002 : résumés des présentations de la session par affichage*. Paris : CNES, [2] p. Regards croisés sur les changements globaux, 2002-11-25/2002-11-29, Arles.
- [COM.15]** - Rouspard O., Bonnefond J.M., Jourdan C., Epron D., Irvine M., Berbigier P., Nouvellon Y., Joffre R., Taga S., Sileye T., Labouisse J.P. 2002. Séquestration de carbone dans le sol : le cas des plantations pérennes [Résumé]. *Séquestration de carbone dans les sols tropicaux : compte-rendu de la journée, mardi 26 février 2002, Agropolis, Montpellier*. Montpellier : CIRAD, 1 p. Journée sur la séquestration de carbone dans les sols tropicaux, 2002-02-26, Montpellier, France.
- [POS.2]** - Rouspard O., Bonnefond J.M., Jourdan C., Epron D., Irvine M., Berbigier P., Nouvellon Y., Joffre R., Taga S., Sileye T., Labouisse J.P. 2002. Carbon sequestration in a coconut chronosequence (Vanuatu, Oceania) [Poster]. In: 5-8 March 2002 / CarboEurope Cluster. *2nd CarboEurope Meeting, Budapest (Hungary), 4*. Jena: CarboEurope Cluster, 1 p. CarboEurope Meeting. 2, 2002-03-04/2002-03-08, Budapest, Hongrie.
- [COM.14]** - Rouspard O., Bonnefond J.M., Jourdan C., Epron D., Irvine M., Berbigier P., Nouvellon Y., Joffre R., Taga S., Sileye T., Labouisse J.P. 2002. Carbon sequestration by coconut plantations in Oceania (Vanuatu). *Regards croisés sur les changements globaux, Arles, 25-29 novembre 2002 : résumés des présentations de la session par affichage*. Paris : CNES, [1] p. Regards croisés sur les changements globaux, 2002-11-25/2002-11-29, Arles.
- [COM.13]** - Nodichao L., Jourdan C. 2001. Apport du potassium et tolérance du palmier à huile au déficit hydrique du sol. In: Agbo B.P. (ed.), Arodokoun D.Y. (ed.), Aïhou Kouessi (ed.), Matthess A. (ed.). *Recherche agricole pour le développement : actes de l'atelier scientifique, Niaouli, 11 - 12 janvier 2001*. Cotonou : INRAB, p. 215-221 Atelier scientifique sur la recherche agricole pour le développement. 1, 2001-01-11/2001-01-12, Niaouli, Bénin.
- [COM.12]** - Rouspard O., Nouvellon Y., Hamel O., Bonnefond J.M., Epron D., Joffre R., Jourdan C., Saint-André L., Irvine M., Mouvondy W.J., Mabilia A., Thongo A., Laclau J.P., Bouillet J.P. 2001. Carbon flux and sequestration by eucalypt chronosequence in Congo [Poster]. In: CarboEurope Cluster. *First CarboEuroFlux Meeting, 10-12 January 2001, Hyytiälä (Finland)*. Jena: CarboEurope, 1 p. CarboEuroFlux Meeting. 1, 2001-01-10/2001-01-12, Hyytiälä, Finlande.
- [COM.11]** - Rouspard O., Nouvellon Y., Jourdan C., Bonnefond J.M., Epron D., Joffre R., Mouvondy W.J., Mabilia A., Thongo A. 2001. Séquestration de carbone par des plantations d'eucalyptus au Congo [Résumé de poster]. In : INRA. *Premières Rencontres d'Ecophysiologie de l'Arbre, Autrans (Vercors), 16-19 janvier 2001*. Résumés Paris : INRA, p. 71 Premières Rencontres d'Ecophysiologie de l'Arbre, 2001-01-16/2001-01-19, Autrans, France.
- [COM.10]** - Nouvellon, Y., Rouspard, O., Hamel, O., Mouvondy, W., Epron, D., Bonnefond, J.M., Saint-André, L., Jourdan, C., Mabilia, A., Dauzat, J., Berbigier, P., Irvine, M., Mounzeo, L. 2001. Measuring and modelling of carbon and water fluxes from Eucalyptus stands in Congo. CIFOR Congress, Pointe-Noire, Congo, July 2001. Proceedings, 5pp.
- [COM.9]** - Mouvondy, W., Epron, D., Nouvellon, Y., Jourdan, C., Joffre, R., Rouspard, O., 2001. Composantes autotrophe et hétérotrophe de la respiration du sol dans une plantation industrielle d'Eucalyptus sur savane au Congo. 3eme Colloque Rhizosphère - INRA - Dijon, 26-28 Novembre 2001.
- [COM.8]** - Rouspard O., Mialet-Serra I., Eroy M.N., Dauzat J., Jourdan C., Braconnier S. 1999. Modélisation du fonctionnement du cocotier. In : CIRAD, 06/09/1999, Montpellier, France. *Atelier AGER : Quelle agronomie au Cirad ?* s.l: s.n, [18] p. Atelier AGER : Quelle agronomie au Cirad ?, 1999-09-06, Montpellier, France.
- [POS.1]** - Jourdan C., Chopart J.L. 1998. Méthodes d'étude des systèmes racinaires au champ menées au CIRAD [Poster] = Methods for studying root systems in the field at CIRAD. *Congrès Mondial des Sciences du Sol. 16. - Montpellier : CIRAD, 1998*. s.l: s.n., 1 p. Congrès Mondial de Science du Sol. 16, 1998-08-20/1998-08-26, Montpellier, France.
- [COM.7]** - Jourdan C., Rey H. 1998. Modelling and simulation of the architecture and development of the oil palm

(*Elaeis guineensis* Jacq.) root system: some practical applications [Abstract and Poster]. *The supporting roots, structure and function, 20-24 July 1998, Bordeaux, France. Book of abstracts*. Bordeaux : Laboratoire de rhéologie du bois de Bordeaux, [1] p. Colloque sur les Racines principales, structures et fonctionnement. 1, 1998-07-20/1998-07-24, Bordeaux, France.

[COM.6] - Jourdan C., Rey H. 1996. Modelling and simulation of the architecture and development of the oil-palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) root system with special attention to practical application. In : Darus Ariffin (ed.), Wahid Mohd Basri (ed.), Rajanaidu Nookiah (ed.), Hj Tayeb Dolmat (ed.), Paranjothy K. (ed.), Cheah Suan-Choo (ed.), Chang Kwong Choong (ed.), Ravigadevi S. (ed.). *Proceedings of the 1996 PORIM International Palm Oil Congress: competitiveness for the 21st Century. Agriculture Conference*. Kuala Lumpur : PORIM, p.97-110 PORIM International Palm Oil Congress, 1996-09-23/1996-09-28, Kuala Lumpur, Malaisie.

[COM.5] - Jourdan C. 1995. Modelling of branching process of the root system of young oil palm seedlings: a markovian approach. In: Jalami Sukaimi (ed.), Ariffin Darus (ed.), Rajanai. *Proceedings of the 1993 PORIM international palm oil congress "Update and vision". Agriculture = [Actes du congrès international 1993 du PORIM sur l'huile de palme. "Présent et perspectives". Agriculture]*. Kuala Lumpur : PORIM, p.620-624 PORIM International Palm Oil Congress, 1993-09-20/1993-09-25, Kuala Lumpur, Malaisie.

[COM.4] - Jourdan C. 1995. Modélisation de l'architecture du système racinaire du palmier à huile. Une application pratique : estimation du volume de sol utile pour le potassium et le phosphore. In : INRA. *Compte-rendu du séminaire sur la racine et le système racinaire = [Proceedings of the workshop on root and root system]*. France : INRA, p.15-19 La racine et le système racinaire, 1995-04-06/1995-04-07, (Orléans, France).

[COM.3] - Jourdan C., Rey H., Guédon Y. 1995. Modelling of the branching process of the root system of young oil palm seedlings. A markovian approach. In: Baluska F. (ed.), Ciamporova M. (ed.), Gasparikova O. (ed.), Barlow P.W. (ed.). *Structure and function of roots*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, p.113-119 International Symposium on Structure and Function of Roots. 4, 1993-06-20/1993-06-26, Stara Lesna, Slovaquie.

[COM.2] - Jourdan C., 1993. Modelling of branching process of the root system of young oil palm seedlings: a markovian approach. In: Proceedings of the 1993 PORIM international palm oil congress "Update and vision". Jalami Sukaimi (ed.), Ariffin Darus (ed.), Rajanaidu N. (ed.), Mohd Tayeb Dolmat (ed.), Paranjothy K. (ed.), Mohd Basri Wahid (ed.), Henson I.E. (ed.), Chang Kwong Choong; 1993-09-20/1993-09-25 ; Kuala Lumpur, Malaysia. p.620-624.

[COM.1] - Jourdan C., Enjalric F., Lardet L., Michaux-Ferrière N., Berger A. 1992. Typologie du matériel végétal (*Hevea brasiliensis* Müll.-Arg.) en micropropagation : caractéristiques hydriques et histologiques [Poster]. Forum des Jeunes Chercheurs en Physiologie Végétale, 1992/09/03-04, Perpignan.

Mémoires (Thèses, DEA, Maîtrise) [MEM]

[MEM.3] - Jourdan C. 1995. Modélisation de l'architecture et du développement du système racinaire du palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.). Montpellier : Université de Montpellier 2, 247 p. Thèse de doctorat : Physiologie, Biologie des Organismes et des Populations.

[MEM.2] - Jourdan C. 1991. Typologie du matériel végétal (*Hevea brasiliensis* Mull-Arg) en micropropagation : caractéristiques morphologiques, anatomiques et hydriques. Montpellier : USTL, 25 p. Mémoire DEA : Fin d'Etudes en Bases de la Production Végétale. Biotechnologie et Amélioration des Plantes.

[MEM.1] - Jourdan C. 1990. Stratégies de résistance à l'enfouissement déchaussement et de colonisation chez une pionnière des sables et galets littoraux en Languedoc *Eryngium maritimum* L. (Ombellifères). . *Mémoire (Maîtrise : Biologie des Organismes et des Populations)*. Montpellier : Université de Montpellier II, 30 p.

Logiciels [SOFT]

[SOFT.3] - Calvino L. & Jourdan C. 2005. RHIZODIGIT (v.1.3) : un logiciel de saisie semi-automatique des données de croissance racinaire relevées sur rhizotrons. [Numérique].

[SOFT.2] - Mailhé B. & Jourdan C. 2000. RHIZODIGIT (v.1.2) : un logiciel de saisie semi-automatique des données de croissance racinaire relevées sur rhizotrons. [Numérique]. CIRAD, Montpellier, France.

[SOFT.1] - Rouanet X. & Jourdan C. 1999. RHIZODIGIT (v.1.1) : un logiciel de saisie semi-automatique des données de croissance racinaire relevées sur rhizotrons. [Numérique]. CIRAD, Montpellier, France.

Médias (Télévision, Radio) [MEDIA]

[MEDIA.2] - Christophe Jourdan, Philippe Hinsinger. 2013. Emission La tete au carré - France Inter. [Radio France Inter]. Paris, Maison de RadioFrance 11 février 2013 (durée 1 h).

[MEDIA.1] - Christophe Jourdan. 2012. Emission "Silence ça pousse" FRANCE 5. *Les racines*. [France Télévision]. Paris Diffusion le 12 mars 2012 (durée 5 min.).

Documents de vulgarisation dans périodique sans comité de lecture [VULG]

[VULG.4] - Jourdan C. 1997. Die Vierte Dimension. Focus: n. 46, p. 208.

[VULG.3] - Jourdan C. 1996. Il fait pousser leurs racines palmier à huile sur ordinateur! *Ça m'Intéresse* (185): 44-45.

[VULG.2] - Jourdan C., Rey H. 1996. Architecture racinaire du palmier à huile : modélisation et simulation. *Plantations, Recherche, Développement*, 3 (5) : 313-327.

[VULG.1] - Jourdan C. 1996. Modéliser la nature pour mieux la comprendre et la maîtriser. *Ça m'Intéresse* (183): 14-15.

3. Activités d'encadrement

Au cours de ces 18 dernières années depuis ma thèse, j'ai encadré ou co-encadré 72 stagiaires dont 36 Doctorants, 5 Post-Docs et CDD, 12 Masters (1&2) et 19 Ingénieurs, étudiants en IUT/IUP et en Licence (**Tableau 3**). Ces encadrements d'étudiants aussi bien en France qu'à l'étranger (Brésil, Congo, Bénin, Thaïlande, Laos) ont constitué une grosse part de mon activité de valorisation et de diffusion des connaissances. Mon implication dans la publication avec les étudiants encadrés est certaine avec 27 publications co-signées y compris avec des stagiaires en master, cursus ingénieur ou IUP (**Tableau 3**).

Tableau 3. Synthèse des activités d'encadrement de stagiaires et nombre d'encadrement avec publications co-signées.

Diplôme préparé	Nb d'encadrement	Nb d'encadrement avec publications co-signées
Doctorat	36	18
Post-Doc, CDD	5	2
Masters (1 et 2)	12	3
Ingénieur (1 ^e , 2 ^e et 3 ^e année)	11	2
Licence, Licence Pro, IUT/IUP	8	2
Total	72	27

3.1. Co-encadrement de thèses [DOC]

J'ai participé à l'encadrement de 36 doctorants et co-signé des publications avec 18 d'entre eux (**Tableau 3**). Mon degré de participation n'a pas été le même pour tous les doctorants, j'ai été le co-encadrant principal pour seulement 6 doctorants (leur nom est souligné dans la liste ci-après, [DOC.1], [DOC.11], [DOC.12], [DOC.17], [DOC.19], [DOC.31]) et avec qui j'ai co-signé 43 publications dont 13 articles publiés dans des revues ACL. Par contre, mon engagement était partiel, focalisé sur les questions relatives aux systèmes racinaires, dans les autres encadrements. En outre, j'ai participé aux comités de pilotage de thèse de 27 doctorants, ils sont indiqués par une * après leur nom dans la liste ci-dessous.

[Doc.1] - 1997 – Hélène Colas* : Association de culture cocotier-cacaoyer. Modélisation de leur système racinaire. Etudes préliminaires sur l'interaction racinaire et la consommation en eau des deux plantes. Ecole Doctorale : Univ. Montpellier 2 (Biologie des Systèmes Intégrés, Agronomie, Environnement (BSIAE), Nationalité : France. Dir. thèse : JC Remy (SupAgro, Montpellier). Mon rôle : Encadrement principal, protocole de terrain, analyse des données, correction du manuscrit. Situation actuelle : Mariée, 2 enfants.

[Doc.2] - 2002 – François Lecompte* : Modélisation de la mise en place et de la régulation de l'architecture racinaire du bananier dans un andosol : effets des contraintes mécaniques liées au compactage (INRA Guadeloupe). Ecole Doctorale : INA-PG – Paris. Nationalité : France. Dir. thèse : H. Ozier-Lafontaine (INRA, Guadeloupe). Mon rôle : Encadrement technique, protocole de terrain. Situation actuelle : Chercheur INRA-PSH (Montfavet).

[Doc.3] - 2003 – Armin Oppelt : Root Morphology of Co-occurring African Fruit Tree Species with Contrasting Strategies of Exploration and Exploitation. Ecole Doctorale : Université de Göttingen – Göttingen. Nationalité : Allemagne. Dir. thèse : W. Kurt (Univ. Göttingen, Allemagne). Mon rôle : Encadrement technique, protocole de terrain. Situation actuelle : Chercheur IGF (Autriche).

[Doc.4] - 2004 – Eduardo Villanueva : Développement conjoint des systèmes aérien et racinaire chez deux génotypes de pommier (Malus x domestica Borkh). Ecole Doctorale : Sibaghe SupAgro, Univ. Montpellier II. Nationalité : Mexique. Dir. thèse : F. Dosba (INRA, Montpellier). Mon rôle : Encadrement technique, protocole de terrain, analyse des données, correction articles et manuscrit. Membre du jury de thèse. Situation actuelle : Enseignant Chercheur Université de Mexico (Mexique).
2 publications co-signées : [ACL.16], [COM.29]

[Doc.5] - 2005 – Isabelle Mialet-Serra* : Nature et dynamique des stocks de réserves glucidiques chez le cocotier (*Cocos nucifera* L.). Ecole Doctorale : Univ. Montpellier 2 (Biologie des Systèmes Intégrés, Agronomie, Environnement (BSIAE)). Nationalité : France. Dir. thèse : M. Dingkuhn (CIRAD, Montpellier). Mon rôle : Encadrement technique, protocole de terrain, analyse des données, correction articles et manuscrit. Situation actuelle : Chercheur CIRAD (Disponibilité Region LR).

19 publications co-signées : [ACL.29], [ACL.25], [ACL.21], [ACL.20], [ACL.15], [ACL.13], [ACLN.3], [CHA.3], [COM.60], [COM.57], [COM.38], [COM.37], [COM.36], [COM.35], [COM.34], [COM.27], [COM.20], [COM.19], [COM.8]

[Doc.6] - 2005 – Nathalie Lamanda* : Analyse de systèmes de culture à base cocotier sur une île du nord de l'archipel du Vanuatu Evaluation des possibilités d'association de culture dans les cocoteraies en production. Ecole Doctorale : Univ. Montpellier 2 (Biologie des Systèmes Intégrés, Agronomie, Environnement (BSIAE)). Nationalité : France. Dir. thèse : P. Martin (INRA, Paris-Grignon). Mon rôle : Encadrement technique, protocole de terrain, mission de terrain, analyse des données, correction articles et manuscrit. Situation actuelle : Chercheur CIRAD (UMR SYSTEM).

5 publications co-signées : [ACL.19], [ACLN.3], [COM.28], [COM.27], [COM.20]

[Doc.7] - 2005 – Rachmat Mulia : Modélisation tri-dimensionnelle de la croissance du système racinaire des plantes en milieu hétérogène avec un automate voxelair : concepts de modélisation et application à des arbres en agroforesterie. Ecole Doctorale : Sibaghe - SupAgro Montpellier. Nationalité : Indonésie. Dir. thèse : M. Van Noordwick (ICRAF, Indonesia). Mon rôle : Encadrement technique, protocole de terrain. Situation actuelle : Chercheur ICRAF (South East Asia Office).

[Doc.8] - 2006 – Eduardo Alpizar : Etude de la résistance de *Coffea arabica* au nématode *Meloidogyne exigua* conférée par le gène Mex-1 et mise au point des outils pour son analyse fonctionnelle. Ecole Doctorale : Sibaghe - SupAgro Montpellier. Nationalité : Costa Rica. Dir. thèse : H. Etienne (CIRAD, Montpellier). Mon rôle : Encadrement technique, protocole de terrain, analyse des données, correction article. Situation actuelle : Chef d'entreprise Doka Heredia (Costa Rica).

1 publication co-signée [ACL.27]

[Doc.9] - 2006 - Jérôme Chopard* : Quelle échelle de représentation des systèmes racinaires pour modéliser les transferts d'eau ? Ecole Doctorale : Univ. Montpellier 2 (Biologie des Systèmes Intégrés, Agronomie, Environnement (BSIAE)). Nationalité : France. Dir. thèse : D. Auclair (CIRAD, Montpellier). Mon rôle : Encadrement technique, correction manuscrit. Situation actuelle : Chercheur INRIA (Montpellier).

[Doc.10] - 2008 – Sandrine Legros* : Ajustement de la phénologie, de la croissance et de la production du palmier à huile face à des environnements variables : mécanismes de la plasticité phénotypique. Ecole Doctorale : Univ. Montpellier 2 (Biologie des Systèmes Intégrés, Agronomie, Environnement (BSIAE)). Nationalité : France. Dir. thèse : M. Dingkuhn (CIRAD, Montpellier). Mon rôle : Encadrement technique, protocole de terrain, mission de terrain, analyse des données, correction articles et manuscrit. Membre du jury de thèse. Situation actuelle : Ingénieur d'étude (CETIOM).

5 publications co-signées : [COM.60], [COM.57], [COM.37], [COM.35], [COM.34]

[Doc.11] - 2008 – Armel Thongo* : Modélisation de la dynamique de croissance racinaire d'un clone d'eucalyptus au Congo : Application à l'estimation du turnover et de la respiration racinaire. Ecole Doctorale : Cotutelle Université NANCY 1 - Université BRAZZAVILLE, Nationalité : Congo. Dir. thèse : D. Epron (INRA, Nancy). Mon rôle : Encadrement principal, protocole de terrain, mission de terrain, analyse des données, correction articles et manuscrit. Situation actuelle : Chercheur CRDPI (Congo).

26 publications co-signées : [ACL.34], [ACL.31], [ACL.26], [ACL.22], [ACL.14], [ACL.12], [ACL.9], [ACL.8], [COM.59], [COM.56], [COM.55], [COM.54], [COM.52], [COM.42], [COM.40], [COM.32], [COM.30], [COM.23], [COM.18], [COM.17], [COM.16], [COM.12], [COM.11], [POS.8], [POS.4], [POS.3]

[Doc.12] - 2008 – Leifi Nodichao* : Biodiversité racinaire, absorption potassique et résistance à la sécheresse chez le palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.) au Bénin. Ecole Doctorale : Université Cocody - Abidjan, Côte d'Ivoire. Nationalité : Bénin. Dir. thèse : S. Aké (Univ. Cocody, Abidjan). Mon rôle : Encadrement principal, protocole de terrain, mission de terrain, analyse des données, correction articles et manuscrit. Membre du jury de thèse. Situation actuelle : Directeur du centre de Recherche CRAPP à Pobè (INRAB-Bénin).

8 publications co-signées : [ACL.33], [ACLN.2], [ACLN.1], [COM.31], [COM.18], [COM.13], [POS.5], [POS.4]

[Doc.13] - 2009 - Herintsitohaina RAZAKAMANARIVO RAMARSON : Potentialités de stockage du carbone dans le système sol-plante dans les plantations d'Eucalyptus. Ecole Doctorale : SupAgro Montpellier. Nationalité : Madagascar. Dir. thèse : A. Albrecht (IRD, Montpellier). Mon rôle : Encadrement technique, protocole de terrain, analyse des données, correction manuscrit. Situation actuelle : Chercheur au LRI (Madagascar).

[Doc.14] - 2010 – Carole Bécel* : Analyse et modélisation de la variabilité spatiale et temporelle de la croissance racinaire en verger de pêcher. Influence de la distribution spatiale de l'eau dans le sol et de la disponibilité en photo-assimilats. Ecole Doctorale : Univ. Montpellier 2 (Biologie des Systèmes Intégrés, Agronomie, Environnement (BSIAE)). Nationalité : France. Dir. thèse : L. Pagès (INRA, Avignon). Mon rôle : Encadrement technique, protocole de terrain, correction manuscrit. Situation actuelle : Post-Doc INRA (Agroécologie-Dijon).

[Doc.15] - 2010 – Fanny Bikindou : Détermination et caractérisation des facteurs de production dans un massif clonal d'eucalyptus au Congo. Ecole Doctorale : Université BRAZZAVILLE. Nationalité : Congo. Dir. thèse : F. Mialoundama (Univ Mariem Ngouabi, Brazzaville). Mon rôle : Encadrement technique, protocole de terrain, correction article. Situation actuelle : Chercheur au CRDPI (Congo).
1 publication co-signée : [COM.55]

[Doc.16] - 2010 - Claire Marsden : modélisation et extrapolation spatiale de la parcelle à la région. Ecole Doctorale : Supagro, Montpellier - ED Sibaghe. Nationalité : France. Dir. thèse : D. Epron (INRA, Nancy). Mon rôle : Encadrement technique, protocole de terrain, mission de terrain, correction articles et manuscrit. Situation actuelle : Enseignant-Chercheur (SupAgro-Montpellier).
3 publications co-signées : [ACL.22], [COM.59], [COM.53]

[Doc.17] - 2010 – Naruenat Chairungsee* : Above- and belowground biomass and net primary productivity of a rubber tree plantation (*Hevea brasiliensis* Muell.Arg.) in Thailand. Ecole Doctorale : Kasetsart Univ- Bangkok THAILAND. Nationalité : Thaïlande. Dir. thèse : Somprach Thanisawanyangkura (Kasetsart Univ, Bangkok). Mon rôle : Encadrement principal, protocole de terrain, mission de terrain, analyse des données, correction articles et manuscrit. Membre du jury de thèse. Situation actuelle : Chercheur à Office of Agricultural Research and Development (Thaïlande).
2 publications co-signées : [ACL.47], [COM.44]

[Doc.18] - 2010 – Eduardo da Silva* : Dynamique spatio-temporelle du prélèvement racinaire de plantations d'eucalyptus dans des sols ferrallitiques profonds au Brésil. Contribution du sous-sol à la nutrition minérale des arbres. Ecole Doctorale : Univ Sao Paulo - ESALQ (Piracicaba -Brésil). Nationalité : Brésil. Dir. thèse : L. Gonçalves (ESALQ, Piracicaba). Mon rôle : Encadrement technique, protocole de terrain, mission de terrain, correction articles et manuscrit. Situation actuelle : Enseignant-Chercheur (Univ. Rio-Brésil).
6 publications co-signées : [ACL.46], [ACL.35], [ACL.28], [ACL.24], [ACL.23], [ACL.18]

[Doc.19] - 2011 - Mao Zhun* : Modélisation temporelle et spatiale du renforcement racinaire dans les forêts naturelles en montagne, cotutelle Univ. Ecole Doctorale : Cotutelle Montpellier 2 (ED Sibaghe), Univ Chinese Agriculture. Nationalité : Chine. Dir. thèse : A.Stokes (INRA, Montpellier). Mon rôle : Encadrement principal, protocole de terrain, mission de terrain, correction articles et manuscrit. Situation actuelle : Post-Doc (IRSTEA-Grenoble).
7 publications co-signées : [ACL.43], [ACL.42], [ACL.37], [COM.66], [COM.58], [POS.12], [POS.10]

[Doc.20] - 2011 – Ji Jinnan* : Modélisation et analyse par éléments finis de l'effet de la végétation sur la stabilité des pentes en zones forestières. Ecole Doctorale : Univ. Montpellier 2 – Ecosystème. Nationalité : Chine. Dir. thèse : A.Stokes (INRA, Montpellier). Mon rôle : Encadrement technique, protocole de terrain. Situation actuelle : Post-Doc Beijing Forestry Univ. (Chine).

[Doc.21] - 2011 – Adrien Bonneau* : Développement d'un modèle d'enracinement multi-physique basé sur l'agrégation de l'architecture racinaire d'arbres forestiers. Application à l'éco-ingénierie de la stabilité des pentes. Ecole Doctorale : Univ. Paul Sabatier Toulouse. Nationalité : France. Dir. thèse : T. Fourcaud (CIRAD, Montpellier). Mon rôle : Encadrement technique, modélisation, correction articles et manuscrit. Situation actuelle : Ingénieur R&D chez Acceptables Avenirs (Toulouse).
2 publications co-signées : [ACL.38], [COM.61]

[Doc.22] - 2012 - Aye-Aye Thwe : Effects of Acute Ozone Exposure on Dynamic Shoot and Root Growth at Different Developmental Stages of Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). Ecole Doctorale : Kasetsart Univ- Bangkok THAILAND. Nationalité : Myanmar. Dir. thèse : K. Poonpipope (Kasetsart Univ, Bangkok). Mon rôle : Encadrement technique, protocole de terrain, mission de terrain, correction article. Situation actuelle : Chercheur au Department of Agriculture Resaerch (Myanmar).
1 publication co-signée [ACL.41]

[Doc.23] - 2013 – Jessada Sopharat* : Water Balance Modeling of the Rubber Tree (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.) Plantation under Tropical Conditions. Ecole Doctorale : Prince of Songhla Univ. Hat Yai – THAILAND. Nationalité : Thaïlande. Dir. thèse : S. Sayan (Prince of Songhla Univ, Hat Yai). Mon rôle : Encadrement technique, protocole de terrain, mission de terrain, correction article. Situation actuelle : Soutenance de thèse repoussée d'un an.

[Doc.24] - 2013 - Hervé Aholouké* : Evaluation des modalités de gestion de la biomasse du palmier à huile restituée au sol, sur la matière organique du sol et les caractéristiques du palmier à huile dans les plantations villageoises du Bénin. Ecole Doctorale : Cotutelle SupAgro Montpellier et FSA – Abomey Calavi (Bénin). Nationalité : Bénin. Dir. thèse : JL. Chotte (IRD, Montpellier). Mon rôle : Encadrement technique, protocole de terrain, mission de terrain, analyse des données, correction articles et manuscrit. Membre du jury de thèse. Situation actuelle : Chercheur au CRAPP (INRAB-Bénin).
1 publication co-signée : [COM.68]

[Doc.25] - 2013 - Fabien Charbonnier* : NPP du café agroforestier et Service environnemental carbone. Ecole Doctorale : Université NANCY 1. Nationalité : France. Dir. thèse : E. Dreyer (INRA, Nancy). Mon rôle : Encadrement technique, protocole de terrain, mission de terrain, analyse des données. Situation actuelle : Recherche Post-Doc (Mexique).
1 publication co-signée : [POS.9]

[Doc.26] - 2014 - Sebastian Persch* : Fine root dynamics in different land-use treatments on tropical peat soil in Indonesia. Ecole Doctorale : Univ Göttingen (Allemagne). Nationalité : Allemagne. Dir. thèse : D.Hoelscher (Univ. Göttingen, Allemagne). Mon rôle : Encadrement technique, protocole de terrain, analyse des données. Situation actuelle : Thèse en cours (Allemagne/Indonésie).

[Doc.27] - 2014 – Yan Wang* : Subalpine forest root dynamics and interaction with environmental factors over time and space. Ecole Doctorale : Univ Chinese Agriculture. Nationalité : Chine. Dir. thèse : A.Stokes (INRA, Montpellier). Mon rôle : Encadrement technique, protocole de terrain, mission de terrain, analyse des données. Situation actuelle : Thèse en cours (CIRAD Montpellier).

[Doc.28] - 2014 – Jean-Luc Maeght* : Influence de la variabilité climatique sur la dynamique racinaire de teck à différents stades de leur cycle de vie. Ecole Doctorale : SupAgro Montpellier, Nationalité : France. Dir. thèse : A.Stokes (INRA, Montpellier). Mon rôle : Encadrement technique, protocole de terrain, mission de terrain, analyse des données, correction article. Situation actuelle : Thèse en cours, Agent IRD (Ventiane Laos)
1 publication co-signée [ACL.45]

[Doc.29] - 2015 - George Lambais* : Produção e mortalidade de raízes finas em plantações de Eucalyptus grandis sobre solos com diferentes texturas. Ecole Doctorale : Univ Sao Paulo - ESALQ (Piracicaba -Brésil). Nationalité : Brésil. Dir. thèse : L Gonçalves (ESALQ, Piracicaba). Mon rôle : Encadrement technique, protocole de terrain, mission de terrain, analyse des données, accueil 10 mois Montpellier. Situation actuelle : Thèse en cours (ESALQ).
1 publication co-signée [ACL.46]

[Doc.30] - 2015 - Florence Tardy* : Approche par les traits fonctionnels de la compétition pour les ressources entre le bananier, ses adventices et les plantes de services dans les agrosystèmes complexes. Ecole Doctorale : Université Montpellier 2 - ED SIBAGHE. Nationalité : France. Dir. thèse : M. Dorel (CIRAD, Guadeloupe). Mon rôle : Encadrement technique, protocole de terrain. Situation actuelle : Thèse en cours (CIRAD Guadeloupe).

[Doc.31] - 2016 – Céline Pradier* : Rôle fonctionnel des racines profondes en plantation d'eucalyptus - réponse à une réduction des précipitations. Ecole Doctorale : Université Montpellier 2 - ED SIBAGHE. Nationalité : Française. Dir. thèse : P. Hinsinger (INRA, Montpellier) puis **C. Jourdan** (CIRAD, Montpellier). Mon rôle : Encadrement principal, protocole de terrain, mission de terrain, suivi au jour le jour. Situation actuelle : Thèse en démarrage.

[Doc.32] - 2016 – Alaa M. Issa* : RoSoM – Influence of root-soil mechanical interaction on the variability of root architecture. Ecole Doctorale : Université Montpellier 2 - ED SIBAGHE. Nationalité : Syrienne. Dir. thèse : T. Fourcaud (CIRAD, Montpellier) puis **C. Jourdan** (CIRAD, Montpellier). Mon rôle : Encadrement technique et administratif, protocole de terrain, suivi laboratoire. Situation actuelle : Thèse en démarrage.

[Doc.33] - 2016 – Awaz Mohammed* : Effets des variabilités climatiques sur le synchronisme entre la croissance racinaire et aérienne des noyers hybrides en systèmes agroforestiers tempérés. Ecole Doctorale : Université Montpellier 2 - ED SIBAGHE. Nationalité : Syrienne. Dir. thèse : A.Stokes (INRA, Montpellier). Mon rôle : Encadrement technique, protocole de terrain, mission de terrain. Situation actuelle : Thèse en démarrage.

[Doc.34] - 2016 – François Postic* : Utilisation des propriétés électriques des plantes et du sol pour la caractérisation non destructive de la biomasse racinaire. Ecole Doctorale : Université Avignon - ED SAS (Sciences et Agrosociétés). Nationalité : Française. Dir. thèse : C. Doussan (INRA, Montfavet). Mon rôle : Encadrement technique, protocole de terrain. Situation actuelle : Thèse en démarrage.

[Doc.35] - 2016 – Oswaldo Forey* : Vergers plurispécifiques : piloter l'enracinement des arbres en profondeur par l'association d'herbacées dès la plantation. Ecole Doctorale : SupAgro - ED SIBAGHE. Nationalité :

Argentine. Dir. thèse : J. Wery (INRA, Montpellier). Mon rôle : Encadrement technique, protocole de terrain, mission de terrain. Situation actuelle : Thèse en démarrage.

[Doc.36] - 2016 – Marie Chélin* : Influence de la stratégie de destruction du couvert hivernal sur la dynamique spatio-temporelle de la teneur en eau dans le sol sous une culture de maïs. Ecole Doctorale : Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech (Belgique). Nationalité : Française. Dir. thèse : Sarrah Garré (Gembloux Agro-Bio Tech). Mon rôle : Encadrement technique, protocole de terrain. Situation actuelle : Thèse en démarrage.

3.2. Encadrement de Post-Docs [POSD] et CDD [CDD]

J'ai participé ces dernières années à l'encadrement de 2 Post-Docs et 3 CDD dans le cadre de collaborations avec des laboratoires du Nord (Allemagne, Canada, France). J'ai co-signé des publications avec 2 d'entre eux. D'autres publications sont en cours de soumission.

[POSD.1] - 2007 (12 mois) **Muriel Navarro** Post-Doc : Productivité Primaire Nette du cocotier au Vanuatu. CIRAD - CP & VARTC Vanuatu, Nationalité : France
9 publications co-signées : [ACL.29], [ACL.25], [ACL.21], [ACL.15], [ACLN.3], [CHA.3], [POS.9], [COM.38], [COM.24]

[CDD.1] - 2011 (12 mois) **Benoit Cloutier-Hurteau** CDD : Comparaison du comportement des cultures de caféier, eucalyptus et pin face à la contrainte hydrique. Début de méta-analyse des données du projet ATP 07-01 Université de Montréal Canada - Eco&Sols Montpellier, Nationalité : Canada
1 publication co-signée : [COM.67]

[POSD.2] - 2012 (18 mois) **Christina Schreiber** Post-Doc: Detection of pH gradients in between acidifying and alkalizing roots with a novel camera/pH sensor system. Jülich Research center, Allemagne - Eco&Sols Montpellier, Nationalité : Allemagne

[CDD.2] - 2012 (2 mois) **Elsa Defrenet** CDD : Analyse des données de Rhizotrons de l'observatoire Coffee-Flux (Costa Rica) AgroCampusOuest (Rennes) - Eco&Sols Montpellier, Nationalité : France

[CDD.3] - 2013 (1.5 mois) **Matthias Klais** CDD : Construction d'un set de commande d'analyse statistique sur la base de données de dynamique racinaire issue des minirhizotrons. CDD Ingénieur de Recherche INRA Montpellier, Nationalité : Allemagne

3.3. Encadrement de Master 1 [MAS1] et 2 [MAS2]

J'ai participé à l'encadrement de 12 masters (4 master 1 et 8 masters 2) et co-signé des publications avec 3 d'entre eux. D'autres publications sont en cours de soumission avec les étudiants de 2012-2013.

[MAS2.1] - 2007 (6 mois) **Haifa Khudeer** Master 2 : Comparaison de la dynamique de croissance des systèmes racinaires de jeunes plants de pin maritime (*Pinus pinaster*) et de robinier (*Robinia pseudoacacia*) sur des pentes de différents angles en utilisant les rhizotrons. Univ Bordeaux, Nationalité : Syrie

[MAS1.1] - 2009 (5 mois) **Chafia Belhanda** Master 1 : Analyse de la plasticité structurale des différents organes de l'Eucalyptus soumis à une contrainte hydrique. Univ Montpellier 2 - Master 1 Parcours Bio-Ingénierie Spécialité Biotraçabilité, Biodétection et biodiversité (BBB), Nationalité : Algérie

[MAS1.2] - 2010 (3 mois) **Louise Audebert** Master 1: Architecture racinaire de la vigne sous contrainte hydrique. Univ Nancy - Master 1 FAGE, Nationalité : France

[MAS2.2] - 2010 (6 mois) **Mathias Christina** Master 2 : Contribution à l'étude de la dynamique et à la caractérisation des racines fines en plantations d'Eucalyptus grandis installées sur sols ferrallitiques profonds. ENS Lyon - Master 1, Nationalité : France
1 publication co-signée [ACL.36]

[MAS1.3] - 2011 (5 mois) **Sheena Sangay** Master 1 : Caractérisation de la distribution racinaire de la vigne en climat Méditerranéen Univ Nancy - Master 1 FAGE, Nationalité : Pérou

[MAS1.4] - 2011 (5 mois) **Christelle Wonkam** Master 1 : Profondeur d'enracinement des arbres de la forêt tropicale humide. Comparaison entre deux types de sols de RCA. Univ. Montpellier 2, Nationalité : Rép. Centrafricaine

[MAS2.3] - 2011 (6 mois) **Riza Putranto** Master 2: Distribution spatiale de l'expression génique dans différents types de racines chez *Hevea brasiliensis*. Univ Montpellier 2, Nationalité : Indonésie
1 publication co-signée [ACL.39]

[MAS2.4] - 2012 (6 mois) **Elsa Defrenet** Cursus Ingénieur/Master 2 : Evaluation de la productivité racinaire des caféiers dans un système agroforestier au Costa Rica. AgroCampusOuest (Rennes), Nationalité : France

[MAS2.5] - 2012 (6 mois) **Florence Rigel** Cursus Ingénieur/Master 2 : Influence de la disponibilité en eau et en potassium sur la distribution des racines fines dans les plantations d'Eucalyptus au Brésil. AgroParisTech, Nationalité : France

[MAS2.6] - 2013 (6 mois) **Arezki Aberkane** Master 2 : Reconnaissance, recalage et caractérisation de racines dans une séquence d'images prises in situ à partir de minirhizotrons et de scanners optiques circulaires. Univ. Angers - ERIEE - LGi2P de l'Ecole des Mines d'Alès (Photonique, Signal et Imagerie). Nationalité : Algérie
1 publication co-signée [POS.13]

[MAS2.7] - 2014 (6 mois) **Amandine Germon** Cursus Ingénieur/Master 2 : Dynamique racinaire en agroforesterie et conséquences sur le cycle du carbone et la croissance des arbres. Université de Lorraine, Ensaia, AgroParisTech, Nationalité : France

[MAS2.8] - 2014 (2 ans) **Maëla Peron Gomide** Maestria Brésilienne : Dynamique racinaire en agroforesterie et conséquences sur le cycle du carbone et la croissance des arbres. Université de Botucatu (UNESP), Etat de San Paulo, Brésil, Nationalité : Brésil

3.4. Encadrement d'ingénieurs [ING], Licence [LIC], IUT/IUP [IUT]

J'ai participé à l'encadrement de stage de 11 élèves en parcours ingénieur (1^e, 2^e ou 3^e année), 4 étudiants en licence (classique ou professionnelle) et 4 étudiants en IUT/IUP. J'ai co-signé des publications avec 4 d'entre eux.

