



Biodiversité
Agriculture
Alimentation
Environnement
Terre
Eau

Ecole Doctorale GAIA

Dossier de demande

d'Habilitation à Diriger des Recherches

présenté le

par **Guerric le MAIRE**

sur le thème

Téledétection et modélisation du fonctionnement carboné et hydrique des
écosystèmes forestiers gérés

.....



Sommaire

I) DOSSIER ADMINISTRATIF	6
I.1. Curriculum vitae	6
I.1. Encadrement d'étudiants	7
I.1.1. Thèse de doctorat (toutes en co-encadrement) :	7
I.1.2. Stages de DEUG, Master I, Master II, césure	8
I.1.3. Articles acceptés ou en cours de préparation avec des étudiants	8
I.2. Animation et gestion de la recherche	10
I.2.1. Coordination de projets ou responsable WP	10
I.2.2. Implication dans des projets en tant que chercheur participant	11
I.2.3. Jurys et comités de suivi	11
I.2.4. Evaluation de projets et d'articles dans des revues à facteur d'impact	11
I.2.5. Participation à la vie collective	12
I.3. Production scientifique	12
I.3.1. Indices bibliométriques	12
I.3.2. Analyse critique des publications	13
I.3.3. Articles publiés dans des revues ACL (à comité de lecture)	14
I.3.4. Chapitres de livres	20
I.3.5. Présentations ou posters à des conférences	21
II) BILAN DES RECHERCHES	24
II.1. Introduction générale	24
II.1.1. Contexte	24
II.1.2. Une stratégie de recherche s'appuyant sur deux approches complémentaires: télédétection et modélisation	25
II.1.3. Des terrains diversifiés	27
II.2. Partie 1 : Apport de la télédétection pour la quantification des variabilités spatiales et temporelles de variables biophysiques de couverts forestiers utiles pour la modélisation de leur bilan de carbone, d'eau et d'énergie	27
II.2.1. Télédétection hyperspectrale pour l'estimation du contenu en chlorophylle et autres caractéristiques des couverts forestiers	27
II.2.2. Estimation spatio-temporelle de l'indice foliaire et du fAPAR	33
II.2.3. Les séries temporelles d'images satellites pour la classification, l'analyse phénologique et le suivi de la gestion des écosystèmes forestiers	40
II.2.4. Estimation des biomasses des forêts	45
II.3. Partie 2 : La modélisation du bilan de carbone et d'eau d'écosystèmes forestiers : de la plante à la région	49

II.3.1.	Bilans carbonés, hydrique et énergétique d'écosystèmes forestiers : de l'observation à la modélisation mécaniste	49
II.3.2.	Apport de la modélisation pour l'analyse de mesures expérimentales.....	54
II.3.3.	Variabilités spatiale et temporelle du fonctionnement carboné et hydrique des écosystèmes forestiers	58
II.3.4.	Gestion sylvicole et adaptation aux changements climatiques	64
II.4.	Conclusion	70
III)	PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES	71
III.1.	Contexte professionnel, projet personnel et collectif	71
III.2.	Contexte et enjeux des plantations forestières tropicales	72
III.2.1.	Etat actuel des plantations forestières tropicales	72
III.2.2.	Cas des plantations d'Eucalyptus au Brésil	73
III.2.3.	Principaux enjeux : production, environnement, changements climatiques	74
III.2.4.	La spatialisation du fonctionnement à différentes échelles : une approche intégrative	76
III.3.	Synergie expérimentation-modélisation-télédétection pour la spatialisation du fonctionnement des plantations tropicales	77
III.3.1.	Axe 1 : Amélioration de la compréhension du fonctionnement des écosystèmes par la modélisation.....	77
III.3.2.	Axe 2 : Sources d'information spatiales, observation et expérimentation.....	80
III.3.3.	Axe 3 : Assimilation de l'information de télédétection dans les modèles de fonctionnement ..	84
III.4.	Projets en cours et à venir	87
IV)	References.....	88

Liste des figures

Figure 1 : Copie d'écran de Web of Science le 15 octobre 2017 (source : ISI Web of Science)	12
Figure 2 : Rang parmi les auteurs des articles. L'année 2018 est une prévision optimiste, si les articles soumis fin 2017 sont acceptés	14
Figure 3 : Résultats de la calibration d'indices de chlorophylle (a) à l'échelle foliaire et (b) à l'échelle de couverts forestiers via les modèles PROSPECT et PROSAIL. D'après le Maire et al. (2008).	32
Figure 4 : Relation entre le APAR annuel (obtenus via la série temporelle de NDVI MODIS) et la production de bois annuelle (obtenue à partir d'inventaires forestiers). Les lignes relient les parcelles entre des inventaires successifs.....	39
Figure 5 : Série temporelle de NDVI du satellite MODIS sur une parcelle d'eucalyptus. D'après Marsden et al. (2010)	42
Figure 6 : Evolution saisonnière de l'indice foliaire estimé à partir de données MODIS et moyennées sur une ferme agroforestière (91 pixels de 250m) et 10 années consécutives. Les principales étapes du cycle cultural du café sont indiquées au-dessus du graphique, et les précipitations mensuelles moyennes en dessous.	43
Figure 7 : Coefficient de corrélation de Pearson entre le rendement de l'année actuel (année N) et le LAI moyen des mois de l'année N et de l'année N-1. Les LAI sont estimés via des séries temporelles de NDVI du satellite MODIS. Les corrélations significatives ($p < 0.05$) sont indiquées par des symboles en étoile.....	44
Figure 8 : Comparaison entre mesures et simulations du modèle MAESPA sur une parcelle d'Eucalyptus (Eucflux) pendant 5 ans. A gauche : pour les contenus en eau dans le sol à différentes profondeurs (jusqu'à 10 mètres. A droite : pour l'évapotranspiration réelle. D'après Christina et al. (2017).....	56
Figure 9 : Résultat des simulation du bilan hydrique MAESPA sur la parcelle d'Eucalyptus Eucflux.	57
Figure 10 : Comparaison des simulations avec le modèle G'Day (lignes) et des mesures (symboles) sur une parcelle d'eucalyptus à la station d'Itatinga (São Paulo, Brésil). D'après Marsden et al. (2013)	63
Figure 11 : Application du modèle G'Day sur 16 parcelles différentes, avec une prise en compte des types de sols différents. D'après Marsden et al. (2013)	63
Figure 12 : Schéma du modèle couplé ORCHIDEE – FMM. D'après Bellassen et al. (2010)	68
Figure 13 : Schéma du fonctionnement du module de croissance et de gestion forestière et de son couplage à Orchidée. D'après Bellassen et al. (2010)	69
Figure 14 : Plantations d'eucalyptus au Brésil et aire de préservation permanente.....	73
Figure 15 : Productivité primaire nette en fonction de la température moyenne d'écosystèmes forestiers dans le monde, d'après Luyssaert et al. (2007). Des écosystèmes de plantations tropicales sur lesquels travaillent l'UMR Eco&Sols ont été ajoutés, dont une valeur (haute) pour des eucalyptus dans de bonnes conditions au Brésil. Figure extraite de Roupsard et al. (2008).	74
Figure 16 : Analyse de sensibilité du modèle et typologie des paramètres en vue de la spatialisation du modèle	81
Figure 17 : Possibilités d'utilisation de l'imagerie satellite pour l'étude des plantations d'eucalyptus. (*) méthodologie déjà développées sur des parcelles d'eucalyptus au Brésil.....	82
Figure 18 : Proposition d'un schéma d'assimilation des données multi-échelle	86

Liste des tableaux

Tableau 1 : Tableau récapitulant les publications dans des revues à comité de lecture en fonction des années, en les triant par ordre de facteur d'impact. * la moyenne des FI est pondérée par le nombre d'articles publié dans les revues correspondantes. (source : ISI Web of Science)	13
Tableau 2 : Statistiques des publications en fonction des thématiques (source : ISI Web of Science)	13
Tableau 3: Estimation du rayonnement photosynthétiquement actif absorbé (APAR) d'un couvert à partir du NDVI. f_{max} et k_d de l'équation 10 sont obtenus à partir d'analyses de photos hémisphériques (Marsden et al. 2010); α est obtenu en utilisant les valeurs de GF (photos hémisphériques) et NDVI mesuré la même journée. NDVIveg et NDVIs sont obtenus sur les séries temporelles d'images (Marsden et al. 2010) ; $k(\theta_v)$ est considéré constant pour des angles de visées zénithaux faibles ; α_i , τ_i et ρ_s sont estimés à partir de mesures indépendantes	37
Tableau 4 : Fonctionnement du modèle couplé.....	68

Liste des encadrés

Encadré 1 : Calibration d'indices de chlorophylle à différentes échelles	32
Encadré 2 : Estimation du fAPAR de plantation d'eucalyptus	37
Encadré 3 : Série temporelles de LAI de caféiers agroforestiers	43
Encadré 4 : Estimation des biomasses de parcelles d'Eucalyptus par télédétection satellitaire radar, lidar ou optique	48
Encadré 5 : Résumé des modèles écophysologiques basés sur les processus utilisés	52
Encadré 6 : Bilan hydrique d'une plantation d'Eucalyptus	56
Encadré 7 : Application du modèle G'Day sur un réseau de parcelles	62
Encadré 8 : couplage d'un modèle de gestion forestière et un modèle écophysologique.....	67

I) DOSSIER ADMINISTRATIF

I.1. Curriculum vitae

Nationalité :	Française
Date de naissance :	06/08/1979, Châtenay Malabry
Situation familiale :	Marié, quatre enfants
Adresse professionnelle France:	UMR Eco&Sols, bât. 12, 2 place Pierre Viala, 34060 Montpellier Cedex 2 Courriel : guerric.le_maire@cirad.fr
Adresse professionnelle Brésil:	NIPE/UNICAMP Rua Cora Coralina, 330 - Caixa Postal 6166 - CEP: 13083-896 - Campus Unicamp - Campinas/SP
Adresse personnelle (Brésil):	R. José Alexandrino Palazzo, 295; B. Barão Geraldo; CEP 13085-048; Campinas (SP) Brasil
Fonction :	<ul style="list-style-type: none">➤ Depuis Janvier 2008 : Chercheur Cirad /Département Persyst/ UMR Eco&Sols, Ecologie Fonctionnelle et Biogéochimie des Sols et des Agro-écosystèmes➤ Juin 2015 – Juin 2016 : Chercheur invité Embrapa, laboratoire Meio Ambiente, Jaguariuna, SP, Brésil➤ Depuis Juin 2016 : Chercheur visitant université UNICAMP, laboratoire NIPE, Campinas, Brésil➤ Depuis Janvier 2017 : Professeur visitant CNPEM, laboratoire CTBE, Campinas, Brésil➤ Depuis 2010 : Animateur de l'axe modélisation de l'UMR Eco&Sols
Formation :	Doctorat en Ecologie spécialité écophysologie végétale, Université Paris XI, Orsay, F. (2005) DEA Ecologie, Université Paris VI et XI, INA P-G, F. (2002) Ingénieur Agronome Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, F. (2002) Classes Préparatoires BCPST (1997-1999) Baccalauréat scientifique (1997)
Parcours professionnel :	Chercheur CIRAD , UMR Eco&Sols Ecologie Fonctionnelle et Biogéochimie des Sols et des Agro-écosystèmes (INRA, IRD, CIRAD, SupAgro) (2010-) ; Chercheur associé UMR TETIS Chercheur CIRAD , UPR80 Fonctionnement et pilotage des écosystèmes de plantation (2008-2010) ; Chercheur associé UMR TETIS Post-doctorant , Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), UMR CEA-CNRS-UVSQ, Saclay, F (2006-2007) ; Développement du modèle de vegetation global Orchidée pour simuler la gestion forestière ; Financement Région Ile-de-France ; Directeur : Dr. P. Ciais Attaché temporaire à l'enseignement et à la recherche (ATER) , Laboratoire Ecologie, Systématique et Evolution, Université Paris XI, Orsay, F. (2005-2006) Docteurant , Laboratoire Ecologie, Systématique et Evolution, CNRS & Université Paris XI, Orsay, F. (2002-2005) ; « Détermination du bilan de carbone de la forêt de Fontainebleau : apport de la télédétection pour la spatialisation des paramètres d'entrée » ; Bourse Docteur Ingénieur du CNRS ; directeur : Dr. C. François
Activités d'enseignements et de formation :	2007 à 2017 : environ 40 heures au total, Cours niveaux M1 ou M2 : Université Paris XI, Université Montpellier 2, Université de Nancy, Institut des Régions Chaudes, SILAT, Université de Sao Paulo, UNESP, UNICAMP 2002 à 2006 : 250 heures au total, Monitorat durant la thèse puis ATER : Cours, TD, TP et encadrement de projets personnels, niveaux Licence, Maîtrise et DEA, Université Paris XI

I.1. Encadrement d'étudiants

I.1.1. Thèse de doctorat (toutes en co-encadrement) :

Nom	Sujet, Années, Université, Directeur	Position actuelle
Claire Marsden 2008-2010	Bilans carbonés et hydriques de plantations à croissance rapide d'Eucalyptus : modélisation et extrapolation spatiale de la parcelle à la région, Université de Lorraine ; Directeur Pr. D. Epron (EEF, Nancy) ; Co-encadrant : Dr. Y. Nouvellon (Eco&Sols, Montpellier) ; encadrement 40%	Maître de Conférence SupAgro Montpellier, UMR Eco&Sols
Valentin Bellassen 2008-2010	Intéractions entre gestion forestière et changements climatiques, Université Versailles Saint-Quentin ; Directeur Dr. N. Viovy (LSCE, CEA Saclay) ; encadrement 30%	Chargé de Recherche INRA Dijon, UMR CESAER
Mathias Christina 2011-2014	Modélisation du bilan couplé eau-carbone-potassium dans des plantations d'eucalyptus, SupAgro Montpellier ; Directeur Dr. JP. Laclau (Eco&Sols, Montpellier) ; encadrement 50%	Chercheur Cirad Montpellier, UMR AIDA
Julianne C Oliveira 2012-2016	Utilisation d'un modèle de transfert radiatif tridimensionnel pour simuler la réflectance de plantations d'Eucalyptus, le signal LiDAR et le rayonnement absorbé à l'échelle de l'arbre, Université de São Paulo (ESALQ) ; Directeur Pr. L. Estraviz (ESALQ, Piracicaba, Brésil) ; encadrement 50%	Post-doc UNICAMP, financement FAPESP
Clifton Sabajo 2013-en cours	Land Use and Land Cover Changes in South East Asia and their Effects on Carbon and Energy Fluxes to the Atmosphere, Thèse Erasmus Mundus, Programme FONASO, en co-tutelle Université de Göttingen – AgroParisTech; Directeur Pr. A. Knohl (Bioclimatology, Göttingen); encadrement 50%	Soutenance prévue en Mai 2018
Rémi Vezy 2014-en cours	Simulation of alternative management practices for perennial plantation adaptation to global changes, Université de Bordeaux, Financement INRA – Cirad ; Directeur Dr. Denis Loustau (ISPA, Bordeaux) ; encadrement 50%	Soutenance prévue le 19 décembre 2017
Ana Luciano 2016- en cours	Identificação das áreas de cana-de-açúcar e estimativa da produtividade agrícola da cultura, UNICAMP (Campinas, Brésil); Directeur Pr. J. V. Rocha (FEAGRI/UNICAMP); encadrement 50%	Soutenance prévue en 2019

La thèse de doctorat est une étape décisive pour les étudiants, qui leur permet de consolider leur connaissance dans un domaine scientifique, d'apprendre le métier de chercheur dans son ensemble (travail en équipe, travaux expérimentaux, valorisation des résultats, éthique, etc.), d'apprendre à présenter leurs résultats sous forme orale ou écrite en anglais, et situer leur travail dans l'ensemble des

travaux du domaine. On demande donc beaucoup aux doctorants, et en peu de temps. La base du succès repose sur le sujet de thèse, qui doit être novateur sans être trop risqué ; sur l'adéquation entre le profil de l'étudiant et le sujet ; et sur l'accompagnement par le directeur et co-directeur(s), que ce soit d'un point de vue purement scientifique ou humain. La première année de thèse en particulier demande beaucoup d'attention et de temps, jusqu'au premier article. Il s'agit ensuite d'accompagner l'étudiant vers une autonomie. L'accompagnement des étudiants en thèse n'est pas une tâche facile, mais reste une activité essentielle et gratifiante dans notre métier. Les étudiants apportent beaucoup aux chercheurs et aux équipes, par leur motivation, leur dynamisme, et leurs idées nouvelles.

I.1.2. Stages de DEUG, Master I, Master II, césure

2016	Julie Boury , Cartographie de l'occupation et de l'usage du sol au Brésil à l'échelle du paysage, M1 Université Paris Diderot, 6 mois au Brésil
2013	Florian Rançon , Caractérisation de la structure des systèmes agroforestiers à base caféiers au Costa-Rica, à partir d'images à très haute résolution, Césure SupAgro , 6 mois
2012	Amandine Dionneau , Modélisation du cycle du carbone du sol dans des afforestation d'eucalyptus au Congo, M2 SupAgro , 6 mois
2011	Laure Vogel Modélisation des cycles du carbone et de l'azote du sol après conversion d'une savane en plantations d'Eucalyptus au Congo-Brazzaville, M2 Sols : organisation, fonctionnement et gestion , UPMC-AgroParisTech, 6 mois
2010	Simon Taugourdeau , Indice Foliaire d'un système agroforestier à base de caféiers : Mesure, Dynamique, relation avec la production, M2 EcoSystèmeS UM2 , 6 mois
2009	Joseph Bechara , Evolution de l'indice foliaire sur une parcelle d'eucalyptus, 3 mois
2003 à 2005	Crystelle Touzeau, Germain Boulay, Patricia Racine , Université Paris XI, DEUG , aide sur les expérimentations de thèse, 2 mois/an

I.1.3. Articles acceptés ou en cours de préparation avec des étudiants

Claire Marsden (thèse)	<ul style="list-style-type: none"> • Marsden, C., le Maire, G., Stape, J.-L., Seen, D.L., Roupsard, O., Cabral, O., Epron, D., Lima, A.M.N., & Nouvellon, Y. (2010). Relating MODIS vegetation index time-series with structure, light absorption and stem production of fast-growing Eucalyptus plantations. <i>Forest Ecology and Management</i>, 259, 1741-1753 • Le Maire G., Marsden C., Nouvellon, Y., Grinand C., Hakamada R., Stape J.L. & Laclau J.P. 2011. MODIS NDVI time-series allow the monitoring of Eucalyptus plantation growth. <i>Remote Sensing of Environment</i>, 115:2613-2625 • le Maire, G., Marsden, C., Nouvellon, Y., Stape, J.-L., & Ponzoni, F. (2012). Calibration of a Species-Specific Spectral Vegetation Index for Leaf Area Index (LAI) Monitoring: Example with MODIS Reflectance Time-Series on Eucalyptus Plantations. <i>Remote Sensing</i>, 4, 3766-3780 • Marsden, C., Nouvellon, Y., Laclau, J.-P., Corbeels, M., McMurtrie, R.E., Stape, J.L., Epron, D., & le Maire, G. (2013). Modifying the G'DAY process-based model to simulate the spatial variability of Eucalyptus plantation growth on deep tropical soils. <i>Forest Ecology and Management</i>; 301 (2013) 112–128
Valentin Bellassen (thèse)	<ul style="list-style-type: none"> • Bellassen V., Le Maire G., Dhôte J.F., Ciais P., Viovy N., 2010. Modelling forest management within a global vegetation model – Part 1: Model structure and general behaviour. <i>Ecological Modelling</i>, 221: 2458-