[ING.1] - 1998 (3 mois) **Sophie Hébert** Cursus Ingénieur (2e année) : Saisie, analyse et traitement des données de croissance racinaire observées sur rhizotrons. Comparaison entre le Vanuatu et l'Indonésie Institut Supérieur Agricole de Beauvais (ISAB), Nationalité : France

[IUT.1] - 1999 (3 mois) **Xavier Rouanet** IUP : Application RHIZODIGIT : Logiciel de saisie et d'analyse de données de croissance racinaire Univ Montpellier 2 - IUP Génie Mathématique et Informatique, Montpellier, Nationalité : France
1 publication co-signée [SOFT.1]

[LIC.1] - 2000 (3 mois) **Lisa Taillet** Licence : Mise en forme et traitements semi-automatique des données rhizotrons issues de RHIZODIGIT. Laboratoire de chimie-Physique de la Faculté de Pharmacie de Limoges, Nationalité : France

[ING.2] - 2001 (3 mois) **Bertrand Mailhé** Cursus Ingénieur 1ère année : Logiciel d'acquisition, de gestion et d'exportation de données via une table à digitaliser. EPSI : Ecole Privée des Sciences Informatiques de Montpellier, Nationalité : France
1 publication co-signée [SOFT.2]

[ING.3] - 2002 (6 mois) **Magali Dechazal** Cursus Ingénieur 3e année : Typologie racinaire et estimation des réserves carbonées souterraines chez le manguier adulte à la Réunion. ISTOM - 3 année, Nationalité : France

[ING.4] - 2003 (3 mois) **Kamal Kansou** Cursus ingénieur 3e année : Mise en place d'essais, conduite, analyse, interprétation sur le rôle des réserves carbonées et la croissance du système racinaire du palmier à huile en Indonésie. ENSA Rennes, Nationalité : France

[IUT.2] - 2005 (3 mois) **Loïc Calvino** IUP: Développement d'un logiciel dédié à l'étude de la dynamique de croissance racinaire via une table à digitaliser et analyse des résultats. Univ Montpellier 2 - IUP Génie Mathématique et Informatique, Montpellier, Nationalité : France
1 publication co-signée [SOFT.3]

[LIC.2] - 2008 (1 mois) **Myrdal Koty** Licence : Dynamique de croissance de l'igname sur rhizotron au champ. Univ Lyon, Nationalité : Bénin

[IUT.3] - 2008 (3 mois) **Suzy Terrier** DUT : Analyse de la plasticité anatomique des feuilles de l'eucalyptus sous contrainte hydrique au champ. Univ. Montesquieu-Bordeaux IV-IUT de Périgueux Génie Biologique - Option Agronomie, Nationalité : France

[ING.5] - 2009 (3 mois) **Kim Roesslé** Coursus Ingénieur 2^e année : Analyse de la plasticité anatomique des feuilles et des tiges de caféier sous stress hydrique. ENITA Bordeaux, Nationalité : France

[ING.6] - 2010 (6 mois) **Olivier Dassou** Coursus Ingénieur 5^e année : Impact du choix de la méthode d'échantillonnage sur la détermination des paramètres de développement racinaire chez le palmier à huile (*Elaeis Guineensis* Jacq.) au Bénin. Ecole d'Ingénieur Agronome de la Faculté des Sciences Agronomiques (FSA) de l'Université d'Abomey-Calavi (UAC) du Bénin, Nationalité : Bénin

[LIC.3] - 2010 (3 mois) **Audrey Aldebert** LicencePro: Analyse de la plasticité structurale des différents organes de caféier soumis à une contrainte hydrique. Université Strasbourg (Agronomie et Agriculture Durable), Nationalité : France

[LIC.4] - 2010 (2 mois) **Charlotte Robert** Licence BFP : Analyse de la dynamique de croissance des racines de caféier sous contrainte hydrique. Licence 3 - Univ Montpellier 2 (parcours Biologie Fonctionnelle de la Plante) Nationalité : France

[ING.7] - 2010 (2 mois) **Alexandre Wenseleers** Coursus Ingénieur 3^e année : Architecture racinaire de la vigne sous contrainte hydrique. SupAgro Montpellier 2 année, Nationalité : Belgique

[ING.8] - 2010 (16 mois) **Joseph Levillain** VSN/Ingénieur : Biomasse de l'eucalyptus au Congo: part du système racinaire dans les bilans de biomasse à l'échelle d'une parcelle. Volontaire Service National à l'URDPI (Pointe Noire, Congo), Nationalité : France
7 publications co-signées : [ACL.34], [POS.8], [COM.56], [COM.55], [COM.54], [COM.52], [COM.42]

[IUT.4] - 2011 (2 mois) **Mohammed El Yayahoui** DUT : Mise au point d'un module de pilotage à distance de l'acquisition d'images de racines d'hévéa. ENSAM I.U.T. GEII Montpellier, Nationalité : France

[ING.9] - 2011 (2 mois) **Thibault Debailleul** Coursus Ingénieur 2^e année : Analyse de la dynamique de la croissance des racines de caféiers sous contrainte hydrique. SupAgro Montpellier, Nationalité : France

[ING.10] - 2012 (5 mois) **Danielle Araujo Barbosa** Coursus Ingénieur 3^e année : Dynamique racinaire de la vigne sous contrainte hydrique. SupAgro Montpellier - Univ. de Recife Brasil, Nationalité : Brésil

[ING.11] - 2012 (1 mois) **Anna Deffner** Coursus Ingénieur 3^e année : Etude de la transpiration au sein d'une population d'Eucalyptus par mesure de flux de sève : Comparaison de la réponse de deux génotypes différents à des conditions de stress hydrique. SupAgro Montpellier 2 année Césure, Nationalité : France

4. Animation de la recherche

4.1. Participation au montage et à la réalisation des projets de recherche nationaux et internationaux

Dans ce paragraphe je listerai les différents projets dans lesquels j'ai apporté ma contribution, en regroupant les projets pour lesquels j'avais un rôle de coordinateur, d'animateur de tâche ou de

participant. Les étudiants que j'ai encadrés dans le cadre des différents projets seront également listés en fin des paragraphes.

4.1.1. Coordination

CIRAD - Action Thématique Prioritaire (ATP, 2007-2011) : Plasticité phénotypique des plantations pérennes sous contrainte hydrique au champ. (Budget : 210k€/3ans, fin du projet en déc. 2010, prolongation d'un an avec l'encadrement d'un Post-Doc (Benoît Clouthier-Hurteau [CDD.1]) jusqu'à fin déc. 2011). Coordination avec JM Gion (CIRAD-BIOS/UPR 39) et responsable de l'activité « racines » chez les 3 plantes (pin, eucalyptus, caféier). Synthèse en séminaire de restitution publique sur 2 jours : 11-12 juillet 2012 (AMAP, CIRAD). Encadrement de 4 stagiaires : [CDD.1], [MAS1.1], [ING.5], [IUT.3], [LIC.3].

ANR 2014 : DEEPROOT "Deep roots of trees and rhizosphere functions as a response to climate change". (Budget : 483 k€ sur 42 mois). Coordinateur du projet et responsable de l'activité dynamique et fonctionnement racinaire (Eucalyptus et Teck). Projet déposé en Octobre 2013 à l'appel générique du plan d'action 2014, classé 98^{ème} sur 692, non retenu pour la seconde phase.

4.1.2. Animation d'un WP

ANR SYSTEMERA (2010-2013) : ECOSFIX « Services écosystémiques des racines – redistribution hydrique, séquestration du carbone et fixation du sol ». (Budget : 980 k€/4 ans, dont 256 k€ en gestion pour mon WP). Coord. A. Stokes. Animation du WP2 sur la caractérisation des sites expérimentaux (Chamrousse, Restinclières, Costa Rica, Laos) et l'homogénéisation des protocoles inter-sites. Responsable de l'activité production racinaire chez le caféier, l'épicéa, le noyer, le teck. Enc. 6 stagiaires [CDD.2], [MAS2.4], [MAS2.6], [MAS2.7], [LIC.4], [ING.9], [ING.11].

FUI/Région (2010-2013) : DISP'EAU « Développement d'un logiciel innovant d'aide à la décision pour le pilotage d'une irrigation de précision de la vigne. Optimisation de la gestion de la ressource en eau et sélection parcellaire » (Budget : 1,8M€/4 ans, dont 140k€ en gestion pour mon WP). Coord. A. Bsaibes. Animation du WP sur la mise au point et réalisation des essais en parcelles pendant 3 ans en Languedoc Roussillon : distribution (cartes d'impacts racinaires et carottages) et dynamique racinaire (minirhizotrons) en fonction du mode cultural du sol et irrigation chez la vigne. Enc. 5 stagiaires [CDD.3], [MAS1.2], [MAS1.3], [ING.10], [ING.7].

4.1.3. Participation

Au niveau international, j'ai participé à de nombreux projets pour lesquels j'avais un rôle de contributeur sur l'aspect « racines » :

Europe STD3 (1996-1999) : « Coconut-based farming system ». (Budget : 1.5M€/4 ans). Coord. S. Braconnier. Ma participation visait à mettre au point une méthode d'estimation de la biomasse racinaire du cocotier soumis à différents traitements de disponibilité en C (castration, élagage) et d'en estimer les effets. Enc. 1 stagiaire [DOC.1].

Strep Europe FP6 (2007-2010) : CARBOAFRICA, 2007-2010) "Quantification, understanding and prediction of carbon cycle, and other GHG gases, in Sub-Saharan Africa". (Budget : 2,8M€/4 ans). Coord. L. Saint-André. Ma participation s'est focalisée sur l'estimation de la dynamique et productivité du compartiment racinaire des plantations d'eucalyptus au Congo. Enc. 2 stagiaires [ING.9], [DOC.11].

Strep Europe FP6 (2008-2011) : INNOVKAR "Innovative Tools and Techniques for Sustainable Use of the Shea Tree in Sudano-Sahelian zone". (Budget : 1,8 M€/4 ans). Coord. JM Bouvet. Mon

intervention au Burkina Faso a consisté à estimer la dynamique racinaire du karité en liaison avec la phénologie aérienne.

PROCOPE n°25083S (2011-2013) Projet bilatéral entre l'UMR Eco&Sols et le Jülich Research Center, Allemagne : "Rhizosphere pH as a key driver of nutrient bioavailability for plants". (Budget : 12 k€/3 ans). Coord. P. Hinsinger, S. Blossfeld. J'ai participé au développement méthodologique et au transfert au champ sur eucalyptus au Brésil de la méthode de suivi du fonctionnement racinaire (absorption minérale) à l'aide d'optodes. Enc. 1 stagiaire [POSD.2].

COST action FP0803 STM (2009-2012) : Réseau européen focalisé sur le bilan carbone souterrain dans les forêts en Europe : "Belowground C in European forests". (Budget : 130 k€/an sur 4 ans). Coord. I. Brunner. Contribution pour un article de synthèse sur le calcul du turnover racinaire (article Brunner et al., 2013 [ACL.6]).

Au niveau national, j'ai commencé par apporter mes compétences au collectif du CIRAD en contribuant à différents projets internes pour lesquels je pilotais l'action « racines » :

ATP 10/96 (1996-1999) : « Simulation de la croissance et de la production du cocotier ». (Budget : 100 k€/4ans). Coord. J. Dauzat. Dans ce projet j'étais responsable de l'estimation de la productivité racinaire du cocotier. Enc. 4 stagiaires [DOC.1], [ING.1], [IUT.1], [LIC.1].

ATP Carbone (2000-2003) : « Séquestration de carbone des plantations de cocotiers et d'eucalyptus ». (Budget : 150k€/4 ans). Coord. O. Hamel. Dans ce projet j'étais responsable de l'estimation de la dynamique de croissance (turnover) et de la productivité racinaire du cocotier et de l'eucalyptus. Enc. 1 stagiaire [DOC.11].

ATP Réserves (2003-2005) : « Les réserves carbonées chez les arbres : origines, dynamiques et conséquences pour la gestion des plantations ». (Budget : 120 k€/3 ans). Coord. I. Mialet-Serra. Dans ce projet j'étais responsable de l'estimation de la biomasse et dynamique de croissance racinaire du cocotier, manguier, palmier à huile. Enc. 4 stagiaires [DOC.5], [POSD.1], [ING.3], [ING.4].

Projet Fédérateur ARPEGE (2005-2008) : « Développement des systèmes racinaires de six monocotylédones cultivées ». (Budget : 90k€/3 ans). Coord. D. Cornet. Dans ce projet j'étais responsable de caractérisation de l'architecture et la dynamique racinaire de l'igname au Bénin et du cocotier au Vanuatu. Enc. 1 stagiaire [LIC.2].

ATP Dirigée SAFSE (2013-2015) : « Recherche de compromis entre productions et services écosystémiques fournis par les systèmes agroforestiers ». (Budget : 200 k€/3 ans). Coord. JM. Harmand. Ma contribution vise à quantifier la part de carbone injecté dans le sol ainsi que sa dynamique annuelle par les systèmes racinaires des arbustes fixateurs d'azote dans les systèmes agroforestiers en Afrique de l'ouest.

A un niveau national hors CIRAD, j'ai contribué récemment à différents projets :

ANR SYSTERRA (2011-2014) : Intens&fix « Intensification de la production de bois par l'association d'espèces fixatrices d'azote dans les plantations forestières ». (Budget : 987 k€/4ans). Coord. JP Bouillet. Mon implication dans le WP2 a porté sur l'estimation des dynamiques racinaires et turnover de l'eucalyptus en association ou non avec l'acacia.

IFC (Institut Français du Caoutchouc, 2010-2011) : RACINES « Maîtrise de l'enracinement de l'hévéa en vue de l'amélioration des rendements et de l'ancrage des arbres dans le sol ». (Budget : 165 k€/2 ans). Coord. H. Robain. Mon rôle a été de concevoir à l'aide d'un stagiaire électronicien un système de pilotage automatique de plusieurs scanners pour estimer la dynamique racinaire in situ. Enc. 1 stagiaire [IUT.4].

RTRA - Agropolis Fondation (2011-2014) : GPF RHIZOPOLIS « A Federative Project for Plant Root Research». (Budget 1M€/4 ans). Coord. A. Gojon. Ma participation au WP C (Integrating root-soil interactions in the rhizosphere at the whole root system level – application to water and nutrient acquisition by plants”) est basée sur l'interaction avec les 2 plateformes de modélisation CIRAD-AMAP et INRA-PSH/EMMAH et sur le couplage entre un modèle d'architecture racinaire et un modèle fonctionnel rhizosphérique avec comme plante modèle l'eucalyptus.

RTRA - Agropolis Fondation (2013-2016) : RoSoM : “Influence of root-soil mechanical interaction on the variability of root architecture”. (Budget : 133k€/3 ans). Coord. T. Fourcaud. Ma participation vise à comprendre les mécanismes d'interaction physique entre les racines et le sol lors de la croissance en longueur et épaisseur avec l'eucalyptus comme plante modèle.

4.2. Relecture d'articles de 2004 à 2013

Je contribue chaque année à la révision de plusieurs articles scientifiques dans 10 revues internationales et en majorité dans celles où je publie régulièrement :

<i>Acta Oecologica:</i>	2	<i>Journal of Experimental Botany:</i>	1
<i>Annals of Botany:</i>	2	<i>Plant and Soil:</i>	9
<i>Annals of Forest Sciences:</i>	1	<i>Plant Root:</i>	1
<i>Ecological Modeling:</i>	1	<i>Scientia Agricola:</i>	1
<i>Forest Ecology and Management:</i>	4	<i>Tree Physiology:</i>	2

4.3. Jurys et comités de thèse

J'ai participé à 2 jurys de thèses en tant qu'examineur et à plusieurs jurys de Master d'étudiants depuis 2010 dont je n'avais pas de rôle d'encadrement (Master2 Ecosystèmes, Master 2 Biodiversité Végétale Tropicale de l'ED Sibaghe, Université de Montpellier II).

Examineur thèse **Stéphane Berthier** (2001) Effets des sollicitations aérodynamiques sur la croissance et le développement du pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.): influence sur la morphogenèse aérienne et racinaire, et sur la formation du bois de cœur. Soutenue le 19/01/2001 à l'Université de Bordeaux I.

Examineur thèse **Eduardo Garcia Villanueva** (2004) Développement conjoint des systèmes aérien et racinaire chez deux génotypes de pommier (*Malus X domestica* Borkh). Soutenue le 15/11/2004 à SupAgro, Université Montpellier II.

Je participe et ai participé à 23 comités de pilotage de thèse pour des étudiants français et étrangers (Allemagne, Bénin, Brésil, Congo, Laos, Thaïlande).

4.4. Contribution à l'évaluation des personnes

Je suis membre nommé à la commission d'évaluation individuelle du CIRAD. Commission Grenat 2013. Président : L. Bruckler (INRA). Commission chargée d'évaluer 3 unités du CIRAD, soit 67 dossiers pendant une semaine.

J'ai participé à la commission de recrutement d'un technicien en mesure physique au CIRAD le 9 juillet 2013 pour une affectation sur nos sites instrumentés de l'UMR Eco&Sols.

4.5. Expertise scientifique et pour des projets nationaux et internationaux

J'ai réalisé diverses expertises de projets nationaux ou internationaux :

Expertise projet innovant INRA 2013 Département EFPA de Damien Bonnal EFF sur le thème : « La compétition entre hêtre et érable en plantations mélangées engendre-t-elle une différenciation de niche pour l'acquisition des ressources ? ».

Expertise projet International Foundation for Science (IFS), Evaluation of first research grant application IFS No. AC/21363 sur le thème : « Dynamique et régénération naturelle assistée du karité (*Vitellaria paradoxa* C. F. Gaertn.) dans les systèmes agroforestiers du Burkina Faso »

Expertise projet Israel Science Foundation (ISF) Proposal No. 46/98-17.1 Dr Amram Eshel sur le thème : "Application of fractal dimensions for describing of the effect of environmental conditions on the structure of plant root systems".

4.6. Commissions et animation d'équipe

Sur le plan de la vie collective au sein de l'UMR, je suis membre nommé au conseil d'UMR de mon unité qui se réunit 3 fois par an et qui statue sur le budget, les recrutements, les affectations, le fonctionnement de l'unité, etc...

J'ai été nommé correspondant d'équipe pendant 6 ans (2005-2010) au sein de l'UPR 80 « Ecosystèmes de plantation » transversale entre agents des départements « Cultures Pérennes » et « Forêts » et participais régulièrement aux comités du département (CODEP) des Cultures Pérennes du CIRAD.

4.7. Organisation de colloques, workshops

Participation à l'organisation du colloque « The Supporting Roots: Structure and Function », 20-24 July 1998 à Bordeaux en tant que membre du comité d'organisation, responsable d'un workshop « Root architecture modelling and simulation. Practical applications » et participant [COM.7]. Coord. A. Stokes. <http://dx.doi.org/10.1080/03071375.1997.9747182>

Organisation d'un workshop « Traitement d'images racinaires sur fond bruité », le 26 mars 2014 à Montpellier, regroupant différents chercheurs/techniciens/étudiants de l'IRD, CIRAD et INRIA (Montpellier), EERIE (Nîmes) et INRA (Montpellier, Montfavet, Dijon, Toulouse et Clermont-Ferrand) pour tenter de lever le verrou de la reconnaissance des racines sur des images issues de scanner/camera prises *in situ*. L'objectif du workshop était de tester plusieurs outils disponibles sur internet ou le marché pour extraire/segmenter/analyser l'information racinaire sur des images à fond bruité (particules de sol) et décider collectivement du meilleur outil en fonction des objectifs initiaux fixés (étude de la dynamique racinaire, phénologie, architecture, morphologie des poils absorbants...). Une ouverture sur d'autres outils de traitement du signal ou d'autres systèmes d'acquisition de signal capables de détecter les racines sur fond bruité a été proposée. Enfin, ce workshop a permis d'ouvrir la réflexion quant à la continuité du projet RTRA-Agropolis Fondation GPF RHIZOPOLIS.

5. Activité de transfert des connaissances

5.1. Activité de formation

Une part importante de valorisation et transfert des connaissances scientifiques et techniques s'est traduite par la création et le montage avec Jean-Louis Chopart (CIRAD - UR SCA) d'un module de formation interne au CIRAD appelé RACIN'SITU « Caractérisation du développement racinaire in situ des cultures annuelles et pérennes ». Ce module de 40 h (cours, TP et TD) est inscrit dans le catalogue des offres de formation scientifique du CIRAD depuis 2004. Il est dispensé exclusivement au Sud (Sénégal en 2004 et 2005, La Réunion en 2006 et 2008, Burkina Faso en 2010, Bénin en 2010, Madagascar en 2011, la Martinique en 2013 et la Guadeloupe en prévision Oct. 2014) auprès des partenaires du CIRAD et en relation avec les problématiques et expérimentations conduites « in situ » par les chercheurs, techniciens et étudiants locaux. Cette formation rencontre un franc succès avec plus de 95% de satisfaction en moyenne par rapport aux objectifs attendus par les stagiaires (évaluation de la formation disponible auprès du service Formation du CIRAD). Parmi les points forts de la formation les plus cités, on trouve « Variabilité des méthodes, regards critiques sur celles-ci par les formateurs ; Bon transfert des connaissances ; Disponibilité des formateurs ; Aspects pratiques et visuels ; Excellentes démonstrations pratiques ; Renforcement des acquis au-delà de la demande ; Bonne ambiance ». Dans les points à améliorer, on trouve : « Manque de temps de manipulation des logiciels ; Résultats complexes à analyser parfois ; Trop de participants (12) ». Au-delà du transfert des connaissances, ce qui me rend le plus fier ce sont les collaborations qui sont nées à l'issue de ces formations (CERAAS-ISRA Sénégal, INRAB-CRAPP Bénin, CRDPI Congo, CIRAD La Réunion, PRAM La Martinique) avec une mise en application des techniques et protocoles enseignés et les publications (8) cosignées avec les étudiants formés.

5.2. Activité d'enseignement

Mon activité de transfert des connaissances ne se limite pas à la formation au Sud, en effet, je suis Enseignant Associé à Montpellier SupAgro depuis 4 ans où je dispense chaque année 4 h de cours et 24 h TP et travaux d'initiation à la recherche au sein de 2 parcours de Master (Viti-oeno et Euromaster Vinifera, module Vine Ecology, ce dernier étant dispensé en anglais) et en 3ème année du cycle d'ingénieur, spécialité Productions Végétales Durables, sur le thème des systèmes racinaires des plantes pérennes cultivées.

Je participe également à des écoles chercheurs (« MOMOS - Décomposition de la MO du sol », 10-15 janvier 2011, Montpellier ; « Des racines et des sols: approches de modélisation » 26 juin-4 juillet 2013, Montpellier) et donne régulièrement des séminaires/lectures (CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2006 ; Kasetsart University, Bangkok, Thaïlande, 2008; VARTC, Espiritu Santo, Vanuatu, ; CRDPI Pointe Noire, Congo, 2010 ; Universidade de Sao Paulo, Piracicaba, Brésil, 2009 ; AfricaRice, Cotonou, Bénin 2011...).

Au cours de mon Doctorat, j'ai été moniteur pendant 3 ans (1992-1994) puis Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (A.T.E.R.) pendant 1 an (1994-1995) à l'Université de Montpellier II, où je dispensais des TP et TD au DEUG B 2ème année en Physiologie Végétale, pour 64h et 96 h d'enseignement/an respectivement.

5.3. Activité d'expertise scientifique et technique auprès d'entreprises privées et contribution aux ressources propres

Au niveau de la recherche de ressources propres, j'ai participé au montage et à la réalisation de 3 projets d'expertises avec des entreprises privées qui ont contribué à l'obtention de ressources pour

mon unité. Le premier concernait l'étude des effets des attaques d'un ravageur des racines (*Sufetula* spp. Lepidopterae) sur la production du cocotier en Indonésie (contrat RSUP, 250 k€, 1997-2001, 1 article publié [ACL.11]). Le deuxième, toujours en Indonésie, concernait l'étude de la stabilité des acacias et eucalyptus sur tourbes profondes à Sumatra (contrat APP, 109 k€, 2007-2010, projet suspendu avant son terme par le consortium). Le troisième projet en cours est centralisé au Bénin où je vise à comprendre les interactions GxE chez plusieurs variétés de palmier à huile avec la recherche de critères de sélection phénologiques et physiologiques (Contrat PalmElit-CIGE, 2009-2021, 4,5k€/an, 1 article publié [ACL.33] ; Enc. stagiaires [DOC.24], [ING.6]).

Ma contribution aux ressources propres du CIRAD est encore plus importante avec ma participation aux différents projets de recherche dont une partie de mon salaire est pris en charge (Carboafrika, Innovkar, Disp'eau, Palmelit...) avec plus de 250 ½ journées contractualisées par an depuis 3 ans. A cela, il faut ajouter les enseignements dispensés à SupAgro et qui sont rémunérés directement au CIRAD, mais aussi les participants qui payent la formation RACIN'SITU (800 €/stagiaire) ainsi que ma participation dans les commissions d'évaluations individuelle quadriennale qui est rémunérée (1000 €/commission).

Partie II : Bilan des activités de recherche (1992-2014)

1. Introduction générale

Au démarrage de ma thèse (1992), l'étude des systèmes racinaires dans leur globalité n'était pas ou que très peu abordée au CIRAD, et les quelques personnes qui abordaient le système racinaire au champ, le faisaient sur des cultures annuelles essentiellement. Ils quantifiaient la profondeur d'enracinement au champ pour paramétrer des modèles de bilan hydrique presque exclusivement. Mon projet de thèse s'est alors focalisé sur la compréhension, la caractérisation et la modélisation du développement architectural du système racinaire d'une plante pérenne tropicale à forte productivité, le palmier à huile. Suite à ma thèse, j'ai souhaité utiliser ma formation et transférer les connaissances acquises sur le système racinaire du palmier à huile à l'étude d'autres plantes pérennes étudiées au CIRAD. Pour cela, j'ai développé un thème de recherche qui n'existait pas au CIRAD sur la caractérisation et la modélisation de l'architecture et du développement des systèmes racinaires des plantes pérennes tropicales de plantation en vue d'estimer la dynamique de croissance, le turnover, la distribution de biomasse et la productivité annuelle racinaire de ces agroécosystèmes complexes.

Les connaissances sont peu nombreuses dans ces agroécosystèmes, encore aujourd'hui, en partie en raison de la difficulté d'observation du compartiment souterrain des plantes, en particulier sur ces terrains souvent peu étudiés et d'accès difficile, mais aussi en raison du faible nombre d'équipes de recherche dont les objectifs scientifiques sont orientés vers les pays du sud. Les enjeux scientifiques sont importants à une échelle mondiale car dans le contexte de changements climatiques globaux, la séquestration de carbone par des écosystèmes de plantation apparaît comme une solution profitable à l'environnement et l'estimation de la part du compartiment souterrain dans cette séquestration reste un verrou scientifique et méthodologique à lever. Par ailleurs, dans ce contexte, avec des fortes augmentations prévisibles des amplitudes et durées des périodes de contrainte hydrique au champ, la connaissance du rôle joué par les racines profondes, notamment chez les plantes pérennes, apparaît essentielle et ce compartiment reste à ce jour quasiment inexploré.

Face à ce constat, et en me replaçant dans un collectif de recherche sur les cultures pérennes, j'ai cherché à élaborer un cadre conceptuel global sur la thématique du développement des systèmes racinaires des arbres, afin de comprendre pour mieux décrire, modéliser et proposer des solutions pratiques et transférables.

Les objectifs spécifiques de mon projet de recherche conduit entre 1992 et 2014 ont été centrés sur l'estimation des stocks de biomasse racinaire, sur l'évaluation de la productivité annuelle racinaire, sur la caractérisation et la modélisation tridimensionnelle de l'architecture et la dynamique de croissance (turnover), l'estimation de la part des racines qui entre dans les cycles biogéochimiques, ainsi que l'estimation de leur durée de vie. Afin d'atteindre ces objectifs, et compte tenu des problèmes méthodologiques existants, une mise au point et une optimisation méthodologique a été nécessaire dans certains cas.

Mon étude porte sur des écosystèmes de plantation à courte (eucalyptus) et moyenne rotation (hévée, caféier, palmier à huile, cocotier) avec des apports d'intrants qui ne sont pas toujours négligeables. La prise en compte de l'impact de ces cultures sur le milieu, dont le maintien du taux de matière organique du sol (durabilité du système) au travers des litières (notamment racinaires) est

un de mes objectifs de recherche. La prise en compte des effets des changements climatiques, notamment la sécheresse (fréquence, intensité, durée) sur la croissance des systèmes racinaires de ces cultures pérennes constitue un autre axe de recherche.

J'ai eu le souci de replacer mes travaux de recherche au sein de deux enjeux essentiels pour les pays du sud : (i) la durabilité des systèmes de production en milieux difficiles (aléas climatiques), et (ii) le besoin d'intensification des systèmes de production face à la croissance démographique.

2. Décrire, comprendre et modéliser l'architecture et le développement racinaire des arbres tropicaux plantés

2.1. Cas du palmier à huile

J'ai contribué à l'étude de l'architecture et du développement du système racinaire du palmier à huile au cours de mon doctorat réalisé à mi-temps entre Montpellier et la Côte d'Ivoire, Station Expérimentale de La Mé (40 km à l'est d'Abidjan). Mon sujet de thèse portait sur la « Modélisation de l'architecture et du développement du système racinaire du palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.) ». J'ai réalisé mon doctorat de l'université Montpellier II au sein du CIRAD – UR AMAP (dir. Philippe de Reffye) sous la direction de Jean-Claude Rémy, directeur de l'UFR Science du Sol de l'INRA-ENSAM de Montpellier.

Les objectifs de mon travail de thèse étaient de décrire l'architecture du système racinaire du palmier à huile pour en comprendre son développement, son fonctionnement, puis de formaliser ces connaissances par des modèles mathématiques pouvant déboucher, au travers de l'expérimentation virtuelle, sur des applications agronomiques. La caractérisation de ce système racinaire a été réalisée sur une chronoséquence, à différents stades de développement de la plante, allant de la germination et la phase juvénile en pépinière jusqu'à la phase adulte au champ en passant par la phase immature. Cette étude a été possible en station expérimentale en Côte d'Ivoire où plusieurs plantations d'âges différents du même génotype sur le même type de sol étaient présentes (Jourdan, 1995b).

Pendant et à l'issue de ma thèse, 18 publications, toutes en premier auteur, ont été publiées dont 6 articles à comité de lecture ([ACL.2] à [ACL.7]), 1 chapitre d'ouvrage [CHA.2], 6 communications orales dans des colloques nationaux ou internationaux ([COM.2] à [COM.7]), 1 poster [POS.1] et 4 articles de vulgarisation ([VULG.1] à [VULG.4]).

2.1.1. Démarche de l'étude choisie

2.1.1.1. Démarche expérimentale de terrain

Le système racinaire du palmier à huile a été caractérisé par une analyse détaillée de son architecture par analyse architecturale (Atger, 1992, Hallé and Oldeman, 1970) et de sa dynamique d'édification. L'analyse architecturale effectuée dans ma thèse s'est appuyée sur trois points essentiels : (i) l'identification et la caractérisation des différents éléments constituant le système (typologie), (ii) la caractérisation de l'agencement relatif des différents axes ainsi que leurs rapports hiérarchiques (topologie et géométrie) et (iii) la caractérisation de la séquence d'apparition des différents composants du système ainsi que de leur mode de développement (Atger, 1992). La réalisation de ces différents points a nécessité la mise en œuvre d'une double approche méthodologique basée, d'une part, sur l'étude structurale, morphologique, anatomique et

géométrique du système racinaire (approche statique) et d'autre part sur la cinétique de la mise en place des différents axes et sur leur processus de croissance et de ramification (approche dynamique). La première approche a donné lieu à différentes excavations (**Figure 3**) plus ou moins profondes (max 4,5 m), au sein d'une chronoséquence de palmier à huile au cours desquelles le système racinaire a été excavé partiellement (arbres adultes au champ) ou totalement (arbres juvéniles en pépinière ou au champ lors de la première année de culture). Au cours de la deuxième approche, pour analyser le suivi dynamique de la croissance racinaire, j'ai adapté la méthodologie des rhizotrons au champ et au laboratoire avec les moyens disponibles sur place. Le suivi a été effectué sur 2 années en même temps que les relevés d'humidité du sol, température (air, sol) et pluviométrie.



Figure 3. Excavation totale (A) et partielle (B) d'un palmier adulte et rhizotron vertical installé sur un palmier juvénile de 2 ans après plantation (C) en Côte d'Ivoire.

2.1.1.2. Démarche de modélisation et de simulation

La démarche du modélisateur est résumée par la **Figure 4**. La première étape consiste à représenter formellement les systèmes ramifiés. En effet, analyse architecturale et observations *in situ* permettent de constituer une collection de données (point 1 et 2 de la **Figure 4**). Ces dernières sont rassemblées dans un fichier informatique ou fichier de codes dans lequel nous avons codifié la topologie et la géométrie des systèmes racinaires (point 3). La deuxième étape est consacrée au traitement des fichiers de codes. Elle permet d'établir les lois de croissance, de mortalité et de ramification des différents axes présents au sein du système. C'est la phase de modélisation mathématique de l'architecture du système racinaire (point 4). Les sorties de ce traitement sont les paramètres des lois probabilistes utilisées afin de rendre compte des phénomènes observés et de leur variabilité. Les différents processus (croissance, mortalité, ramification, ...) ainsi que les paramètres géométriques sont agencés dans un « axe de référence » (De Reffye et al., 1991). La troisième étape consiste alors à renseigner pour chaque processus les valeurs des paramètres issus de la modélisation dans un fichier paramètre à l'aide d'un éditeur. Le fichier paramètre ainsi constitué va servir de base de données au logiciel de simulation AMAPsim (Barczi et al., 2008), encore appelé moteur de croissance (point 5). La quatrième étape est celle de la simulation de l'architecture du système racinaire (point 6). Cette phase aboutit à la création de véritables maquettes virtuelles que l'on peut visualiser en 3-D sur écran d'ordinateur. La cinquième étape consiste à valider le modèle (point 7) par confrontation des simulations avec les observations de terrain (point 7a : cartes d'impacts racinaires sur front de tranchée, comparaison des biomasses...). Un deuxième type de validation, destiné à tester la pertinence des lois mathématiques utilisées, consiste à "re-modéliser" les fichiers de codes issus des simulations (point 7b). La comparaison s'effectue alors entre les paramètres des différentes lois obtenues avant et après la simulation. Une dernière étape, qui consiste à définir des applications pratiques à partir des maquettes virtuelles (point 8), est celle qui intéresse évidemment le plus l'écophysiologiste ou l'agronome. Dans ma

démarche, j'ai appliqué cette double approche alliant architecture racinaire et modélisation probabiliste.

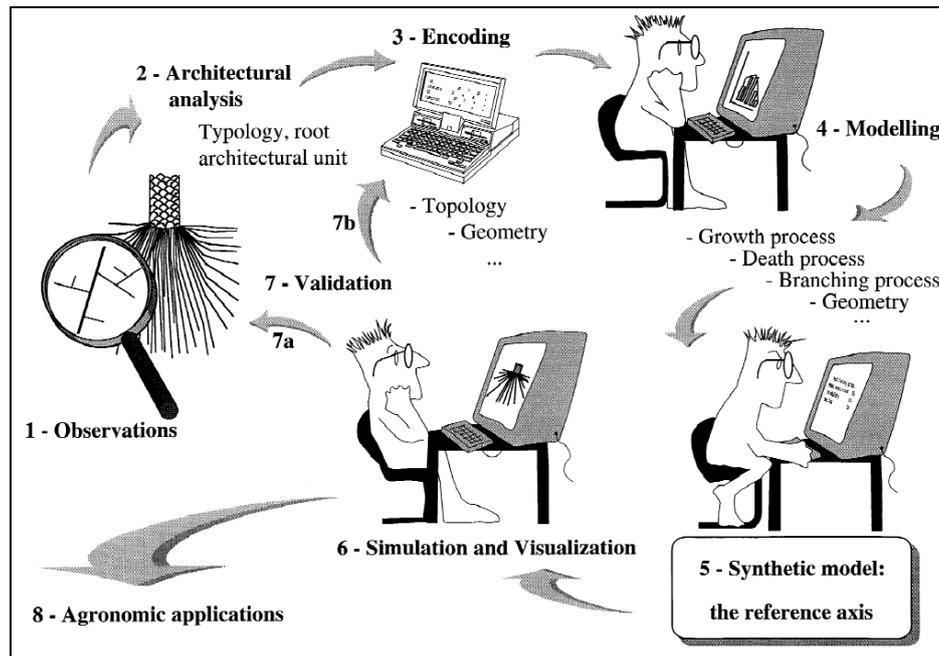


Figure 4. Chaîne de traitement de l'information pour la conception du modèle numérique et la création de maquettes tridimensionnelles par simulation. Selon Jourdan (1995b).

Le modèle : l'axe de référence

Tous les paramètres des différents modèles décrivant la croissance, la mortalité, la ramification, l'élagage racinaire... (décrits dans la partie 2.1.2. Principaux résultats) sont regroupés et ordonnés selon un degré de différenciation croissant dans un modèle mathématique unique appelé « axe de référence » (De Reffye et al., 1991). Cet axe théorique est simulé par un automate gauche-droite orienté fini qui contient toute l'information des états de différenciation des différents types racinaires présents et qui évoluent dans le temps (relation de succession) ainsi que des relations topologiques entre ces types d'axes (relation de parenté). L'axe de référence est en fait un axe végétatif théorique dans lequel on retrouve toutes les étapes de différenciation rencontrées de la germination de la plante jusqu'à sa mort. Chaque étape est caractérisée par un ensemble de valeurs de paramètres des lois de croissance, de ramification et de mortalité (Jourdan, 1995b). Cet axe de référence traduit en fait le changement de fonctionnement des méristèmes et la particularité de ce type de modèle est sa capacité à simuler la typologie racinaire basée sur la notion d'âge physiologique (De Reffye et al., 1991).

Les outils de simulation : AMAPsim et DigR

Le logiciel de simulation de l'axe de référence, AMAPsim (Barczl et al., 2008), qui nous a permis de simuler l'architecture et le développement du système racinaire du palmier à huile, a été initialement développé pour simuler l'architecture et le développement des parties aériennes des plantes, principalement des arbres. Un des principaux challenges méthodologique de mon travail de thèse a été d'adapter cet outil à la représentation formelle des organes souterrains qui ne présentent pas les critères morphologiques apparents retenus pour la partie aérienne et qui constituent la base structurelle du logiciel (pas de nœuds, ni d'entre-nœuds, pas d'unités de croissance marquées), ou la base de temps de calcul (pas de rythmicité apparente, polycyclisme...), sans autres organes

différenciés que des axes (pas de bourgeons, feuilles, fleurs, fruits...). Une solution a été trouvée en créant la notion d'entre-nœuds virtuels basés sur la distance minimale inter-ramifications pour un type racinaire donné (Jourdan et al., 1995a), un peu dans le sens de la « fondamentale distance » entre 2 ramifications de tomate (Newson et al., 1993). En revanche, les notions de topologie, de typologie, d'âge physiologique des méristèmes et de gradient morphogénétique, qui est la base fondatrice de « l'axe de référence » (De Reffye et al., 1991), est bien présente au sein du système racinaire.

Plus récemment, j'ai participé au développement (rédaction du cahier des charges, tests, validation) d'un modèle dédié à la représentation et la simulation de l'architecture des systèmes racinaires de toutes les plantes nommé DigR (Barczy et al., 2011). Cet outil permet, à l'aide d'un nombre relativement limité de paramètres (23) mesurés sur le terrain, de représenter formellement un système racinaire en 3D qui évolue de la germination à la mort de la plante. L'originalité du logiciel qui simule ce modèle est qu'il est conçu pour être couplé à des simulateurs de modèles de type « fonction » et donc qui peut exprimer l'établissement d'une architecture racinaire en fonction du résultat du fonctionnement d'autres organes de la plante et des contraintes environnementales. DigR repose sur trois principaux points clés : (i) l'utilisation de l'analyse architecturale appliquée au niveau de la représentation du système racinaire, (ii) identification indépendante du type de racine et (iii) la gestion de la mise en place de l'architecture indexée sur la position de long des racines.