	<p>2474</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bellassen V., Le Maire G., Guin O., Dhôte J.F., Ciais P., Viovy N., 2011. Modelling forest management within a global vegetation model – Part 2: Model validation from a tree to a continental scale. <i>Ecological Modelling</i>, 222: 57-75 • Bellassen, V., Delbart, N., le Maire, G., Luysaert, S., Ciais, P., Viovy, N., 2011, Potential knowledge gain in large-scale simulations of forest carbon fluxes from remotely sensed biomass and height. <i>Forest Ecology and Management</i>, 261:515–530 • Bellassen V., Viovy N., Luysaert S., Le Maire G., Schelhaas M-J., Ciais P. 2011 Reconstruction and attribution of the carbon sink of European forests between 1950 and 2000. <i>Global Change Biology</i>, 17:3274–3292
Mathias Christina (thèse)	<ul style="list-style-type: none"> • le Maire, G., Nouvellon, Y., Christina, M., Ponzoni, F.J., Gonçalves, J.L.M., Bouillet, J.P., & Laclau, J.P. (2013). Tree and stand light use efficiencies over a full rotation of single- and mixed-species <i>Eucalyptus grandis</i> and <i>Acacia mangium</i> plantations. <i>Forest Ecology and Management</i>, 288, 31-42 • M. Christina, G. Le Maire, P. Battie-Laclau, J.-P Bouillet, Y. Nouvellon, C. Jourdan, J.L.M. Gonçalves, J.-P. Laclau (2015), Measured and modeled interactive effects of potassium and water deficiencies on photosynthesis and light use efficiency in <i>Eucalyptus grandis</i> plantations, <i>Global Change Biology</i>, 21, 2022-2039 • Christina, M., Nouvellon, Y., Laclau, J.P., Stape, J.L., Campoe, O.C. & le Maire, G. (2016) Sensitivity and uncertainty analysis of the carbon and water fluxes at the tree scale in <i>Eucalyptus</i> plantations using a metamodeling approach. <i>Canadian Journal of Forest Research</i>, 46, 297-309 • Christina, M., Nouvellon, Y., Laclau, J.-P., Stape, J.L., Bouillet, J.-P., Lambais, G.R. & le Maire, G. (2017) Importance of deep water uptake in tropical eucalypt forest. <i>Functional Ecology</i>, doi:10.1111/1365-2435.12727. • Christina, M., le Maire, G., Nouvellon, Y., Vezy, R., Bordron, B., Battie-Laclau, P., Gonçalves, L., Delgado-Rojas, j.s., Bouillet, J.-P., & Laclau, J.-P. (submitted). Simulating the effects of different potassium and water supply regimes on soil water content and water table depth over a rotation of a tropical <i>Eucalyptus grandis</i> plantation. <i>Forest Ecology and Management</i>
Julianne d. C. Oliveira (thèse)	<ul style="list-style-type: none"> • Oliveira, J.d.C., Féret, J.-B., Ponzoni, F.J., Nouvellon, Y., Gastellu-Etchegorry, J.-P., Campoe, O.C., Stape, J.L., Rodriguez, L.C.E. & le Maire, G. (2017) Simulating the canopy reflectance of different <i>Eucalypt</i> genotypes with the DART 3D model. <i>Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing</i>, 10, 4844-4852 • <i>1 Article en préparation :</i>
Clifton R. Sabajo (thèse)	<ul style="list-style-type: none"> • Sabajo, C.R., le Maire, G., June, T., Mejjide, A., Roupsard, O., & Knohl, A. (2017). Expansion of oil palm and other cash crops causes an increase of the land surface temperature in the Jambi province in Indonesia. <i>Biogeosciences</i>, 14, 4619-4635 • <i>1 Article en préparation</i>
Rémi Vezy (thèse)	<ul style="list-style-type: none"> • Vezy, R., Christina, M., Roupsard, O., Nouvellon, Y., Duursma, R., Medlyn, B., Soma, M., Charbonnier, F., Blitz-Frayret, C., Stape, J.-L., Laclau, J.-P., Filho, E.d.M.V., Rapidel, B., Do, F., Rocheteau, A., Picart, D., Borgonovo, C., Loustau, D., & le Maire, G. (submitted). Measuring and modelling energy partitioning in canopies of varying complexity using MAESPA model. <i>Agricultural and Forest Meteorology</i>

	<ul style="list-style-type: none"> Christina M., le Maire G., Nouvellon Y., Battie-Laclau P., Bordon B., Gonçalves, J.L.M., Delgado-Rojas, J. S. , Bouillet J-P, Vézy R., Laclau J.-P. (submitted) Simulating the effects of contrasted potassium and water supply regimes on soil water content and water table depth over the development of tropical Eucalyptus grandis plantations, Forest Ecology and Management 2 Articles en preparation
Ana C. d. S. Luciano (thèse)	<ul style="list-style-type: none"> Luciano, A.C.d.S., Picoli, M.C.A., Rocha, J.V., Franco, H.C.J., Sanches, G.M., Leal, M.R.L.V., & le Maire, G. (submitted). Generalized space-time classifiers for monitoring sugarcane areas in Brazil. Remote Sensing of Environment 1 article en préparation
Simon Taugourdeau (stage)	<ul style="list-style-type: none"> Taugourdeau, S., le Maire, G., Avelino, J., Jones, J.R., Ramirez, L.G., Jara Quesada, M., Charbonnier, F., Gómez-Delgado, F., Harmand, J.-M., Rapidel, B., Vaast, P., & Rouspard, O. (2014). Leaf area index as an indicator of ecosystem services and management practices: An application for coffee agroforestry. Agriculture, Ecosystems & Environment, 192, 19-37

Ci-dessus, seules les publications auxquelles j'ai participé de façon significative en tant que co-encadrant apparaissent.

D'autre part, j'ai aussi participé à l'encadrement de deux étudiants de thèse sur certains aspects de leur travail, mais sans être encadrant ni co-encadrant. Ce fut par exemple le cas de la thèse de Fabien Charbonnier (Directeurs O. Rouspard et E. Dreyer) sur les aspects modélisation, ou Clovis Grinand (Directeur M. Bernoux) sur les aspects télédétection, thèses ayant conduit à des publications où je suis deuxième co-auteur.

I.2. Animation et gestion de la recherche

I.2.1. Coordination de projets ou responsable WP

2016 - 2020	Coordinateur du projet FAPESP-Microsoft Research (Brésil), « SEMP », (« Characterizing and predicting biomass production in sugarcane and eucalyptus plantations in Brazil »), 500 000 reais, soit environ 160 000 euros ; collaborations avec Embrapa CNPTIA, Embrapa MA, Instituto de computação (Unicamp), NIPE (Unicamp)
2014 - 2018	Responsable WP du projet ANR (programme Agrobiosphère) « MACACC » (« Modélisation pour l'accompagnement des ACTeurs, vers l'Adaptation des Couverts pérennes ou agroforestiers aux Changements globaux »), 580 000 euros collaborations avec UMR ISPA, UMR MOISA, et autres
2010 - 2011	Coordinateur du projet PNTS « PRI », sur la télédétection des stress hydriques de plantations d'eucalyptus, 22 800 euros collaboration avec UMR TETIS
2010 - 2012	Coordination du projet-expertise « BIOMASSE » sur la télédétection des biomasses et indices foliaires de plantations d'Eucalyptus, 21 000 euros collaboration avec FIBRIA (Brésil)

I.2.2. Implication dans des projets en tant que chercheur participant

2017 - 2024	Projet EUCFLUX phase 2, mené dans le cadre de l'IPEF
2016 - 2020	Projet SUCRE : intervenant en tant qu'encadrant de la thèse de Ana Luciano (CTBE)
2017 - 2020	Projet ESA Venus, CESBIO, responsable (PI) site Brésil-Sao Paulo
2015 - 2017	CNES-TOSCA, HyperTropik, dir. TETIS, responsable (PI) site Brésil-Sao Paulo
2015 - 2017	CNES-TOSCA, CESOSO, dir. TETIS, responsable (PI) site Brésil-Sao Paulo
2015 - 2020	Projet Agência Brasileira de Cooperação (ABC) - Cirad-USP-Embrapa-Ipef "Novas metodologias e praticas silviculturais para uma produção sustentavel das plantações de eucailptos no Brasil" (intervenant)
2014 - 2017	Projet ANR (Programme BIOADAPT) « WUEtree » (« Analyse du déterminisme génétique et environnemental de l'efficacité d'utilisation de l'eau pour améliorer la durabilité des plantations forestières »). Intervenant (160 jours)
2014 - 2017	Projet JECAM (GEO), responsable (PI) site Brésil-Sao Paulo
2013 - 2017	Projet Européen FP7-ENV, « SIGMA », intervenant (48 jours)
2012 - 2014	AFD- CIRAD - IRD, projet agroforesterie SAFSE, intervenant (100 jours)
2011 - 2015	Projet ANR INTENS&FIX (intervenant : 100 jours)
2011 - 2015	Projet Thématique FAPESP. Intensificação ecologica de plantações de eucaliptos pela associação com especies leguminosas arboreas fixadoras de nitrogénio (intervenant 20 jours).
2011 - 2014	Projet Européen Climafrica (intervenant: 30 jours)
2009 - 2011	Projet Européen, CAFNET- EuropeAid
2008 - 2016	Projet EUCFLUX phase 1, mené dans le cadre de l'IPEF (713 k€ au total)
2008 - 2010	Projet Européen ULCOS (Ultra Low CO2 Steelmaking) Phase 2 (intervenant)
2008 - 2010	Projet Européen CARBOAFRICA (intervenant)

I.2.3. Jurys et comités de suivi

J'ai participé aux jurys de thèse de Gabriel Hmimina en 2013 (Université Paris Sud XI Orsay, « Apports de la télédétection rapprochée et de la modélisation à l'étude de la structure et du fonctionnement des couverts végétaux »), de Joannès Guillemot en 2015 (Université Paris Sud XI Orsay, « Etude de la productivité et de l'allocation du carbone des forêts européennes : une approche basée sur la modélisation des processus ») et de Rodrigo E. Hakamada en 2016 (University of Sao Paulo, Physiological responses and soil water balance of clonal Eucalyptus under contrasting spacings and genotypes »), en plus des jurys des thèses que j'ai co-encadrées.

J'ai participé aux comités de suivi de thèse de Fabien Charbonnier (Eco&Sols), Elodie Merlier (ESE), Clovis Grinand (Eco&Sols), Yuanchao Fan (Eco&Sols) et Maxime Durand (EEF Nancy).

J'ai participé à plusieurs jurys de Master en France et au Brésil.