Les caractéristiques topologiques, comme la croissance apicale, la ramification, la sénescence et la mortalité, ainsi que les caractéristiques géométriques, comme la croissance secondaire ou la distribution spatiale des axes, sont modélisées dans DigR par 23 paramètres pour chaque type de racine dont les valeurs peuvent évoluer en fonction de la position le long des axes de racines. Concrètement et sans rentrer dans les détails, un module topologique régule la vitesse de croissance apicale, la croissance retardée, la mort et les probabilités d'auto-élagage des axes. La ramification est caractérisée par l'espacement et le type des ramifications en mélange. Le module géométrique régule l'augmentation du diamètre des racines, les angles de ramification et les directions de croissance (y compris les déviations locales et réorientation globale).

Le simulateur DigR est écrit en java et fournit une interface utilisateur pour manipuler les valeurs de paramètres d'entrée spécifiques de chaque espèce. Il est intégré dans l'environnement Xplo (Griffon et al., 2011, Griffon and de Coligny, 2013), qui permet une visualisation dynamique 3D, une analyse statistique des données et une sauvegarde au format standard (MTG, Obj, Opf). DigR utilise un algorithme de calcul quasi parallèle et peut être utilisé soit comme une application autonome ou être intégré dans d'autres plates-formes de simulation. Le logiciel est distribué sous licence LGPL gratuite et est dédiée à la fois aux biologistes et modélisateurs.

Ce logiciel est structuré afin de pouvoir héberger des modules externes qui pilotent les contraintes environnementales (densité du sol, température, modèle de bilan hydrique...) afin de rendre compte de la diversité des systèmes racinaires tout en simulant leur plasticité face à ces contraintes. Des travaux sont en cours pour connecter DigR avec des modèles de transport réactif dans le sol (Gérard et al., 2008), des modèles dédiés aux parties aériennes des plantes (Barczy et al., 2008), des modèles écophysologiques (Bornhofen et al., 2011) et, pour coupler ce modèle descriptif pur à un modèle de PDE (équations aux dérivées partielles) qui gère la modélisation par diffusion/advection/réaction du développement et de la distribution des racines fines (Bonneu et al., 2012).

2.1.2. Principaux résultats

2.1.2.1. Unité architecturale racinaire du palmier à huile

Les résultats de l'analyse architecturale révèlent l'existence, après une phase juvénile transitoire, de 8 types racinaires distincts (**Figure 5**) dont chacun peut-être caractérisé par un mode de développement et un état de différenciation particulier. La disposition relative des racines primaires verticales (RI VB) et horizontales (RI H), des racines secondaires horizontales (RII H), verticales dirigées vers le haut (RII VU) et verticales dirigées vers le bas (RII VD), des racines tertiaires de surface (sRIII) et profondes (dRIII) et enfin des racines quaternaires (RIV), représente une véritable unité morphologique et fonctionnelle de l'appareil souterrain que nous avons appelé "unité architecturale racinaire" par référence aux travaux d'Edelin (1984), dans le système caulinaire, puis d'Atger (1992) dans le système racinaire des arbres (Jourdan and Rey, 1997a). Ces différents types traduisent ainsi le polymorphisme racinaire caractéristique chez cette plante.

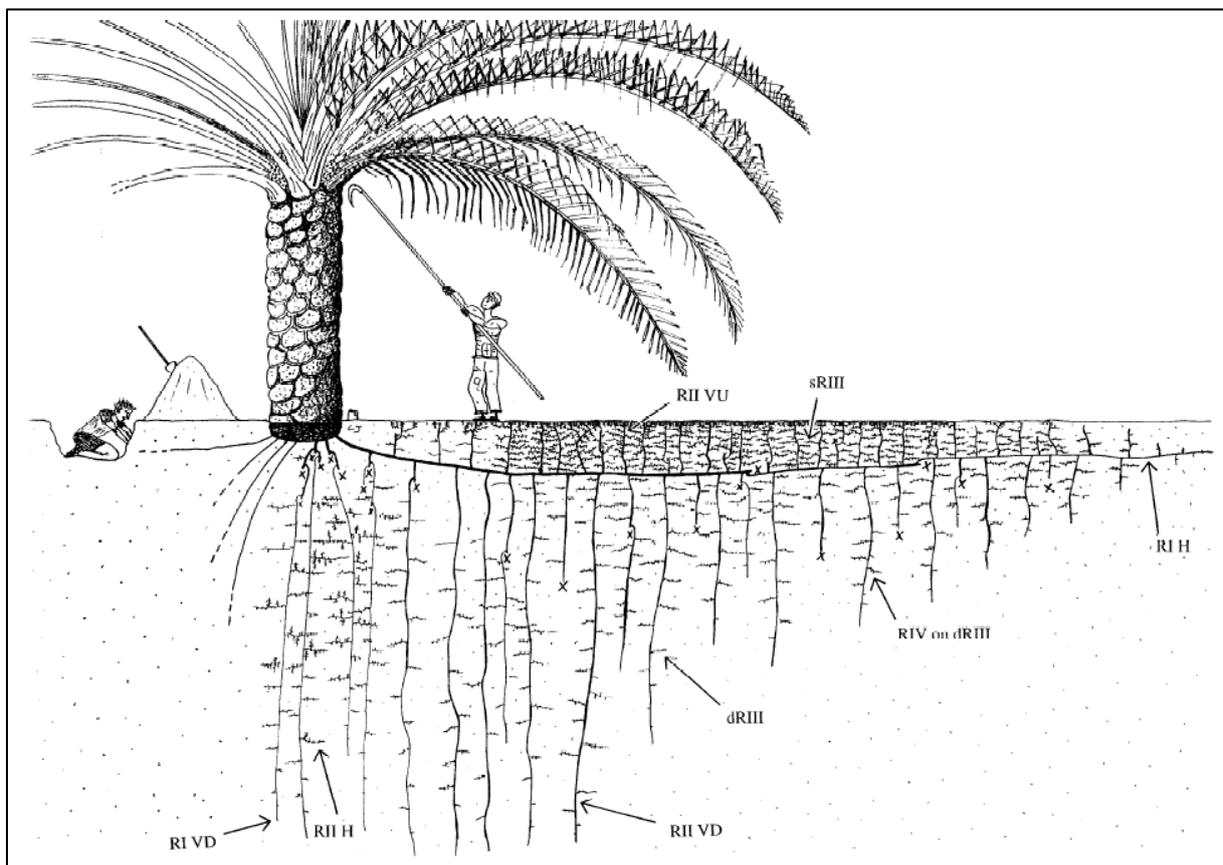


Figure 5. Unité architecturale racinaire du palmier à huile. Dessin partiel du système racinaire d'un palmier âgé de 10 ans avec les 8 types racinaires. La perche du récolteur mesure 3,5 m. Les x indiquent des mortalités d'axes suivis ou non de réitérations. D'après Jourdan & Rey (1997a).

Les systèmes racinaires sont relativement peu étudiés, indéniablement à cause de la lourdeur méthodologique des travaux à mettre en place, mais aussi, probablement, en raison de l'absence de marqueurs morphologiques aussi distincts que les nœuds ou les unités de croissance observés dans les parties caulinaires. Ils demandent par conséquent une observation plus minutieuse. La recherche de marqueurs facilement accessibles est donc indispensable. Au cours de cette étude, nous avons mis en évidence que le diamètre des racines était un bon marqueur de leur vigueur (Jourdan and Rey, 1997a). En effet, nous avons pu montrer, que les racines qui possédaient des vitesses de

croissance élevées, des durées de vie importantes et une ramification peu dense (comme les racines primaires), avaient à la fois un diamètre et un nombre de pôles ligneux importants. A l'opposé, les racines non ramifiées, dont la vitesse d'accroissement est réduite et limitée (comme les racines quaternaires), ont un diamètre et un nombre de pôles ligneux très faibles (**Tableau 4**). De la même façon, nous avons montré l'existence d'une relation étroite entre le diamètre des racines et leurs paramètres de ramification, cas des RII au champ (Jourdan et al., 1995a). D'autres corrélations ont pu être mise en évidence, notamment entre le diamètre des RI juvéniles et la longueur de leur zone apicale non ramifiée, mais aussi entre la vitesse d'accroissement et la longueur de la zone apicale non ramifiée des radicules comme cela a pu être également montré chez le maïs (Pagès et al., 2010). Enfin, si l'on considère la biomasse linéaire (inverse de la longueur spécifique : SRL) comme un critère de différenciation, elle est aussi corrélée positivement au diamètre de toutes les racines au champ (Jourdan, 1995b). Le diamètre racinaire, grâce à son absence de variation le long de chaque racine (caractéristique des Monocotylédones), est donc, chez le palmier, un paramètre morphologique majeur permettant de caractériser avec pertinence les différents types racinaires présents dans le système. Dans la littérature, il existe de nombreux cas de corrélations positives entre le diamètre apical des racines et, d'une part, leur vitesse d'élongation, par exemple chez l'hévéa (Le Roux, 1994, Thaler and Pagès, 1996), l'érable (Lyford and Wilson, 1964), le pin (Wilcox, 1968) ou chez les céréales (Hackett, 1969, Pagès et al., 2010) et, d'autre part, leur structure anatomique interne, en particulier le nombre de pôles de xylème (Charlton, 1967) ou le diamètre du xylème primaire (Horsley and Wilson, 1971).

Tableau 4. Caractéristiques des différents types racinaire au sein de l'unité architecturale racinaire du palmier à huile. Légende : W-Ligneux, NW-non ligneux, I-croissance indéfinie, D-croissance définie, *-valeur maximale observée qui peut être dépassée, DS-ramification diffuse et sylleptique, NB-non ramifié, R-symétrie radiale, B-symétrie bilatérale, L-élagage à long terme > 6 mois, M-élagage à moyen terme 1-3 mois, S-élagage à court terme < 1mois. Selon Jourdan (1995b).

Morphological parameter	RI VD	RI H	RII VU	RII VD	RII H	sRIII	dRIII	RIV
Woody axis	W	W	W	W	W	NW	NW	NW
Geotropism	Orthogeotropic (positive)	Plagiogeotropic	Orthogeotropic (negative)	Orthogeotropic (positive)	Ageotropic	Ageotropic	Ageotropic	Ageotropic
Average diameter (cm)	0.53 ±0.07	0.63 ±0.10	0.18 ±0.05	0.23 ±0.08	0.15 ±0.04	0.10 ±0.03	0.10 ±0.03	0.05 ±0.01
Growth	I	I	I	I	D	D	D	D
Maximum length (cm)	600*	2500	200	600*	50	20	10	1.5
Branching	DS	DS	DS	DS	DS	DS	DS	NB
Symmetry	R	B	R	R	R	R	R	R
Self-pruning	L	L	M	M	M	M	M	S

L'étude de la dynamique de mise en place de ce système racinaire a permis, entre autres, de dégager deux processus de croissance fréquemment rencontrés dans les parties aériennes de nombreuses plantes et relativement peu décrits dans les parties souterraines. Il s'agit (i) du processus de croissance par intercalation qui conduit à l'installation d'un nouveau type racinaire en s'intercalant entre l'axe primaire et le système latéral déjà en place, et (ii) du processus de croissance

d'établissement où progressivement les organes présents deviennent de plus en plus développés jusqu'à un stade ultime qui se répète jusqu'à la mort de l'individu. Le développement du système racinaire du palmier à huile s'effectue donc par étapes qui s'enchaînent graduellement jusqu'à l'expression de l'unité architecturale (mise en place 1 an après la germination), puis se poursuit par la répétition (réitération) de cette unité tout au long de la vie du palmier (**Figure 6**).

La continuité dans les caractéristiques de développement des différents types racinaires répertoriés nous a permis de définir un gradient morphogénétique au sein duquel chaque type de racine pouvait se positionner. Cette classification des racines, ordonnées selon leur état de différenciation, forme un véritable continuum racinaire que nous avons formalisé au travers d'un axe théorique (axe de référence) qui regroupe toutes les caractéristiques des différentes racines.

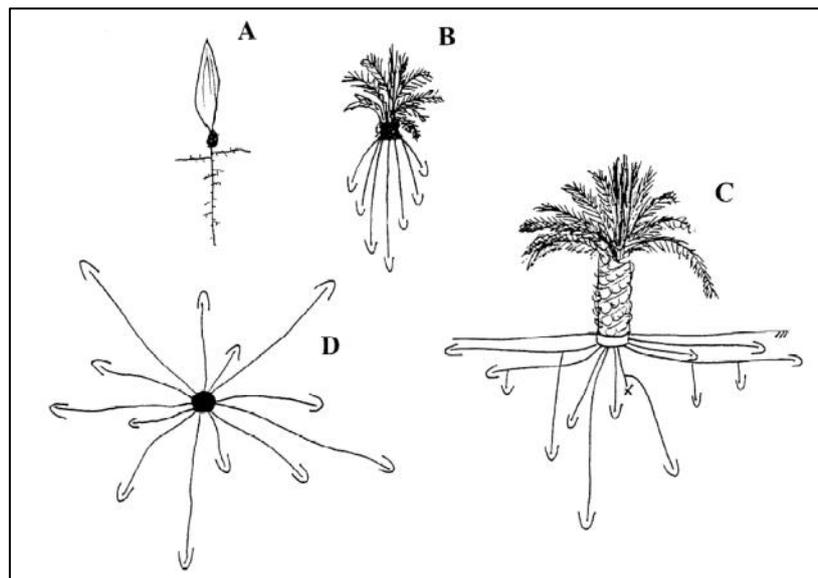


Figure 6. Différents stade de développement du système racinaire. Le stade radicule (A) est rapidement remplacée par le stade R1 juvénile (B) puis par le stade adulte (C: vue de profil, D: vue de dessus). Les R1 et R2 verticales avec les R1 horizontales participent à l'extention de la zone d'exploitation du palmier en profondeur et en surface respectivement (C). L'émission continue racinaire à la base du stipe et le processus de réitération des R1 permettent une exploitation permanente de l'espace proximal (D). Selon Jourdan (1995b).

Les observations réalisées sur le processus d'enracinement du palmier à huile, depuis sa germination jusqu'à sa phase adulte, nous ont permis de vérifier que l'installation des différents types racinaires au cours du temps ne s'effectuait pas de façon aléatoire et désordonnée mais selon un programme bien déterminé. La réalisation de ce programme, qui traduit en fait le développement des différents méristèmes selon leur propre séquence de différenciation, va conditionner la dynamique de mise en place de l'architecture racinaire.

Dans son ensemble, le système racinaire du palmier à huile est caractérisé par la succession dans le temps de trois phases (**Figure 6**) : (i) une très brève où la radicule présente un "état orthotrope" marqué, comparable au pivot des plantes ligneuses, (ii) une phase transitoire où les R1 juvéniles caractérisent, toujours par analogie avec le système racinaire pivotant, un "état orthotrope" et enfin (iii) une phase beaucoup plus longue où les R1 VB représentent un "état orthotrope" et les R1 H un "état plagiotrope". Le système racinaire du palmier à huile apparaît alors comme un ensemble homogène de racines différenciées et hiérarchisées.

Cette continuité dans les caractéristiques de développement des différents types racinaires répertoriés nous a permis de définir un gradient morphogénétique entre les racines primaires, responsables dans l'ancrage et l'exploration du sol, d'une part et les racines quaternaires, impliquées plutôt dans l'acquisition des ressources hydro-minérales, d'autre part. Le long de ce gradient, nous avons pu alors positionner l'ensemble des racines mises en place par le palmier et mettre ainsi en évidence un véritable *continuum racinaire* (Jourdan and Rey, 1997a).

2.1.2.2. Modélisation de l'architecture racinaire du palmier à huile

La reconnaissance de ces types racinaires au sein de ce continuum, selon leur état de différenciation et leur séquence de mise en place, nous a permis d'établir les bases qualitatives d'une formalisation mathématique du fonctionnement des méristèmes racinaires (Jourdan and Rey, 1997b). Les modèles mathématiques utilisés sont basés sur des processus stochastiques (graphes, automates, lois de probabilité).

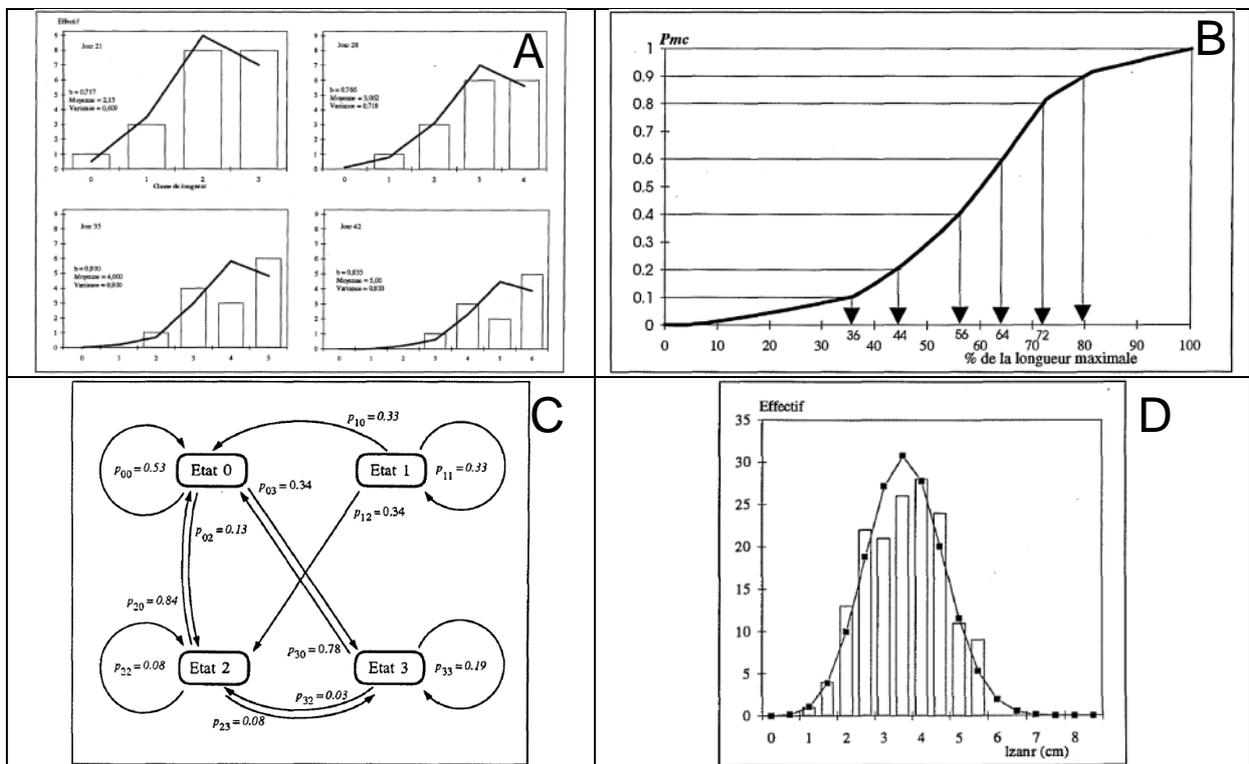


Figure 7. Modélisation des processus : de croissance (A) par une loi binomiale décalée ; de mortalité (B) par un ajustement empirique d'une fonction polynomiale; de ramification (C) par un automate non orienté (chaîne de Markov) ; et du délai à la ramification (D) par une loi binomiale décalée. Selon Jourdan (1995b).

Le processus de croissance des racines a été modélisé par des lois binomiales décalées ajustées sur les histogrammes des classes de longueur de racines en fonction du temps (Figure 7A). Le fonctionnement du méristème est alors assimilable à une succession de tirages au sort indépendants affectés chacun de la même probabilité de donner une nouvelle unité de croissance élémentaire. Dès lors, on peut utiliser le calcul des probabilités pour modéliser ce fonctionnement. Compte tenu de l'équivalence entre les valeurs obtenues pour tous les types racinaires, aussi bien en phase juvénile qu'au champ, et estimés par 3 méthodes différentes, nous avons affecté à toutes les racines une probabilité d'élongation égale à 0,8 (Jourdan, 1995b). La différence de vitesse d'élongation entre types racinaires se gère donc avec la taille de l'unité de croissance élémentaire et le rythme.

Le processus de mortalité des axes racinaires a été caractérisé par leur longueur maximale atteinte pour un âge de la plante. Nous avons défini un découpage arbitraire de la probabilité de mortalité cumulée (P_{mc}) en plusieurs classes. A chaque classe de mortalité correspond un segment de racine pour lequel, tout au long de son développement, sa probabilité de mortalité reste constante. Ce découpage est effectué en tenant compte de la forme de la courbe de mortalité (**Figure 7B**).

Le processus de ramification a été formalisé par un modèle stochastique de type automate non orienté représenté par des chaînes de Markov. Dans un premier temps (Jourdan et al., 1995b), nous avons utilisé un automate à deux états (non ramifié, ramifié), homogène (processus indépendant du rang des états sur l'axe porteur) et d'ordre 1 (l'état de rang n ne dépend que de l'état de rang $n-1$). Par la suite, afin de rendre compte de la répartition des différentes racines latérales produites, nous avons utilisé des chaînes de Markov à quatre états (Jourdan et al., 1995a). Les probabilités de transition d'un état à l'autre caractérisent la succession des racines filles sur l'axe mère en tenant compte du voisinage immédiat de ces racines; ce sont des probabilités conditionnelles (**Figure 7C**). Les probabilités de transition tiennent donc compte, non seulement de l'état de l'unité de longueur élémentaire précédente mais aussi de la nature de l'axe porté. L'automate est ainsi capable de rendre compte de la succession des différents types de formations latérales portées par l'axe qui les a initiées.

Le délai à la ramification est le temps que met une racine mère à initier une racine latérale jusqu'à l'apparition de celle-ci à sa surface. Ce temps peut être traduit en termes de longueur, par l'intermédiaire de la vitesse de croissance de la racine mère. Le délai à la ramification est donc représenté par la distance entre la dernière racine latérale émergée et l'apex de l'axe mère. Ce processus se caractérise par la longueur de la zone apicale non ramifiée (*lzanr*). Tous les types racinaires ont une *lzanr* globalement stable sur une longue période. L'histogramme des *lzanr* pour l'ensemble des racines, de forme unimodale, a été ajusté par une loi binomiale décalée (**Figure 7D**).

Les paramètres géométriques des systèmes racinaires rendent compte globalement de la répartition des racines dans l'espace. La mesure de ces paramètres revient à caractériser les angles d'émission des racines à la base du stipe, sur le plateau racinaire, les angles d'insertion entre les axes porteurs et les axes portés, la répartition radiale des RI autour des palmiers et des racines portées sur leurs axes porteurs et enfin la direction générale de croissance des racines dans le sol. Chez le palmier, les angles d'émission sont compris entre 15° et 90° par rapport à l'horizontale. Les angles d'insertion des différentes racines latérales sur leur porteur sont toujours très proches de 90° . Les racines primaires se répartissent radialement de façon homogène autour des palmiers, aucune rhizotaxie n'a pu être mise en évidence quels que soient les types racinaires. Les paramètres géométriques n'ont pas fait l'objet d'une modélisation approfondie, leurs diverses valeurs moyennes ont été directement introduites dans le modèle, associées à des probabilités de variation autour de ces valeurs. Parmi les paramètres géométriques communs à toutes les racines, deux phénomènes supplémentaires ont été pris en compte : (i) la croissance des racines n'étant pas rigoureusement rectiligne, nous avons associé à chaque racine une probabilité d'effectuer de faibles déviations aléatoires ; (ii) chaque racine du palmier gardant un diamètre constant tout au long de sa vie, le module de croissance en épaisseur des axes au cours du temps n'a pas été utilisé.

Tous les paramètres des différents modèles décrits ci-dessus ont été regroupés et ordonnés selon un degré de différenciation croissant, dans un modèle mathématique unique appelé " axe de

référence " (**Figure 8**). Cet axe théorique est simulé par un automate orienté fini qui formalise la topologie du système racinaire du palmier, sa typologie mise en évidence par l'analyse architecturale, les paramètres des processus précédemment modélisés y compris les paramètres géométriques, ainsi que l'évolution de tout ce qui précède au cours du temps. A titre d'exemple, la représentation formelle de l'architecture du système racinaire du palmier adulte par l'axe de référence est schématisée dans la **Figure 8**. A partir de cet axe de référence, il est désormais possible de reconstituer l'architecture des différentes parties du système racinaire du palmier en définissant un automate à 725 étapes qui autorise sa simulation de 0 à 25 ans (Jourdan, 1995b).

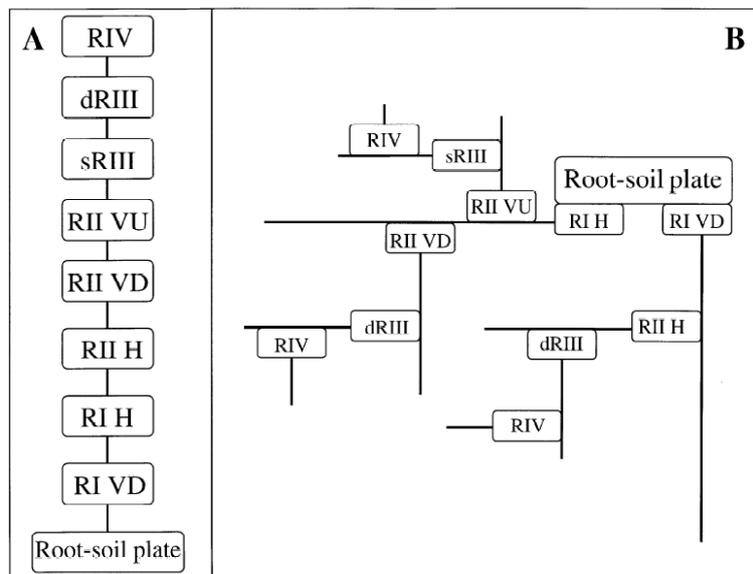


Figure 8. Représentation linéaire de l'axe de référence du palmier à huile (A) et sa représentation structurée (B).

2.1.2.3. Simulation de l'architecture et du développement racinaire du palmier à huile

L'utilisation de logiciels de simulation, a permis de créer des maquettes numériques tridimensionnelles dont la validation par confrontation aux observations de terrain (**Figure 9**) paraît satisfaisante (Jourdan and Rey, 1997c).

Les maquettes numériques peuvent être mises en scène dans une plantation virtuelle créée par un logiciel approprié (**Figure 10**). Le respect des dispositifs traditionnels de plantation (9 m en triangle équilatéral) permet de visualiser, puis de quantifier l'occupation spatiale des systèmes racinaires en fonction de l'âge des palmiers. Cette quantification autorise un autre type de validation des simulations. Pour ce faire nous avons simulé des cartes d'impacts racinaires à l'aide d'une grille virtuelle (**Figure 11**). La confrontation de ces cartes avec les cartes d'impacts racinaires observées sur le terrain à l'aide d'une grille (réelle) de taille identique a été réalisée en comparant les histogrammes des nombres moyens de racines par horizons de sol issus des cartes d'impacts. Les résultats ont été concluants (Jourdan, 1995b) et ont constitué une deuxième méthode robuste de validation tant sur le nombre que sur la répartition des racines dans l'espace en 3D.

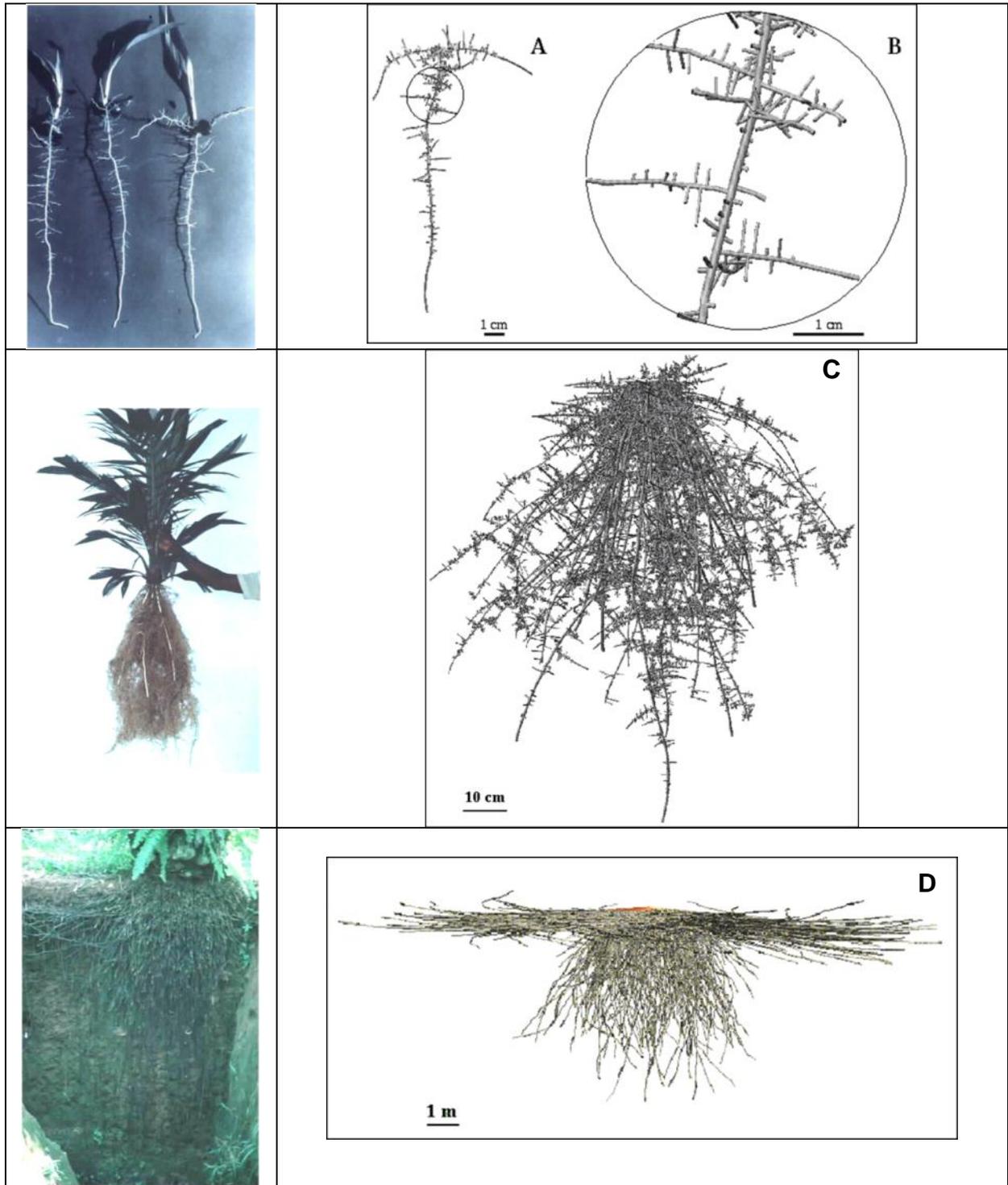


Figure 9. Photos (colonne de gauche) et simulations (colonne de droite) de systèmes racinaires de palmier à huile âgés de 1 mois (A, détail B), 1 an (C) et 10 ans (D, racines primaires seules). Modifié selon Jourdan (1995), Jourdan & Rey (1997c).

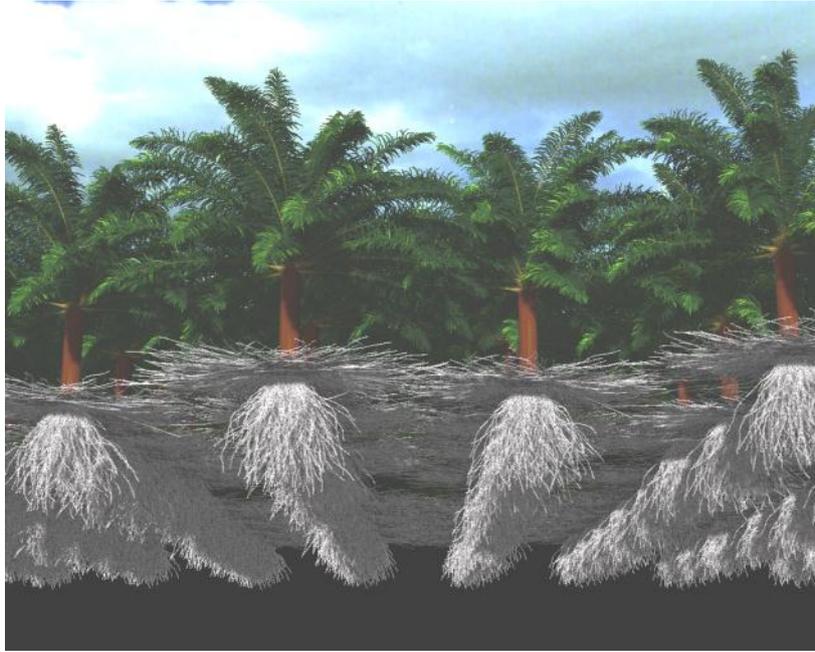


Figure 10. Palmeraie virtuelle âgée de 8 ans (densité 143 arbres/ha) avec des systèmes racinaires uniquement composés de racines primaires. Le système aérien a été simulé également par AMAPsim (Lecoustre). Selon Jourdan et Rey (1997c).

La mise en situation de plantation virtuelle permet de prévoir l'âge à partir duquel les systèmes racinaires des palmiers entrent en compétition pour l'espace et de préciser les horizons concernés (Figure 12A). Cette application a permis, dans le cas du cocotier, d'optimiser la gestion des cultures intercalaires dans les cocoteraies villageoises au Vanuatu [ACL19](Lamanda et al., 2008).

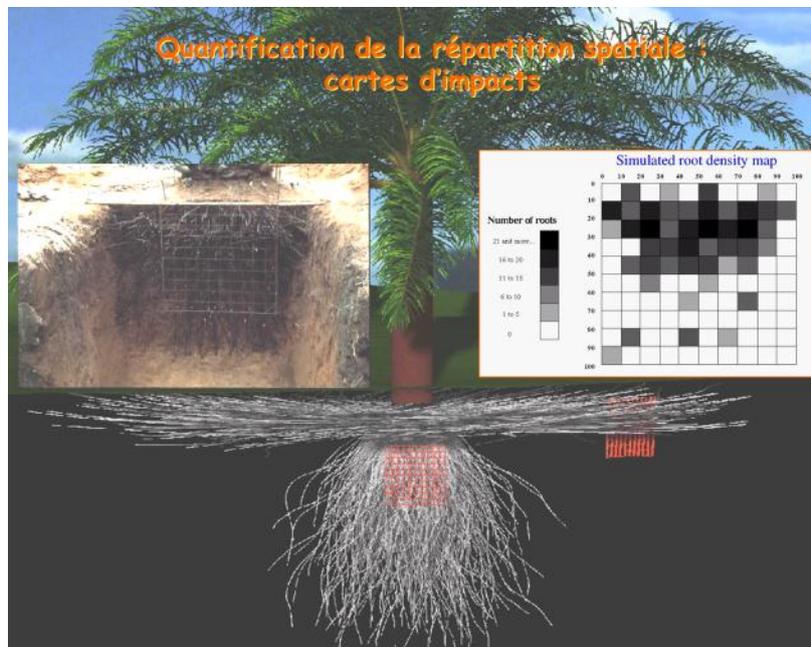


Figure 11. Simulation d'un palmier âgé de 8 ans avec 2 grilles virtuelles permettant de calculer des cartes d'impacts racinaires virtuels (encart de droite) à comparer aux observations de terrain (encart de gauche). (Jourdan & Rey, 1997c).

Une autre forme de validation de ces maquettes a été effectuée en comparant les résultats de biomasse racinaire virtuelle et sa répartition dans l'espace autour des palmiers avec les valeurs observées au champ au sein de la chronoséquence étudiée. Pour ce faire, nous avons déterminé

pour les différents types racinaires la biomasse linéaire et son ajustement avec le diamètre et la distance à l'apex (Jourdan and Rey, 1997c). Les biomasses racinaires obtenues par simulation sont de 0,02, 3,0 et 55 t/ha pour des parcelles âgées de 1, 4 et 16 ans, respectivement. Les observations au champ par carottage (8 cm de diamètre, 256 trous/arbres) et limitées à 1 m de profondeur ont révélé seulement 1,4 t/ha (Ouvrier, 1995) pour une plantation âgée de 4 ans et les prélèvements par monolithes (20 x 20 x 10 cm, 3 répétitions) dans 2 plantations âgées de 16 ans ont révélé des biomasses racinaires de 31,4 t/ha à La Mé (Rey, 1988) et 58,8 t/ha à Dabou (Braconnier and Caliman, 1989) toujours en Côte d'Ivoire. En utilisant la même taille de la fosse et en la plaçant au même endroit que Rey (1988), nous avons obtenu par simulation 25,4 t/ha (Jourdan and Rey, 1997c).

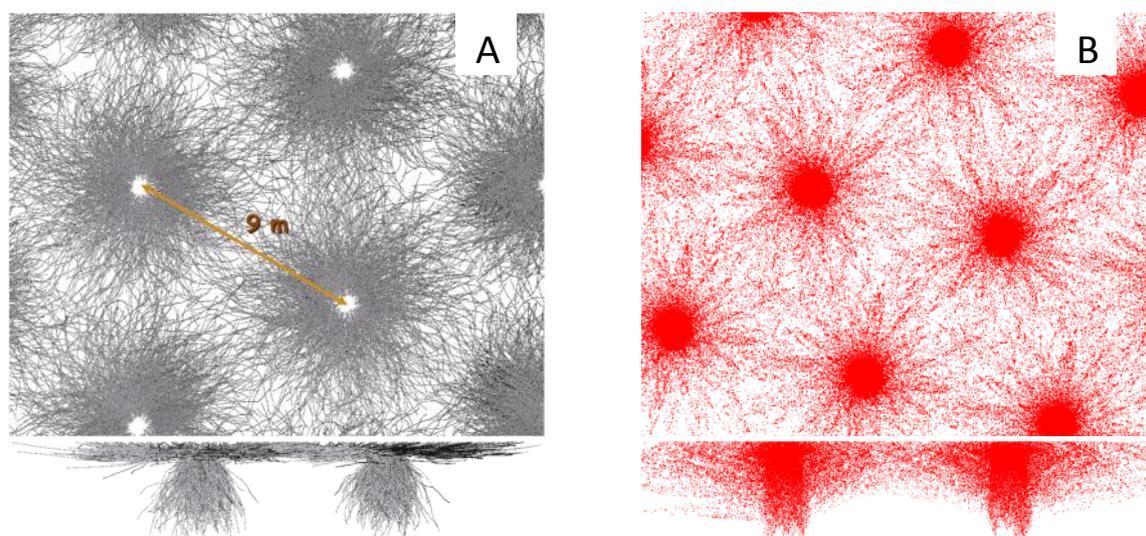


Figure 12. Simulation d'une plantation (143 arbres/ha) âgée de 7 ans (A) et 5 ans (B) vue de dessus (haut) et de profil (bas) mettant en évidence la compétition pour l'espace des racines primaires seules (A) et des zones absorbantes des racines primaires et secondaires seules (B). Modifié selon Jourdan (1995b) et Jourdan & Rey (1997c).

Le modèle a été validé sur la biomasse racinaire du même génotype mais dans d'autres conditions pédoclimatiques, au Bénin, où la contrainte hydrique s'exprime plus fortement qu'en Côte d'Ivoire. La biomasse racinaire totale a été estimée par excavation de grands volumes (méthode « Voronoï ») à 2,87 t/ha (contre 3,0 t/ha par simulation) pour une plantation âgée de 4 ans (Nodichao et al., 2011). Pourtant, la production en huile du palmier au Bénin est environ 2 fois inférieure à celle de Côte d'Ivoire. Au cours de cette même étude, plusieurs génotypes ont été caractérisés et leur biomasse racinaire estimée. Celle-ci fluctue entre 2,4 t/ha pour le génotype sensible et 3,2 t/ha pour le génotype considéré tolérant à la contrainte hydrique (Nodichao et al., 2011). Cette robustesse du modèle validé en conditions pédoclimatiques comparables (Afrique de l'Ouest) a été confirmée par des observations en Indonésie, avec du matériel d'origine contrastée (Yangambi en Indonésie contre Deli x Lamé en Afrique) et qui produit environ 2 fois plus d'huile qu'en Côte d'Ivoire. En effet, la biomasse racinaire a été estimée à Libo (Sumatra, Indonésie) à 15,6 t/ha pour des palmiers âgés de 9 ans [ING.4](Kansou, 2003) et s'insère très bien sur la courbe d'évolution de biomasse racinaire du palmier à huile simulée (Figure 13).

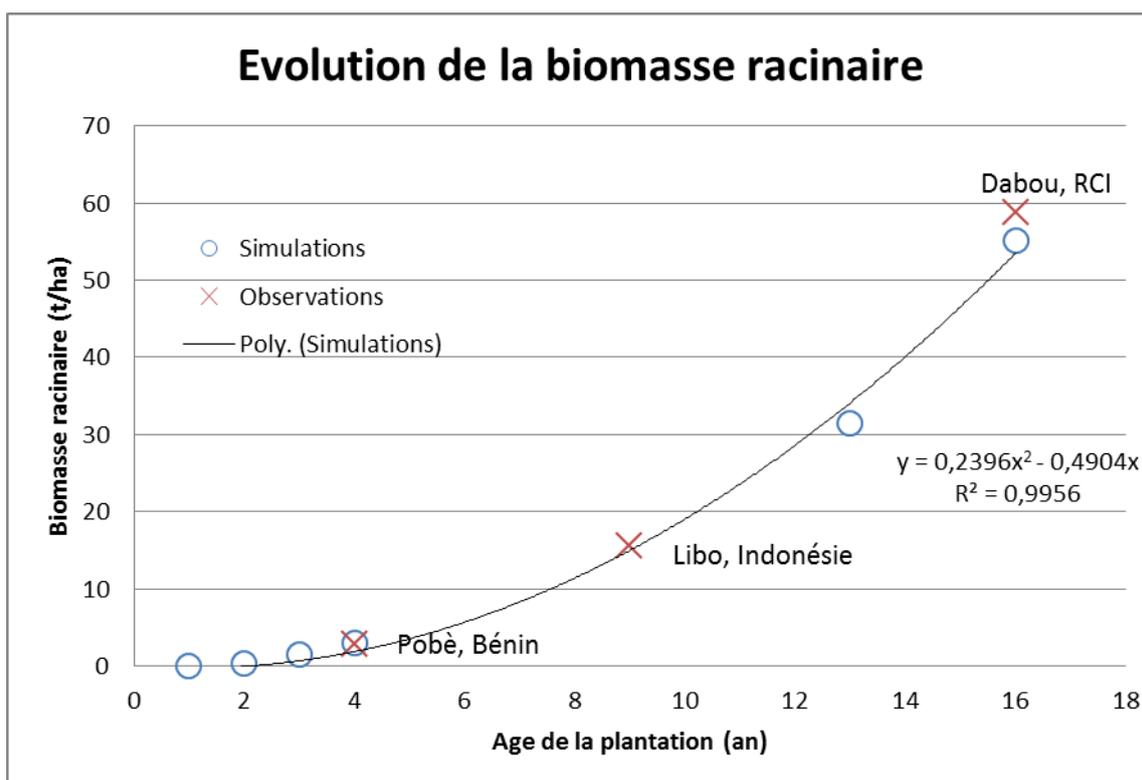


Figure 13. Evolution de la biomasse racinaire du palmier à huile en plantation (143 arbres/ha) obtenue par simulation (ronds) et validation par des observations (croix) dans plusieurs pays avec du matériel végétal différent. (Jourdan, 1995).

L'application la plus intéressante issue de l'utilisation de ces maquettes numériques tridimensionnelles, en termes fonctionnels, est la localisation et l'estimation des surfaces absorbantes et le calcul du volume de sol rhizosphérique utile pour l'absorption des éléments. Après une étude de localisation de zones absorbantes des racines juvéniles faite par vidéodensitométrie d'indicateur coloré basée sur la caractérisation de l'excrétion de H^+ le long des racines à proximité des apex (Jourdan, 1995a), étude validée par des observations anatomiques de chaque type racinaire au champ (Jourdan, 1995b), nous avons pu matérialiser ces zones actives sur les maquettes numériques et passer à des simulations en condition de plantation (**Figure 12B**). Sur l'exemple choisi en **Figure 11B**, la simulation montre qu'à l'âge de 5 ans après plantation, la colonisation de l'espace par les zones absorbantes est presque totale en surface et à 7 ans, la colonisation est totale (Jourdan, 1995b). L'impact sur les cultures intercalaires peut donc être appréhendé et une optimisation des densités de plantation ou du timing de gestion des cultures associées en fonction de l'âge de la plantation peut avoir lieu. Nous avons pu estimer la part des racines absorbantes d'une plantation, elle s'élève à 23% de la surface racinaire totale à l'âge de 5 ans dont la majeure partie (84%) est assurée par les racines tertiaires (29%) et quaternaires (55%) qualifiées classiquement de racines absorbantes (Purvis, 1956). Il ne faut cependant pas négliger la part certes faible (16%) des surfaces absorbantes assurées par les racines primaires et secondaires qui permettent toutefois l'extension latérale et en profondeur du système racinaire (Jourdan and Rey, 1997c).

Concernant l'estimation du volume de sol utile (rhizosphère), défini par le volume dans lequel l'absorption des éléments minéraux est possible au temps t , nous devons connaître la taille du rhizocylindre pour chaque élément étudié. Des estimations sur la mobilité des ions phosphate et potassium pour lesquels les rayons des rhizocylindres sont classiquement estimés à 1 mm et 1 cm respectivement (Callot et al., 1982), ont permis d'obtenir des volumes de sol utile de 33 et 235 m^3/ha

pour prélever ces éléments dans une plantation âgée de 5 ans. La proportion par rapport au volume de sol potentiellement exploitable à cet âge reste faible, surtout pour le phosphate, qui est le nutriment majeur le moins mobile dans les sols.

Les résultats de simulation obtenus, au travers des maquettes numériques, ouvrent le champ à de nombreuses applications agronomiques allant de l'estimation de l'occupation spatiale des racines d'une plantation en fonction de son âge et de sa densité de plantation à l'estimation de la distribution de la biomasse racinaire, des surfaces absorbantes et du volume de sol utile pour absorber les éléments, exploré par les racines. Ces divers résultats permettent d'envisager des perspectives plus larges comme l'étude des flux de carbone et d'eau dans le système racinaire et la plante entière ou l'approche des phénomènes complexes de compétition racinaire pour prélever les éléments minéraux. Ils permettent en outre de réfléchir sur la localisation optimale de l'apport d'engrais et d'estimer la quantité minérale prélevée (et donc à restituer) par un couplage à un modèle d'absorption. Une étape importante à franchir reste la caractérisation des zones absorbantes et l'estimation des prélèvements de toutes les racines au champ, y compris celles en profondeur. C'est un des objectifs de la thèse que conduit Céline Pradier [DOC.31] au Brésil et qui constitue une partie de mon projet de recherche (cf. Partie III).

Par ailleurs, la prise en compte de l'environnement rhizosphérique dans les modèles et de ses effets sur les racines demeure un challenge. Or les modèles actuels d'interactions racine-sol et les processus biogéochimiques dans la rhizosphère ne tiennent pas compte des hétérogénéités spatiales ou temporelles des interactions racine-sol et donc ne parviennent pas à prédire la nutrition des plantes, dans les sols pauvres en éléments nutritifs en particulier (Hinsinger et al., 2011). Afin de combler cette lacune, et dans le cadre du projet RHIZOPOLIS (Agropolis Fondation) toujours en cours, nous tentons d'évaluer l'hétérogénéité spatiale et temporelle de l'acquisition de l'eau et des éléments nutritifs (N, P, K) au sein de l'ensemble du système racinaire par une double approche de couplage de modèle : (i) couplage d'un modèle d'acquisition d'eau et d'éléments minéraux simplifié (Doussan et al., 2006) avec un modèle d'architecture racinaire complexe tel que RootTyp (Pagès et al., 2004) et DigR (Barczi et al., 2011), et (ii) couplage entre un modèle complexe d'acquisition de l'eau et des minéraux, Min3P (Gérard et al., 2008), et un modèle d'architecture racinaire simple basé sur des équations différentielles partielles (Bonneu et al., 2012)[ACL.38].

2.2. Cas des autres plantes pérennes

Suite à ma thèse, j'ai contribué à la consolidation d'un axe de recherche au CIRAD centrée sur l'étude et la modélisation de l'architecture racinaire des plantes pérennes au travers de l'encadrement direct ou en collaboration de plusieurs doctorants ([DOC.1], [DOC.6], [DOC.7], [DOC.9], [DOC.11], [DOC.19], [DOC.21]). Je présenterai ici 3 exemples de mon investissement significatif chez le cocotier/cacaoyer en association en plantation industrielle [DOC.1] ou en milieu villageois [DOC.6] et chez l'eucalyptus [DOC.11] en monoculture.

2.2.1. Le cocotier et le cacaoyer

Le but de cette étude a été d'aborder différents aspects des interactions racinaires entre le cocotier (*Cocos nucifera* L.) et le cacaoyer (*Theobroma cacao* L.), deux plantes fréquemment cultivées en association dans le monde. L'objectif principal a été d'étudier l'architecture et le développement des systèmes racinaires du cocotier et du cacaoyer, cultivés séparément, puis en association à différents

âges allant de la pépinière à une plantation adulte. Cette étude a été faite dans le cadre de la thèse de Doctorat d'Hélène Colas (1997)[DOC.1].

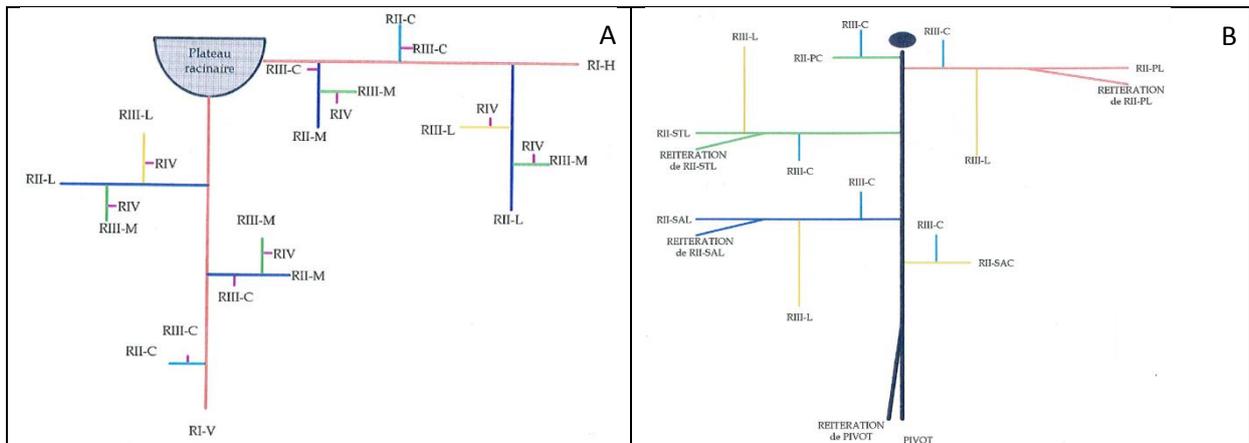


Figure 14. Schéma de l'unité architecturale racinaire du cocotier (A) et du cacaoyer (B) montrant les différents types de racines qui la composent. Selon Colas (1997).

L'unité architecturale des systèmes racinaires a été déterminée, avec la définition d'une typologie des axes racinaires. Chez le cocotier, où le système racinaire est fasciculé comme le palmier à huile, l'analyse architecturale a révélé 9 types d'axes racinaires répartis sur 4 ordres topologiques (**Figure 14A**) : les racines primaires verticales (R1-V) et horizontales (R1-H), les racines secondaires longues (R2 L), moyennes (R2 M) et courtes (R2 C), les racines tertiaires longues (R3 L), moyennes (R3 M) et courtes (R3 C) et les racines quaternaire (R4), ordre ultime de ramification. Chez le cacaoyer, où le système racinaire est pivotant, 8 types racinaires ont été déterminés (**Figure 14B**) : le pivot (Piv) qui porte 3 types de racines secondaires pérennes plutôt longues (R2 précoces, R2 de la séquence acropète et R2 tardives) et 2 types de secondaires plutôt courtes (R2 précoces, R2 de la séquence acropète). Toutes les racines secondaires portent des racines tertiaires qui peuvent être longues (R3 L) ou courtes (R3 C). Ces types racinaires se retrouvent dès le jeune âge au champ aussi bien en culture pure qu'en association.

Par ailleurs des observations faites sur des systèmes racinaires en culture associée ont permis de montrer qu'aucune modification majeure de l'architecture des deux systèmes racinaires n'est provoquée par leurs interactions. Les deux systèmes racinaires cohabitent et aucun phénomène d'allélopathie n'a été observé. En particulier, les vitesses de croissance des racines des plants en culture pure et des plants en culture associée ne sont pas significativement différentes. Elles sont de 4,8, 3,1 et 3,5 mm/j à 5, 14 et 26 ans respectivement pour les racines primaires de cocotier et de 8,4, 5,6 et 0,4 mm/j à 6 mois, 1 et 8 ans respectivement pour le pivot du cacaoyer (Colas, 1997). Comme chez le palmier à huile, les vitesses de croissance des racines de structure chutent avec l'âge des cocotiers et cacaoyers, avec une vitesse maximale atteinte en pépinière ou la première année de plantation.

A l'instar du palmier à huile, nous avons utilisé le modèle global appelé l'axe de référence pour modéliser l'unité architecturale racinaire du cocotier et du cacaoyer. L'axe de référence réunit tous les types d'axes définis, tous les paramètres issus de la modélisation des processus de croissance, mortalité et ramification de ces axes ainsi que leurs paramètres géométriques. Nous avons utilisé les mêmes modèles de processus de croissance, mortalité et ramification des axes racinaires que ceux

ajustés sur les données du palmier à huile. AMAPsim a permis la réalisation de maquettes numériques tridimensionnelles par simulation (**Figure 15**).

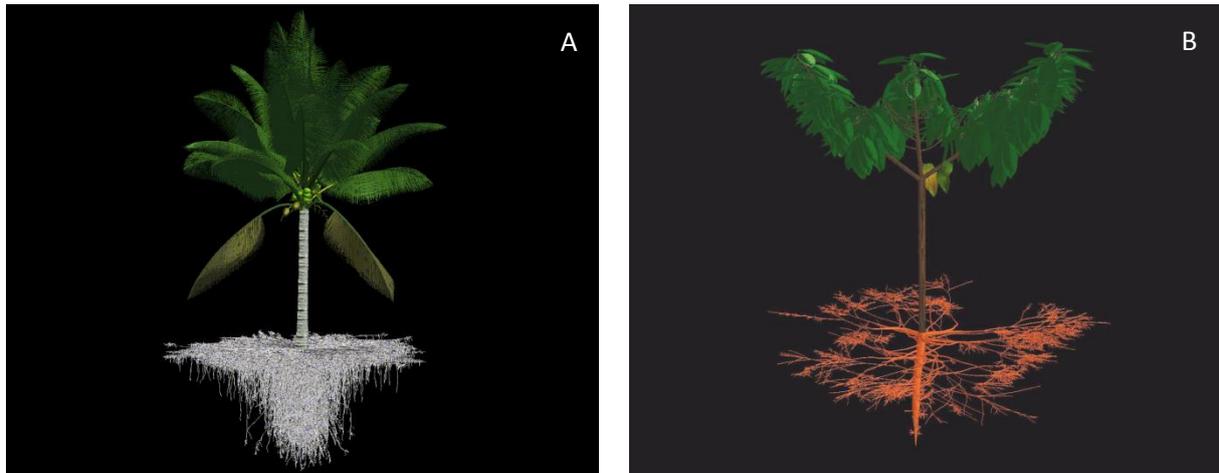


Figure 15. Simulation d'un Cocotier (A) âgé de 7 ans et d'un cacaoyer (B) âgé de 18 mois. La taille du stipe de cocotier atteint 5 m et le tronc de cacaoyer mesure 1,5m. Le diamètre et la profondeur d'enracinement sont de 5 et 4 m pour le cocotier et de 1,5 et 0,5 m pour le cacaoyer, respectivement. Les parties aériennes ont été également simulées par AMAPsim et fournies par I. Mialet-Serra. Selon Colas (1997).

L'utilisation des maquettes numériques a ouvert le champ à de l'expérimentation virtuelle, notamment pour connaître l'âge à partir duquel la compétition pour l'espace était possible. De plus, compte tenu de l'architecture différente des systèmes racinaires des deux plantes, la simulation d'une plantation virtuelle, avec les écartements standard, a permis de caractériser les zones de compétition intense et les zones de moindre compétition (**Figure 16**). L'application agronomique qui en a découlé était une meilleure répartition des engrais spécifiques à chaque plante au champ et en fonction de leur âge. Ils sont localisés de façon optimale dans l'anneau de 1m de rayon autour des cocotiers et entre les 2 lignes des cacaoyers. Les cacaoyers sont généralement plantés après la plantation des cocotiers, une autre application pratique des maquettes était de déterminer l'âge limite des cocotiers à ne pas dépasser pour planter les cacaoyers afin de limiter les compétitions et favoriser le démarrage des jeunes cacaoyers. Ces applications sont théoriques et dans le cadre de la thèse d'Hélène Colas (1997), les compétitions racinaires n'ont pas eu d'effet sur la croissance racinaire des plantes en association, ni dans les conditions du Vanuatu et ni dans celles du Lampung en Indonésie (Sumatra) où les conditions trophiques et en eau n'étaient pas limitantes.

Une autre application des maquettes numériques a été faite dans le cadre des associations cocotier-jardins vivriers villageois en Mélanésie lors de la thèse de doctorat de Nathalie Lamanda (Lamanda, 2005)[DOC.6] que j'ai co-encadrée. Au cours de ce travail, nous avons utilisé le modèle d'architecture du cocotier validé dans la même région (île de Santo, Vanuatu) et nous l'avons modifié afin de pouvoir simuler des cocotiers jusqu'à 100 ans ! La principale modification concernait une simplification topologique (nous nous sommes limités à représenter les racines primaires seulement) ainsi qu'une simplification du rendu géométrique des axes racinaires (diminution du nombre de structures polygonales simulées constituant les axes) afin de diminuer le temps de calcul et d'affichage. Nous avons validé les sorties du modèle sur de vieilles cocoteraies de l'île de Malo, voisine de 3 km de Santo et sur le même type de matériel végétal (**Figure 17**). L'objectif de cette thèse était d'évaluer la disponibilité en lumière et l'encombrement des racines en système agroforestier en utilisant des maquettes numériques 3D des systèmes aérien et racinaire obtenues

par simulation des modèles d'architecture préalablement calibrés. Je me suis occupé de la partie racinaire.

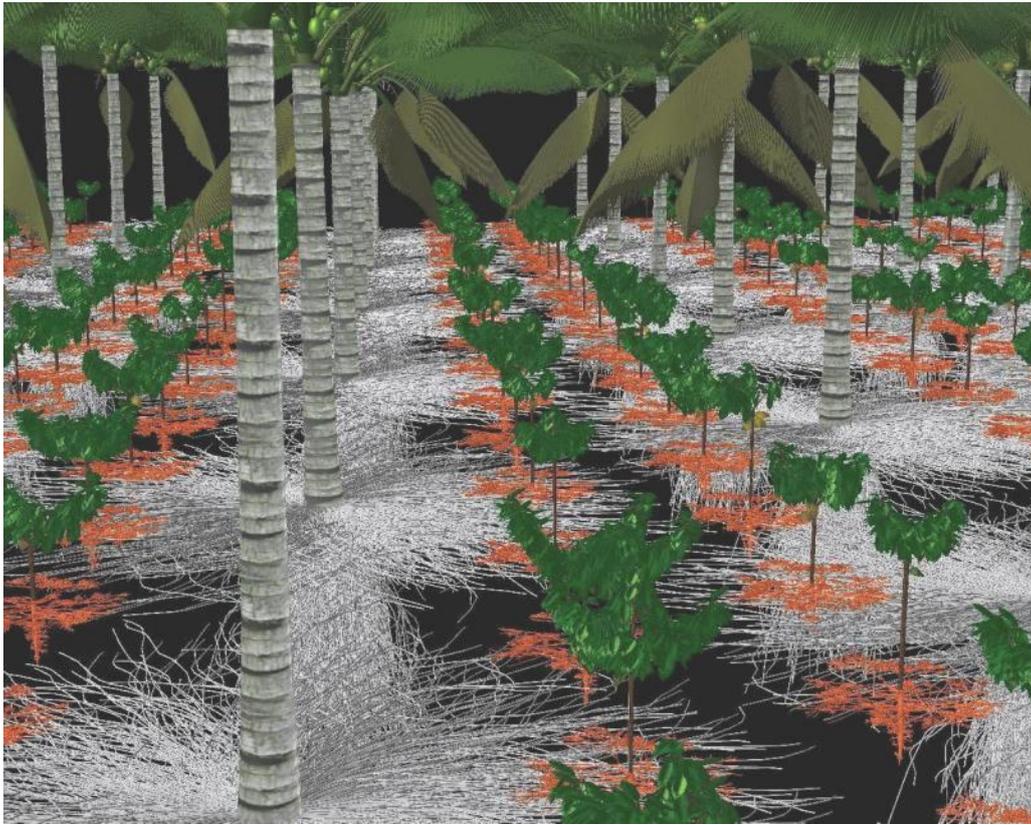


Figure 16. Simulation d'une plantation de culture associée cocotier-cacaoyer âgée de 5 ans pour les cocotiers et de 2 ans pour les cacaoyers. L'appareil aérien a été simulé également par AMAPsim et les maquettes ont été fournies par I. Mialet-Serra. Selon Colas (1997).

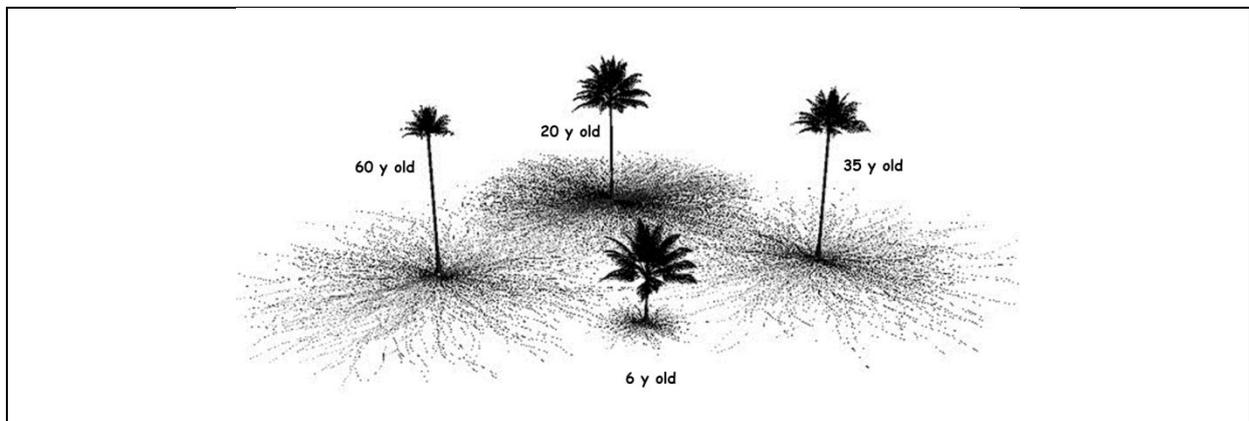


Figure 17. Maquettes numériques 3D de cocotiers entiers âgés de 6, 20, 35, et 60 ans dans les conditions du Vanuatu. Dans le système racinaire, les racines primaires sont uniquement représentées. (Lamanda et al., 2008).

Les résultats de la thèse (Lamanda, 2005) ont montré que la culture intercalaire avec des espèces tolérantes à l'ombre n'a pas été limitée par transmission faible de la lumière au sol jusqu'à la 35e année après la plantation de cocotiers. Toutefois, à ce stade de développement du cocotier, la forte densité des racines primaires dans l'interligne limite le développement racinaire de la culture intercalaire, en particulier pour les cultures de racines et tubercules (taro, igname, kava,...). L'altération de la densité de plantation au fil du temps (avec la mortalité des cocotiers) a permis une

augmentation de la transmission de lumière au sol, mais n'a pas beaucoup affecté la densité des racines sauf à partir de 70 ans après plantation (**Figure 18**).

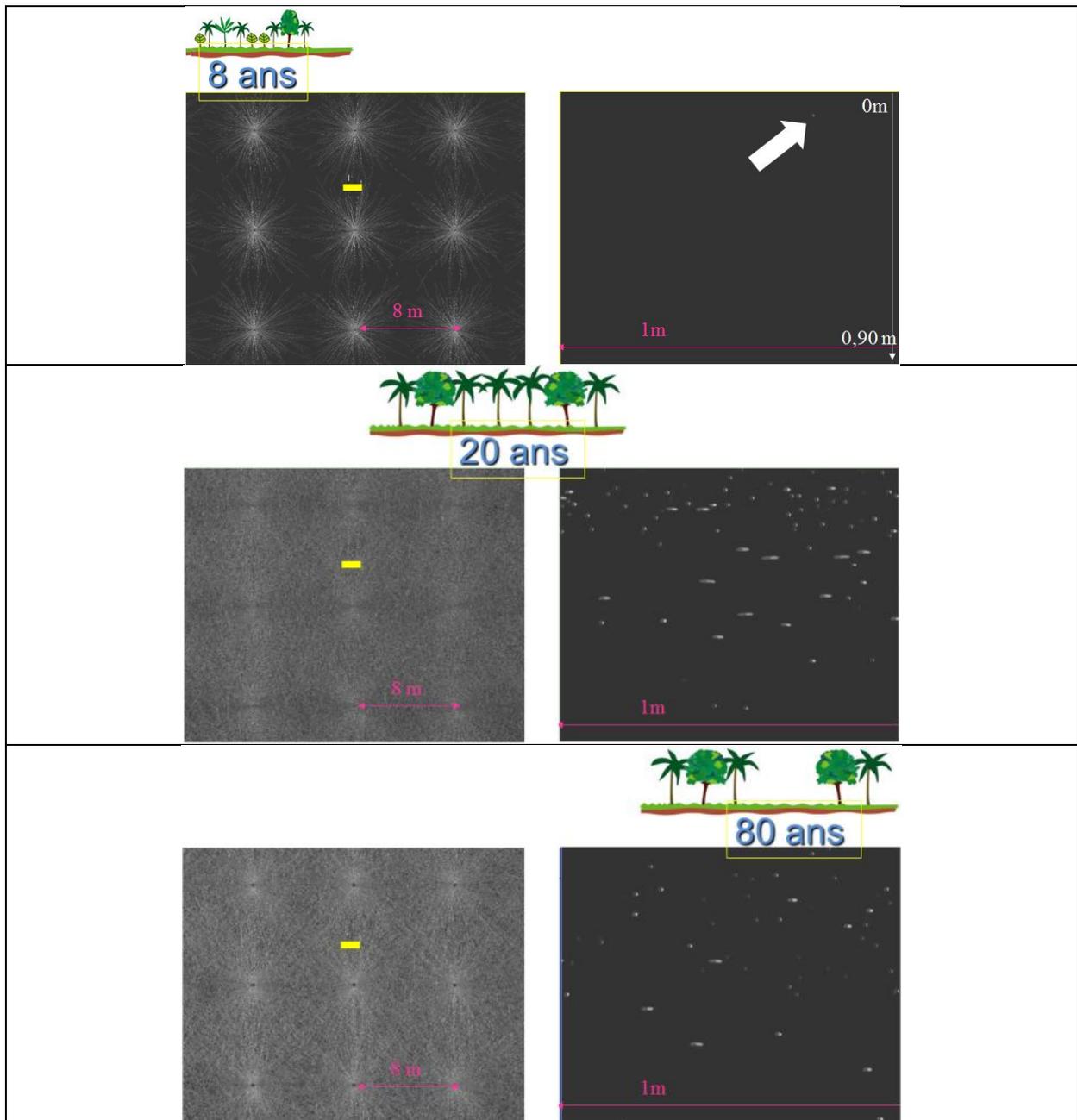


Figure 18. Simulation de cocoteraies âgées de 8 (haut), 20 (milieu) et 80 ans (bas) avec la distribution des systèmes racinaires en vue de dessus (à gauche) et l'interception des racines primaires (à droite) par une carte d'impact virtuelle située au milieu de l'interligne (symbolisée par un rectangle jaune, à gauche). Modifié d'après Lamanda (2005).

Cette approche de modélisation, qui implique peu de paramètres et qui est facile à manipuler, semble être un outil efficace pour recommander des schémas de plantation de cocotiers et à différentes densités et âge, ainsi que pour proposer un meilleur choix de cultures intercalaires selon leur emplacement : plutôt des héliophiles dans les zones les plus ensoleillées (milieu de l'interligne) avec une concurrence racinaire limitée, plutôt des ombrophiles dont la récolte est aérienne près des lignes de cocotiers.

2.2.2. L'eucalyptus

De nombreuses études sylvicoles portant sur la productivité et la durabilité des plantations clonales d'Eucalyptus au Congo ont été menées à la fin des années 1990 par des collègues forestiers du CIRAD au sein de l'UR2PI (Unité de Recherche sur la Productivité des Plantations Industrielles). Elles ont porté en particulier sur l'étude des cycles biogéochimiques (Laclau et al., 2000, Laclau et al., 2001, Laclau et al., 2005, Laclau et al., 2003). Les racines y étaient peu prises en compte alors que le développement racinaire de cette plante s'est avéré extrêmement dense, surtout en surface, avec cependant une colonisation en profondeur (au moins jusqu'à 3 m) non négligeable (Bouillet et al., 2002). L'étude de l'architecture et du développement racinaire de l'eucalyptus est devenu un axe de recherche prioritaire au sein de notre nouvelle équipe issue du regroupement des écophysiologistes du CIRAD-CP et des sylviculteurs du CIRAD-Forêt. J'ai eu la charge de conduire cet axe de recherche à travers l'encadrement d'une thèse de doctorat réalisée sur place par Armel Thongo M'Bou (Thongo M'Bou, 2008). L'objectif de cette thèse a été d'étudier l'architecture et le développement du système racinaire du clone d'Eucalyptus 1-41 (sur lequel l'essentiel des mesures écophysiologiques étaient menées) au Congo. L'architecture du système racinaire a été abordée au sein d'une chronoséquence sur toute la durée d'une rotation (entre 0 et 7 ans). Elle a permis de définir une typologie racinaire composée de cinq catégories de racines assurant trois fonctions essentielles : l'exploration grâce aux racines latérales et pivotantes, l'exploitation du milieu assurée par un réseau très important de racines fines et, ce qui est plutôt rare chez les arbres, la ré-exploitation du milieu, qui se fait par la mise en place tardive d'un système racinaire traçant. Tous ces types racinaires se mettent en place au cours du temps, grâce à une stratégie réitérative, qui permet au système racinaire de se déployer dans un volume considérable de sol.

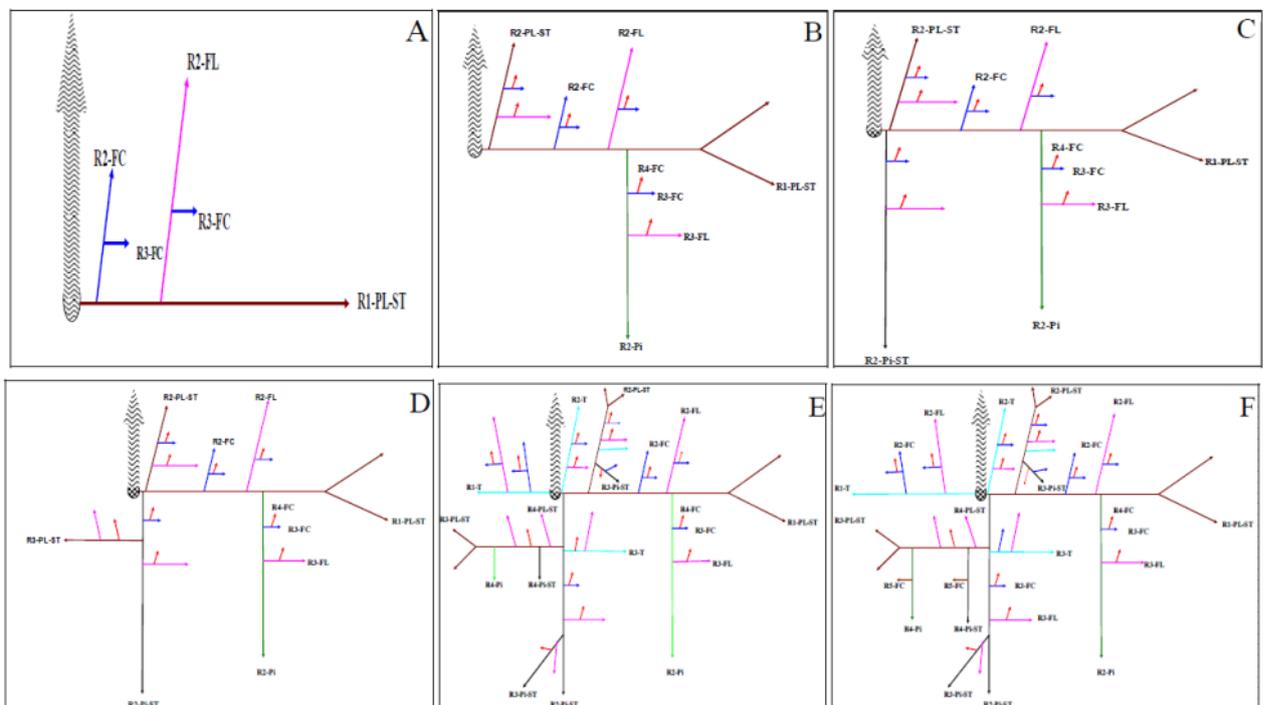


Figure 19. Représentation schématique des systèmes racinaires de l'Eucalyptus en pépinière à 2 mois (A), et au champ à 4 mois (B), 6 mois (C), 1 an (D), 4 ans (E) et 14 ans (F). Selon Thongo M'Bou (2008).

Dans le détail, le système racinaire de l'Eucalyptus clonal, obtenu par bouturage, est à l'origine très simple, une ou plusieurs racines horizontales (plagiotropes) sont émises à la base de la bouture (R1-PL-ST) qui se ramifient en portant 2 types de racines secondaires (Figure 19A): des racines fines

(diamètre < 2 mm) plutôt courtes (une dizaine de cm au maximum, R2-FC) et des racines fines plutôt longues (jusqu'à 70 cm au maximum, R2-FL). Ces 2 types de secondaires portent toutes des racines tertiaires fines et courtes (R3-FC).

Le système se complexifie au champ avec l'émission de plusieurs types racinaires d'ordres topologiques différents (**Figure 19**). En premier lieu, des pivots secondaires (R2-Pi) apparaissent à partir de 4 mois (**Figure 19B**) qui participeront à l'exploration des horizons profonds. Ce sont les premières racines orthotropes à croissance verticale orientée vers le bas (géotropisme positif). Progressivement des pivots secondaires proximaux (proche du tronc) vont se mettre en place à partir de 6 mois par repercement (R2-Pi-ST) en dehors de la séquence classique de développement acropète des ramifications, ils auront pour rôle principal de participer à l'ancrage et au soutien des parties aériennes (le tronc mesure alors 2 m à cet âge et sa croissance va s'accélérer rapidement). Des racines plagiotropes de structure (R2-PL-ST) vont également apparaître en séquence tardive par repercement et vont étendre l'exploration horizontale du système racinaire. Les racines fines courtes et longues vont se ramifier à leur tour et l'apparition d'un 4^{ème} ordre topologique racinaire est observé (**Figure 19C**). Cette architecture va se complexifier avec l'apparition d'axes plagiotropes d'ordre 3 (R3-PL-ST) également en séquence tardive (**Figure 19D**) et d'un nouveau type racinaire particulier émis tardivement à partir du tronc (R1-T) ou de la base des racines primaires plagiotropes (R2-T) ou des pivots secondaires proximaux (R3-T) (**Figure 19E**). Ces dernières racines dites tardives ne grossissent pas en diamètre comme les autres racines émises au même endroit; elles ont un diamètre constant, autour de 5 à 15 mm, et vont atteindre des longueurs très importantes (jusqu'à 10 m). Leur fonction essentielle est la ré-exploitation tardive des zones proximales de l'arbre préalablement exploitées par les racines de la séquence acropète ainsi que l'exploration latérale des horizons superficiels. Au-delà de 4 ans, la structure va se complexifier sans ajout de nouveau type racinaire mais en réitérant l'apparition tardive de type de racines déjà décrite au sein du système et par l'apparition d'un 5^{ème} ordre topologique (**Figure 19F**). Les axes plagiotropes vont eux-mêmes se dupliquer par réitération adaptative et/ou traumatique. Au final, le système racinaire de l'Eucalyptus clonal est un système adventif, issu de la néoformation de méristèmes racinaires à la base de la bouture. Il est constitué par des racines de structure de type plagiotropes et orthotropes émises par vagues plus ou moins tardivement dans la séquence de développement de la plante qui ont pour rôle l'extension et la prospection des horizons superficiels et profonds, lointains de la plante. Ces racines se ramifient et portent des racines fines courtes et longues dont la prolifération en surface et en profondeur ne semble pas être dérangée par la compétition entre arbres au sein de la plantation. En conclusion, trois fonctions essentielles dans le fonctionnement des Eucalyptus sont assurées par ces 5 types racinaires décrits : la charpente par les pivots et les racines plagiotropes, l'exploitation par les racines fines et la ré-exploitation par les racines traçantes.

L'observation du système racinaire de l'Eucalyptus, depuis la pépinière jusqu'au champ, montre que la dynamique de mise en place des différents types racinaires n'est pas l'effet d'un hasard mais répond à un programme morphogénétique spécifique. Pour assurer l'extension de son système racinaire dans un important volume de sol, l'Eucalyptus recourt à deux types de réitérations complémentaires (Atger and Edelin, 1994) : la réitération sylleptique (sur organes jeunes) et la réitération proleptique (sur organes âgés). Sur le système racinaire de l'Eucalyptus, nous avons noté deux cas de réitération sylleptique. Dans le premier cas, les racines latérales secondaires (R2-PL-ST), tertiaires (R3-PL-ST) et quaternaires (R4-PL-ST) et les racines pivotantes de mêmes ordres réitérent une architecture similaire à celle de leurs racines porteuses quel que soit la profondeur du sol. Cette

réitération sylleptique a lieu aussi sur les racines pivotantes les plus développées (les pivots proximaux) des peuplements âgés à travers une intercalation du système racinaire au cours du temps (**Figure 20**). Les pivots secondaires proximaux (R2-Pi-ST) portent des racines plagiotropes (R3-PL-ST) qui émettent à leur tour d'autres pivots (R4-Pi-ST), permettant ainsi de repousser certains types racinaires en particulier les racines fines vers la périphérie de la structure. Ce processus de croissance par intercalation a été observée sur le système racinaire d'autres espèces (Atger, 1992, Jourdan, 1995b). Ce processus permet à la fois l'accroissement du système ramifié et le maintien des relations hiérarchiques entre les organes déjà différenciés. Selon Atger (1992), l'intercalation d'un nouveau type racinaire s'accompagne de l'augmentation de l'effectif de chaque type racinaire déjà en place.

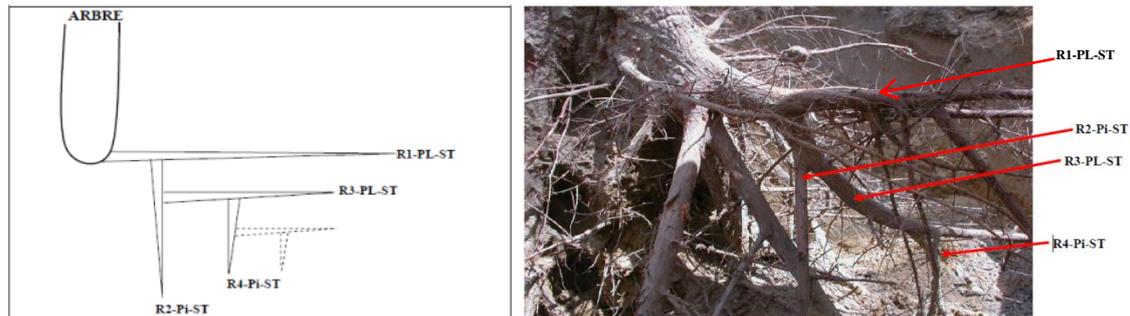


Figure 20. Représentation schématique (gauche) et illustration sur une souche âgée de 14 ans (droite) de l'intercalation sur le système racinaire d'Eucalyptus. Selon Thongo M'Bou (2008).