I.2.4. Evaluation de projets et d'articles dans des revues à facteur d'impact

Relectures d'articles : environ 40 articles pour les journaux suivants: Remote Sensing of Environment, Forest Ecology and Management,, Tree Physiology, Agricultural and Forest Meteorology, Annals of Forest Science, Remote Sensing, Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, Forestry Studies, Southern Forest, International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems, Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Biosystems Engineering, Functional Plant Biology, Ecosystems, Canadian Journal of Remote Sensing, New Phytologist; Relecture de projets : ANR (1), PNTS (2)

I.2.5. Participation à la vie collective

Depuis la fusion de l'UPR FPEP avec l'UMR Eco&Sols, je suis animateur de l'axe transversal modélisation (co-animateur avec Frédéric Gérard (INRA) jusqu'en 2016). L'axe est « transversal » car il concerne les 3 thèmes de recherches de l'UMR Eco&Sols (« Sols, Activités & Réseaux Biologiques », « Nutriments & Intensification Ecologique », « Carbone & Changement Globaux », cf <http://www.umar-ecosols.fr/recherche>). Le fonctionnement de l'axe est basé sur des réunions conjointes en interface avec les thèmes de recherche et l'axe écologie. Cette animation/coordination s'articule autour de 1) réunions régulières ouvertes à tous les chercheurs, ingénieurs et techniciens de l'UMR, 2) l'appui à des projets internes à l'UMR sur la modélisation, 3) l'animation de la prospective scientifique, 4) l'identification de besoins spécifiques (matériel, recrutements, etc) en concertation avec les modélisateurs de l'UMR, et la sélection des projets pour financement interne, 5) le suivi et la présentation des activités de modélisation de l'UMR (site web, visites de chercheurs invités, présentations aux tutelles,...).

Je donne des cours à des étudiants de niveau M1 ou M2 lorsque je suis sollicité, avec des périodes plus intenses que d'autres. La plupart du temps, ce sont des cours sur la modélisation du fonctionnement des plantes ou sur la télédétection pour la caractérisations des surfaces forestières.

I.3. Production scientifique

I.3.1. Indices bibliométriques

J'ai été auteur ou co-auteur de 54 articles entre 2004 et 2017, soit environ 3.6 articles par an (Figure 1). Les indices biométriques montrent que les 54 publications sont en moyenne citées 47.5 fois, mais évidemment avec une large variabilité entre les articles, les plus anciens étant logiquement les plus cités. Le h-index de mes publications est de 24, ce qui est assez proche de la moitié du nombre total des publications. Le nombre de citations par an augmente relativement linéairement sur les 10 dernières années.



Figure 1 : Copie d'écran de Web of Science le 15 octobre 2017 (source : ISI Web of Science)

I.3.2. Analyse critique des publications

J'ai publié dans 25 journaux différents, les principaux étant Remote Sensing of Environment (8 publications), Forest Ecology and Management (7), Global Change Biology (5), Ecological Modelling (4) et Agricultural and Forest Meteorology (4) (Tableau 1). En pondérant les facteurs d'impact (IF) par le nombre d'articles publiés dans les revues correspondantes, on obtient un IF moyen de 4.38. Même si on essaie de viser des revues à haut impact, le choix se fait aussi sur la pertinence de la revue par rapport au public visé. Les journaux appartiennent à différents domaines scientifiques selon le classement de Web of Science : parmi ces domaines, la moitié des publications concernent le domaine des « sciences de l'environnement et écologie » (Tableau 2). En regardant de plus près, il y a environ 20 articles qui concernent la modélisation, 20 qui concernent la télédétection, et le reste concerne d'autres thématiques.

Tableau 1 : Tableau récapitulant les publications dans des revues à comité de lecture en fonction des années, en les triant par ordre de facteur d'impact. * la moyenne des FI est pondérée par le nombre d'articles publié dans les revues correspondantes. (source : ISI Web of Science)

journal	facteur d'impact (2016 JCR)	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Total
NATURE GEOSCIENCE	13.94					1										1
GLOBAL CHANGE BIOLOGY	8.50				1	2			1				1			5
REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT	6.26	1		1	3				2			1				8
PLANT CELL AND ENVIRONMENT	6.17														1	1
FUNCTIONAL ECOLOGY	5.63														1	1
HYDROLOGY AND EARTH SYSTEM SCIENCES	4.44								1							1
FRONTIERS IN PLANT SCIENCE	4.29										1					1
AGRICULTURE ECOSYSTEMS & ENVIRONMENT	4.10											1				1
INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED EARTH OBSERVAT	3.93												1		1	2
AGRICULTURAL AND FOREST METEOROLOGY	3.88			2						1	1					4
BIOGEOSCIENCES	3.85				1										1	2
TREE PHYSIOLOGY	3.65		1							1						2
GEOSCIENTIFIC MODEL DEVELOPMENT	3.48												1			1
BIOGEOCHEMISTRY	3.43									1						1
JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-BIOGEOSCIENCES	3.39			1				2								3
REMOTE SENSING	3.24									1						1
OECOLOGIA	3.13										1					1
FOREST ECOLOGY AND MANAGEMENT	3.06							2	1		4					7
IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OI	2.91											1	1			2
ECOLOGICAL MODELLING	2.36		1					1	1			1				4
CANADIAN JOURNAL OF FOREST RESEARCH	1.83													1		1
INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING	1.72													1		1
REMOTE SENSING LETTERS	1.53										1					1
AGROFORESTRY SYSTEMS	1.17						1									1
REVUE DE METALLURGIE-CAHIERS D INFORMATIONS TEC	0.43						1									1
Total	4.38*	1	2	4	2	6	2	5	6	4	8	4	4	2	4	54

Tableau 2 : Statistiques des publications en fonction des thématiques (source : ISI Web of Science)

Field: Research Areas	Record Count	% of 54	Bar Chart
ENVIRONMENTAL SCIENCES ECOLOGY	26	48.148 %	
FORESTRY	15	27.778 %	
REMOTE SENSING	15	27.778 %	
IMAGING SCIENCE PHOTOGRAPHIC TECHNOLOGY	12	22.222 %	
GEOLOGY	9	16.667 %	
AGRICULTURE	6	11.111 %	
BIODIVERSITY CONSERVATION	5	9.259 %	
METEOROLOGY ATMOSPHERIC SCIENCES	4	7.407 %	
ENGINEERING	2	3.704 %	
PHYSICAL GEOGRAPHY	2	3.704 %	
PLANT SCIENCES	2	3.704 %	

J'ai publié jusqu'à présent 10 articles en premier auteur, et si les articles soumis sont acceptés, j'aurai en 2018 16 articles en deuxième auteur et 9 en dernier auteur (Figure 2). Dans ces trois cas je suis très impliqué dans le processus de rédaction, analyse des résultats et publications. On peut voir que la part des articles en deuxième ou dernier auteur est en augmentation constante. Plus récemment les articles sont moins en premier auteur et plutôt en deuxième ou dernier, ce qui est logique car la plupart de ces articles concernent les résultats des travaux des doctorants que j'encadre ou co-encadre. La part des articles dans lequel je m'investis fortement (premier, deuxième ou dernier auteur) reste environ stable, à 2.3 articles par an, et représente environ les 2/3 de mes publications. Comme je l'ai souligné auparavant, j'ai publié 15 articles avec des étudiants que j'encadrait ou co-encadrait officiellement, sur le total des 54 articles publiés en 2017.

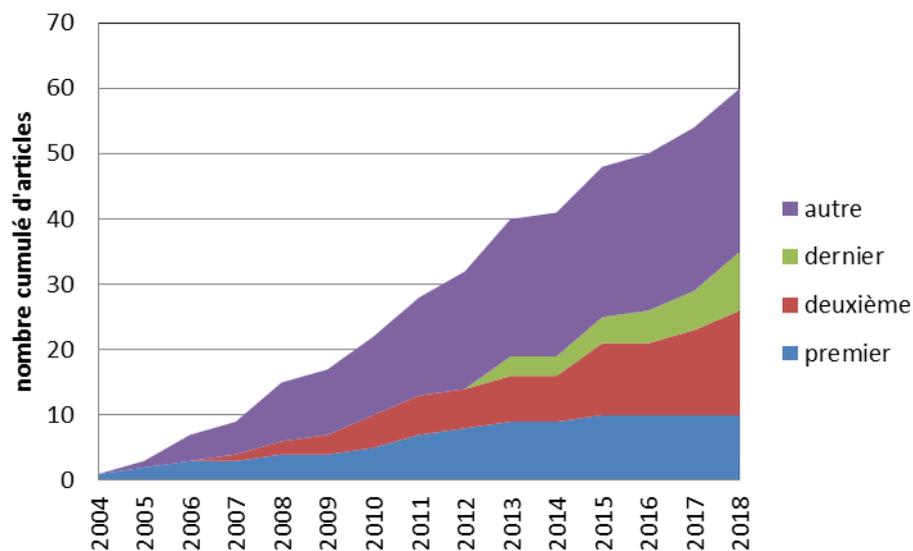


Figure 2 : Rang parmi les auteurs des articles. L'année 2018 est une prévision optimiste, si les articles soumis fin 2017 sont acceptés

I.3.3. Articles publiés dans des revues ACL (à comité de lecture)

2017

- Sabajo, C.R., **le Maire, G.**, June, T., Meijide, A., Roupsard, O., & Knohl, A. (2017). Expansion of oil palm and other cash crops causes an increase of the land surface temperature in the Jambi province in Indonesia. *Biogeosciences*, 14, 4619-4635
- Oliveira, J.d.C., Féret, J.-B., Ponzoni, F.J., Nouvellon, Y., Gastellu-Etchegorry, J.-P., Campoe, O.C., Stape, J.L., Rodriguez, L.C.E. & **le Maire, G.** (2017) Simulating the canopy reflectance of different Eucalypt genotypes with the DART 3D model. *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10, 4844-4852.
- Lambais, G.R., Jourdan, C., de Cássia Piccolo, M., Germon, A., Pinheiro, R.C., Nouvellon, Y., Stape, J.L., Campoe, O.C., Robin, A., Bouillet, J.-P., le Maire, G., & Laclau, J.-P. (2017). Contrasting phenology of Eucalyptus grandis fine roots in upper and very deep soil layers in Brazil. *Plant and Soil*
- Sabajo, C.R., **le Maire, G.**, June, T., Meijide, A., Roupsard, O., & Knohl, A. (2017). Expansion of oil palm and other cash crops causes an increase of the land surface temperature in the Jambi province in Indonesia. *Biogeosciences*, 14, 4619-4635

- Christina, M., Nouvellon, Y., Laclau, J.-P., Stape, J.L., Bouillet, J.-P., Lambais, G.R. & **le Maire, G.** (2017) Importance of deep water uptake in tropical eucalypt forest. *Functional Ecology*, 31, 509-519.
- Charbonnier, F., Rouspard, O., **le Maire, G.**, Guillemot, J., Casanoves, F., Lacoïnte, A., Vaast, P., Allinne, C., Audebert, L., Cambou, A., Clément-Vidal, A., Defrenet, E., Duursma, R.A., Jarri, L., Jourdan, C., Khac, E., Leandro, P., Medlyn, B.E., Saint-André, L., Thaler, P., Van Den Meersche, K., Barquero Aguilar, A., Lehner, P., & Dreyer, E. (2017). Increased light-use efficiency sustains net primary productivity of shaded coffee plants in agroforestry system. *Plant, Cell & Environment*, 40, 1592-1608
- Grinand, C., **le Maire, G.**, Vieilledent, G., Razakamanarivo, H., Razafimbelo, T. & Bernoux, M. (2017) Estimating temporal changes in soil carbon stocks at ecoregional scale in Madagascar using remote-sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 54, 1-14.

2016

- Waldner, F., De Abelleira, D., Verón, S.R., Zhang, M., Wu, B., Plotnikov, D., Bartalev, S., Lavreniuk, M., Skakun, S., Kussul, N., **Le Maire, G.**, Dupuy, S., Jarvis, I. & Defourny, P. (2016) Towards a set of agrosystem-specific cropland mapping methods to address the global cropland diversity. *International Journal of Remote Sensing*, 37, 3196-3231.
- Christina, M., Nouvellon, Y., Laclau, J.P., Stape, J.L., Campoe, O.C. & **le Maire, G.** (2016) Sensitivity and uncertainty analysis of the carbon and water fluxes at the tree scale in Eucalyptus plantations using a metamodeling approach. *Canadian Journal of Forest Research*, 46, 297-309.

2015

- Atzberger, C., Darvishzadeh, R., Immitzer, M., Schlerf, M., Skidmore, A., & **le Maire, G.** (2015). Comparative analysis of different retrieval methods for mapping grassland leaf area index using airborne imaging spectroscopy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 43, 19-31
- Fan, Y., Rouspard, O., Bernoux, M., **Le Maire, G.**, Panferov, O., Kotowska, M.M., & Knohl, A. (2015). A sub-canopy structure for simulating oil palm in the Community Land Model (CLM-Palm): phenology, allocation and yield. *Geoscientific Model Development*, 8, 3785-3800
- Baghdadi, N., **le Maire, G.**, Bailly, J.S., Osé, K., Nouvellon, Y., Zribi, M., Lemos, C., Hakamada, R., Evaluation of ALOS/PALSAR L-band data for the estimation of Eucalyptus plantations aboveground biomass in Brazil (2015) *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8, 3802-3811
- M. Christina, **G. Le Maire**, P. Battie-Laclau, J.-P Bouillet, Y. Nouvellon, C. Jourdan, J.L.M. Gonçalves, J.-P. Laclau (2015), Measured and modeled interactive effects of potassium and water deficiencies on photosynthesis and light use efficiency in Eucalyptus grandis plantations, *Global Change Biology*, 21, 2022-2039
- Falster, D.S., Duursma, R.A., Ishihara, M.I., Barneche, D.R., FitzJohn, R.G., Vårhammar, A., Aiba, M., Ando, M., Anten, N., Aspinwall, M.J., Baltzer, J.L., Baraloto, C., Battaglia, M., Battles, J.J., Bond-Lamberty, B., van Breugel, M., Camac, J., Claveau, Y., Coll, L., Dannoura, M., Delagrangé, S., Domec, J.-C., Fatemi, F., Feng, W., Gargaglione, V., Goto, Y., Hagihara, A., Hall, J.S., Hamilton, S., Harja, D., Hiura, T., Holdaway, R., Hutley, L.S., Ichie, T., Jokela, E.J., Kantola, A., Kelly, J.W.G., Kenzo, T., King, D., Kloeppel, B.D., Kohyama, T., Komiyama, A., Laclau, J.-P., Lusk, C.H., Maguire, D.A., **le Maire, G.**, Mäkelä, A., Markesteijn, L., Marshall, J., McCulloh, K., Miyata, I., Mokany, K., Mori, S., Myster, R.W., Nagano, M., Naidu, S.L., Nouvellon, Y., O'Grady, A.P., O'Hara, K.L., Ohtsuka, T., Osada, N., Osunkoya, O.O., Peri, P.L., Petritan, A.M., Poorter, L., Portsmouth, A., Potvin, C., Ransijn, J., Reid, D., Ribeiro, S.C., Roberts, S.D., Rodríguez, R., Saldaña-Acosta, A., Santa-Regina, I., Sasa, K., Selaya, N.G., Sillett, S.C., Sterck, F., Takagi, K., Tange, T., Tanouchi, H., Tissue, D., Umehara, T., Utsugi, H., Vadeboncoeur, M.A., Valladares, F., Vanninen, P., Wang, J.R., Wenk, E., Williams,

R., de Aquino Ximenes, F., Yamaba, A., Yamada, T., Yamakura, T., Yanai, R.D., & York, R.A. (2015). BAAD: a Biomass And Allometry Database for woody plants. *Ecology*, 96, 1445-1445

2014

- Sainte-Marie, J., Saint-André, L., Nouvellon, Y., Laclau, J.P., Roupsard, O., **le Maire, G.**, Delpierre, N., Henrot, A., & Barrandon, M. (2014). A new probabilistic canopy dynamics model (SLCD) that is suitable for evergreen and deciduous forest ecosystems. *Ecological Modelling*, 290, 121-133
- Forrester, D., Guisasola, R., Tang, X., Albrecht, A., Dong, T., & **le Maire, G.** (2014). Using a stand-level model to predict light absorption in stands with vertically and horizontally heterogeneous canopies. *Forest Ecosystems*, 1, 17
- le Maire, G.**, Dupuy, S., Nouvellon, Y., Loos, R.A., & Hakamada, R. (2014). Mapping short-rotation plantations at regional scale using MODIS time series: Case of eucalypt plantations in Brazil. *Remote Sensing of Environment*, 152, 136-149
- Taugourdeau, S., **le Maire, G.**, Avelino, J., Jones, J.R., Ramirez, L.G., Jara Quesada, M., Charbonnier, F., Gómez-Delgado, F., Harmand, J.-M., Rapidel, B., Vaast, P., & Roupsard, O. (2014). Leaf area index as an indicator of ecosystem services and management practices: An application for coffee agroforestry. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 192, 19-37
- Baghdadi, N., **Le Maire, G.**, Fayad, I., Bailly, J.S., Nouvellon, Y., Lemos, C., Hakamada, R. (2014). Testing different methods of forest height and aboveground biomass estimations from ICESat/GLAS data in eucalyptus plantations in Brazil. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 7 (1) , art. no. 6521496 , pp. 290-299

2013

- Laclau, J.-P., Silva, E.A.d., Rodrigues Lambais, G., Bernoux, M., **le Maire, G.**, Stape, J.L., Bouillet, J.-P., Gonçalves, J.L.M., Jourdan, C., & Nouvellon, Y. (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*, 4
- Charbonnier, F., **le Maire, G.**, Dreyer, E., Casanoves, F., Christina, M., Dauzat, J., Eitel, J.U.H., Vaast, P., Vierling, L.A., & Roupsard, O. (2013). Competition for light in heterogeneous canopies: Application of MAESTRA to a coffee (*Coffea arabica* L.) agroforestry system. *Agricultural and Forest Meteorology*, 181, 152-169
- Laclau, J.-P., Nouvellon, Y., Reine, C., Gonçalves, J.L.d.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
- Zhou, J., Proisy, C., Descombes, X., **le Maire, G.**, Nouvellon, Y., Stape, J.-L., Viennois, G., Zerubia, J., & Coutron, P. (2013). Mapping local density of young *Eucalyptus* plantations by individual tree detection in high spatial resolution satellite images. *Forest Ecology and Management*, 301, 129-141
- Marsden, C., Nouvellon, Y., Laclau, J.-P., Corbeels, M., McMurtrie, R.E., Stape, J.L., Epron, D., & **le Maire, G.** (2013). Modifying the G'DAY process-based model to simulate the spatial variability of *Eucalyptus* plantation growth on deep tropical soils. *Forest Ecology and Management*; 301 (2013) 112–128
- le Maire, G.**, Nouvellon, Y., Christina, M., Ponzoni, F.J., Gonçalves, J.L.M., Bouillet, J.P., & Laclau, J.P. (2013). Tree and stand light use efficiencies over a full rotation of single- and mixed-species *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* plantations. *Forest Ecology and Management*, 288, 31-42
- Campoe, O.C., Stape, J.L., Nouvellon, Y., Laclau, J.-P., Bauerle, W.L., Binkley, D., & **le Maire, G.** (2013). Stem production, light absorption and light use efficiency between dominant and non-dominant trees of *Eucalyptus grandis* across a productivity gradient in Brazil. *Forest Ecology and Management*, 288, 14-20

Atzberger, C., Darvishzadeh, R., Schlerf, M., & **le Maire, G.** (2013). Suitability and adaptation of PROSAIL radiative transfer model for hyperspectral grassland studies. *Remote Sensing Letters*, 4, 55-65

2012

le Maire, G., Marsden, C., Nouvellon, Y., Stape, J.-L., & Ponzoni, F. (2012). Calibration of a Species-Specific Spectral Vegetation Index for Leaf Area Index (LAI) Monitoring: Example with MODIS Reflectance Time-Series on Eucalyptus Plantations. *Remote Sensing*, 4, 3766-3780

Nouvellon Y., Laclau, JP., Epron, D., **Le Maire, G.**, Bonnefond, JM., Gonçalves, JLM., Bouillet, J.P., 2012. Production and carbon allocations in monocultures and mixed-species plantations of Eucalyptus grandis and Acacia mangium in Brazil. *Tree Physiology* 32 (6), 680–695

Delpierre, N., Soudani, K., François, C., **Le Maire, G.**, Bernhofer, C., Kutsch, W., Misson, L., Rambal, S., Vesala, T., & Dufrêne, E. (2012). Quantifying the influence of climate and biological drivers on the interannual variability of carbon exchanges in European forests through process-based modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 154–155, 99-112

Nouvellon, Y., Epron, D., Marsden, C., Kinana, A., **Le Maire, G.**, Deleporte, P., Saint-André, L., Bouillet, J.-P., & Laclau, J.-P. (2012). Age-related changes in litter inputs explain annual trends in soil CO₂ effluxes over a full Eucalyptus rotation after afforestation of a tropical savannah. *Biogeochemistry*, 111, 515-533

2011

Bellassen V., Viovy N., Luyssaert S., **Le Maire G.**, Schelhaas M-J., Ciais P. 2011 Reconstruction and attribution of the carbon sink of European forests between 1950 and 2000. *Global Change Biology*, 17:3274–3292

Le Maire G., Marsden C., Nouvellon, Y., Grinand C., Hakamada R., Stape JL. & Laclau JP. 2011. MODIS NDVI time-series allow the monitoring of Eucalyptus plantation growth. *Remote Sensing of Environment*, 115:2613-2625

Gómez-Delgado F., Rouspard O., **Le Maire G.**, Taugourdeau S., Pérez A., Van Oijen M., Vaast P., Rapidel B., Harmand J.M., Voltz M., Bonnefond J.M., Imbach P. & Moussa R. 2011. Modelling the hydrological behaviour of a coffee agroforestry basin in Costa Rica. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15: 369-392.