La réitération proleptique est aussi observée dans les peuplements âgés d'Eucalyptus par une production tardive des racines adventives à partir du tronc (R1-T). Ces réitérations ont aussi été observées sur les parties aériennes et racinaires de nombreuses autres espèces (Atger and Edelin, 1994, Kahn, 1980, Moulia et al., 1999, Vercambre et al., 2003). La réitération sylleptique peut se produire uniquement à proximité de la souche comme chez *Platanus hybrida* et *Laetia procera* ou affecter les racines latérales sur toute leur longueur comme cela a été observé chez *Cecropia obtusa* (Atger and Edelin, 1994). La réitération aboutit à la formation des pivots surnuméraires comme cela a été observé chez *Platanus hybrida*. Cette stratégie de mise en place du système racinaire permet une occupation totale du sol à toutes les profondeurs. Elle permet au système racinaire de coloniser une surface approximativement circulaire et de disposer des racines fines absorbantes sur la quasi-totalité de l'espace de sol où il croît. Des différences nettes dans la colonisation du sol sont observées avec des systèmes racinaires qui ne peuvent pas réitérer (Atger and Edelin, 1994).

La réitération proleptique est complémentaire de la réitération sylleptique en termes d'occupation du sol. Elle permet de ré-exploiter certains espaces laissés vides, à la suite du passage du front racinaire ou de la mortalité de certaines racines, et de coloniser des nouveaux espaces grâce à l'extension des racines traçantes, notamment à la base du tronc. Cette stratégie est d'autant plus importante qu'elle permet de compenser le renouvellement constant des racines tout le long de la vie de l'arbre (Atger and Edelin, 1994).

La relation entre le diamètre basal et la longueur totale confirme l'appartenance de plusieurs types d'ordre topologiques différents à des groupes homogènes (**Figure 21**). Cette figure montre que les types racinaires d'ordre topologique différents (par exemple R2-PL-ST et R3-PL-ST) de même que les racines fines courtes et longues (R2-FC et R3-FC) font partie de groupes de racines homogènes. Il est intéressant de noter qu'en dehors des racines primaires plagiotropes, des tardives et des pivotantes,

il existe une relation relativement robuste ($0,7 < R^2 < 0,9$) entre le diamètre basal et la longueur des racines charpentières secondaires et tertiaires ainsi que certaines racines fines.

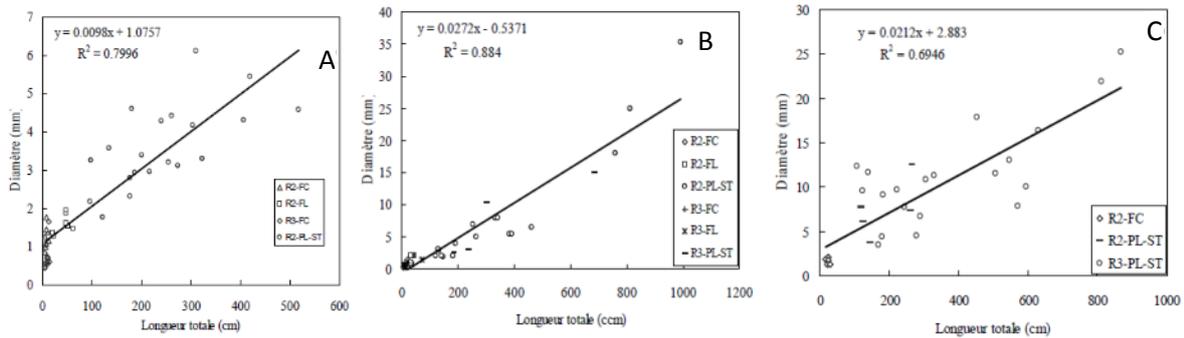


Figure 21. Relation entre le diamètre basal et la longueur totale des types racinaires secondaires (R2) et tertiaires (R3) observés à 1 an (A), 4 ans (B) et 14 ans (C). Selon Thongo M’Bou (2008).

L’utilisation des outils de modélisation préalablement développés sur palmier à huile, cocotier et cacaoyer nous ont permis de modéliser puis de simuler l’architecture et le développement racinaire de l’Eucalyptus. Ces maquettes ouvrent le champ à des applications fonctionnelles comme l’estimation des zones et volumes de sol utiles pour prélever les nutriments (Figure 22). Elles seront utiles après la caractérisation du fonctionnement rhizosphérique des différents types racinaires de l’Eucalyptus en fonction de la profondeur du sol, actuellement en cours d’étude dans la thèse de doctorat de Céline Pradier au Brésil (voir projet de recherche).

Une deuxième partie du travail de thèse d’A. Thongo M’Bou au Congo portait sur l’estimation de la productivité racinaire de l’Eucalyptus au travers de sa dynamique et son turnover. L’étude de la croissance racinaire en rhizotron au champ a été entreprise pour suivre la cinétique de mise en place des types racinaires au cours de leur développement ainsi que leur phénologie. Les résultats sont présentés dans le chapitre 3.2.

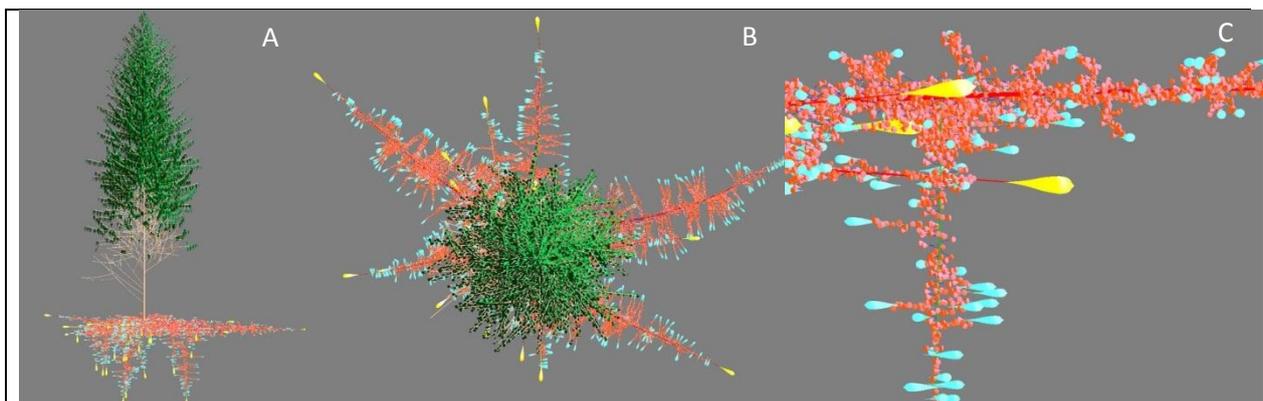


Figure 22. Simulation tridimensionnelle d’un eucalyptus entier âgé d’un an en vue de profil (A), de dessus (B) et détail des volumes de sol rhizosphériques (C). Jourdan et al. (in prep.)

3. Estimer la productivité racinaire (bNPP) des écosystèmes tropicaux plantés

Un deuxième volet de mon activité de recherche conduite au cours des 15 dernières années était focalisé sur l’estimation de la productivité racinaire des écosystèmes tropicaux plantés étudiés au sein de mon unité de recherche. Les sites expérimentaux étaient assez dispersés sur 4 continents

(Vanuatu, Indonésie, Thaïlande, La Réunion, Congo, Bénin, Brésil et Costa Rica) et concernaient diverses plantes pérennes conduites en plantation (Cocotier, Palmier à huile, Hévéa, Manguier, Eucalyptus, Caféier). La multiplicité des sites et des plantes étudiées m'a conduit à élaborer des protocoles standardisés et à mettre au point des méthodes et outils d'analyses dédiés. Ils seront détaillés dans le prochain paragraphe, puis je discuterai les principaux résultats obtenus sur la dynamique et le turnover racinaire de ces plantations, avant de conclure sur l'estimation de la productivité racinaire et son importance dans le bilan carboné de ces agroécosystèmes.

3.1. Mises au point méthodologiques

3.1.1. Méthode (mini)rhizotron

L'étude de la phénologie et ou de la dynamique racinaire impose l'utilisation de dispositifs non ou peu destructifs, transparents, peu onéreux (pour une utilisation sur plusieurs sites et une bonne couverture du site) et faciles d'utilisation en milieu tropical. La méthode la plus répandue, la moins onéreuse (moins de 500 € pour une expérimentation) et la mieux adaptée chez nos partenaires du Sud consiste à installer des vitres en verre ou Plexiglas® protégés par des cadres métalliques (**Figure 23**) ou en bois, disposé sur des profils de sol lissés ou non dans des fosses plus ou moins profondes. Le dispositif, communément appelé **rhizotron** (**Figure 24**), nécessite un savoir-faire pour son installation ainsi que pour le suivi de croissance. Ce dernier peut se faire par prise d'images (scanner à plat généralement, mais aussi appareil photo) ou par relevés manuels à l'aide de feutres de couleurs indélébiles sur feuille plastique transparente. La structure du cadre métallique qui rigidifie le rhizotron est maintenant standardisée (**Figure 23**) et peut s'adapter à tous les terrains quel que soit leur densité et résistance à la pénétration.

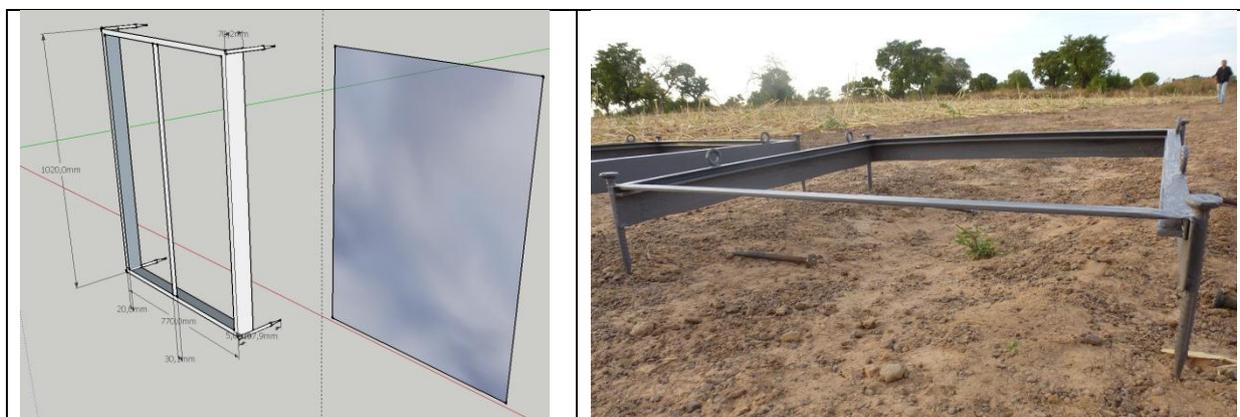


Figure 23. Cadre de rhizotron dessiné avec côtes pour fabrication et réalisation au Burkina Faso.

Un autre dispositif pour l'étude de la dynamique racinaire, le **minirhizotron** (**Figure 24**), largement diffusé dans le monde (Johnson et al., 2001, Majdi and Andersson, 2005), a été utilisé également dans nos dispositifs, soit utilisé seul, soit utilisé en complément (ou par comparaison) de la méthode rhizotron. Ce dispositif est constitué d'un tube transparent de 7 cm de diamètre, que l'on insère dans le sol dans un trou de même diamètre réalisé à la tarière incliné à 45°. L'encombrement au sol est minime et le nombre de tubes peut couvrir facilement la variabilité de la parcelle. Un scanner circulaire ou une caméra vidéo doit être utilisée pour relever les données de croissance racinaire. L'analyse des données doit obligatoirement passer par un logiciel d'analyse d'images. Ce dispositif est très onéreux (entre 10 et 20 k€ par expérimentation selon la quantité de tubes) comparativement à la méthode rhizotron. Il présente cependant l'intérêt de ne pas être trop destructif (pas de fosses à creuser si l'on veut échantillonner les horizons superficiels), par contre on ne peut pas contrôler aussi

bien qu'avec des rhizotrons l'interface tube-sol et bien souvent des macropores artificiels modifient les conditions de croissance des racines. Un autre inconvénient de ce dispositif est la faible surface d'observation qui ne permet pas de suivre suffisamment longtemps les racines individuelles, ce qui ne permet pas, bien souvent, de déterminer la date exacte de la mort des racines et donc d'estimer leur longévité.



Figure 24. Rhizotrons installés dans une plantation d'eucalyptus au Congo (A), de mangroier à la Réunion (B), de caféier au Costa Rica (C) et de palmier à huile en Côte d'Ivoire (D). Minirhizotrons installés sur vigne en France (E), sur eucalyptus au fond d'une fosse de 7 m de profondeur au Brésil (F), sur caféier au Costa Rica (G) et détail du tube avant installation définitive (H).

L'ensemble de la procédure d'installation et de suivi des deux dispositifs a fait l'objet d'un didacticiel en plusieurs langues distribué auprès des partenaires. Le module de formation RACIN'SITU enseigné au Sud dispense en partie cette procédure d'installation, de suivi et de saisie des données et enfin d'analyse des résultats (cf. 3.1.2 RhizoDigit). La méthode a pu ainsi être diffusée auprès de nombreux étudiants et chercheurs sans que je n'aie à me rendre sur place.

3.1.2. Logiciel RhizoDigit© : digitalisation et analyse de la dynamique racinaire

Deux méthodes semi-automatiques de saisie des données de croissance racinaire ont été testées. La première était la numérisation du rhizotron à l'aide d'un scanner à plat ou par photos numériques. Cette option a vite été écartée à cause des nombreuses retouches nécessaires pour « nettoyer » l'image (saisie initiale imparfaite, recouvrement des racines mal interprété sur image, salissures de terre, temps de saisie sur image très long, logiciels peu adaptés et souvent chers...) qui augmentaient considérablement la durée du processus de saisie. La deuxième méthode testée est le relevé manuel sur le terrain ce qui permet une première interprétation dans le choix des racines (choix du type, choix de l'espèce, retrait des adventices...) et de leur état physiologique (en croissance, en sénescence, en pause...) avec une meilleure précision que sur image. De plus, le dispositif rhizotron, en permettant une observation sur une plus grande surface, autorise une saisie manuelle des données de croissance racinaire assez aisée. J'ai mis au point une procédure standardisée de saisie des données selon un protocole précis basé sur une correspondance de codes-couleur avec des dates d'observation. Cette saisie s'effectue sur feuille plastique transparente à l'aide de feutres de couleurs indélébiles, selon une règle simple : une seule couleur par date d'observation et des symboles ou des

diamètres de pointe de feutres différents pour distinguer les racines de différents types ou diamètres et/ou d'espèces différentes et/ou de mycorhizes. Toute observation pouvant modifier la croissance des racines (macropores, ravageurs, montée de nappe...) est notée pour une interprétation ultérieure.

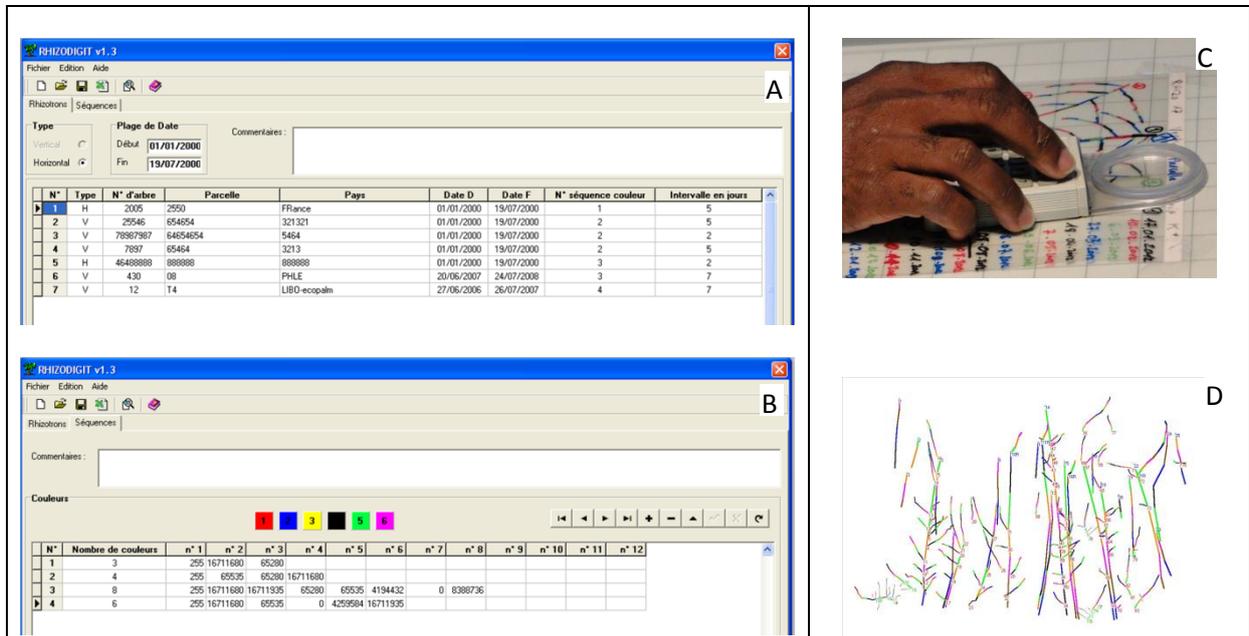


Figure 25. Logiciel RhizoDigit v.1.3. Capture d'écran de l'onglet Rhizotron (A), de l'onglet Séquences (B), de la fenêtre de saisie (D) et gros plan sur la digitalisation d'une feuille de relevés racinaires sur table à digitaliser à l'aide d'un pointeur (C).

L'étape suivante est la digitalisation des relevés de croissance réguliers à l'aide d'une table à digitaliser. Pour piloter cette digitalisation et mettre en forme les données racinaires pour une analyse aisée j'ai développé le logiciel **RhizoDigit®** (Figure 25) à l'aide d'étudiants en IUT ou école d'ingénieur en informatique de Montpellier ([IUT.1], [IUT.2], [ING.2]). Ce logiciel est écrit en Pascal, version orientée objet, sous environnement de développement intégré Delphi. L'environnement de développement s'appuie sur un éditeur d'interfaces graphiques associé à un éditeur de code source. Il doit son succès à sa facilité d'utilisation pour développer des applications graphiques et/ou liées aux bases de données. Les résultats de la saisie sont collectés dans une base de données qui recense trois types d'informations : les informations sur la structure des racines (arrangement des différents axes racinaires entre eux, axe père/axe fils), des informations spatiales en 2D (localisation et orientation de ces axes) et enfin des informations temporelles liées à l'utilisation de couleurs différentes suivant la date d'observation. Ces données sont organisées afin de rendre possible une extraction (fichier texte) sous Excel ou autre logiciel de traitement des données pour le calcul des vitesses de croissance, de rapports de rythme entre axes fils et axes père, pour estimer les périodes de croissance ou d'arrêt de croissance dans l'année (effet saisonnier) ou entre années (effet interannuel) ou d'attaque de parasites, etc.

L'application RhizoDigit® permet de recueillir plusieurs informations sur le rhizotron nécessaires pour établir la base de données :

- un rhizotron recense la croissance d'une partie du système racinaire d'un arbre observé périodiquement entre une date de départ et une date de fin,

- un rhizotron peut être en position verticale ou horizontale. L'arbre sur lequel il a été installé est identifié par un numéro. Cet arbre est planté sur une parcelle identifiée par son nom, sa position, la compagnie et le pays dans lequel elle se trouve,
- un rhizotron est composé de plusieurs racines elle-même constituées de un ou plusieurs segments de couleurs correspondant à la croissance de la racine entre 2 dates d'observation,
- une racine appartient à un rhizotron, elle appartient à un type racinaire, identifié ou non par l'analyse architecturale (racine primaire, secondaire, tertiaire, etc..., cf. chapitre 2.1), ou à une classe de diamètre (racine fines, moyennes, grosses). Elle est identifiée par un numéro,
- une racine (ou segment) correspond à la partie qui a poussé pendant une période de temps qui s'écoule entre 2 dates d'observation. Elle est donc caractérisée par la date de son observation,
- une racine a un état phénologique, elle peut être en croissance, en pause, attaquée (par des insectes par exemple), en sénescence, morte, bloquée (par un obstacle), sortie de la zone d'observation ou réitérée (après la mort de la racine, celle-ci repousse parfois en amont),
- la racine a une longueur et peut être issue par ramification d'une racine porteuse (notion d'antécédent) si elle est au minimum racine secondaire. La ramification est ainsi caractérisée,
- si la racine est réitérée alors elle a un ordre et un numéro de réitération,
- une séquence de couleurs correspond à la couleur du feutre utilisé pour le relevé : pour des raisons de lisibilité, chaque relevé est effectué avec un feutre de couleur différente. Quand tous les feutres ont été utilisés on recommence avec les mêmes feutres dans le même ordre. Donc à une couleur de la séquence on associe une ou plusieurs dates,
- une même séquence peut être utilisée pour plusieurs rhizotrons. Elle est identifiée par un numéro.

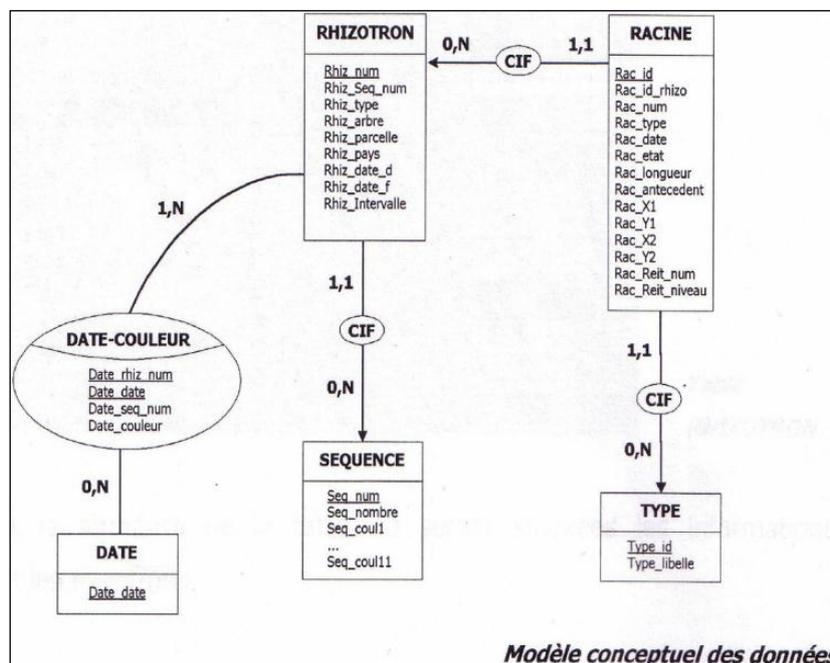


Figure 26. Modèle conceptuel des données qui recense les différents paramètres et les liens entre eux.

A partir de toutes ces informations, la base de données a été créée et le Modèle Conceptuel de Données regroupant tous les paramètres ainsi que les relations qui les lient a pu être établi (Figure 26).

J'ai développé le logiciel RhizoDigit© pour répondre à une attente des utilisateurs qui pratiquaient le dispositif rhizotron pour analyser la dynamique de croissance racinaire de leur système de culture et qui n'avaient pas les moyens financiers pour utiliser les minirhizotrons munis de scanners circulaires ou de caméra avec le logiciel d'analyse d'image associé. La formation à l'utilisation de ce logiciel est dispensée dans le module RACIN'SITU que j'organise dans les pays du Sud tous les 2 ans environ. Le logiciel et sa documentation sont fournis gratuitement aux participants à cette formation.

3.1.3. Méthode biomasse racinaire

La biomasse du compartiment souterrain constitue une part importante de la biosphère qui peut atteindre à l'équilibre environ 30% de la biomasse aérienne (Canellas Rey de Vinas and San Miguel Ayanz, 2000, Grier et al., 1981). De plus, la production de racines fines peut être équivalente ou même supérieure à la production de litière aérienne dans un grand nombre de forêts et peut même dépasser 50 % de la production primaire nette (NPP) de l'écosystème (Burke and Raynal, 1994, Fahey and Hughes, 1994). En dépit de son importance pour la production végétale, l'estimation de la biomasse souterraine et sa répartition dans le sol est encore fastidieuse, longue et difficile à réaliser, et aucune méthodologie fiable et unique n'est disponible pour estimer avec précision la biomasse des différents types de racines. Pour identifier la meilleure méthode d'estimation de la biomasse racinaire dans nos différents sites d'étude, j'ai voulu tester au même endroit et même moment quatre méthodes différentes, en prenant en compte les temps et nombre de main-d'œuvre afin d'estimer la méthode la plus efficace. Cette expérience a fait l'objet d'une publication technique dans *Annals of Botany* (Levillain et al., 2011) dont voici les principaux résultats.

Ces quatre méthodes ont été appliquées dans une plantation d'Eucalyptus âgés de 6 ans au Congo. Elles sont différenciées entre elles par les volumes d'échantillonnage du sol : tarière (8 cm de diamètre), monolithe (25 × 25 cm en carré), la moitié de la tranchée de Voronoï (1,5 m³) et une tranchée de Voronoï entière (3 m³), choisie comme méthode de référence (**Figure 27**).

Les principaux résultats avec la méthode de référence (profondeur 0-1m) ont montré que la biomasse des racines fines (BRF, diamètre < 2 mm) était estimée à 1,8 t ha⁻¹, la biomasse des racines moyennes (BRM, diamètre 2-10 mm) à 2,0 t ha⁻¹, la biomasse des grosses racines (BRG, diamètre > 10 mm) à 5,6 t ha⁻¹ et enfin la biomasse des souches à 6,8 t ha⁻¹. La biomasse souterraine totale a été estimée à 16,2 t ha⁻¹ (root:shoot ratio égal à 0,23) pour cette densité de plantation d'eucalyptus fixée à 800 tiges ha⁻¹. La BRF était très élevée (0,56 t ha⁻¹) en surface (0-3 cm de profondeur) et a fortement diminué (0,3 t ha⁻¹) avec la profondeur (50-100 cm). Sans considérations sur les besoins en main-d'œuvre, aucune différence significative n'a été trouvée entre les quatre méthodes pour BRF et BRM. Toutefois, la BRG a été mieux estimée par les tranchées de Voronoï complètes et semi-complètes. Lorsque la main d'œuvre a été prise en compte (en homme.heure), la méthode la plus efficace avec une erreur faible (< 10 %) était la tarière pour BRF, alors que les tranchées de Voronoï complètes et semi-complètes étaient les méthodes les plus appropriées pour estimer BRM et BRG.

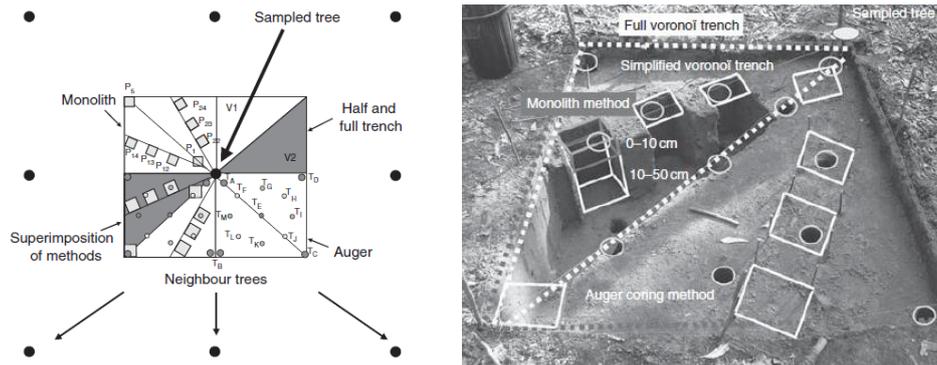


Figure 27. Schéma d'échantillonnage autour d'un eucalyptus détaillant les 4 méthodes utilisées et photo de la superposition des 4 méthodes sur une tranchée de Voronoï. Selon Levillain et al. (2011) [ACL.34].

En conclusions, comme la BRG combinée avec celle des souches s'élève à 78 % du total de la biomasse souterraine, la méthode de tranchée Voronoï complète est fortement recommandée lors de l'estimation de la biomasse racinaire totale d'une plantation. Inversement, pour l'estimation de BRF, la tarière est recommandée avec un schéma d'échantillonnage adapté qui intègre la variabilité spatiale de la distribution des racines fines autour des arbres.

Cette expérimentation a confirmé l'importance de la prise en compte du volume de sol et de la zone échantillonnée autour de l'arbre pour estimer la biomasse racinaire d'une plantation, surtout si l'on veut caractériser avec précision la biomasse des différents types racinaires. Un protocole standard a été défini en fonction des objectifs fixés, il est diffusé auprès de nos partenaires.

3.1.4. Méthode calcul turnover

Le turnover des racines fines des arbres est l'une des principales voies d'entrée de carbone (C) dans les sols des écosystèmes forestiers (Nadelhoffer and Raich, 1992). Compte tenu de l'importance de ce flux de C, estimé entre 0,5 et 3 t C ha⁻¹ an⁻¹ dans ces écosystèmes à l'état d'équilibre (Gill and Jackson, 2000) et de la durée de vie plutôt limitée de ces racines de moins de 2 mm de diamètre, nous avons clairement besoin d'avoir une bonne compréhension du taux de renouvellement de ces racines qui meurent et contribuent au stock de C du sol. Dans le contexte des changements climatiques et avec la mise en œuvre future des crédits C dans de nombreux pays, il incombe aux scientifiques qui étudient cette dynamique de fournir aux modélisateurs et décideurs des valeurs de turnover racinaire les plus réalistes possibles. Actuellement, le taux de turnover des racines, qui est couramment utilisé pour paramétrer des modèles biogéochimiques, dérive de la littérature scientifique sur la base de relations supposées entre la durée de vie des feuilles et celle des racines (turnover plus faible pour espèces à feuilles persistantes et à durée de vie de feuille plutôt longue) avec des valeurs oscillant entre 0,18 et 1,02 an⁻¹ (Cienciala and Tatarinov, 2006, Pietsch et al., 2005) ou simplifié à une seule valeur médiane de 0,7 an⁻¹ (Hickler et al., 2008). Par ailleurs, le taux de turnover des racines fines dépend de la biomasse et de la production annuelle de racines fines, mais aussi des différentes méthodes de mesure et de calcul utilisées (Finér et al., 2011, Gaul et al., 2009, Jourdan et al., 2008, Yuan and Chen, 2010). Par conséquent, un débat constant existe parmi les scientifiques sur la façon dont le taux de turnover des fines racines peut être le mieux estimé avec la méthode la plus appropriée (Jourdan et al., 2008, Majdi, 2005, Strand et al., 2008, Trumbore and Gaudinski, 2003).

Afin de faire le point, lors d'une rencontre du réseau européen COST FP0803 « Belowground carbon turnover in European forests » réunissant des chercheurs de 30 pays européens, nous avons constitué un groupe « methodology » entre scientifiques concernés et nous avons cherché à définir une méthode standard de calcul du turnover et à statuer sur les méthodes d'échantillonnage les plus efficaces. Le résultat de cette réflexion a abouti à un article de synthèse piloté par Ivano Brunner (Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research) publié récemment dans *Plant and Soil* (Brunner et al., 2013). L'objectif de ce travail était de calculer le taux de turnover racinaire d'espèces forestières communes européennes et de les comparer avec les valeurs les plus fréquemment publiées. Nous avons compilé les données européennes disponibles et appliqué différentes méthodes de calcul du taux de turnover. Nous avons utilisé deux principales méthodes de calcul (*Decision Matrix* et formule max-min) comme le suggère la littérature et nous avons comparé les deux méthodes d'échantillonnage les plus couramment utilisées (*Sequential coring, Ingrowth cores*).

Les résultats ont montré que les taux moyens de turnover obtenus par la combinaison des méthodes de carottage séquentiel et de matrice décisionnelle étaient $0,86 \text{ an}^{-1}$ pour *Fagus sylvatica* et $0,88 \text{ an}^{-1}$ pour *Picea abies* lorsque les données maximales de biomasse étaient utilisées pour le calcul, et de $1,11 \text{ an}^{-1}$ pour les deux espèces lorsque les valeurs moyennes de biomasse étaient utilisées. L'utilisation de la biomasse moyenne plutôt que la biomasse maximale a donné des valeurs de turnover racinaire d'environ 30 % plus fortes. L'utilisation de la matrice décisionnelle a doublé les taux de turnover par rapport à la formule max-min. Cependant, elle intègre plus d'informations dans le calcul que la formule max-min, notamment le taux de décomposition.

Nous avons conclu que la méthode de carottage séquentiel avec les calculs de biomasse moyenne à l'aide de la matrice décisionnelle donnaient les estimations de turnover racinaire les plus fiables dans les forêts européennes et devrait de préférence être la méthode standard à utiliser dans les modèles pour les estimations du flux C entrant dans le compartiment souterrain de ces écosystèmes. Ce résultat était conforme avec mes résultats obtenus antérieurement en milieu tropical sur plantation d'Eucalyptus au Brésil (Jourdan et al., 2008).

3.2. Principaux résultats sur la dynamique racinaire

Contrairement à la production racinaire bien documentée des forêts ou des plantations de feuillus des milieux tempérés, la production souterraine des plantations pérennes tropicales est assez peu étudiée. La dynamique des racines fines et son turnover sont deux paramètres importants dans l'estimation du bilan carboné souterrain des plantations, en particulier en raison des grandes variations saisonnières de la croissance des racines ou de la mortalité qui a lieu tout au long de l'année, même dans un environnement tropical. Au cours de ma carrière, j'ai pu étudier la dynamique racinaire de plusieurs plantations pérennes (Caféier, Eucalyptus, Hévée, Manguier, Palmier à huile et Cocotier) dans plusieurs pays tropicaux répartis en Amérique Centrale et du Sud, en Afrique de l'Ouest et Equatoriale, dans l'océan Indien, en Asie du Sud-Est et dans les îles du Pacifique Sud. Le plus souvent ces études caractérisaient la dynamique racinaire d'une chronoséquence représentative de la durée d'exploitation des plantations. Les données ont été enregistrées au cours d'une année, deux ou quatre années consécutives durant les deux dernières décennies. Les Caféiers étaient étudiés au Costa Rica et Brésil. Les peuplements d'Eucalyptus clonaux ont été étudiés au Congo, les semis au Brésil. Les Hévées étaient étudiés en Thaïlande alors que les

Manguiers étaient étudiés à la Réunion. Les Palmiers à huile ont été étudiés en Côte-d'Ivoire, au Bénin et en Indonésie (Sumatra et Bornéo). Enfin, les Cocotiers ont été étudiés en Indonésie et au Vanuatu. Dans chaque expérimentation, 6 à 12 rhizotrons ont été mis en place sur le terrain et, en dehors des plantations de Manguiers et Cocotiers, les méthodes de carottages séquentiels et *ingrowth cores* ont été appliquées à tous les autres plantations.

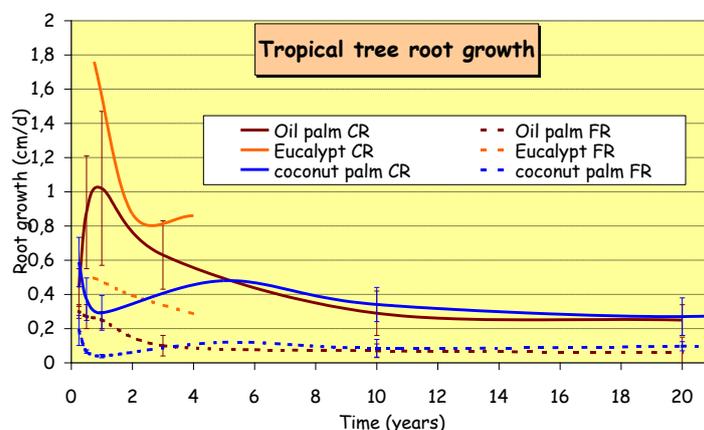


Figure 28. Evolution de la dynamique de croissance des racines grosses (CR) et fines (FR) des palmiers à huile, cocotiers et eucalyptus au cours du temps (d'après Jourdan et al. (2003) [POS.4]).

Les résultats sur les chronoséquence de Palmiers, Cocotiers et Eucalyptus ont tous révélé que la dynamique de racines fines variait avec l'âge des plantations, avec une forte variation au cours des deux premières années de croissance où la vitesse des racines est toujours plus forte (**Figure 28**). Pour toutes ces plantations âgées de 4 ans et plus, la dynamique de racines fines devient très stable et régulière. En particulier chez l'Eucalyptus au Congo, la vitesse moyenne d'élongation des racines fines, mesurée une même période de l'année (mars – juillet par exemple), reste toujours inférieure chez les peuplements âgés ($0,18 \text{ cm j}^{-1}$ à 14 ans) par rapport aux peuplements juvéniles ($0,45 \text{ cm j}^{-1}$ à 9 mois) ou même en pépinière ($0,55 \text{ cm j}^{-1}$) qui enregistre les taux de croissance les plus forts. Ces vitesses d'élongation des racines fines d'Eucalyptus au Congo sont faibles par rapport à celles rapportées sur d'autres espèces d'Eucalyptus qui sont plutôt de l'ordre de 1 à 2 cm j^{-1} (Misra, 1999). Cependant, les observations au champ sur la taille des racines plagiotropes primaires ont montré une longueur totale moyenne de 4 mètres pour des plantations âgées d'1 an, ce qui suggère une vitesse d'élongation moyenne d'un peu plus de 1 cm j^{-1} . Dans les conditions du Brésil, des croissances supérieures (2 cm j^{-1}) ont été enregistrées chez des semis d'*E. grandis* au cours des 2 premières années de croissance (Laclau et al., 2013a) ce qui lui permet d'atteindre des horizons profonds relativement vite : 9,5 m à 1,5 an (Christina et al., 2011) et même 28 m à 9 ans en Afrique du Sud (Dye, 1996).

Par ailleurs, nous avons observé que les variations de la dynamique des racines fines étaient plus fortes au sein d'une année plutôt qu'entre années en raison des fortes variations saisonnières, en particulier avec l'alternance des saisons sèches et humides (**Figure 29**). En effet, chez la majorité des espèces étudiées, on observe une nette diminution des vitesses d'élongation des racines lors du passage de la saison humide à la saison sèche. Ces vitesses, fortes en saison de pluie, diminuent pour atteindre des valeurs minimales en saison sèche comme c'est le cas chez l'Hévéa (**Figure 29A**) et l'Eucalyptus (**Figure 29C**). Ces vitesses peuvent même devenir nulles sur plusieurs semaines comme cela a été observé chez le Palmier à huile dans les conditions climatiques du Bénin où une saison

sèche marquée dure plusieurs mois (**Figure 29C**). Parallèlement, la part des racines en arrêt de croissance (en phase de sénescence) augmente significativement avec cette diminution globale du taux d'élongation racinaire lors des saisons sèches (**Figure 29B**). A la reprise des pluies, le nombre de racines en pause ou mortes chute, le nombre de racines nouvelles et la vitesse des racines en croissance augmentent.

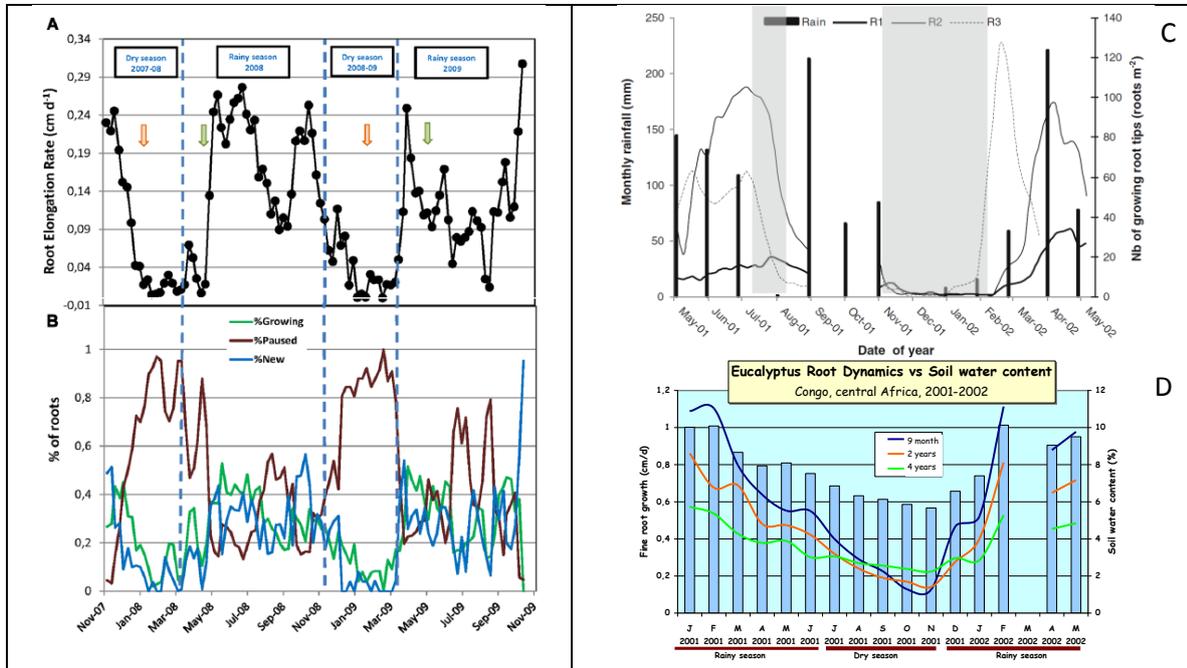


Figure 29. Variations intra-annuelles (2 à 4 ans d'observations) de la dynamique racinaire de l'Hvéa en Thaïlande (A et B, selon Chairungsee et al. 2013 [ACL.47]), du Palmier à huile au Bénin (C, selon Nodichao et al 2011 [ACL.33]) et de l'Eucalyptus au Congo (D, selon Jourdan et al. 2003 [POS.4]).