Bellassen, V., Delbart, N., **le Maire, G.**, Luyssaert, S., Ciais, P., Viovy, N., 2011, Potential knowledge gain in large-scale simulations of forest carbon fluxes from remotely sensed biomass and height. *Forest Ecology and Management*, 261:515–530 doi:10.1016/j.foreco.2010.11.002

le Maire, G., Marsden, C., Verhoef, W., Ponzoni, F.J., Lo Seen, D., Bégué, A., Stape, J.-L., & Nouvellon, Y., 2011, Leaf area index estimation with MODIS reflectance time series and model inversion during full rotations of Eucalyptus plantations. *Remote Sensing of Environment* 115:586–599

Bellassen V., **Le Maire G.**, Guin O., Dhôte J.F., Ciais P., Viovy N., 2011. Modelling forest management within a global vegetation model – Part 2: Model validation from a tree to a continental scale. *Ecological Modelling*, 222: 57-75

2010

Bellassen V., **Le Maire G.**, Dhôte J.F., Ciais P., Viovy N., 2010. Modelling forest management within a global vegetation model – Part 1: Model structure and general behaviour. *Ecological Modelling*, 221: 2458-2474

Le Maire G., Delpierre N., Jung M., Ciais P., Reichstein M., Viovy N., Granier A., Ibrom A., Kolari P., Longdoz B., Moors E.J., Pilegaard K., Rambal S., Richardson A.D., Vesala T., 2010. Detecting the critical periods that underpin interannual fluctuations in the carbon balance of European forests. *Journal of Geophysical Research*, 115, G02003, 16 p. <http://dx.doi.org/10.1029/2009JG001244>

- Marsden, C., **le Maire, G.**, Stape, J.-L., Seen, D.L., Roupsard, O., Cabral, O., Epron, D., Lima, A.M.N., & Nouvellon, Y. (2010). Relating MODIS vegetation index time-series with structure, light absorption and stem production of fast-growing Eucalyptus plantations. *Forest Ecology and Management*, 259, 1741-1753
- Nouvellon, Y., Laclau, J.-P., Epron, D., Kinana, A., Mabiata, A., Roupsard, O., Bonnefond, J.-M., **le Maire, G.**, Marsden, C., Bontemps, J.-D., & Saint-André, L. (2010). Within-stand and seasonal variations of specific leaf area in a clonal Eucalyptus plantation in the Republic of Congo. *Forest Ecology and Management*, 259, 1796-1807
- Mahecha, M.D., Reichstein, M., Jung, M., Seneviratne, S.I., Zaehle, S., Beer, C., Braakhekke, M.C., Carvalhais, N., Lange, H., **Le Maire, G.**, & Moors, E. (2010). Comparing observations and process-based simulations of biosphere-atmosphere exchanges on multiple timescales. *Journal of Geophysical Research*, 115, G02003, doi:02010.01029/02009JG001016

2009

- 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., & Jean-Pierre, B. (2009). Scaling-up productivity (NPP) using light or water use efficiencies (LUE, WUE) from a two-layer tropical plantation. *Agroforestry Systems* 76 : 409-422

2008

- le Maire G.**, François C., Soudani K., Berveiller D., Pontailier J.-Y., Bréda N., Genet H., Davi H., Dufrêne E., Calibration and validation of hyperspectral indices for the estimation of biochemical and biophysical parameters of broadleaves forest canopies, (2008) *Remote Sensing of Environment*, 112, 3846-3864
- Ciais, P., Schelhaas, M.J., Zaehle, S., Piao, S.L., Cescatti, A., Liski, J., Luyssaert, S., **le Maire, G.**, Schulze, E.D., Bouriaud, O., Freibauer, A., Valentini, R., & Nabuurs, G.J. (2008). Carbon accumulation in European forests. *Nature Geoscience*, 1, 425-429
- Luo Y., Gerten D., **le Maire G.**, Parton W.J., Weng E., Zhou X., Keough C., Beier C., Rustad L., (2008) Modeled interactive effects of precipitation, temperature, and [CO₂] on ecosystem carbon and water dynamics in different climatic zones, *Global Change Biology* 14, 1- 14, doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01629.x
- Gerten D., Luo Y., **le Maire G.**, Parton W. J., Keough C., Weng E., Beier C., Ciais P., Cramer W., Rustad L., Dukes J., Emmett B., Hanson P.J., Knapp A., Linder S., Nepstad D., (2008) Modelled effects of precipitation on ecosystem carbon and water dynamics in different climatic zones, *Global Change Biology* 14, 1–15, doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01651.x
- Feret, J.-B., François, C., Asner, G.P., Gitelson, A.A., Martin, R.E., Bidet, L.P.R., Ustin, S.L., **le Maire, G.**, & Jacquemoud, S. (2008). PROSPECT-4 and 5: Advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments. *Remote sensing of environment*, 112, 3030-3043
- Soudani K., **le Maire G.**, Dufrêne E., François C., Delpierre N., Ulrich E, Cecchini S., (2008) Remote sensing of onset of green-up in deciduous broadleaf forests using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS/Terra): evaluation and comparison with in situ observations over France, *Remote Sensing of Environment* 112 (5), 2643-2655

2007

- Jung M., **le Maire G.**, Zaehle S., Luyssaert S., Vetter M., Churkina G., Ciais P., Viomy N., Reichstein M., (2007) Assessing the ability of three land ecosystem models to simulate gross carbon uptake of forests from boreal to Mediterranean climate in Europe, *Biogeosciences*, 4, 647-656
- Luyssaert, S., Inglima, I., Jung, M., Richardson, A., Reichstein, M., Papale, D., Piao, S.L., Schulze, E.-D., Wingate, L., Matteucci, G., Aragao, L., Aubinet, M., Beer, C., Bernhofer, C., Black, K., Bonal, D., Bonnefond, J.M., Chambers, J.Q., Ciais, P., Cook, B., Davis, K.J., Dolman, A.J., Gielen, B., Goulden, M.L., Grace, J., Granier, A., Grelle, A., Griffis, T., Grunwald, T.,

Guidolotti, G., Hanson, P.J., Harding, R., Hollinger, D.Y., Hutrya, L.R., Kolari, P., Kruijt, B., Kutsch, W., Lagergren, F., Laurila, T., Law, B.E., **Le Maire, G.**, Lindroth, A., Loustau, D., Malhi, Y., Mateus, J., Migliavacca, M., Misson, L., Montagnani, L., Moncrieff, J., Moors, E.J., Munger, J.W., Nikinmaa, E., Ollinger, S.V., Pita, G., Rebmann, C., Rouspard, O., Saigusa, N., Sanz, M.J., Seufert, G., Sierra, C., Smith, L.K., Tang, J., Valentini, R., Vesala, T., & Janssens, I.A. (2007). CO2 balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database. *Global Change Biology*, 13, 2509-2537

2006

- Le Maire G.**, François C., Soudani K., Davi H., Le Dantec V., Saugier B., Dufrêne E. (2006) Forest LAI determination: A multi-year satellite-independent method based on within-stand NDVI spatial variability. *Journal of Geophysical Research*, 111, G02027, doi:10.1029/2005JG000122
- Soudani K., François C., **le Maire G.**, Le Dantec V., Dufrêne E. (2006) Comparative analysis of Ikonos, SPOT and ETM+ data for Leaf Area Index estimation in temperate coniferous and deciduous forest stands, *Remote Sensing of Environment*, 102, 161-175
- Davi H., Dufrêne E., François C., **le Maire G.**, Loustau D., Bosc A., Rambal S., Granier A., Moors E. (2006) Sensitivity of water and carbon fluxes to climate changes from 1960 to 2100 in European forest ecosystems, *Agricultural and Forest Meteorology*, 141, 35-56
- Davi H., Bouriaud O., Dufrêne E., Soudani K., Pontailler J.Y., **le Maire G.**, François C., Bréda N., Granier A., le Dantec V. (2006) - Effect of aggregating spatial parameters on modelling forest carbon and water fluxes, *Agricultural and Forest Meteorology*, 139, 269-287

2005

- le Maire G.**, Davi H., Soudani K., François C., Le Dantec V., Dufrêne E. (2005) Modeling annual production and carbon dioxide fluxes of a large managed temperate forest using forest inventories, satellite data and field measurements, *Tree Physiology*, 25, 859-872.
- Dufrêne E., Davi H., François C., **le Maire G.**, Le Dantec V., Granier A. (2005) Modelling carbon and water cycles in a Beech forest. Part I : Model description and uncertainty analysis on modelled NEE, *Ecological Modelling*, 185, 407-436.

2004

- le Maire G.**, François C., Dufrêne E. (2004). Towards universal broad leaf chlorophyll indices using PROSPECT simulated database and hyperspectral reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*, 89 (1), 1-28.

Articles dans d'autres domaines :

- Peyre V., Lair V., André V., **le Maire G.**, Kragh-Hansen U., le Maire M., Moller J.V. (2005) Detergent Binding as a Sensor of Hydrophobicity and Polar Interactions in the Binding Cavities of Proteins, *Langmuir*. 21, 8865-8875.
- Sahin-Toth M., le Coutre J., Kharabi D., **le Maire G.**, Lee JC., Kaback HR. (1999) Characterization of Glu126 and Arg144, two residues that are indispensable for substrate binding in the lactose permease of Escherichia coli, *Biochemistry*, 38 (2), 813-819.