Il a été montré que la teneur en eau du sol, à travers son humidité (**Figure 30A**) ou son potentiel matriciel (**Figure 30B**), était le principal déterminant de cette variation saisonnière de la croissance racinaire dans les différentes plantations étudiées. Cela a été observé chez l'Eucalyptus au Congo (Thongo M'Bou et al., 2008b), l'Hvéa en Thaïlande (Chairungsee et al., 2013), le Manguier à la Réunion (Jourdan et al. 2003), le Palmier à huile au Bénin (Nodichao et al., 2011) et le Cafétier au Costa Rica (publication en cours). Des résultats similaires ont été trouvés en forêt tropicale humide de Malaisie où l'influence d'une saison sèche, même de faible intensité, provoquait des ralentissements de croissance et des mortalités racinaires (Green et al., 2005).

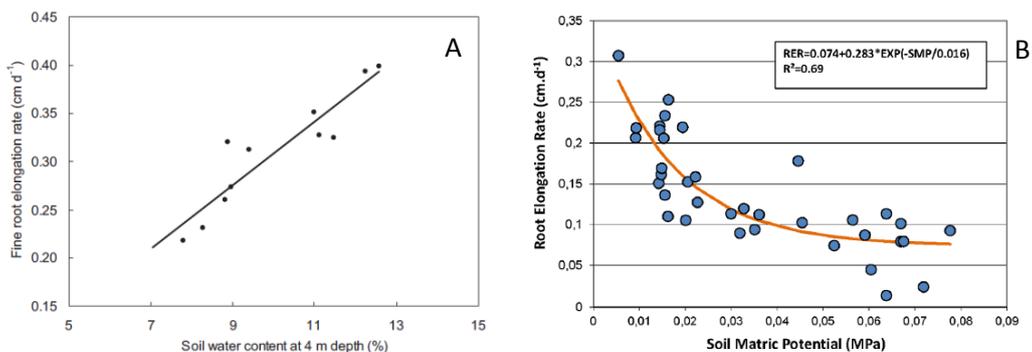


Figure 30. Relation significative ($r = 0.93$) entre l'élongation moyenne mensuelle racinaire et l'humidité du sol sur 4m de profil de sol dans une plantation d'Eucalyptus au Congo âgée de 2 ans (A, d'après Thongo M'Bou 2011) et le potentiel matriciel du sol dans une plantation d'Hvéa âgée de 13 ans en Thaïlande (B, d'après Chairungsee et al. 2013).

3.3. Principaux résultats sur l'estimation du turnover racinaire

La durée de vie moyenne des racines fines peut être calculée en divisant le stock de biomasse de ces racines par son « input » dans l'année c'est-à-dire sa production annuelle. Parce que le turnover racinaire est l'inverse de la durée de vie, il peut être ainsi calculé en divisant la production annuelle racinaire par le stock de biomasse sur pied (Gill and Jackson, 2000). Calculer le turnover racinaire d'une plantation revient donc à estimer la production annuelle de racines ainsi que le stock de biomasse sur pied. Il existe une dizaine de méthodes pour estimer la production racinaire (Milchunas, 2009) mais les deux méthodes les plus largement utilisées sont (i) la méthode des carottes de recolonisation ou « *ingrowth cores* » (Persson, 1983) et, (ii) la méthode des carottes séquentielles ou « *sequential coring* » (Ostonen et al., 2005). Dans la première, on mesure la quantité de racines fines produites dans un volume connu de sol sans racines sur une période de temps définie. L'avantage de cette méthode est sa relative facilité et rapidité d'application (Vogt et al., 1998) mais présente certains inconvénients notamment ceux liés à la réactivation racinaire après l'installation des filets de recolonisation conduisant à une surproduction racinaire chez les espèces à forte croissance (Jourdan et al., 2008) et à la modification des propriétés du sol préalablement à la mesure. Dans la deuxième méthode ces inconvénients sont inexistant, il s'agit de prélever plusieurs séries de carottes de sol à des intervalles définis (souvent tous les mois) sur une période d'au moins 1 an. Les racines fines sont extraites des carottes de sol et leur biomasse et nécromasse sont calculées. A l'issue de ces prélèvements, il existe plusieurs méthodes pour calculer la production de racines fines (cf *supra*). Elle peut être calculée par la formule « *Max-Min* » (McClagherty et al., 1982), par la formule de la matrice décisionnelle ou « *Decision Matrix* » (Fairley and Alexander, 1985), ou par la formule du flux entre compartiments ou « *Compartment Flow* » (Santantonio and Grace, 1987). La méthode « *max-min* » utilise uniquement des données sur la biomasse et sous-estime souvent les valeurs de production, par contre les deux autres méthodes nécessitent à la fois la biomasse et les données de nécromasse. La méthode « *Compartment Flow* » exige en outre les données de décomposition des litières de racines fines (Osawa and Aizawa, 2012). Ainsi, les valeurs de turnover de racines fines peuvent varier non seulement en raison des méthodes de mesure mais aussi en raison des méthodes de calcul appliquées (Jourdan et al., 2008, Strand et al., 2008, Vogt et al., 1998). Une véritable comparaison des différents taux de turnover ne peut être possible qu'en utilisant des observations réalisées sur les mêmes sites où les diverses méthodes ont été appliquées (Gaul et al., 2009, Hendricks et al., 2006, Jourdan et al., 2008, Ostonen et al., 2005). Quant à la popularité des différentes méthodes de mesures trouvées dans la littérature, il existe beaucoup plus de résultats de turnover racinaire issues de données de *sequential coring* et *ingrowth cores* qu'à partir de la méthode de minirhizotron (Finér et al., 2011).

Chez l'Eucalyptus, l'estimation de la production des racines fines a permis de mettre en évidence une forte variation des estimations en fonction des méthodes de prélèvement utilisées. Nous avons comparé au Congo et au Brésil les deux méthodes d'échantillonnage les plus courantes (carottage séquentiel et *ingrowth cores*) et nous avons utilisé quatre méthodes de calculs différentes (*max-min*, *decision matrix*, *positive increments*, *short-term cores*). Les valeurs de production annuelle racinaire et de turnover fluctuent d'un facteur 10 au Congo soit entre 0,3 et 3,5 t ha⁻¹ et entre 0,4 et 4,0 an⁻¹ respectivement (Thongo M'Bou, 2008). Au Brésil, l'amplitude des variations est sensiblement plus faible avec une production annuelle qui varie entre 0,7 et 2,4 t ha⁻¹ et un turnover entre 0,8 et 3,4 an⁻¹ (Jourdan et al., 2008). Les estimations les plus réalistes du turnover racinaire de l'eucalyptus

seraient autour de 2 an^{-1} , soit une durée de vie moyenne des racines fines de l'ordre de 6 mois, ce qui implique un important retour d'éléments minéraux et de carbone dans le sol. Par comparaison, les valeurs de turnover foliaires sont du même ordre de grandeur au Brésil, avec des valeurs de 2 an^{-1} pour les plantations sous fertilisation non limitante en K et de 3 an^{-1} pour les témoins sans apport de K (Laclau et al., 2009), tandis qu'au Congo les taux de turnover foliaire sont autour de $2,4 \text{ an}^{-1}$ (Laclau, 2001).

Tableau 5. Estimation des biomasses, production et turnover des racines fines de plusieurs espèces tropicales plantés étudiés au CIRAD. L'échantillonnage a été réalisé par carottage séquentiel (0-30cm de profondeur) et la méthode de calcul par la matrice décisionnelle a été appliquée.

Espèce, âge, pays	Biomasse racinaire (t ha ⁻¹)	Production racinaire annuelle (t ha ⁻¹ an ⁻¹)	Turnover racinaire (an ⁻¹)
Eucalyptus, 2 ans, Congo	1,02	0,98	1,0
Eucalyptus, 4 ans, Congo	1,09	1,73	1,6
Eucalyptus, 2 ans, Brésil	0,91	1,66	1,8
Palmier à huile, 4 ans, Bénin	1,57	1,03	0,7
Cocotier, 10 ans, Vanuatu	1,61	0,69	0,4
Cocotier, 25 ans, Philippines	4,29	2,49	0,6
Hévée, 13 ans, Thaïlande	1,80	2,46	1,4
Caféier, 20 ans, Costa Rica	1,89	2,47	1,3

Les valeurs de turnover de racines fines échantillonnées sur les 30 premiers cm du sol, là où le renouvellement racinaire est maximum, sont assez variables entre au sein d'un agro-écosystème (voir ci-dessus) et même entre agro-écosystèmes (**Tableau 5**). Cependant, lorsqu'on regroupe les Monocotylédones (ici représentées par les palmacées) et les Dicotylédones (ici représentées par le Caféier, Hévée et Eucalyptus), les valeurs de turnover sont du même ordre de grandeur entre espèces au sein du même groupe, quels que soient l'âge des plantations et la zone géographique (**Tableau 5**). Les Monocotylédones arborescentes que j'ai pu étudier ont un turnover racinaire 2 à 3 fois plus faible que les Dicotylédones observées. Une explication pourrait être trouvée en considérant les diamètres des racines fines. En effet, les racines les plus fines sont celles qui se renouvellent le plus et une corrélation négative a souvent été observée entre le taux de turnover des racines fines et leur diamètre (Gaudinski et al., 2001, Matamala et al., 2003, Ostonen et al., 2005). Les racines fines des Palmiers ou des Cocotiers ont un diamètre autour de 1 mm (Colas, 1997, Jourdan, 1995b), ce qui est supérieur à celui des racines les plus fines des Hévées, Caféiers et surtout des Eucalyptus qui présentent les plus forts taux de turnover.

Les taux de turnover habituellement rapportés dans la littérature pour les espèces des forêts tropicales sont du même ordre ou légèrement supérieurs à ceux présentés ci-dessus chez les plantations pérennes tropicales. Par exemple, le turnover du *Larix* dans le centre de la Corée s'élèvent à $2,2 \text{ an}^{-1}$ (Son and Hwang, 2003), des valeurs similaires ont été trouvés chez l'Acacia ($2,0 \text{ an}^{-1}$) au Kenya (Lehmann and Zech, 1998) et chez le *Terminalia* ($2,4 \text{ an}^{-1}$) en Côte-d'Ivoire (Schroth and Zech, 1995). Globalement, ces valeurs en milieu tropical sont plus élevées que celles rapportées précédemment chez les feuillus ($0,1-2,0 \text{ an}^{-1}$) ou les conifères ($0,5-0,7 \text{ an}^{-1}$) des forêts des écosystèmes tempérés (Burke and Raynal, 1994, Nadelhoffer and Raich, 1992). Gill et Jackson (2000) ont fait la synthèse des études portant sur la dynamique des racines fines dans la littérature et ont conclu que le turnover des racines fines diminuait bien des écosystèmes tropicaux vers les écosystèmes des hautes latitudes pour tous les groupes fonctionnels de plantes. Quelques

exceptions subsistent cependant, des valeurs de turnover de racines fines de 2-2,5 an⁻¹ ayant été rapportées sur des racines non mycorhizées de vieux peuplements de pins aux États-Unis (King et al., 2002). Les paramètres climatiques ont certainement un rôle à jouer dans ces variations. En effet, une relation exponentielle significative a été mise en évidence entre le turnover racinaire et la température moyenne annuelle en savane et chez les arbustes (Gill et Jackson, 2000). Cette relation est cependant très faible dans les forêts (R²= 0.19). Par contre le turnover racinaire n'est pas sensible à la moyenne annuelle de précipitation et à l'évapotranspiration potentielle à une échelle globale (Gill et Jackson, 2000) mais il le devient à une échelle locale (Norby and Jackson, 2000). D'autres études sont nécessaires pour étudier l'effet des facteurs externes comme : les pathogènes des racines, la radiation solaire ou le taux de minéralisation de l'azote (Lauenroth et Gill, 2003).

Toutefois, la grande variabilité des résultats obtenus montrent qu'il faut continuer à améliorer les méthodes d'observation et de calcul du turnover racinaire. La méthode par observation directe à travers les (mini)rhizotrons reste la seule qui permet de voir naître et mourir des racines et donc d'en estimer la durée de vie réelle par observation et non par estimation. Tout en continuant son amélioration, elle sera préconisée pour l'estimation des ordres de grandeur des valeurs de turnover racinaire des écosystèmes naturels ou plantés.

3.4. Bilan sur la productivité racinaire

Au cours de 15 dernières années, mon activité était centrée sur l'estimation de la production primaire nette racinaire (bNPP) de plusieurs écosystèmes tropicaux plantés afin de contribuer au bilan carboné de ces plantations. Les estimations des stocks de biomasse de tous les types racinaires, de nécromasse, ainsi que les flux nets (production annuelle racinaire + turnover) ont permis de boucler les bilans de C qui restaient souvent incomplets et où le compartiment souterrain restait à l'état de « boîte noire ». Ainsi, par différentes méthodes, nous avons pu consolider nos estimations de productivité racinaire pour une meilleure prise en compte du compartiment souterrain.

Tableau 6. Production primaire nette aérienne (aNPP) et souterraine (bNPP) de 6 écosystèmes tropicaux plantés. Les valeurs de production racinaire des Eucalyptus¹ sont ici estimées par TBCA, celles des Eucalyptus², Caféiers et Hévéa le sont par sequential coring, les Cocotiers par rhizotrons. ¹(Epron et al., 2013), ²(Nouvellon et al. 2006), ³(Charbonnier et al. 2014 soumis. et Defrenet, 2013 [MAS2.4]), ⁴(Chairungsee et al., 2013, Satakhun et al., 2013), ⁵(Navarro et al., 2008), ⁶(Dufrene, 1989).

Ecosystème, âge, pays	aNPP (t ha ⁻¹ an ⁻¹)	bNPP (t ha ⁻¹ an ⁻¹)	% compartiment racinaire
Eucalyptus, 6 ans, Brésil¹	16,2	5,6	26%
Eucalyptus, 4 ans, Congo² EPF1 clone	14,8	7,5	34%
Eucalyptus, 4 ans, Congo² UG clone	23,6	8,9	27%
Eucalyptus, 7 ans, Congo¹	8,6	9,0	51%
Caféier, 20 ans, Costa Rica³	6,8	2,47	27%
Hévéa, 15 ans, Thaïlande⁴	11,6	2,46	18%
Cocotier, 17 ans, Vanuatu⁵	9,7	2,2	19%
Palmier à huile, 13 ans, Côte d'Ivoire⁶	11,3	5,8	34%

La comparaison des différents écosystèmes révèle l'importance de la part du système racinaire dans le bilan carboné des plantations. Celle-ci varie entre 20 et 50 % de la production primaire nette totale chaque année (**Tableau 6**) ce qui est en accord avec les chiffres classiquement trouvés dans la littérature (Grier et al., 1981, Jackson et al., 1997, Nadelhoffer and Raich, 1992, Santantonio and

Grace, 1987). Mise à part les plantations d'eucalyptus au Congo, pour lesquelles la production souterraine peut égaler la production aérienne en fin de rotation (bNPP obtenue par TBCA : *Total Belowground Carbon Allocation* (Epron et al., 2013, Giardina et al., 2004)), les valeurs des bNPP des plantations étudiées sont relativement semblables (autour de 20-30% de la NPP). Cette absence de variations est à relier sans doute à la relative équivalence des régimes climatiques entre les différents pays des tropiques humides dans lesquels ont été conduites ces études. Une comparaison avec les pays à saison sèche marquée serait intéressante. Parmi les facteurs de contrôle de la production racinaire, plusieurs ont été mis en évidence incluant la nutrition minérale (Kern et al., 2004, Noguchi et al., 2007), la topographie (Noguchi et al., 2007), la concentration en CO₂ de l'atmosphère (Pregitzer et al., 1995), l'environnement de la plante (Lopez et al., 1998), la température du sol et le stade de développement du végétal (Kern et al., 2004), la structure et la texture du sol (Lecompte et al., 2003, West et al., 2004), les microorganismes du sol (Wells et al., 2002) et enfin le pH du sol (Godbold et al., 2003).

Dans de nombreuses études, les taux de production des racines fines et leur turnover n'ont été estimés que dans les couches supérieures du sol et des hypothèses ont été formulées pour extrapoler à l'ensemble du profil racinaire ou ont avancé que la mortalité des racines fines pouvait être faible ou nulle dans les couches profondes (Hendrick and Pregitzer, 1993b, Wells et al., 2002). Cette hypothèse devra être vérifiée avec les plantations qui possèdent un enracinement profond, comme les plantations d'Eucalyptus au Congo (Bouillet et al., 2002) ou au Brésil (Christina et al., 2011, Laclau et al., 2013b) ou de Caféier au Costa Rica où d'importantes densités de racines fines sont observées dans les couches profondes du sol au-delà de 3 m et même jusqu'à plus de 13 m au Brésil (Christina et al., 2011, Laclau et al., 2013a). Les effets de la profondeur du sol sur le turnover racinaire ne sont pas clairement démontrés (Wells et al., 2002). Cependant il a été observé que la durée de vie des racines augmentait avec la profondeur en raison de la diminution des fluctuations de la température du sol et la meilleure disponibilité en eau (Eissenstat and Yanai, 1997, Hendrick and Pregitzer, 1993a). Certaines études ont suggéré dans le passé que les racines profondes ont probablement joué un rôle relativement modeste dans les bilans de C et en éléments nutritifs des forêts de feuillus (Hendrick and Pregitzer, 1996). Par contre, dans les sols tropicaux fortement altérés, des racines très profondes peuvent être une source majeure de C dans le sol (Nepstad et al., 1994) et peuvent être essentielles pour maintenir la croissance des plantes au cours des épisodes secs (Bruno et al., 2006). Les recherches futures sur la production et le fonctionnement des racines fines devront prendre en compte le comportement de ces racines profondes (cf. projet de recherche).

4. Conclusion

Au cours de mon parcours de recherche, lors de ces deux dernières décennies au CIRAD, j'ai créé puis développé un programme de recherche sur la modélisation de l'architecture et du développement racinaire de plusieurs plantes pérennes tropicales. Pour contribuer au bouclage du bilan de carbone de ces différents écosystèmes tropicaux plantés, j'ai mis au point ou adapté différents protocoles, méthodes et logiciels pour le calcul de la biomasse, de la dynamique, du turnover et enfin de la productivité racinaire. La plupart de ces mises au point ont été publiées et diffusées aux partenaires à travers des sessions de formation que je dispense dans différents pays au Sud. Les résultats de

productivité racinaire sont pratiquement tous publiés ou en voie de l'être. Un article de synthèse sur ces différents agroécosystèmes est en préparation.

Cependant, des observations récentes réalisées par les étudiants que j'ai encadrés ([DOC.11], [DOC.12], [DOC.29], [MAS2.2], [MAS2.4], [MAS2.5]) ont montré que les racines de ces plantations n'étaient pas cantonnées aux horizons superficiels et avaient une dynamique importante de colonisation en profondeur, pouvant atteindre rapidement des profondeurs de l'ordre de 15 m dans les plantations d'Eucalyptus au Brésil (Christina et al., 2011). Or, l'ensemble des bilans de productivité racinaire établis à ce jour ne prennent pas en compte ces racines profondes.

Par ailleurs, les études sur l'architecture et le développement racinaire de ces arbres de plantation étaient purement descriptives, même si des tentatives de représentation de la mortalité et de l'élagage racinaire ou de calculs de volumes de sol rhizosphérique ont été tentées par simulation (Jourdan, 1995b, Jourdan and Rey, 1997c). Les maquettes numériques tridimensionnelles sont des outils qui permettent de visualiser des structures et leur dynamique, mais aussi d'intégrer, estimer et localiser en 3D des fonctions majeures comme le prélèvement d'éléments minéraux, l'exsudation apicale, les modifications des propriétés physico-chimiques, biochimiques et biologiques (communautés microbiennes) du sol autour des racines... Pour cela, il est nécessaire de caractériser ces processus à une échelle fine pour pouvoir les restituer sur les maquettes. C'est l'objet de mon projet de recherche qui sera centré sur l'étude du rôle fonctionnel des racines profondes et qui sera détaillé dans la 3^{ème} partie de ce mémoire.

Partie III : Projet de recherche

1. Vision synthétique du projet et programmation

La rhizosphère, volume de sol à l'interface sol/racine et soumis aux actions des racines, est un des habitats microbiens les plus actifs et joue un rôle majeur dans la production primaire et la régulation de divers services écosystémiques (cycle biogéochimiques, séquestration du carbone) (Hinsinger et al., 2009). En dépit du rôle majeur de la rhizosphère dans le fonctionnement du sol, nos connaissances actuelles des processus sous-jacents restent limitées, en particulier chez les arbres, au champ. Pour ces derniers, les études sur l'organisation et le fonctionnement de la rhizosphère sont limitées par (i) la variabilité spatiale et temporelle du fonctionnement racinaire et (ii) la difficulté d'étudier les racines profondes.

L'objectif principal de mon projet de recherche est donc de caractériser et de localiser la distribution spatiale des paramètres biogéochimiques et microbiens (y compris les champignons mycorhiziens) dans la rhizosphère d'arbres, en fonction de la profondeur et en fonction du statut fonctionnel des racines (typologie fonctionnelle). Il permettra de mieux comprendre l'impact de la diversité fonctionnelle racinaire sur la composition des rhizodépôts, les propriétés biogéochimiques de la rhizosphère et les communautés microbiennes associées qui, en retour, influent sur le fonctionnement de l'arbre (allocation de carbone et alimentation hydro-minérale) et de nombreux services écosystémiques. Ce projet est initié à la suite d'une somme de plusieurs observations qui nous ont conduits à affirmer que les racines des arbres sont architecturalement et fonctionnellement hétérogènes au sein du système racinaire, en particulier en fonction de la profondeur. De plus, chez les arbres des climats tropicaux, elles mettent en place une forte proportion de leurs racines fines en profondeur (Christina et al., 2011, Laclau et al., 2013b, Maeght et al., 2013).

L'hypothèse centrale de mon projet est que les propriétés du sol dans la rhizosphère, dont la diversité des communautés microbiennes rhizosphériques, sont influencées par l'état physiologique des racines, état qui dépend de la profondeur et des conditions climatiques. Comme l'évolution du climat au sein des écosystèmes tropicaux devrait se traduire par une modification de la répartition saisonnière des pluies, notre hypothèse sera testée dans des scénarios climatiques contrastés simulant les effets d'une réduction des précipitations sur le fonctionnement des racines à différentes profondeurs. Je prévois de tester cette hypothèse à court terme sur un des sites expérimentaux instrumentés de notre unité (Itatinga, Brésil) où l'Eucalyptus, essence forestière à croissance rapide et racines profondes, est cultivé. Des parcelles sous exclusion partielle de pluies seront comparées à des parcelles témoins, pour évaluer l'influence du changement climatique sur le fonctionnement des racines de surface et profondes ainsi que leurs rhizosphères respectives.

Mon projet de recherche est un projet intégré qui vise à regrouper des compétences rarement associées : écophysiologie végétale, biogéochimie et écologie microbienne des sols, analyse spatiale et modélisation. Une des originalités du projet est de transférer au champ des techniques innovantes comme des sondes non invasives (optodes) permettant de mesurer des paramètres environnementaux et des techniques d'imagerie de systèmes racinaires, et de les associer aux analyses de séquençage haut débit. Le caractère innovant de cette approche *in situ* permettra d'aboutir à une vision plus intégrée de la rhizosphère des arbres, en dépassant les approches des modèles de laboratoire. L'idée est de fournir une cartographie microbienne et biogéochimique de l'environnement rhizosphérique des racines en fonction de leur typologie fonctionnelle et de la profondeur et d'identifier les patrons biogéographiques microbiens associés. Ce projet permettra de caractériser pour la première fois l'environnement rhizosphérique des racines profondes des arbres, prérequis essentiel pour déterminer leurs rôles dans des services écosystémiques comme la séquestration du carbone et les cycles biogéochimiques des nutriments majeurs tels que l'azote, le phosphore, le potassium et d'autres cations.

Ce projet dans son ensemble sera conduit sur plusieurs années et fédèrera les collègues écophysiologistes, biogéochimistes, microbiologistes de l'unité Eco&Sols ainsi que d'autres unités partenaires françaises (UMR BIOEMCO-Bondy, UMR LEM-Lyon, UMR AGROECOLOGIE-Dijon). Il fera l'objet d'un dépôt auprès de bailleurs français (ANR, LabEx AGRO-Agropolis Fondation) et étrangers (EU, FAPESP-Brésil).

Il est proposé dans un premier temps de commencer ce projet par une thèse de Doctorat (Céline Pradier, thèse initiée en novembre 2013) dont j'assurerai officiellement la direction après la soutenance de mon HDR. Cette thèse co-encadrée avec P. Hinsinger (directeur de thèse), intitulée « Rôle fonctionnel des racines profondes en plantation d'Eucalyptus – réponse à une réduction des précipitations », a démarré le 1er novembre 2013 sur un financement CIRAD et se déroulera à mi-temps sur le site ESALQ-USP d'Itatinga au Brésil (<http://lcf.esalq.usp.br/estacoes/itatinga/apresentacao.php>) et en France.

La question de recherche principale de la thèse de Doctorat de Céline Pradier est centrée sur l'étude des effets combinés de la profondeur du sol et d'une réduction des précipitations sur les spécificités fonctionnelles des racines fines de plantations d'Eucalyptus?

Les objectifs ambitieux de ce projet sont les suivants: (i) évaluer le rôle des racines profondes dans les prélèvements hydriques et, (ii) caractériser et évaluer le fonctionnement racinaire (absorption/excrétion) *in situ* pour une meilleure prise en compte dans les modèles d'absorption hydro-minérale et de séquestration de C dans le sol.

2. Introduction et objectifs du projet de recherche

La production primaire végétale dépend d'un volume de sol minuscule - la rhizosphère. La vie sur Terre dépend fortement des processus biogéochimiques qui se produisent dans un petit volume de sol autour des racines, appelé la rhizosphère (Hinsinger et al., 2009). Alors que le sol dans son ensemble comporte des myriades d'organismes et d'espèces, la plupart du volume du sol est, paradoxalement, inhabitée (Nunan et al., 2003, Watt et al., 2006). Cette situation reflète le fait que la vie du sol est discrètement concentrée dans des « hot spots » comme la rhizosphère (Nunan et al., 2003, Watt et al., 2006). La rhizosphère est connue pour être l'un des habitats les plus dynamiques de la planète (Hinsinger et al., 2009) et joue un rôle essentiel dans le maintien des processus biogéochimiques qui, en fin de compte, déterminent la qualité et la quantité de la production des aliments, fibres et énergie. Les changements dans les propriétés du sol autour des racines des plantes influencent également les processus microbiens ayant un impact sur les émissions de gaz à effet de serre (Philippot et al., 2009). Malgré cela, nous savons encore très peu de choses sur les processus rhizosphériques et encore moins sur la façon dont nous pouvons les manipuler à des fins agronomiques (Dessaux et al., 2010, Richardson et al., 2009, Ryan et al., 2009). Même si notre compréhension des interactions de la rhizosphère a considérablement augmenté au cours des 10 dernières années (Dessaux et al., 2010), il subsiste un besoin pressant pour réaliser des études interdisciplinaires visant à comprendre les interactions subtiles et complexes entre la biologie, la physique et la chimie de ce système qui affiche une variabilité spatiale particulièrement élevée. ***En utilisant les récentes innovations technologiques de sondage non-invasif et les techniques d'imagerie, ainsi que celles apparues dans la bio-informatique et la technologie de séquençage de***

prochaine génération (NGS) pour accéder à la diversité microbienne, nous nous proposons de caractériser in situ l'environnement rhizosphérique des arbres adultes qui poussent dans des sols profonds, allant ainsi au-delà des approches qui se fondent seulement sur les modèles de laboratoire, des plantes jeunes, le plus souvent isolées et de petite taille et des microcosmes.

Les services fournis par les écosystèmes associés aux racines profondes : une boîte noire scientifique? La croissance des racines induit la rhizodéposition de C à différentes profondeurs du sol, y compris les horizons profonds. Conjointement avec le dépôt de litière aérienne à la surface du sol, la production de racines est considérée comme l'entrée principale de C organique dans les sols et peut même représenter un stock de C de plus du double de celui existant au-dessus du sol dans certains écosystèmes (Jackson et al., 1997). Un obstacle majeur qui limite les progrès de la mise en œuvre des approches d'ingénierie écologique, répondant aux exigences post-Kyoto, est notre incapacité à comprendre et à utiliser les multiples fonctions remplies par les racines, et les racines profondes en particulier, dans les écosystèmes terrestres. Dans la plupart des études, les caractéristiques des racines sont mesurées dans la couche arable (0-0,3 m). Pourtant, selon une méta-analyse de 475 profils de sol à partir d'une large gamme de biomes terrestres (Schenk and Jackson, 2002a, Schenk and Jackson, 2005), dans, ces résultats sont probablement sous-estimés car peu d'études ont regardé les horizons plus profonds et donc ont artificiellement tronqué la distribution en profondeur des racines. En effet, plusieurs études récentes (Christina et al., 2011, Laclau et al., 2013a, Maeght et al., 2013) montrent que l'enracinement profond des écosystèmes forestiers plantés est une réalité. Par exemple, une étude au Laos dans une plantation de teck de 15 ans a montré que plus de 75 % de la longueur des racines fines se trouvaient entre 1 et 12 m (**Figure 31**). En outre, même si la décomposition des racines est plus faible dans les horizons profonds que dans la couche arable (**Figure 32**), les processus de dégradation des racines sont encore importants. Ainsi, la croissance des racines profondes participe de façon essentielle aux entrées de C dans le sous-sol.

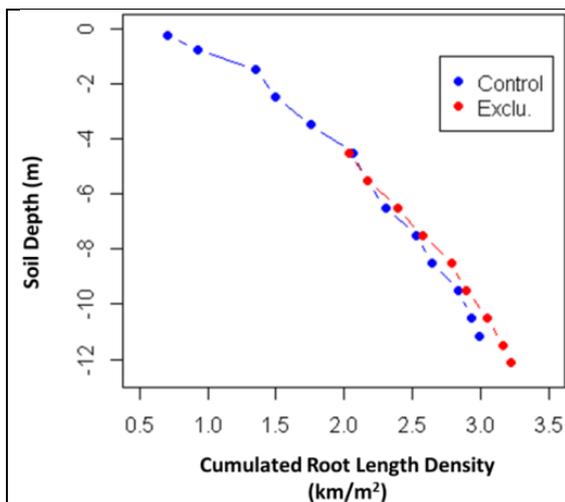


Figure 31. Longueur cumulée de racines fines de teck dans le nord du Laos (sous exclusion de pluie ou non): la longueur totale des racines fines inférieures à 1 m de profondeur est environ trois fois plus importante qu'au-dessus (Maeght et al., 2012).

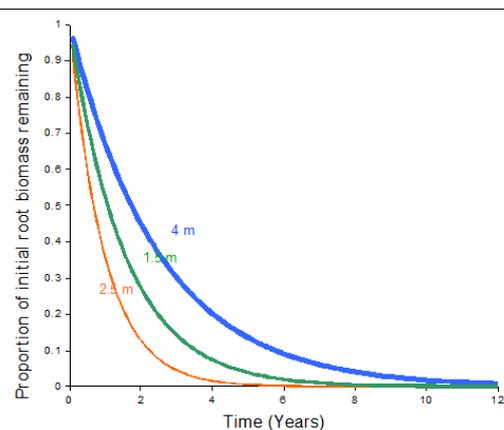


Figure 32. Taux de décomposition des racines à différentes profondeurs du sol dans les plantations d'hévéas en Thaïlande qui mettent l'accent sur les processus de dégradation biologique plus importants dans les horizons de surface qu'en profondeur (Gonkhamdee et al., 2009).

Nous émettons l'hypothèse que les fonctions des racines diffèrent avec la profondeur du sol, et donc peuvent agir sur les services écosystémiques tels que la production primaire, les cycles des nutriments et de l'eau et la séquestration de C. Cette hypothèse est étayée par des découvertes récentes qui montrent un potentiel d'absorption des nutriments différencié chez les racines profondes d'Eucalyptus (da Silva et al., 2011). Les racines fines apparaissent également comme un important puits de C du sol, puisqu'elles représentent 33 % de la production primaire nette annuelle mondiale (Jackson et al., 1997). Toutefois, notre connaissance actuelle reste insuffisante pour déterminer si la production de racines fines se produit régulièrement ou non tout au long du profil des sols. Si la production de racines fines est active dans les horizons profonds du sol (Christina et al., 2011, Mulia and Dupraz, 2006), une meilleure compréhension de la dynamique de ces racines pourrait avoir des implications importantes dans le contexte du changement global, puisque la séquestration de C à long terme est plus susceptible de se produire dans les horizons les plus profonds du sol (Gill and Burke, 2002). Il est donc essentiel de clarifier les rôles fonctionnels des racines profondes et des communautés microbiennes associées. Un tel effort de recherche est une condition préalable pour comprendre comment gérer les interactions souterraines pour concevoir des systèmes de culture plus durables et pour parvenir ainsi à une intensification écologique des agroécosystèmes (Hinsinger et al., 2011). La société est confrontée au défi de plus en plus important sur la façon de produire de grandes quantités de biomasse tout en minimisant les intrants (engrais, etc...), surtout dans les pays tropicaux où il existe une demande pressante d'une population en croissance rapide et où les sols sont généralement pauvres en éléments nutritifs. Dans les sols altérés profonds des régions tropicales, on peut supposer que les racines qui poussent à grande profondeur pourraient jouer un rôle crucial dans la capture des nutriments (indispensable en raison du lessivage des nutriments dans les horizons supérieurs) en plus de sécuriser l'accès à l'eau et éventuellement aux éléments nutritifs pendant la saison sèche. Cela est particulièrement vrai vu que le changement climatique se produit dans de nombreuses régions du monde, en particulier celles où sont attendues des périodes de sécheresse plus intenses et plus longues. Cependant, on sait peu sur l'absorption des nutriments par les racines très profondes (da Silva et al., 2011), et encore moins sur les communautés microbiennes associées (Michalet et al., 2013). ***L'effet de l'hétérogénéité fonctionnelle des racines associée à l'enracinement profond sur la biogéochimie de la rhizosphère, et sur l'écologie des communautés microbiennes et mycorhiziennes qui y sont associées est une nouvelle frontière que mon projet de recherche vise à explorer.***

Le caractère innovant de ce projet consiste en outre à étudier l'écologie microbienne et la biogéochimie de la rhizosphère à une échelle allant du mètre au centimètre le long d'un profil de sol profond, à l'aide de techniques innovantes appliquées *in situ*. Ce projet doit permettre de renforcer et de compléter les concepts et les méthodologies développées dans plusieurs projets en cours : (i) ANR « ECOSFIX » où l'hétérogénéité fonctionnelle des racines profondes et les techniques de rhizotron sont abordées mais pas à une échelle rhizosphérique ; (ii) EU FP7 « EURoot » où la modélisation de l'architecture et du fonctionnement racinaire et le développement technologique de senseurs optiques de nutriments (optodes) sont en cours mais pas sur des arbres au champ (il s'agit de céréales et, principalement, de travaux en conditions de laboratoire sous serre) et sans la prise en compte de la biodiversité microbienne de la rhizosphère.

Mon projet de recherche sera une première tentative pour caractériser l'environnement rhizosphère à l'échelle du champ à l'aide de techniques de sonde non-invasives et d'imagerie pour les arbres adultes sur sols profonds. Il est basé sur l'hypothèse que démêler l'hétérogénéité spatiale de la

rhizosphère est une condition préalable pour améliorer notre compréhension de son rôle dans les fonctions clés des sols tels que la nutrition des plantes, le stockage du C et les émissions de gaz à effet de serre. Une autre caractéristique majeure de ce projet est de faire usage des sites expérimentaux uniques dans les tropiques où les précipitations ont été manipulées (exclusion de pluie partielle sous couvert *versus* témoin sans exclusion) afin de simuler les changements climatiques futurs et de vérifier si les propriétés des racines profondes et leurs environnements rhizosphériques sont modifiés en réponse à une diminution des précipitations. Pour ce faire, ce projet devra réunir des écophysiologistes, des biogéochimistes, des microbiologistes et des écologues du sol, à savoir des communautés scientifiques qui interagissent rarement les unes avec les autres. Nous supposons que (i) l'hétérogénéité fonctionnelle des racines est le principal moteur du fonctionnement et de la différenciation de la rhizosphère et que (ii) la profondeur du sol aura une incidence sur la fonctionnalité des racines. En outre, nous nous attendons à ce que le fonctionnement de racines profondes soit stimulé en réponse à la diminution des précipitations. Ces hypothèses seront testées dans un sol profond altéré, pauvre en C et en éléments nutritifs, comme ceux qu'on trouve habituellement dans les régions tropicales, sur un site expérimental au Brésil déjà équipé d'un système d'exclusion de pluie (**Figure 33**).

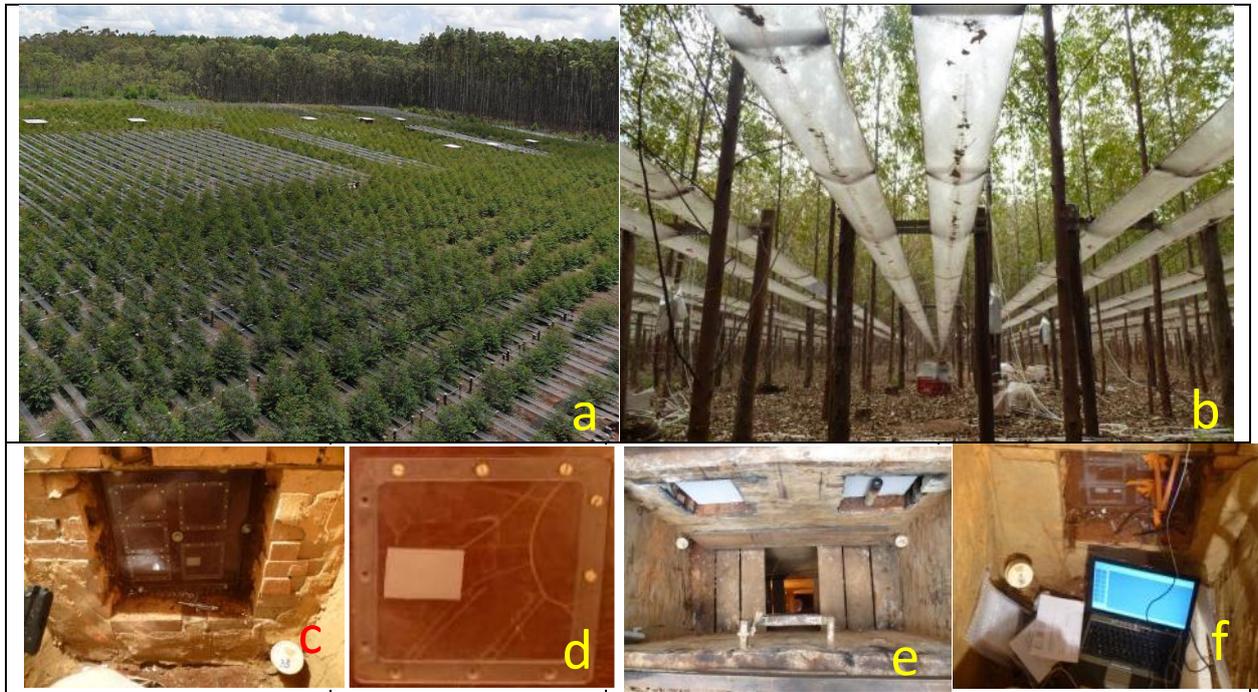


Figure 33. Expérience d'exclusion (33%) de pluie dans une plantation d'eucalyptus à Itatinga (Brésil), 222 (a) et 855 (b) jours après la plantation. Les fenêtres à optodes (c, d) sont testées en conditions réelles dans des fosses instrumentées jusqu'à 7m de profondeur (e) dans un essai préliminaire où la dynamique du pH rhizosphérique a été caractérisée (f).

L'*Eucalyptus* sera utilisé comme espèce modèle, car premièrement il est connu pour être profondément enraciné (Christina et al., 2011) et deuxièmement parce que nous avons accumulé une bonne connaissance sur l'architecture de son système racinaire, son développement et son fonctionnement (da Silva et al., 2011, Jourdan et al., 2008, Laclau et al., 2013a, Thongo M'Bou et al., 2008a). Le site expérimental sur lequel le projet sera développé est localisé à Itatinga (ESALQ, Université de São Paulo, Brésil) sur des sols sableux profonds (> 20 m) sans contrainte physique majeure pour la croissance des racines (Christina et al., 2011). Sur ce site, une large expérience d'exclusion de pluie (réduction de 30% sous la canopée et témoin reproduits dans 3 blocs) est conduite sur 2 ha (**Figure 33a,b**). Le site est fortement instrumenté pour étudier les cycles

biogéochimiques des éléments nutritifs, de l'eau et du C (monitoring de la teneur en eau du sol par sondes TDR jusqu'à une profondeur de 17 m, de la composition chimique des solutions du sol et de la respiration du sol, ainsi que plusieurs études écophysologiques en cours, ...).

La caractérisation biogéochimique *in situ* de la rhizosphère des arbres ainsi que des communautés microbiennes associées et l'impact des racines profondes sur le fonctionnement de la rhizosphère et les services écosystémiques sont les principales originalités scientifiques de ce projet ambitieux. Trois grandes questions de recherche seront abordées, qui sont détaillées ci-dessous, avec les hypothèses correspondantes.

Quel est l'impact de la profondeur sur l'état fonctionnel des racines et des communautés microbiennes de la rhizosphère?

- *Hypothèse*: Les racines fines ont un état fonctionnel différent (racine en croissance et sénescence, modalités de rhizodéposition de C, statut mycorhizien, propriétés biogéochimiques de la rhizosphère) avec la profondeur du sol.
- *Hypothèse*: les communautés microbiennes de la rhizosphère (dont les communautés mycorhiziennes) varient avec la profondeur du sol pour un type fonctionnel de racine donné.

Quel est l'impact de la réduction des précipitations sur le fonctionnement des racines de surface et des racines profondes?

- *Hypothèse*: Les racines fines de surface et profondes répondent différemment à la pénurie d'eau en fonction de leur état fonctionnel (état de croissance ou sénescence, mode de rhizodéposition de C, statut mycorhizien, propriétés biogéochimiques de la rhizosphère) en raison d'un plus grand investissement dans les racines profondes comme une réponse à la réduction des précipitations.
- *Hypothèse*: les communautés microbiennes rhizosphériques profondes (dont les communautés mycorhiziennes) varient en conséquence, en réponse à la réduction des précipitations.

Quel est l'impact du type fonctionnel de la racine et de la profondeur sur la biogéographie microbienne dans la rhizosphère, et quels sont les principaux moteurs de l'hétérogénéité de la rhizosphère qui en résulte?

- *Hypothèse*: Les racines mycorhizées et non mycorhizées façonnent différemment la répartition des communautés et des activités microbiennes dans leur rhizosphère, ce qui crée un micro-environnement hétérogène en fonction de la distance à la surface de la racine et à l'apex de la racine.
- *Hypothèse*: Le pH et la composition des rhizodépôts sont des variables explicatives importantes de la diversité microbienne dans l'environnement des racines, et des différences observées entre racines de surface et racines profondes.

Pour faire face à l'hétérogénéité environnementale de la rhizosphère aux échelles pertinentes, ce projet a l'ambition d'apporter les dernières technologies de laboratoire sur le terrain, tels que les fenêtres équipées de senseurs optiques (optodes) non invasifs (**Figure 33c,d**) et des scanners optiques mis en place dans les puits d'accès en profondeur (**Figure 33e**).

3. Etat de l'art

Quelle est l'importance des plantations forestières sous les tropiques et quelles sont les motivations pour le choix de l'Eucalyptus comme modèle expérimental? Bien que les plantations

forestières ne représentent que 5 % des forêts du monde en 2000, elles ont fourni 33 % de l'offre mondiale de bois (MEA, 2005). La superficie occupée par les forêts de plantation a progressé à un taux annuel de 2.0-2.5 millions d'hectares au cours des dernières décennies (FAO, 2010). L'expansion plus récente des plantations a été fondée sur les espèces exotiques gérées en courtes rotations dans les régions tropicales et subtropicales. L'Eucalyptus (famille des Myrtaceae) est l'espèce de feuillus la plus plantée dans les régions tropicales; elle couvre environ 20 millions d'hectares, dont près de 5 millions au Brésil (ABRAF, 2011). La plupart des plantations d'Eucalyptus sont établies sur des sols profonds fortement altérés et l'espèce est connue pour y extraire l'eau à des profondeurs d'au moins 7,5 m (Calder et al., 1997). Les taux de croissance verticale presque symétriques au-dessus et en dessous du sol ont été montrés dans une chronoséquence d'*Eucalyptus grandis* au Brésil (Christina et al., 2011). Le front racinaire pouvant atteindre les profondeurs de 10 m et 18 m, à 2 et 4 ans après la plantation, respectivement, soit une extension en profondeur du système racinaire d'environ 5 m par an au cours des premiers stades de croissance. Des taux de croissance racinaires similaires ont été observés au cours des deux premières années après la plantation dans l'expérience de réduction de pluie, qui fera l'objet de ce projet (données non publiées). Dans une parcelle à proximité, les racines fines de *E. grandis* ont montré des taux potentiels d'absorption des nutriments contrastés avec la profondeur en fonction du type de nutriments. En effet, des potentiels d'absorption (par unité de longueur racinaire) proportionnellement plus élevés pour les cations à 3 m de profondeur par rapport à la surface du sol y ont été observés (da Silva et al., 2011). La capacité de *E. grandis* d'explorer rapidement un volume considérable de sol ainsi que la spécialisation fonctionnelle de ses racines en profondeur, contribuent sans doute à atteindre la production de biomasse forestière la plus élevée au monde, telle qu'elle est observée dans cet agroécosystème, malgré les sols pauvres sur lesquels elle est établie. En effet, les racines profondes sont susceptibles de fournir des quantités importantes d'eau et de nutriments nécessaires tout au long du développement de ces plantations à croissance rapide. ***Par conséquent, les plantations d'Eucalyptus peuvent être considérées comme un modèle pertinent d'écosystème forestier tropical à enracinement profond dans ce projet.***

Que savons-nous au sujet de l'influence de la profondeur du sol sur le fonctionnement des racines dans les plantations forestières ? Les systèmes racinaires sont connus pour être très hétérogènes et plastiques, à la fois architecturalement et fonctionnellement, en fonction de l'âge de la plante et sa phénologie, des conditions du sol, du climat, etc... (Hodge et al., 2009). Cela est particulièrement vrai pour les racines des plantes pérennes, qui ont un impact durable sur l'environnement du sol. Une expression significative de la plasticité de la racine est la croissance des racines en profondeur, à une profondeur de plusieurs mètres selon les espèces, à condition que les propriétés physiques du sol ne soient pas limitantes (Masle, 2002). Excepté pour les espèces de plantes qui sont adaptées pour atteindre les nappes phréatiques profondes pour leur croissance et leur survie pendant les périodes sèches, les systèmes racinaires des plantes se développent peu en profondeur (moins de 1 m de la surface du sol dans de nombreux sites forestiers) en raison des propriétés physiques et chimiques des sols qui limitent la croissance des racines en profondeur (Reubens et al., 2007). Toutefois, la profondeur d'enracinement maximale rapportée dans la littérature scientifique est sous-estimée car peu d'études se sont penchées sur des horizons plus profonds (Schenk and Jackson, 2002a) et ont donc artificiellement tronqué la distribution en profondeur des racines. Cependant, une étude Stone et Kalisz (1991) ont rapporté 37 exemples de la colonisation des racines d'arbre entre 10 et 60 m sous la surface du sol, ce qui indique que la profondeur d'enracinement maximale varie considérablement selon les conditions climatiques et pédologiques, et entre les espèces (Stone and

Kalisz, 1991). Les racines les plus profondes, cependant, jouent un rôle fondamental dans le captage d'eau de la nappe phréatique profonde pendant la saison sèche. Des travaux préliminaires (Pierret et al., non publié) ont montré que sur des sites en Thaïlande, qui diffèrent considérablement en termes de type de sol et de climat par rapport au Brésil, les racines d'Hévéa se développent constamment à des profondeurs > 1 m, avec d'importantes quantités de racines jusqu'à des profondeurs d'au moins 20 m pour les arbres matures (> 15 ans). Ces auteurs ont observé que la biomasse de racines fines trouvée en dessous d'1 m de profondeur représentait encore plus d'un tiers de la biomasse totale des racines fines (même jeu de données que **Figure 31**). Fait intéressant, ils ont constaté de nettes différences dans le comportement des racines fines avec la profondeur du sol, comme la dynamique de croissance des racines et les taux de décomposition (**Figure 32**). Cependant, le fonctionnement réel de ces racines profondes et les propriétés de leur rhizosphère sont très peu étudiés, comme il est généralement admis que les racines qui poussent en surface sont les principaux contributeurs à la croissance des plantes grâce à l'apport de nutriments. En effet, à notre connaissance, il n'existe pas de données dans la littérature sur la présence d'associations mycorhiziennes avec les racines profondes (c'est à dire aux profondeurs > 2 m). Des observations préliminaires au Brésil ont indiqué que des hyphes ectomycorhiziens et des ectomycorhizes ont été observées dans les fenêtres installées à plus de 6 m de profondeur dans les plantations d'Eucalyptus. Lors du creusement de nouveaux puits d'observation en vue de la réalisation de ce projet, des ectomycorhizes ont été observées sur les racines prélevées dans les horizons du sol excavé jusqu'à au moins 13 m de profondeur (travaux de caractérisation en cours). **Par conséquent, la modification présumée de la biogéochimie de la rhizosphère, y compris la composition de rhizodépôts et les conséquences pour les communautés microbiennes en profondeur sera abordée dans ce projet. En fin de compte, ce projet permettra d'améliorer notre compréhension du rôle des racines profondes dans la séquestration du C et l'émissions de gaz à effet de serre de l'écosystème, ainsi que dans le cycle biogéochimique des nutriments.**

Que savons-nous au sujet de l'impact de la typologie des racines d'arbre et les rhizodépôts sur les communautés microbiennes dans la rhizosphère ? Différentes fonctions des racines (ancrage, absorption de l'eau et/ou des nutriments) peuvent être identifiées au sein du même système racinaire avec différents états physiologiques (racines en croissance, en sénescence ou mycorhizées...), conduisant à la définition des différents types fonctionnels de racines (Jourdan et Rey, 1997a). Cette typologie fonctionnelle racinaire est aussi liée à des différences dans la composition chimique de la racine (rapport C/N, par exemple) et des activités racinaires (exsudation d'acides organiques et autres rhizodépôts, acquisition de nutriments), qui influencent à leur tour la diversité, la composition et l'activité des communautés microbiennes rhizosphériques (Ladygina and Hedlund, 2010). Dans les espèces de plantes qui forment des ectomycorhizes (l'Eucalyptus parmi les espèces d'arbres tropicaux), la morphologie et la physiologie de l'extrémité des racines ectomycorhiziennes est considérablement altérée, ce qui donne des changements substantiels en termes de modification de pH local ou des patrons d'exsudation comme indiqué par des expériences en microcosmes (Casarin et al., 2004), et en termes de communautés microbiennes associées (Uroz et al., 2007). Bien que l'influence de la rhizodéposition sur les communautés microbiennes ait été largement étudiée dans les espèces végétales herbacées dans des conditions contrôlées (Dennis et al., 2009), peu d'études ont porté sur les espèces d'arbres, en particulier dans des conditions au champ. La relation entre la typologie des racines et l'activité des racines a été récemment étudiée (Michalet et al., 2013) dans le cadre du projet « Pir Amazonie C-Dex », qui vise à déterminer l'impact

de chimiodiversité des exsudats racinaires d'arbres sur les communautés microbiennes. Bien que ce projet porte exclusivement sur des racines peu profondes, il témoigne d'un lien entre la morphologie des racines et de la nature des composés organiques libérés par les racines dans le sol (Michalet et al., 2013). **Faisant suite à ce travail, ce projet de recherche vise à apporter un éclairage nouveau sur les relations entre les types fonctionnels racinaires des arbres, y compris le statut mycorhizien des racines, la composition des rhizodépôts, les propriétés biogéochimiques de la rhizosphère et la composition de la communauté microbienne (y compris mycorhizienne) associée aux racines.**

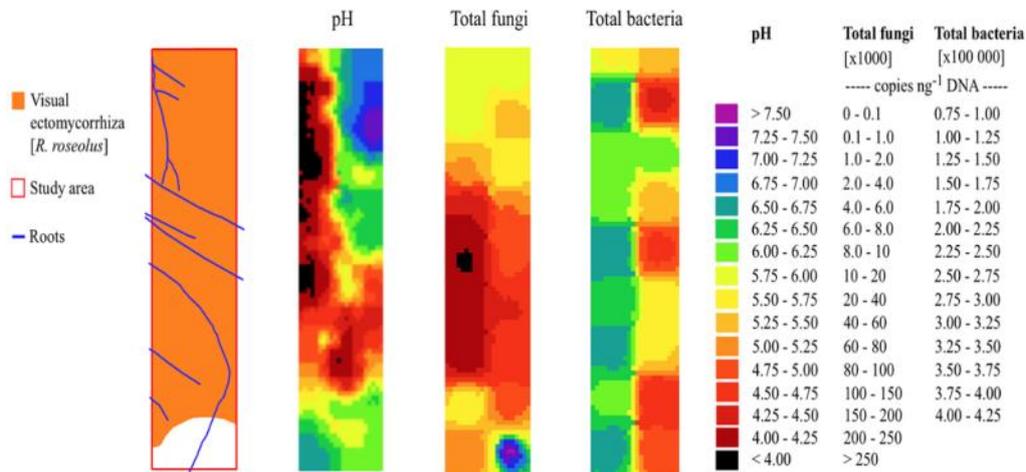


Figure 34. Maps (2 cm x 9 cm) of roots, mycorrhizae, pH, total fungi and bacteria in the rhizosphere of pine grown in a microcosm experiment in a top soil inoculated with the ectomycorrhizal fungus *Rhizopogon roseolus*. Selon Cloutier-Hurteau et al. (submitted).

Que savons-nous sur les hétérogénéités de la rhizosphère des arbres dans le sol ? L'écologie de la rhizosphère est déterminée par une série de processus interactifs qui sont fortement influencés par l'architecture physique de la matrice du sol, couplée avec la distribution spatiale et temporelle des rhizodépôts, des protons et de gaz, qui à leur tour sont liés au rôle des racines comme des puits pour l'eau et les nutriments. Les conséquences pour la croissance des plantes et l'écologie de l'ensemble de l'écosystème sont significatifs (Hinsinger et al., 2009). Par exemple, le pH du sol, qui est le principal facteur déterminant la diversité microbienne de l'échelle de la parcelle au continent (Bru et al., 2011, Fierer and Jackson, 2006) peut varier de 3 unités de pH, même à l'échelle millimétrique (Blossfeld et al., 2013, Yang et al., 1995). En outre, la racine peut provoquer de grandes variations de pH qui ne se produisent pas de façon homogène le long du système racinaire et qui varient au fil du temps (Blossfeld et al., 2010, Blossfeld et al., 2013, Hinsinger et al., 2003), créant ainsi des micro-niches hautement dynamiques. Cette hétérogénéité est négligée dans la plupart des études sur l'écologie microbienne de la rhizosphère. En conséquence, les relations possibles entre l'hétérogénéité des paramètres biogéochimiques tels que le pH et la structure des communautés microbiennes dans la rhizosphère restent mal documentées. Des études récentes ont caractérisé l'hétérogénéité spatiale du pH du sol (en utilisant des optodes) et l'abondance des *phyla* bactériens sélectionnés à l'échelle sub-centimétrique au sein de la rhizosphère de jeunes arbres (Figure 34). Ce travail pionnier a élégamment démontré que : i) la distribution spatiale des communautés bactériennes dans la rhizosphère s'explique en partie par les variations de pH, et ii) les *phyla* différents des bactéries occupent des niches distinctes. Cette expérience en microcosme a souligné l'importance de l'hétérogénéité spatiale des communautés microbiennes de la rhizosphère et de la

nécessité d'explorer cette hétérogénéité à une échelle appropriée pour comprendre les déterminants de la répartition de la communauté microbienne dans l'environnement racinaire.

La caractérisation de l'hétérogénéité spatiale de la rhizosphère des arbres à une échelle appropriée pour cartographier les communautés microbiennes liées à différents types fonctionnels de racines, en fonction de la profondeur du sol et dans le contexte du changement climatique (réduction des précipitations), constitue la principale originalité de mon projet (voir schéma conceptuel du projet sur la Figure 35). En outre, la comparaison de la structure et de la dynamique des communautés microbiennes/mycorrhizienne dans la rhizosphère des arbres soumis à des climats contrastés (témoin vs réduction des précipitations), permettra d'explorer l'impact du changement climatique attendu sur le fonctionnement de la rhizosphère des arbres. Cette recherche fournira des informations utiles pour déterminer si le changement climatique aura une incidence sur la durabilité et la productivité des plantations d'arbres à croissance rapide comme l'Eucalyptus.

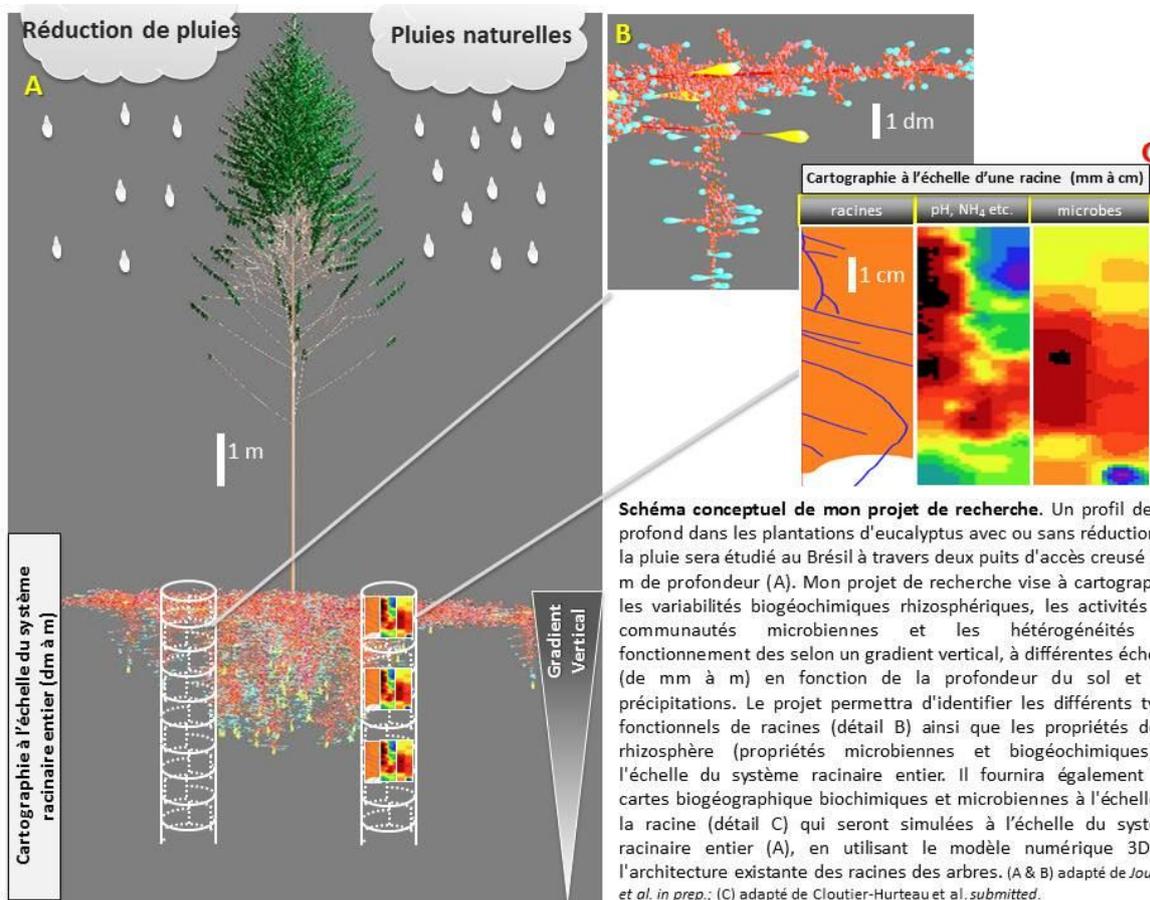


Figure 35. Schéma conceptuel du projet de recherche.

Que sait-on au sujet de l'impact de la réduction des précipitations sur le fonctionnement des racines profondes d'arbres de plantation et de leurs communautés microbiennes associées? Selon Beier et al. (2012), la majorité des expériences avec modification des précipitations ont été réalisées dans les prairies (46%) et des forêts (30%) et étaient situées à des latitudes moyennes (30-60°). Ils ont constaté une nette sous-représentation des expériences sur des sites avec des climats à fortes précipitations, supérieures à 1500 mm an⁻¹ (6%)(Beier et al., 2012). Cependant, il faut noter que certaines de ces zones de fortes précipitations sont projetées pour être plus sensible et pour faire face à la plupart des changements significatifs (IPCC, 2007). En ce qui concerne l'effet de la

manipulation des précipitations sur les communautés microbiennes, la diversité fongique est apparue moins sensible aux variations saisonnières de l'humidité et de la température que la diversité bactérienne dans les écosystèmes naturels méditerranéens (Yuste et al., 2011). En outre, une étude a révélé que la diversité fongique estimée dans des échantillons de sol prélevés dans des prairies avait augmenté pendant les périodes sèches (Hawkes et al., 2011). Cependant, une étude récente a montré que l'abondance des champignons mesurée en peuplement de *Pinus/Juniperus* diminuait au cours de la saison sèche (Cregger et al., 2012), ce qui suggère que les champignons du sol peuvent être limités par l'absence d'eau. Il peut en résulter une diminution des activités fongiques comme la dégradation des substrats carbonés. En ce qui concerne la symbiose ectomycorhizienne, une étude réalisée en forêt méditerranéenne (peuplement de Chêne vert) a montré que le traitement de réduction des précipitations avait sensiblement modifié la composition de la communauté ectomycorhizienne (Richard et al., 2011). Pour les communautés bactériennes de sols de prairies, il a été montré que les cycles d'humectation-dessiccation du sol influençaient le cycle de l'azote par des changements dans les groupes microbiens fonctionnels présentant différentes susceptibilités à la faible disponibilité de l'eau (Huygens et al., 2011, Placella et al., 2012). Collectivement, ces données indiquent que la réduction des précipitations, telle qu'attendue en conséquence des changements climatiques qui affectent la planète, joue un rôle important dans la structuration des communautés microbiennes des sols. Toutefois, aucune donnée n'est disponible sur la réponse des communautés microbiennes à la diminution des précipitations en fonction de la profondeur du sol où elles se situent. Par conséquent, mon projet devrait contribuer à améliorer notre compréhension de l'impact du changement climatique sur les activités microbiennes de la rhizosphère des racines profondes et in fine sur le fonctionnement des plantations d'arbres en sols tropicaux très altérés et profonds.

4. Caractériser le rôle des racines profondes dans ces écosystèmes tropicaux

4.1. Contexte et justification

Les modèles de changement climatique prévoient une réduction des précipitations atteignant 20% entre la première et la dernière décennie du 21^{ème} siècle dans les régions circum-Méditerranée (dont une large part de la France), la zone caraïbe, l'Afrique du Sud, l'Australie occidentale et une large part du Brésil (IPCC, 2007). Il est important de connaître les facultés d'adaptation des écosystèmes afin de concevoir des méthodes de conservation et de gestion adaptées. Dans le cas des espèces pérennes, la mise en place d'un système racinaire profond constitue une stratégie d'adaptation à la contrainte hydrique. Dans des sols fortement altérés où une grande part de la fertilité se concentre dans l'horizon superficiel (chute de litières, apports de fertilisants), la contribution relative des racines profondes à la nutrition minérale est cependant très peu documentée. L'essentiel des travaux, y compris sur les espèces ligneuses pérennes, s'est concentré sur le rôle des racines superficielles, et des mycorhizes, dans la nutrition minérale des arbres forestiers. Le rôle joué par les racines profondes constitue un challenge métrologique et, de fait, un verrou scientifique majeur, qu'il est important de lever pour étudier la durabilité des écosystèmes forestiers de plantation, ainsi que leur résilience face aux changements globaux.

Les plantations d'Eucalyptus connaissent une très forte expansion au niveau mondial, et particulièrement au Brésil où il est attendu que la surface plantée passe de 5 à 11-14 millions ha d'ici 2020. Ces plantations jouent un rôle important dans la fourniture de bois énergie et de pâte à papier en milieu tropical et permettent de réduire la pression sur les forêts naturelles pour satisfaire la demande croissante en bois. La gestion intensive de ces plantations permet de produire de fortes quantités de bois, en moyenne de 40 m³/ha/an dans les plantations industrielles du Brésil, malgré des sols fortement altérés ayant généralement de très faibles réserves en nutriments (Gonçalves et al., 2013). Ces plantations clonales installées sur des sols très profonds ont de fortes demandes en nutriments tout au long de la rotation. Elles constituent un modèle très simple de plantation forestière (sans sous-bois) qui permet d'étudier les prélèvements racinaires jusqu'à des profondeurs dans le sol supérieures à 10 mètres.

Il existe peu de données quantitatives concernant les racines fines situées en profondeur dans le sol et la littérature scientifique tend à sous-estimer l'importance des racines profondes dans le déterminisme de la productivité des écosystèmes (Schenk and Jackson, 2002b), leur attribuant essentiellement un rôle pour l'acquisition de l'eau dans les écosystèmes à saison sèche marquée (Schenk and Jackson, 2002a). Concernant l'acquisition des nutriments en sols pauvres et la part des associations symbiotiques avec des micro-organismes (champignons mycorhiziens), la question demeure quasiment vierge. L'Eucalyptus présente des caractéristiques singulières par sa vitesse de croissance racinaire qui lui permet d'explorer rapidement les horizons profonds. Les racines fines ont en effet été observées à plus de 3 m de profondeur 1 an seulement après la plantation, au Congo (Bouillet et al., 2002) ou au Brésil (Jourdan et al., 2008), et en abondance jusqu'à 10 m après 2 ans de croissance sur le dispositif EucFlux (SOERE) du Brésil (Christina et al., 2011, Laclau et al., 2013a).

Le dispositif expérimental de lysimétrie suivi sur les sites de Kondi au Congo depuis 1998 et d'Itatinga au Brésil depuis 2003 a contribué à améliorer la compréhension des cycles biogéochimiques des nutriments dans ces plantations à croissance rapide (Laclau et al., 2010). Les prélèvements hydriques par horizon de sol peuvent être estimés à partir du suivi en continu de l'humidité du sol par des sondes TDR installées jusqu'à 17 m de profondeur. Cependant nous ne savons pas dans quelle mesure le système racinaire est surdimensionné avec un rôle spécifique de certaines racines profondes. Da Silva et al. (2011) ont montré sur le site du Brésil à l'aide de traceurs (¹⁵N, Sr et Rb) qu'il existe un certain degré de spécialisation des racines : pour une même longueur, la capacité des racines profondes à prélever les cations Sr (analogue de Ca) et Rb (analogue de K) est supérieure à celle des racines superficielles. Ces résultats confirment in situ l'hypothèse de Göransson et al. (2006) sur la spécialisation des racines dans le prélèvement de nutriments en fonction des profondeurs prospectées. Toutefois, les mécanismes expliquant les potentialités d'absorption des racines à différentes profondeurs en fonction de leurs caractéristiques architecturales n'ont pas été étudiés (Göransson et al., 2006).

Un enjeu important pour progresser dans l'intensification écologique des plantations et leur adaptation au changement climatique est donc de préciser le rôle de la dynamique spatio-temporelle du système racinaire dans l'acquisition des nutriments. En effet des études récentes montrent que le renouvellement des racines fines (turnover) mais également leur potentiel d'absorption d'eau et de nutriments dépendent de leur architecture (Eissenstat et al., 2000, Guo et al., 2008, Guo et al., 2004, Pregitzer et al., 2002, Wang et al., 2006). Ces résultats sont en particulier observés dans les conditions de forte contrainte hydrique saisonnière (Comas et al., 2010, Huang et al., 1997), c'est

également le cas des plantations d'Eucalyptus dans de nombreux pays tropicaux. Les observations faites au Congo sur la distribution verticale des racines fines sous Eucalyptus suggèrent en outre un lien avec l'acquisition des nutriments (Bouillet et al., 2002), permis par la plasticité du système racinaire et son aptitude à coloniser préférentiellement les zones enrichies en nutriments, particulièrement N et P (Hodge, 2004). La colonisation croissante de l'horizon superficiel par les racines fines au cours de la rotation pourrait ainsi s'expliquer par un enrichissement de cet horizon par le cycle biologique (apports en surface de nutriments par les chutes de litières). Avec une moindre disponibilité de l'eau en surface due à des précipitations inférieures et/ou moins bien distribuées au cours de l'année, les racines profondes pourraient donc avoir un rôle croissant pour couvrir les besoins en nutriments des arbres.

Les racines fines, en plus d'avoir des durées de vie extrêmement variables selon leur ordre architectural (Eissenstat et al., 2000), montrent des structures et/ou des fonctions différentes (Guo et al., 2004, Pregitzer et al., 2002), pouvant varier au cours de la vie de la plante (Comas et al., 2010). Certains paramètres physiologiques varient entre racines fines mais aussi au cours de leur vie, comme l'absorption ou la concentration en nitrate (Pregitzer et al., 2002), le potentiel d'absorption du phosphate (Bouma et al., 2001), l'aptitude à être colonisé par des hyphes mycorhiziennes (Resendes et al., 2008). Enfin, chez diverses espèces ligneuses, le rôle majeur des zones apicales, qu'elles soient ou non mycorhizées, dans l'absorption des nutriments a pu être démontré (Hawkins et al., 2008). Des observations réalisées récemment sur des dispositifs de minirhizotrons mis en place dans une fosse jusqu'à 8 m de profondeur au Brésil ont révélé l'abondance de cordons mycéliens et de mycorhizes en profondeur (thèse de G. Lambais en cours), suggérant un rôle important de la symbiose en profondeur.

La compréhension du fonctionnement des racines profondes apparaît donc comme un verrou scientifique à lever pour l'évaluation de l'influence des plantations forestières sur (i) le stockage de C dans les horizons profonds par les apports en matière organique fraîche (root turnover) qui peuvent se stabiliser ou au contraire conduire à un priming effect de la matière organique pré-existante (Fontaine et al., 2007) ou (ii) la limitation des pertes par lixiviation de nutriments apportés par les fertilisants (Laclau et al., 2010).

Enfin, les résultats issus de cette thèse devront permettre d'alimenter les travaux de modélisation intégrant architecture et fonctionnement des systèmes racinaires initiés dans le cadre du Grand Projet Fédérateur Agropolis Fondation RHIZOPOLIS (2011-2014) associant à Eco&Sols les équipes d'AMAP (T. Fourcaud, H. Rey et J.F. Barczi), de PSH et EMMAH en Avignon (L. Pagès et C. Doussan).

4.2. Cadre méthodologique et résultats attendus

Le travail expérimental sera réalisé *in situ* en plantation d'Eucalyptus au Brésil sur un dispositif expérimental lourdement instrumenté (plantations réalisées en 2010, **Figure 33**). Il correspond à un vaste dispositif d'exclusion de pluie dans lequel deux puits ont été creusés début 2014 jusqu'à 17 m de profondeur dans deux traitements : avec et sans réduction de pluie (http://www.montpellier.inra.fr/ecosols/implantations_et_ateliers/bresil). L'infrastructure sur ce site (électricité, personnel permanent sur le terrain, gardiennage,...) permet d'installer *in situ* des équipements utilisés jusqu'à présent uniquement en laboratoire. Des analyses destructives des racines et du sol échantillonnés à différentes profondeurs lors du creusement de ces puits sont en

cours de réalisation, ainsi que la mise en place de fenêtres d'observation (jusqu'à 17 m). Des mesures *in situ* des variations du pH et de concentrations de nutriments dans la rhizosphère seront réalisées à l'aide de senseurs optiques (optodes) dans des rhizotrons, munis de mini-fenêtres escamotables. Cette technique non destructive, développée récemment (Blossfeld and Gansert, 2007, Blossfeld et al., 2010, Blossfeld et al., 2013) et qui a été testée pour la 1ère fois *in situ* avec succès en 2012 au Brésil (fosse du dispositif EucFlux), nous permettra de réaliser un monitoring spatio-temporel du pH du sol le long des racines fines, ainsi que des concentrations d'ammonium, voire de nitrate (optodes en développement dans le cadre du projet EURoot 2011-2015). Les prototypes d'optodes pour l'ammonium devraient être mis à notre disposition par la compagnie allemande PreSens partenaire du projet EURoot. La nature des rhizodépôts collectés au voisinage des racines aux différentes profondeurs sera évaluée après échantillonnage *in situ* à l'aide de rhizons.

Après réalisation de ce suivi non destructif, le sol rhizosphérique sera prélevé et comparé au sol éloigné des racines, afin de mettre en évidence des zones de fonctionnement différenciées (dans ce cas, les concentrations en potassium et phosphate seront aussi mesurées) et d'en déduire les flux de nutriments *in situ*. Les communautés microbiennes rhizosphériques ou non seront caractérisées à l'aide de méthodes moléculaires. Des prélèvements de racines fines en croissance dans les rhizotrons (via les mini-fenêtres) situés à différentes profondeurs seront réalisés afin d'analyser leur colonisation (interne et externe) mycorhizienne selon la méthodologie de Resendes et al. (2008). Enfin, une caractérisation morphologique et anatomique des racines sera réalisée en fonction de la profondeur et du régime hydrique (stage Master Brésilien en cours de réalisation par M. Peron [MAS2.8]).

Le choix des profondeurs pour positionner les fenêtres d'observation est d'une importance capitale. Il sera basé sur une évaluation précise de la variabilité verticale des paramètres physico-chimiques du sol qui sont connus pour influencer la biogéographie microbienne (Bru et al., 2011, Fierer and Jackson, 2006), tels que la texture du sol, pH, C organique, N total et P, et le contenu des bases échangeables. Ce choix sera fait en utilisant la méthode de spectroscopie visible en proche infrarouge (visNIRS), qui permet, à faible coût, l'estimation de ces paramètres via l'utilisation de modèles prédictifs pour chaque variable (Cécillon et al., 2009). Ainsi, des spectres NIRS (à la fois *in situ* avec un dispositif portable et *ex situ*, dans des conditions de laboratoire) et MIRS (en moyen infra rouge) seront obtenus pour tous les échantillons de sol recueillis, afin d'obtenir des calibrations spectrales qui seront utilisées pour prédire les paramètres biogéochimiques sur de petits échantillons à l'échelle centimétrique. Il est extrêmement important d'utiliser cette approche car il est nécessaire de mesurer toutes ces variables sur les mêmes échantillons que ceux sur lesquels les mesures microbiennes seront faites. Des cartes de variabilité des paramètres biogéochimiques rhizosphériques en fonction de l'état fonctionnel des racines et de la profondeur du sol, dérivées des mesures d'optodes et spectres NIRS, seront établies à une échelle centimétrique (autour des racines) et métrique (sur tout le profil de sol).

Les données de sortie seront traitées à l'aide d'outils bio- et géostatistiques pour cartographier l'environnement racinaire à une échelle micrométrique (segments de racine) et macro-métrique (système racinaire) avec une approche de modélisation 3D (Bru et al., 2011, Philippot et al., 2009), afin de comprendre les facteurs qui pilotent la diversité l'abondance et le fonctionnement de la communauté microbienne de la rhizosphère. Cette méthodologie sera utilisée pour aller au-delà des approches qui reposent uniquement sur les modèles de laboratoire et de jeunes plants de

microcosmes cultivés et, finalement, générer une vision plus intégrée de la rhizosphère des arbres *in situ*. Ce projet livrera les cartes des propriétés biogéochimiques et microbiennes de la rhizosphère des différents types fonctionnels de racines à différentes profondeurs et selon l'état hydrique du sol, et permettra d'identifier les facteurs qui pilotent cette répartition biogéographique microbienne dans le sol.

Le résultat final de ce projet est de proposer une intégration des propriétés rhizosphériques obtenues à l'échelle de la racine à l'échelle du système racinaire entier, en utilisant les modèles 3D d'architecture racinaire des arbres que j'ai développés au début de ma carrière (Jourdan et Rey, 1997b,c). Enfin, ce projet produira la première caractérisation de la rhizosphère des arbres *in situ* à enracinement profond en fonction de la profondeur du sol et la diminution des précipitations, une condition préalable pour déterminer leur rôle dans des services écosystémiques rendus par ces écosystèmes tels que la séquestration du carbone et le cycle des éléments nutritifs.

4.3. Partenaires scientifiques

Les compétences des différents partenaires que je compte associer à ce projet sont reconnues mondialement pour leur expérience sur le terrain, dans la manipulation et le suivi des capteurs *in situ*, la modélisation, l'écophysiologie des systèmes racinaires mycorhizés ou non, de la biochimie et de la biogéochimie du sol ainsi qu'en microbiologie moléculaire. Cela permettra au consortium de recueillir des données quantitatives de haut niveau sur les interactions racine-microorganismes dans le système sol/plante, à différentes échelles, et à évaluer la façon dont les événements de sécheresse prolongée dans un contexte de changements climatiques sont susceptibles d'affecter racines profondes et les activités microbiennes rhizosphériques.

Pour aller au-delà de l'approche de microcosme de la rhizosphère, je compte profiter de la longue expérience dans les études sur le terrain acquise par notre équipe Eco&Sols sur l'étude des cycles biogéochimiques et de l'eau dans les plantations d'eucalyptus (JP Laclau, Y. Nouvellon, et JP Bouillet). Pour la caractérisation écophysiologique des racines mycorhizées je compte m'appuyer sur l'expérience interne de C. Plassard et A. Robin (UMR Eco&Sols). La participation de spécialistes reconnus de la rhizosphère comme P. Hinsinger (biogéochimie de la rhizosphère – UMR Eco&Sols), F. Poly, S. Michalet et X. Le Roux (analyse des rhizodépôts, écologie chimique et le fonctionnement azoté et diversité microbienne – **UMR LEM Laboratoire d'Ecologie Microbienne, CNRS Lyon**), L. Philippot, A. Spor, B. Pivato et R. Barnard (analyse des données de la communauté microbienne, biogéographie et pyroséquençage - **UMR Agroécologie, INRA Dijon**), et N. Nunan (biogéographie microbienne et modélisation – **UMR Bioemco, IRD Bondy**) et leur longue histoire de collaboration avec notre équipe d'Eco&Sols (via A. Brauman - la diversité microbienne de la rhizosphère) garantit la réussite de ce projet.

La forte implication de nos partenaires de recherche brésiliens (JLM Gonçalves, M. Lambais ESALQ-USP Piracicaba ; T. Rodrigues UNESP - Botucatu) et les étudiants des universités locales (ESALQ-USP et UNESP) et française (Université Montpellier II) avec la présence permanente de chercheurs de Eco&sols et sans oublier l'aide technique des partenaires allemands (Société Presens) qui développent les optodes sont une autre garantie de réussite du projet.