Articles soumis ou état avancé de rédaction (soumission proche)

- Luciano, A.C.d.S., Picoli, M.C.A., Rocha, J.V., Franco, H.C.J., Sanches, G.M., Leal, M.R.L.V., & **le Maire, G.** (submitted). Generalized space-time classifiers for monitoring sugarcane areas in Brazil *Remote Sensing of Environment*
- Vezy, R., Christina, M., Rouspard, O., Nouvellon, Y., Duursma, R., Medlyn, B., Soma, M., Charbonnier, F., Blitz-Frayret, C., Stape, J.-L., Laclau, J.-P., Filho, E.d.M.V., Rapidel, B., Do, F., Rocheteau, A., Picart, D., Borgonovo, C., Loustau, D., & **le Maire, G.**

- (submitted). Measuring and modelling energy partitioning in canopies of varying complexity using MAESPA model. *Agricultural and Forest Meteorology*
- Christina, M., **le Maire, G.**, Nouvellon, Y., Vezy, R., Bordron, B., Battie-Laclau, P., Gonçalves, L., Delgado-Rojas, J.S., Bouillet, J.-P., & Laclau, J.-P. (submitted). Simulating the effects of different potassium and water supply regimes on soil water content and water table depth over a rotation of a tropical *Eucalyptus grandis* plantation. *Forest Ecology and Management*
- Guillemot, J., **le Maire, G.**, Munishamappa, M., Charbonnier, F., & Vaast, P. (in prep). Native coffee agroforestry conserves carbon stocks and tree diversity in the Indian Western Ghats, exotic agroforestry does not
- Féret, J.-B., **le Maire, G.**, Jay, S., Barbier, N., Bendoula, R., Berveiller, D., Chave, J., Etchegorry, J.-P.G., Hmimina, G., Lefèvre, M.-J., Nouvellon, Y., Oliveira, J., Ponzoni, F., Porcar-Castell, A., Proisy, C., Solanki, T., Soudani, K., & Vincent, G. (in prep). Physical modeling vs. machine learning estimation of leaf mass per area and leaf water content based on leaf optical properties. *Remote Sensing of Environment*
- Le Maire, G.**, Nouvellon, Y., Stape, J.-L., Campoe, O., Vezy, R., Bouillet J.-P., Laclau, J.-P., 2016. Dynamic of canopy structure, PAR absorption and light-use efficiency of 16 *Eucalyptus* genotypes along a full rotation. *Forest Ecology and Management* (in prep).
- Nouvellon, Y., Stape J.L., **le Maire, G.**, Bonnefond, J.-M., Christina, M., Campoe, O., Da Rocha, H., Loos, R.A., Rouspard, O., Guillemot, J., Bouillet, J.-P., Laclau, J.-P. Height years of carbon, water and energy fluxes over an *Eucalyptus* stand in Brazil: effect of clear-cut and the role of fast soil exploration by root during regrowth. *Global Change Biology* (in prep).
- Soma, M., Vezy, R., Guilionie, L., **le Maire, G.**, Filho, E.d.M.V., Meersche, K.V.d., Avelinog, J., & Rouspard, O. (in prep). On the potential of agroforestry to buffer crop canopy temperature: a simple empirical model tested on coffee
- Vezy, R., **le Maire, G.**, Christina, M., Georgiou, S., Imbach, P., Hidalgo, H.G., Alfaro, E.J., Blitz-Frayret, C., Laclau, J.-P., Picart, D., Loustau, D., Charbonnier, F., Duursma, R., Medlyn, B., Lehner, P., & Rouspard, O. (in prep). Modeling Yield, Net Primary Productivity, Energy, And Water Partitioning in Heterogeneous Agroforestry Systems: A New Coffee Agroforestry Dynamic Model Driven by Metamodels From MAESPA
- Vezy, R., Rouspard, O., Georgiou, S., Imbach, P., Rapidel, B., Charbonnier, F., Blitz-Frayret, C., Loustau, D., Hidalgo, H.G., Alfaro, E.J., & **le Maire, G.** (in prep). Modelling *Coffea arabica* adaptation to future climate change: neither CO₂ nor shade remediate projected yield losses at low elevations

I.3.4. Chapitres de livres

- Davi H., Christophe François, Jérôme Ogée, Éric Dufrêne, Philippe Ciais, Alexandre Bosc, Denis Loustau, **le Maire G.** Chapter 9. Modelling tools for predicting the carbon cycle (2010) in Forests, *Carbon Cycle and Climate Change* Ed. Quae
- Rouspard, 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 S. Jose (Ed.), *Agroforestry for commodity production: ecological and social dimensions* (pp. p. 145-158). Dordrecht: Springer [Pays-Bas]
- Le Maire G.**, Davi H., Dufrêne E. 2009. CASTANEA: a forest process-based model of carbon and water balances. In: Rapidel B., Rouspard O. and Navarro M.N. (eds) *Modelling Agroforestry Systems with perennial crops Connecting AF researchers with modellers. PCP-Mésoamérique, CATIE, Turrialba, Costa Rica, 20pp.*
- Rouspard O., Gomez Delgado F., Rapidel B., **Le Maire G.** 2009. Why is agroforestry so challenging for modellers? How to conciliate complexity, interactions, accuracy and upscaling? A proposed strategy for agroforestry modelling. In: Rapidel B., Rouspard O. and

- Navarro M.N. (eds) Modelling Agroforestry Systems with perennial crops Connecting AF researchers with modellers. PCP-Mésoamérique, *CATIE, Turrialba, Costa Rica*, 7pp.
- 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. (2008). Scaling-up productivity (NPP) using light or water use efficiencies (LUE, WUE) from a two-layer tropical plantation. In S. Jose (Ed.), *Agroforestry for commodity production: ecological and social dimensions* (pp. p. 145-158). Dordrecht: Springer [Pays-Bas]
- Roupsard, O., **Le Maire, G.**, Nouvellon, Y., Dauzat, J., Jourdan, C., Navarro, M.N.V., Saint-André, L., Bonnefond, J.M., & 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). In P.J. Vaast (Ed.), *Multistrata Agroforestry Systems with Perennial Crops: making ecosystem services count for farmers, consumers and the environment* (p. 8). Turrialba, Costa Rica: Agroforestry Systems, Springer

I.3.5. Présentations ou posters à des conférences

- Dupuy S., Londoño M., Lebourgeois V., **le Maire G.**, Tran A., Gaetano R., (2017) Cartographie de l'occupation du sol agricole à la Réunion ; utilisation d'images gratuites et de logiciels libres, Rencontres Géomatique Réunion (RGR2017), Saint-Pierre, La Réunion
- Luciano, A.C.d.S., Picoli, M.C.A., Rocha, J.V., Silva, A.C.d.O. & **le Maire, G.** (2016) Semiautomatic classification of sugarcane areas from Random Forest algorithm and OLI/Landsat-8 images (oral presentation and 10 pages proceedings). Simposio International SELPER. Puerto Iguazu, Argentina.
- Le Maire G.**, Dupuy S., Boury J., Lebourgeois V., Bégué A., Presentation of the JECAM Brazil – Botucatu (São Paulo) site activities , JECAM/GEOGLAM Science Meeting, Kiev, 11-12 October, 2016 (poster)
- Féret, J.-B. Barbier N., Berveiller D., Gastellu-Etchegorry J.-P., Grau E., Hmimina G., Lefèvre-Fonollosa M.-J., le Maire G., Oliveira J., Proisy C., Soudani K., Vincent G. (2016) Estimation de la biodiversité des forêts tropicales par imagerie hyperspectrale : Avancées du projet HyperTropik. Colloque SFTP, Grenoble, 15 mai 2016
- Le Maire, G.**, Rançon F., Charbonnier F., Roupsard O. (2014), Characterizing the structure of coffee agroforestry systems in Costa Rica (Poster), Pléiades Days, Toulouse, France
- Roupsard, O., Charbonnier, F., Taugourdeau, S., Kinoshita, R., Guidat, F., Rançon, F., **Le Maire, G.**, Van den Meersche, K., Jourdan, C., Harmand, J.M., Vaast, P., De Melo, E., Imbach, A., Albrecht, A., Chevallier, F., Do, F., Rocheteau, A., & Chotte, J.L. (2014). Using process models, remote sensing and spectrometry to open scientific locks in agroforestry systems: the example of coffee in Costa Rica. Poster. In FAO (Ed.), *International Symposium on Agroecology for Food and Nutrition Security, FAO, Rome, 18-19 sept. 2014*. Rome: FAO
- le Maire, G.**, Dupuy, S., Nouvellon, Y. & Hakamada, R. (2014). Monitoring the expansion of Eucalyptus plantations in Brazil (poster). Global vegetation monitoring and modelling international conference, Avignon, France
- Fan, Y., Knohl, A., Bernoux, M., Roupsard, O., Panferov, O., **le Maire, G.**, & Tölle, M. (2014). Simulating carbon, water and energy fluxes of a rainforest and an oil palm plantation using the Community Land Model (CLM4.5). In, *EGU General Assembly 2014: Geophysical Research Abstracts Vol. 16, EGU2014-PREVIEW*, 2014
- Charbonnier, F., **Le Maire, G.**, Dreyer, E., Casanoves, F., Christina, M., Dauzat, J., Eitel, J., Vierling, L., Van den Meersche, K., Harmand, J.M., & Roupsard, O. (2014). The End of the Sun / Shade dichotomy in AFS: mapping of plant light budgets in multistrata heterogeneous plots. Oral Presentation. In, *World Congress on Agroforestry*. Dehli, India, 10-14 February 2014
- Mathias C., Laclau, J-P., Nouvellon, Y., Duursma, R., Stape, J-L., Lambais, G-R., **Le Maire, G.**, 2013. Water withdrawal in deep soil layers: a key strategy to cope with drought in tropical