Comme ce projet vise à combler le fossé entre les écologistes « aériens » et « souterrains », il rassemble les disciplines qui sont rarement associées tels que, l'écophysiologie de l'arbre et des racines, la biogéochimie des sols et de l'écologie microbienne. Je ne suis pas spécialiste de toutes ces disciplines à la fois mais je me propose de monter un consortium afin de favoriser un dialogue interdisciplinaire pour obtenir une première image précise des interactions spatiales de racines et les microorganismes du sol des arbres de plein champ. Pour cela, je compte continuer mes collaborations de longue date en interne au CIRAD avec l'UMR AMAP (T. Fourcaud, H. Rey et J.F. Barczi), mais aussi en externe avec les UMR PSH et EMMAH en Avignon (L. Pagès et C. Doussan). Pour le volet microbien, je compte développer de nouvelles collaborations, déjà initiées en interne à Eco&Sols via A. Brauman, avec les équipes mondialement connues de L. Philippot (INRA-Agroécologie Dijon), X. Le Roux (CNRS-LEM Lyon), N. Nunan (IRD-Bioemco Bondy).

5. Conclusion

Mes travaux s'intègrent dans le projet scientifique de l'UMR Eco&Sols en contribuant d'une part à l'estimation de la productivité primaire nette des plantations pérennes tropicales (Eucalyptus, Hévée, Caféier), permettant ainsi de compléter le bilan carboné de ces agroécosystèmes étudiés par mes collègues au sein du collectif (Thème 3 de l'UMR) et d'autre part, à la caractérisation du fonctionnement racinaire, aussi bien en surface qu'en profondeur, en termes de prélèvements d'éléments minéraux et de modifications des propriétés biogéochimiques de la rhizosphère dans le cadre du maintien de la durabilité des systèmes de production (Thème 2 de l'UMR). La compréhension du rôle des racines profondes dans la création de niches microbiennes singulières et dans le déterminisme de la biogéographie microbienne du sous-sol est également au cœur des fronts de sciences identifiés (Thème 1 de l'UMR). L'étude du turnover des racines fines contribue à préciser la quantité de litières racinaires qui sont produites annuellement et qui augmentent le stock de C du sol. L'effet de la contrainte hydrique sur la croissance des racines de plusieurs géotypes d'arbres en plantation doit permettre, par comparaison, de caractériser le meilleur idéotype adapté à un environnement stressé tout en maintenant un bon niveau de production avec un niveau minimal d'apport d'intrants fertilisants. Le projet décrit ici concernant l'Eucalyptus pourra être élargi à d'autres agroécosystèmes plus complexes étudiés dans l'UMR, en particulier les peuplements mixtes (Eucalyptus-Acacia) et les systèmes agroforestiers qui associent des espèces pérennes et annuelles. Des dispositifs instrumentés sont en cours d'élaboration en Afrique de l'Ouest et dans le Sud de la France, qui permettront la comparaison d'écosystèmes contrastés et la généralisation éventuelles des résultats obtenus sur les plantations d'Eucalyptus du Brésil.

Partie IV : Références

- ABRAF. 2011.** Anuário estatístico. 122p.
- Atger C. 1992.** *Essai sur l'architecture racinaire des arbres*, Ph.D, Univ. Montpellier II.
- Atger C, Edelin C. 1994.** Premières données sur l'architecture comparée des systèmes racinaires et caulinaires. *Canadian-Journal-of-Botany*, **72**: 963-975.
- Barczy J-F, Rey H, Jourdan C. 2011.** DigR : how to model root system in its environment? 1 - the model XVIII *International Botanical Congress*. Melbourne, Australia, IBC 2011.
- Barczy JF, Rey H, Caraglio Y, De Reffye P, Barthelemy D, Dong QX, Fourcaud T. 2008.** AmapSim: A structural whole-plant simulator based on botanical knowledge and designed to host external functional models. *Annals of Botany*, **101**: 1125-1138.
- Beier C, Beierkuhnlein C, Wohlgemuth T, Penuelas J, Emmett B, Körner C, de Boeck H, Christensen JH, Leuzinger S, Janssens IA, Hansen K. 2012.** Precipitation manipulation experiments – challenges and recommendations for the future. *Ecology Letters*, **15**: 899-911.
- Blossfeld S, Gansert D. 2007.** A novel non-invasive optical method for quantitative visualization of pH dynamics in the rhizosphere of plants. *Plant, Cell & Environment*, **30**: 176-186.
- Blossfeld S, Perriguet J, Sterckeman T, Morel J-L, Löscher R. 2010.** Rhizosphere pH dynamics in trace-metal-contaminated soils, monitored with planar pH optodes. *Plant and Soil*, **330**: 173-184.
- Blossfeld S, Schreiber CM, Liebsch G, Kuhn AJ, Hinsinger P. 2013.** Quantitative imaging of rhizosphere pH and CO₂ dynamics with planar optodes. *Annals of Botany*, **112**: 267-276.
- Bonneu A, Dumont Y, Rey H, Jourdan C, Fourcaud T. 2012.** A minimal continuous model for simulating growth and development of plant root systems. *Plant and Soil*, **354**: 211-227.
- Bornhofen S, Barot S, Lattaud C. 2011.** The evolution of CSR life-history strategies in a plant model with explicit physiology and architecture. *Ecological Modelling*, **222**: 1-10.
- Bouillet JP, Laclau JP, Arnaud M, M'Bou AT, Saint-Andre L, Jourdan C. 2002.** Changes with age in the spatial distribution of roots of Eucalyptus clone in Congo - Impact on water and nutrient uptake. *Forest Ecology and Management*, **171**: 43-57.
- Bouma TJ, Nielsen KL, Van Hal J, Koutstaal B. 2001.** Root system topology and diameter distribution of species from habitats differing in inundation frequency. *Functional Ecology*, **15**: 360-369.
- Braconnier S, Caliman J-P. 1989.** Premiers résultats concernant l'étude du système racinaire du palmier à huile en sol dégradé. Paris, IRHO.
- Bru D, Ramette A, Saby NPA, Dequiedt S, Ranjard L, Jolivet C, Arrouays D, Philippot L. 2011.** Determinants of the distribution of nitrogen-cycling microbial communities at the landscape scale. *ISME J*, **5**: 532-542.
- Brunner I, Bakker MR, Björk RG, Hirano Y, Lukac M, Aranda X, Børja I, Eldhuset TD, Helmisaari HS, Jourdan C, Konôpka B, López BC, Miguel Pérez C, Persson H, Ostonen I. 2013.** Fine-root turnover rates of European forests revisited: An analysis of data from sequential coring and ingrowth cores. *Plant and Soil*, **362**: 357-372.
- Bruno RD, da Rocha HR, de Freitas HC, Goulden ML, Miller SD. 2006.** Soil moisture dynamics in an eastern Amazonian tropical forest. *Hydrological Processes*, **20**: 2477-2489.
- Burke MK, Raynal DJ. 1994.** Fine root growth phenology, production, and turnover in a northern hardwood forest ecosystem. *Plant and Soil*, **162**: 135-146.
- Calder IR, Rosier PTW, Prasanna KT, Parameswarappa S. 1997.** Eucalyptus water use greater than rainfall input - possible explanation from southern India. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions %2 internationale %8 1997-00-00*, **1**: 249-256.
- Callot G, Chamayou H, Maertens C, Salsac L. 1982.** *Mieux comprendre les interactions sol-racines: incidences sur la nutrition minérale.*, Paris, France, INRA.
- Canellas Rey de Vinas I, San Miguel Ayanz A. 2000.** Biomass of root and shoot systems of *Quercus coccifera* shrublands in Eastern Spain. *Ann. For. Sci.*, **57**: 803-810.
- Casarin V, Plassard C, Hinsinger P, Arvieu J-C. 2004.** Quantification of ectomycorrhizal fungal effects on the bioavailability and mobilization of soil P in the rhizosphere of *Pinus pinaster*. *New Phytologist*, **163**: 177-185.
- Cécillon L, Barthès BG, Gomez C, Ertlen D, Genot V, Hedde M, Stevens A, Brun JJ. 2009.** Assessment and monitoring of soil quality using near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS). *European Journal of Soil Science*, **60**: 770-784.
- Chairungsee N, Gay F, Thaler P, Jourdan C. 2013.** Impact of rainfall regime and soil water status on fine root dynamic in a rubber plantation. *Frontiers in Plant Science*, **25 December 2013**: 11p.
- Charlton WA. 1967.** The root system of *Linaria vulgaris* Mill. II Differentiation of root types. *Can. J. Bot.*, **45**: 81-91.
- Christina M, Laclau J-P, Gonçalves JLM, Jourdan C, Nouvellon Y, Bouillet J-P. 2011.** Almost symmetrical vertical growth rates above and below ground in one of the world's most productive forests. *Ecosphere*, **2**: art27.
- Cienciala E, Tatarinov FA. 2006.** Application of BIOME-BGC model to managed forests: 2. Comparison with long-term observations of stand production for major tree species. *Forest Ecology and Management*, **237**: 252-266.
- Colas H. 1997.** *Association de cultures cocotier-cacaoyer. Modélisation de leur système racinaire. Etudes préliminaires sur l'interaction racinaire et la consommation en eau des deux plantes.*, Thèse, Univ. Montpellier II, Montpellier.
- Comas LH, Bauerle TL, Eissenstat DM. 2010.** Biological and environmental factors controlling root dynamics and function: effects of root ageing and soil moisture. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, **16**: 131-137.
- Cregger MA, Schadt CW, McDowell NG, Pockman WT, Classen AT. 2012.** Response of the Soil Microbial Community to Changes in Precipitation in a Semiarid Ecosystem. *Applied and Environmental Microbiology*, **78**: 8587-8594.

- da Silva EV, Bouillet J-P, de Moraes Gonçalves JL, Junior CHA, Trivelin PCO, Hinsinger P, Jourdan C, Nouvellon Y, Stape JL, Laclau J-P. 2011. Functional specialization of Eucalyptus fine roots: contrasting potential uptake rates for nitrogen, potassium and calcium tracers at varying soil depths. *Functional Ecology*, **25**: 996-1006.
- De Reffye P, Dinouard P, Barthélémy D. 1991. Modélisation et simulation de l'architecture de l'orme du Japon *Zelkova Serrata* (Thunb.) Makino (Ulmaceae) : la notion d'axe de référence. *L'arbre. Biologie et développement*. Edelin, C. ed., Naturalia Monspelienca.
- Dennis PG, Hirsch PR, Smith SJ, Taylor RG, Valsami-Jones E, Miller AJ. 2009. Linking rhizoplane pH and bacterial density at the microhabitat scale. *Journal of Microbiological Methods*, **76**: 101-104.
- Dessaux Y, Hinsinger P, Lemanceau P. 2010. *Rhizosphere: Achievements and Challenges*, Springer.
- Doussan C, Pierret A, Garrigues E, Pagès L. 2006. Water Uptake by Plant Roots: II – Modelling of Water Transfer in the Soil Root-system with Explicit Account of Flow within the Root System – Comparison with Experiments. *Plant and Soil*, **283**: 99-117.
- Dufrene E. 1989. *Photosynthèse, consommation en eau et modélisation de la production chez le palmier à huile (Elaeis guineensis Jacq.)*. Paris-Sud, Centre d'Orsay, Paris.
- Dye PJ. 1996. Response of Eucalyptus grandis trees to soil water deficits. *Tree Physiology*, **16**: 233-238.
- Eissenstat DM, Wells CE, Yanai RD, Whitbeck JL. 2000. Building roots in a changing environment: implications for root longevity. *New Phytologist*, **147**: 33-42.
- Eissenstat DM, Yanai RD. 1997. The Ecology of Root Lifespan. Advances in Ecological Research. In: Fitter MBaAH ed. Volume 27 ed., Academic Press.
- Epron D, Nouvellon Y, Mareschal L, Moreira RMe, Koutika L-S, Geneste B, Delgado-Rojas JS, Laclau J-P, Sola G, Gonçalves JLDm, Bouillet J-P. 2013. Partitioning of net primary production in Eucalyptus and Acacia stands and in mixed-species plantations: Two case-studies in contrasting tropical environments. *Forest Ecology and Management*, **301**: 102-111.
- Fahey TJ, Hughes JW. 1994. Fine root dynamics in a northern hardwood forest ecosystem, Hubbard Brook Experimental Forest, NH. *Journal of Ecology*, **82**: 533-548 (58 ref.).
- Fairley RI, Alexander IJ. 1985. Methods calculating fine root production forest. *Ecological interactions in soil*.
- FAO. 2010. Global Forest Resources Assessment. <http://www.fao.org/forestry/fra/fra2010/en/>.
- Fierer N, Jackson RB. 2006. The diversity and biogeography of soil bacterial communities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **103**: 626-631.
- Finér L, Ohashi M, Noguchi K, Hirano Y. 2011. Factors causing variation in fine root biomass in forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, **261**: 265-277.
- Fontaine S, Barot S, Barre P, Bdioui N, Mary B, Rumpel C. 2007. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature*, **450**: 277-280.
- Gaudinski JB, Trumbore SE, Davidson EA, Cook AC, Markewitz D, Richter DD. 2001. The age of fine-root carbon in three forests of the eastern United States measured by radiocarbon. *Oecologia*, **129**: 420-429.
- Gaul D, Hertel D, Leuschner C. 2009. Estimating fine root longevity in a temperate Norway spruce forest using three independent methods. *Functional Plant Biology*, **36**: 11-19.
- Gérard F, Mayer KU, Hodson MJ, Ranger J. 2008. Modelling the biogeochemical cycle of silicon in soils: Application to a temperate forest ecosystem. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, **72**: 741-758.
- Giardina CP, Binkley D, Ryan MG, Fownes JH, Senock RS. 2004. Belowground carbon cycling in a humid tropical forest decreases with fertilization. *Oecologia*, **139**: 545-550.
- Gill R, Burke I. 2002. Influence of soil depth on the decomposition of *Bouteloua gracilis* roots in the shortgrass steppe. *Plant and Soil*, **241**: 233-242.
- Gill RA, Jackson RB. 2000. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytologist*, **147**: 13-31.
- Godbold DL, Fritz HW, Jentschke G, Meessenburg H, Rademacher P. 2003. Root turnover and root necromass accumulation of Norway spruce (*Picea abies*) are affected by soil acidity. *Tree Physiology*, **23**: 915-921.
- Gonçalves JLDm, Alvares CA, Higa AR, Silva LD, Alfenas AC, Stahl J, Ferraz SFdB, Lima WdP, Brancalion PHS, Hubner A, Bouillet J-PD, Laclau J-P, Nouvellon Y, Epron D. 2013. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. *Forest Ecology and Management*, **301**: 6-27.
- Gonkhamdee S, Maeght JL, Do F, Pierret A. 2009. Growth dynamics of line *Hevea brasiliensis* roots along a 4.5-m soil profile. *Khon Kaen Agric. J.*, **37**: 265-276.
- Göransson H, Wallander H, Ingerslev M, Rosengren U. 2006. Estimating the relative nutrient uptake from different soil depths in *Quercus robur*, *Fagus sylvatica* and *Picea abies*. *Plant and Soil*, **286**: 87-97.
- Green JJ, Dawson LA, Proctor J, Duff EI, Elston DA. 2005. Fine root dynamics in a tropical rain forest is influenced by rainfall. *Plant and Soil*, **276**: 23-32.
- Grier CC, Vogt KA, Keyes MR, Edmonds RL. 1981. Biomass distribution and above- and below-ground production in young and mature *Abies amabilis* zone ecosystems of the Washington Cascades. *Canadian Journal of Forest Research*, **11**: 155-167.
- Griffon S, Barczy J-F, Rouault de Coligny F. 2011. Xplo: a software for plant architecture exploration. *XVIII International Botanical congress*. Melbourne, Australia, IBC 2011.
- Griffon S, de Coligny F. 2013. AMAPstudio: An editing and simulation software suite for plants architecture modelling. *Ecological Modelling*, In press.

- Guo D, Li H, Mitchell RJ, Han W, Hendricks JJ, Fahey TJ, Hendrick RL. 2008. Fine root heterogeneity by branch order: exploring the discrepancy in root turnover estimates between minirhizotron and carbon isotopic methods. *New Phytologist*, **177**: 443-456.
- Guo DL, Mitchell RJ, Hendricks JJ. 2004. Fine root branch orders respond differentially to carbon source-sink manipulations in a longleaf pine forest. *Oecologia*, **140**: 450-457.
- Hackett C. 1969. A study of the root system of barley. II - Relationships between root dimensions and nutrient uptake. *New Phytol.*, **68**: 1023-1030.
- Hallé F, Oldeman RAA. 1970. *Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux.*, Masson et Cie.
- Hawkes CV, Kivlin SN, Rocca JD, Huguet V, Thomsen MA, Suttle KB. 2011. Fungal community responses to precipitation. *Global Change Biology*, **17**: 1637-1645.
- Hawkins BJ, Boukcim H, Plassard C. 2008. A comparison of ammonium, nitrate and proton net fluxes along seedling roots of Douglas-fir and lodgepole pine grown and measured with different inorganic nitrogen sources. *Plant, Cell & Environment*, **31**: 278-287.
- Hendrick RL, Pregitzer KS. 1993a. The dynamics of fine root length, biomass and nitrogen content in two northern hardwood ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research*, **23**: 2507-2520.
- Hendrick RL, Pregitzer KS. 1993b. Patterns of fine root mortality in two sugar maple forests. *Nature-London*, **361**: 59-61.
- Hendrick RL, Pregitzer KS. 1996. Temporal and depth-related patterns of fine root dynamics in northern hardwood forests. *Journal of Ecology*, **84**: 167-176.
- Hendricks JJ, Hendrick RL, Wilson CA, Mitchell RJ, Pecot SD, Guo D. 2006. Assessing the patterns and controls of fine root dynamics: an empirical test and methodological review. *Journal of Ecology*, **94**: 40-57.
- Hickler T, Smith B, Prentice IC, MjÖFors K, Miller P, Arneth A, Sykes MT. 2008. CO2 fertilization in temperate FACE experiments not representative of boreal and tropical forests. *Global Change Biology*, **14**: 1531-1542.
- Hinsinger P, Bengough AG, Vetterlein D, Young I. 2009. Rhizosphere: biophysics, biogeochemistry and ecological relevance. *Plant and Soil*, **321**: 117-152.
- Hinsinger P, Brauman A, Devau N, Gérard F, Jourdan C, Laclau J-P, Le Cadre E, Jaillard B, Plassard C. 2011. Acquisition of phosphorus and other poorly mobile nutrients by roots. Where do plant nutrition models fail? *Plant and Soil*, **348**: 29-61.
- Hinsinger P, Plassard C, Tang C, Jaillard B. 2003. Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: A review. *Plant and Soil*, **248**: 43-59.
- Hodge A. 2004. The plastic plant: root responses to heterogeneous supplies of nutrients. *New Phytologist*, **162**: 9-24.
- Hodge A, Berta G, Doussan C, Merchan F, Crespi M. 2009. Plant root growth, architecture and function. *Plant and Soil*, **321**: 153-187.
- Horsley SB, Wilson BF. 1971. Development of the woody portion of the root system of *Betula papyrifera*. *Am. J. Bot.*, **58**: 141-147.
- Huang B, Duncan RR, Carrow RN. 1997. Drought-Resistance Mechanisms of Seven Warm-Season Turfgrasses under Surface Soil Drying: II. Root Aspects. *Crop Sci.*, **37**: 1863-1869.
- Huygens D, Schoupe J, Roobroeck D, Alvarez M, Balocchi O, Valenzuela E, Pinochet D, Boeckx P. 2011. Drying–rewetting effects on N cycling in grassland soils of varying microbial community composition and management intensity in south central Chile. *Applied Soil Ecology*, **48**: 270-279.
- IPCC. 2007. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/contents.html.
- Jackson RB, Mooney HA, Schulze ED. 1997. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **94**: 7362-7366.
- Johnson MG, Tingey DT, Phillips DL, Storm MJ. 2001. Advancing fine root research with minirhizotrons. *Environmental and Experimental Botany*, **45**: 263-289.
- Jourdan C. 1995a. Modélisation de l'architecture du système racinaire du palmier à huile. Une application pratique : estimation du volume de sol utile pour le potassium et le phosphore. In: Inra ed. *Compte-rendu du séminaire sur la racine et le système racinaire = [Proceedings of the workshop on root and root system]*. France, INRA.
- Jourdan C. 1995b. *Modélisation de l'architecture et du développement du système racinaire du palmier à huile (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.)*, Thèses, Université de Montpellier 2, Montpellier.
- Jourdan C, Rey H. 1997a. Architecture and development of the oil-palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) root system. *Plant and Soil*, **189**: 33-48.
- Jourdan C, Rey H. 1997b. Modelling and simulation of the architecture and development of the oil-palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) root system. I. The model. *Plant and soil*, **190**: 217-233.
- Jourdan C, Rey H. 1997c. Modelling and simulation of the architecture and development of the oil-palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) root system. II. Estimation of root parameters using the RACINES postprocessor. *Plant and soil*, **190**: 235-246.
- Jourdan C, Rey H, Guedon Y. 1995a. Architectural analysis and modelling of the branching process of the young oil-palm root system. *Plant and Soil*, **177**: 63-72.
- Jourdan C, Rey H, Guedon Y. 1995b. Modelling of the branching process of the root system of young oil palm seedlings. A markovian approach. *Structure and Function of Roots*. Springer Netherlands.
- Jourdan C, Silva EV, Gonçalves JLM, Ranger J, Moreira RM, Laclau J-P. 2008. Fine root production and turnover in Brazilian Eucalyptus plantations under contrasting nitrogen fertilization regimes. *Forest Ecology and Management*, **256**: 396-404.

- Kahn F. 1980.** Comportements racinaire et aérien chez les plantes ligneuses de la forêt tropicale humide (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). *Adansonia. Série 2 (France)*, **19**: 413-427.
- Kansou K. 2003.** Mise en place d'essais, conduite, analyse, interprétation sur le rôle des réserves carbonées et la croissance du système racinaire du palmier à huile en Indonésie. Rennes, France, CIRAD.
- Kern CC, Friend AL, Johnson JM-F, Coleman MD. 2004.** Fine root dynamics in a developing *Populus deltoides* plantation. *Tree Physiology*, **24**: 651-660.
- King JS, Albaugh TJ, Allen HL, Buford M, Strain BR, Dougherty P. 2002.** Below-ground carbon input to soil is controlled by nutrient availability and fine root dynamics in loblolly pine. *New Phytol.*, **154**: 389-398.
- Laclau J-P, Almeida JCR, Gonçalves JLM, Saint-André L, Ventura M, Ranger J, Moreira RM, Nouvellon Y. 2009.** Influence of nitrogen and potassium fertilization on leaf lifespan and allocation of above-ground growth in *Eucalyptus* plantations. *Tree Physiology*, **29**: 111-124.
- Laclau J-P, Da Silva EA, Lambais GR, Bernoux M, Le Maire G, Stape JL, Bouillet J-P, de Moraes Gonçalves JL, Jourdan C, Nouvellon Y. 2013a.** Dynamics of soil exploration by fine roots down to a depth of 10 m throughout the entire rotation in *Eucalyptus grandis* plantations. *Frontiers in Plant Science*, **4**.
- Laclau J-P, Ranger J, de Moraes Gonçalves JL, Maquère V, Krusche AV, M'Bou AT, Nouvellon Y, Saint-André L, Bouillet J-P, de Cassia Piccolo M, Deleporte P. 2010.** Biogeochemical cycles of nutrients in tropical *Eucalyptus* plantations: Main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. *Forest Ecology and Management*, **259**: 1771-1785.
- Laclau JP. 2001.** Dynamique du fonctionnement mineral d'une plantation d'*Eucalyptus*. In: Doctorat Td ed. INA-Paris Grignon.
- Laclau JP, Bouillet JP, Ranger J. 2000.** Dynamics of biomass and nutrient accumulation in a clonal plantation of *Eucalyptus* in Congo. *Forest Ecology and Management*, **128**: 181-196.
- Laclau JP, Bouillet JP, Ranger J, Joffre R, Gouma R, Saya A. 2001.** Dynamics of nutrient translocation in stemwood across an age series of a *Eucalyptus* hybrid. *Annals of Botany*, **88**: 1079-1092.
- Laclau JP, Deleporte P, Bouillet JP, Ranger J. 2005.** Influence of afforestation with eucalypts in Congolese Savannas on longterm nutrient availability in the soils. *Management of tropical sandy soils for sustainable agriculture. 27/11-02/12/2005, Khon Kaen, Thailand*.
- Laclau JP, Deleporte P, Ranger J, Bouillet JP, Kazotti G. 2003.** Nutrient dynamics throughout the rotation of *Eucalyptus* clonal stands in Congo. *Annals of Botany*, **91**: 879-892.
- Laclau JP, Nouvellon Y, Reine C, Gonçalves JLM, Krusche AV, Jourdan C, le Maire G, Bouillet JP. 2013b.** Mixing *Eucalyptus* and *Acacia* trees leads to fine root over-yielding and vertical segregation between species. *Oecologia*, **172**: 903-913.
- Ladygina N, Hedlund K. 2010.** Plant species influence microbial diversity and carbon allocation in the rhizosphere. *Soil Biology and Biochemistry*, **42**: 162-168.
- Lamanda N. 2005.** *Characterization and agroecological evaluation of agroforestry cropping systems: application to coconut-based cropping systems of Malo Island (Vanuatu)*. Univ. Montpellier II, Montpellier, France.
- Lamanda N, Dauzat J, Jourdan C, Martin P, Malézieux E. 2008.** Using 3D architectural models to assess light availability and root bulkiness in coconut agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, **72**: 63-74.
- Le Roux Y. 1994.** *Mise en place de l'architecture racinaire d'Hevea brasiliensis. Etude comparée du semis et de la microbouture.*, Université d'Aix Marseille III, Faculté des Sciences et Techniques Saint-Jérôme., Marseille.
- Lecompte F, Ozier-Lafontaine H, Pages L. 2003.** An analysis of growth rates and directions of growth of primary roots of field-grown banana trees in an andisol at three levels of soil compaction. *Agronomie*, **23**: 209-218.
- Lehmann J, Zech W. 1998.** Fine root turnover of irrigated hedgerow intercropping in Northern Kenya. *Plant and Soil*, **198**: 19-31.
- Levillain J, Thongo M'Bou A, Deleporte P, Saint-André L, Jourdan C. 2011.** Is the simple auger coring method reliable for below-ground standing biomass estimation in *Eucalyptus* forest plantations? *Annals of Botany*, **108**: 221-230.
- Lopez B, Sabaté S, Gracia C. 1998.** Fine roots dynamics in a Mediterranean forest: effects of drought and stem density. *Tree Physiology*, **18**: 601-606.
- Lyford W, Wilson BF. 1964.** Development of the root system of *Acer rubrum* L. In: Service UF ed. *Harvard For. Paper*. Harvard University.
- Maeght J-L, Rewald B, Pierret A. 2013.** How to study deep roots—and why it matters. *Frontiers in Plant Science*, **4**.
- Maeght JL, HenrydesTureaux T, Sengtaheuanghoung O, Stokes A, Ribolzi O, Pierret A. 2012.** Drought effect on teak tree (*Tectona grandis*) roots on carbon inputs and water uptake in a deep soil of northern Laos. *Roots toThe Future 8th Symposium of the International Society of Root Research*. Dundee, Scotland.
- Majdi H. 2005.** Fine Root Turnover in Forest Ecosystems. *Plant and Soil*, **276**: vii-viii.
- Majdi H, Andersson P. 2005.** Fine Root Production and Turnover in a Norway Spruce Stand in Northern Sweden: Effects of Nitrogen and Water Manipulation. *Ecosystems*, **8**: 191-199.
- Masle J. 2002.** High soil strength: mechanical forces al play on root morphogenesis and in root: shoot signaling. In: Y. Waisel AE, U. Kafkafi (Eds.) ed. *Plant Roots the Hidden Half*. New York, Basel, Marcel Dekker Inc.,.
- Matamala R, González-Meler MA, Jastrow JD, Norby RJ, Schlesinger WH. 2003.** Impacts of Fine Root Turnover on Forest NPP and Soil C Sequestration Potential. *Science*, **302**: 1385-1387.
- McClagherty C, Aber J, Melillo J. 1982.** The role of fine roots in the organic-matter and nitrogen budgets of two forested ecosystems. *Ecology*, **63**: 1481-1490.

- MEA. 2005. Millenium Ecosystem Assessment. <http://www.millenniumassessment.org/en/index.html>.
- Michalet S, Rohr J, Warshan D, Bardon C, Roggy J-C, Domenach A-M, Czarnes S, Pommier T, Combourieu B, Guillaumeud N, Bellvert F, Comte G, Poly F. 2013. Phytochemical analysis of mature tree root exudates in situ and their role in shaping soil microbial communities in relation to tree N-acquisition strategy. *Plant Physiology and Biochemistry*, **72**: 169-177.
- Milchunas DG. 2009. Estimating Root Production: Comparison of 11 Methods in Shortgrass Steppe and Review of Biases. *Ecosystems*, **12**: 1381-1402.
- Misra RK. 1999. Root and shoot elongation of rhizotron-grown seedlings of Eucalyptus nitens and Eucalyptus globulus in relation to temperature. *Plant and Soil*, **206**: 37-46.
- Mouliia B, Loup C, Chartier M, Allirand JM, Edelin C. 1999. Dynamics of architectural development of isolated plants of Maize (*Zea mays* L.), in a Non-limiting Environment: The branching potential of modern maize. *Annals of Botany*, **84**: 645-656.
- Mulia R, Dupraz C. 2006. Unusual fine root distributions of two deciduous tree species in southern France: what consequences for modelling of tree root dynamics? *Plant and Soil*, **281**: 71-85.
- Nadelhoffer KJ, Raich JW. 1992. Fine root production estimates and belowground carbon allocation in forest ecosystems. *Ecology*, **73**: 1139-1147.
- Navarro M, Jourdan C, Sileye T, Braconnier S, Mialet-Serra I, Saint-André L, Dauzat J, Nouvellon Y, Epron D, Bonnefond J-M, Berbigier P, Rouzière A, Bouillet J-P, Rouspard O. 2008. Fruit development, not GPP, drives seasonal variation in NPP in a tropical palm plantation. *Tree Physiology*, **28**: 1661-1674.
- Nepstad DC, de Carvalho CR, Davidson EA, Jipp PH, Lefebvre PA, Negreiros GH, da Silva ED, Stone TA, Trumbore SE, Vieira S. 1994. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. *Nature*, **372**: 666-669.
- Newson RB, Parker JS, Barlow PW. 1993. Are lateral roots of tomato spaced by multiples of a fundamental distance? *Annals-of-Botany*, **71**: 549-557.
- Nodichao L, Chopart J-L, Rouspard O, Vauclin M, Aké S, Jourdan C. 2011. Genotypic variability of oil palm root system distribution in the field. Consequences for water uptake. *Plant and Soil*, **341**: 505-520.
- Noguchi K, Konôpka B, Satomura T, Kaneko S, Takahashi M. 2007. Biomass and production of fine roots in Japanese forests. *Journal of Forest Research*, **12**: 83-95.
- Norby RJ, Jackson RB. 2000. Root dynamics and global change: seeking an ecosystem perspective. *New Phytologist*, **147**: 3-12.
- Nunan N, Wu K, Young IM, Crawford JW, Ritz K. 2003. Spatial distribution of bacterial communities and their relationships with the micro-architecture of soil. *Fems Microbiology Ecology*, **44**: 203-215.
- Osawa A, Aizawa R. 2012. A new approach to estimate fine root production, mortality, and decomposition using litter bag experiments and soil core techniques. *Plant and Soil*: 1-15.
- Ostonen M, Lohmus K, Pajuste K. 2005. Fine root biomass, production and its proportion of NPP in a fertile middle-aged Norway spruce forest: Comparison of soil core and ingrowth core methods. *Forest Ecology and Management*, **212**: 264-277.
- Ouvrier M. 1995. Etude du système racinaire. (*IDEFOR, plantation R. Michaux*): 16 p.
- Pagès L, Serra V, Draye X, Doussan C, Pierret A. 2010. Estimating root elongation rates from morphological measurements of the root tip. *Plant and Soil*, **328**: 35-44.
- Pagès L, Vercambre G, Drouet J-L, Lecompte F, Collet C, Le Bot J. 2004. Root Typ: a generic model to depict and analyse the root system architecture. *Plant and Soil*, **258**: 103-119.
- Persson HA. 1983. The distribution and productivity of fine roots in boreal forests. *Plant and Soil*, **71**: 87-101.
- Philippot L, Hallin S, Börjesson G, Baggs EM. 2009. Biochemical cycling in the rhizosphere having an impact on global change. *Plant and Soil*, **321**: 61-81.
- Pietsch SA, Hasenauer H, Thornton PE. 2005. BGC-model parameters for tree species growing in central European forests. *Forest Ecology and Management*, **211**: 264-295.
- Placella SA, Brodie EL, Firestone MK. 2012. Rainfall-induced carbon dioxide pulses result from sequential resuscitation of phylogenetically clustered microbial groups. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **109**: 10931-10936.
- Pregitzer KS, DeForest JL, Burton AJ, Allen MF, Ruess RW, Hendrick RL. 2002. Fine root architecture of nine North American trees. *Ecological Monographs*, **72**: 293-309.
- Pregitzer KS, Zak DR, Curtis PS, Kubiske ME, Teeri JA, Vogel CS. 1995. Atmospheric CO₂, soil nitrogen and turnover of fine roots. *New Phytol.*, **129**: 579-585.
- Purvis C. 1956. The root system of the oil palm: its distribution, morphology, and anatomy. *Journal of the West African Institute for Oil Palm Research*, **1**: 60-82.
- Resendes ML, Bryla DR, Eissenstat DM. 2008. Early events in the life of apple roots: variation in root growth rate is linked to mycorrhizal and nonmycorrhizal fungal colonization. *Plant and Soil*, **313**: 175-186.
- Reubens B, Poesen J, Danjon F, Geudens G, Muys B. 2007. The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review. *Trees*, **21**: 385-402.
- Rey H. 1988. Profils radiculaires. *Alimentation en eau du palmier à huile sur sols acides sableux des sédiments tertiaires en Côte d'Ivoire. Approche méthodologique. Premiers résultats*. Paris, France, IRHO.

- Richard F, Roy M, Shahin O, Sthultz C, Duchemin M, Joffre R, Selosse M-A. 2011. Ectomycorrhizal communities in a Mediterranean forest ecosystem dominated by *Quercus ilex*: seasonal dynamics and response to drought in the surface organic horizon. *Annals of Forest Science*, **68**: 57-68.
- Richardson A, Barea J-M, McNeill A, Prigent-Combaret C. 2009. Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. *Plant and Soil*, **321**: 305-339.
- Ryan P, Dessaux Y, Thomashow L, Weller D. 2009. Rhizosphere engineering and management for sustainable agriculture. *Plant and Soil*, **321**: 363-383.
- Santantonio D, Grace JC. 1987. Estimating fine-root production and turnover from biomass and decomposition data: a compartment-flow model. *Canadian Journal of Forest Research*, **17**: 900-908.
- Satakhun D, Gay F, Chairungsee N, Kasemsap P, Chantuma P, Thanisawanyangkura S, Thaler P, Epron D. 2013. Soil CO₂ efflux and soil carbon balance of a tropical rubber plantation. *Ecological Research*, **28**: 969-979.
- Schenk HJ, Jackson RB. 2002a. The global biogeography of roots. *Ecological Monographs*, **72**: 311-328.
- Schenk HJ, Jackson RB. 2002b. Rooting depths, lateral root spreads and below-ground/above-ground allometries of plants in water-limited ecosystems. *Journal of Ecology*, **90**: 480-494.
- Schenk HJ, Jackson RB. 2005. Mapping the global distribution of deep roots in relation to climate and soil characteristics. *Geoderma*, **126**: 129-140.
- Schroth G, Zech W. 1995. Above- and below-ground biomass dynamics in a sole cropping and an alley cropping system with *Gliricidia sepium* in the semi-deciduous rainforest zone of West Africa. *Agroforestry Systems*, **31**: 181-198.
- Son Y, Hwang JH. 2003. Fine root biomass, production and turnover in a fertilized *Larix leptolepis* plantation in central Korea. *Ecological Research*, **18**: 339-346.
- Stone EL, Kalisz PJ. 1991. On the maximum extent of tree roots. *Forest Ecology and Management*, **46**: 59-102.
- Strand AE, Pritchard SG, McCormack ML, Davis MA, Oren R. 2008. Irreconcilable Differences: Fine-Root Life Spans and Soil Carbon Persistence. *Science*, **319**: 456-458.
- Thaler P, Pagès L. 1996. Root apical diameter and root elongation rate of rubber seedlings (*Hevea brasiliensis*) show parallel responses to photoassimilate availability. *Physiologia-Plantarum*, **97**: 365-371.
- Thongo M'Bou A. 2008. *Etude du système racinaire de l'Eucalyptus en plantation tropicale : analyse architecturale, croissance et respiration.*, Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I et Université Marien Ngouabi, Brazzaville.
- Thongo M'Bou A, Jourdan C, Deleporte P, Nouvellon Y, Saint-André L, Bouillet J-P, Mialoundama F, Mabiala A, Epron D. 2008a. Root elongation in tropical Eucalyptus plantations: Effect of soil water content = Élongation des racines dans les plantations tropicales d'Eucalyptus : effet du contenu en eau du sol. *Annals of Forest Science*, **65**: 609 (à paraître).
- Thongo M'Bou A, Jourdan C, Deleporte P, Nouvellon Y, St-Andre L, Bouillet JP, Mialoundama F, Mabiala A, Epron D. 2008b. Root elongation in tropical Eucalyptus plantations: effect of soil water content. *Annals of Forest Science*, **65**.
- Trumbore SE, Gaudinski JB. 2003. The secret lives of roots. *Science*, **302**: 1344-1345.
- Uroz S, Calvaruso C, Turpault MP, Pierrat JC, Mustin C, Frey-Klett P. 2007. Effect of the Mycorrhizosphere on the Genotypic and Metabolic Diversity of the Bacterial Communities Involved in Mineral Weathering in a Forest Soil. *Applied and Environmental Microbiology*, **73**: 3019-3027.
- Vercambre G, Pages L, Doussan C, Habib R. 2003. Architectural analysis and synthesis of the plum tree root system in an orchard using a quantitative modelling approach. *Plant and Soil*, **251**: 1-11.
- Vogt KA, Vogt DJ, Bloomfield J. 1998. Analysis of some direct and indirect methods for estimating root biomass and production of forests at an ecosystem level. *Plant and Soil*, **200**: 71-89.
- Wang LX, Mou PP, Jones RH. 2006. Nutrient foraging via physiological and morphological plasticity in three plant species. *Canadian Journal of Forest Research*, **36**: 164-173.
- Watt M, Hugenholtz P, White R, Vinnall K. 2006. Numbers and locations of native bacteria on field-grown wheat roots quantified by fluorescence in situ hybridization (FISH). *Environmental Microbiology*, **8**: 871-884.
- Wells CE, Glenn DM, Eissenstat DM. 2002. Changes in the risk of fine-root mortality with age: a case study in peach, *Prunus persica* (Rosaceae). *American Journal of Botany*, **89**: 79-87.
- West JB, Espeleta JF, Donovan LA. 2004. Fine root production and turnover across a complex edaphic gradient of a *Pinus palustris*-*Aristida stricta* savanna ecosystem. *Forest Ecology and Management*, **189**: 397-406.
- Wilcox HE. 1968. Morphological studies of the root of red pine, *Pinus resinosa*. I - Growth characteristics and patterns of branching. *American Journal of Botany*, **55**: 247-254.
- Yang J, Hammer RD, Blanchard RW. 1995. Microscale pH spatial distribution in the AP horizon of Mexico silt loam. *Soil Science*, **160**: 371-375.
- Yuan ZY, Chen HYH. 2010. Fine Root Biomass, Production, Turnover Rates, and Nutrient Contents in Boreal Forest Ecosystems in Relation to Species, Climate, Fertility, and Stand Age: Literature Review and Meta-Analyses. *Critical Reviews in Plant Sciences*, **29**: 204-221.
- Yuste JC, Penuelas J, Estiarte M, Garcia-Mas J, Mattana S, Ogaya R, Pujol M, Sardans J. 2011. Drought-resistant fungi control soil organic matter decomposition and its response to temperature. *Global Change Biology*, **17**: 1475-1486.