- eucalypt plantations. AGU Fall Meeting: 9-13 December 2013, San Francisco, CA, USA (oral presentation).
- Nouvellon Y., Stape J.L., **Le Maire G.**, Bonnefond J.M., Rocha H., Campoe O.C., Bouillet J.P., Laclau J.P. 2013. Carbon, water and energy balances of an Eucalyptus grandis plantation in Brazil: effects of clearcut and stand age. In : AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 9-13 December 2013. s.l. : s.n., [1] p. AGU Fall Meeting, 2013-12-09/2013-12-13, San Francisco, Etats-Unis.
- le Maire, G.**, Nouvellon, Y., Rouspard, O., Proisy, C., Couteron, P., Dauzat, J., Christina, M., Charbonnier, F., Zhou, J., Stape, J.L., 2012. Parameterization of a tree-scale process-based model with very high resolution satellite images. IGARSS conference, July 22-27, Munich, Germany.
- Fabien Charbonnier, Olivier Rouspard, Erwin Dreyer, **Guerric le Maire**, Using the MAESTRA model to simulate light interactions and photosynthesis in a heterogeneous agroforestry system, 05/2012; In proceeding of: 30th AMS Conference on Agricultural and Forest Meteorology, At Boston, MA
- Rouspard, O., Dauzat, J., **Le Maire, G.**, Charbonnier, F., & Nouvellon, Y. (2011). Modelling processes at different scales: trade-offs between detailed and scalable models? Oral presentation. In, *FSPM Workshop Campinas-Brazil, 24-28 October 2011*
- Rouspard, O., Dauzat, J., **Le Maire, G.**, Charbonnier, F., & Nouvellon, Y. (2011). Modelling light budgets in Multistrata ecosystems: trade-offs between detailed and scalable models? Oral Presentation. In, *PCP Workshop : From the Leaf to the Landscape: Field and Remote Sensing Approaches for Understanding Vegetation Structure and Dynamics*. CATIE, Turrialba, Costa Rica
- le Maire G.**, Claire Marsden, Flávio Jorge Ponzoni, Wouter Verhoef, Danny Lo Seen, Agnès Bégué, José-Luiz Stape, Yann Nouvellon, Calibration of a vegetation index to monitor Eucalyptus plantation leaf area index with MODIS reflectance time-series [oral presentation], XV SBSR Conference, 01-05 May 2011, Curitiba, Brazil
- Charbonnier, F., Rouspard, O., & **Le Maire, G.** (2011). Using a plant-to ecosystem model (MAESTRA) in coffee agroforestry systems to simulate APAR, evapotranspiration and GPP. Oral Presentation. In, *PCP Workshop : Modelling agroforestry systems*. CATIE, Turrialba, Costa Rica
- Rouspard, O., Gomez Delgado, F., Charbonnier, F., Benegas, L., Taugourdeau, S., Kinoshita, R., Moussa, R., Dreyer, E., Lacoïnte, 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. (2010). The CAFNET/Coffee-Flux project: evaluating water, carbon and sediment Ecosystem Services in a coffee agroforestry watershed of Costa Rica : [Poster]. In Asic (Ed.), *23rd International Conference on Coffee Science (ASIC 2010), October 03-08, 2010, Bali, Indonesia* (p. 1 p.). s.l.: s.n.
- Taugourdeau, S., **Le Maire, G.**, Rouspard , O., Avelino, J., Gomez Delgado, F., Jones, J.R., Marsden, C., Robelo, A., Alpizar, E., Barquero, A., Rapidel , B., Vaast, P., & Harmand, J.M. (2010). LAI dynamics of agroforestry and full sun coffee systems in Costa Rica. Poster. In, *XIth ESA Congress AGRO 2010*. Montpellier, France
- Nouvellon, Y., Stape, J.L., Laclau, J.P., Bonnefond, J.M., Da Rocha, H.R., Campoe, O.C., Marsden, C., Bouillet, J.P., Loos, R.A., Kinana, A., **Le Maire, G.**, Saint Andre, L., & Rouspard , O. (2010). Water and energy fluxes above an Eucalyptus plantation in Brazil: environmental control and comparison with two eucalypt plantations in Congo. In, *Sir Mark Oliphant Canopy Processes in a Changing Climate Conference (formally the IUFRO Canopy Processes Meeting)*. Falls Creek, Victoria and Tarraleah, Tasmania
- Gómez-Delgado, F., Rouspard, O., Moussa, R., Van Oijen, M., Vaast, P., Rapidel, B., Perez, A., Harmand, J.-M., Voltz, M., **Le Maire, G.**, Imbach, P., Bonnefond, J.M., & Taugourdeau, S. (2010). Measuring and modelling water balance, erosion and hydrological services in a coffee agroforestry watershed of Costa Rica. In, *21st Century Watershed Technology: Improving Water Quality and Environment*. University La Earth Costa Rica, Oral presentation: American Society of Agronomical and Biological Engineers (ASABE)

- le Maire, G.**, Nouvellon, Y., Gonçalves, J L M., Bouillet, J-P, Laclau, J-P, Competition for light and light use efficiency for *Acacia mangium* and *Eucalyptus grandis* trees in mono-specific and mixed-species plantations in Brazil (Poster), 2010, AGU Fall Meeting, 13-17 December 2010, San Francisco, Etats-Unis
- le Maire, G.**, Marsden, C., Laclau, J.-P., Stape, J.-L., Corbeels, M., & Nouvellon, Y. (2010). Spatial and temporal variability of the carbon budget of tropical eucalyptus plantations assessed using ecosystem modelling and remote-sensing. In, *International Conference on Integrative Landscape Modelling (Landmod2010)* Montpellier: Edition Quae Symposcience
- Marsden C., **Le Maire G.**, Laclau J.P., Stape J.L., Nouvellon Y. 2009. Combining ecosystem modelling and remote-sensing to establish the spatial and temporal dynamics of the carbon budget of fast-growing tropical *Eucalyptus* plantations. *ICDC8 : 8th International Carbon Dioxide Conference, Jena, Germany, September 13-19*. s.l. : s.n., [2] p. International Carbon Dioxide Conference. 8, 2009-09-13/2009-09-19, Jena, Allemagne.
- Nouvellon, Y., Stape, J.-L., Bonnefond, J.-M., Bouillet, J., Saint-André, L., Hamel, O., Epron, D., Thongo M'Bou, A., Kinana, A., **Le Maire, G.**, Rouspard, O., Da Rocha, H.R., 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, *Knowledge-based management of tropical rainforests*. Cayenne, French Guiana
- Rouspard O., Gómez-Delgado F., Rapidel B., Kinoshita R., Perez A., Moussa R., Jourdan C., **Le Maire G.**, Harmand J.-M., Bonnefond J.M., Vaast P. 2009. The CAFNET/Coffee-Flux project: evaluating water, sediment and carbon ecosystem services in an agroforestry coffee watershed (Costa Rica). *2nd World Congress of Agroforestry (2009), Nairobi, Kenya. Poster*.
- Rouspard, O., Gómez-Delgado, F., Rapidel, B., Kinoshita, R., Perez, A., Moussa, R., Jourdan, C., **Le Maire, G.**, Harmand, J.-M., Bonnefond, J.M., & Vaast, P. (2009). Scaling the water, C and sediment partitioning from plot to watershed: COFFEE-FLUX, a coffee agroforestry experiment in Costa Rica. In, *Asiaflux Workshop*. October 27-29, Sapporo, Japan. Poster presentation
- 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., Chantuma, A., **le Maire, G.**, Hamel, O., & Bouillet, J.-P. (2008). Partitioning NPP into growth, litter and exports: impacts on ecosystem carbon fluxes. A review for tropical perennial plantations. . In, *IUFRO: Productivity of tropical plantations*. Porto Seguro, Bahia, Brasil.10-15 of November 2008.Oral presentation
- Marsden C., **le Maire G.**, Nouvellon Y., Stape JL., Analysis of Modis NDVI time-series over Eucalyptus plantations of south-eastern Brazil (oral presentation), 13th November 2008-IUFRO - Processes Controlling Productivity in Tropical Plantation - Porto Seguro
- Bellassen V., **Le Maire G.**, Dhôte J.F., Viovy N., Ciais P. 2008. Modelling forest management within a global vegetation model (ORCHIDEE) : [Poster, abstract]. In : CarboEurope. *6th CarboEurope-IP Integrated Project Meeting, Jena, Germany, 29 September - 2 October, 2008* . s.l. : s.n., 2 p. CarboEurope-IP Integrated Project Meeting. 6, 2008-09-29/2008-09-02, Jena, Allemagne.
- Le Maire G.**, Delpierre N., Jung M., Ciais P., Reichstein M., Viovy N. 2008. Interannual changes in the carbon budget of European forests : detecting hot-spots periods of variability. [Poster, abstract]. In : CarboEurope. *6th CarboEurope-IP Integrated Project Meeting, Jena, Germany, 29 September - 2 October, 2008* . s.l. : s.n., 1 p. CarboEurope-IP Integrated Project Meeting. 6, 2008-09-29/2008-09-02, Jena, Allemagne.

II) BILAN DES RECHERCHES

II.1. Introduction générale

II.1.1. Contexte

Les services rendus par les écosystèmes forestiers et dont l'humanité bénéficie sont multiples. Le Millenium Ecosystem Assessment (MEA 2005) les groupe en quatre catégories : 1) les services d'approvisionnement (alimentation, production de bois, etc.), 2) les services de régulations (hydrologie, cycle du carbone), 3) les services de support (services essentiels pour tous les autres services écosystémiques), 4) les services culturels et aménités (services récréatifs, esthétiques, etc.). La quantification de ces services est un enjeu important dans l'objectif de maintenir ou d'améliorer ces fonctionnalités. C'est un défi pour la recherche, qui doit répondre à la demande de la société sur ces questions, alors que la compréhension du fonctionnement des forêts est encore champ ouvert pour la recherche (Saxe et al. 2001; Sutherland et al. 2013).

La demande mondiale en bois augmente continuellement, suivant principalement la croissance démographique (FAO 2006), et pourrait s'accélérer si la part de la biomasse comme ressource d'énergie renouvelable augmente. Les ressources forestières naturelles ne peuvent à elles-seules faire face à cette demande, car leur exploitation pose des question en terme de durabilité, d'impact sur la biodiversité (MEA 2005), voire même d'impact sur le climat (Alkama and Cescatti 2016), en particulier pour les forêts tropicales. La gestion des forêts pour la production de bois est très variable à travers le monde, pouvant aller du prélèvement ponctuel aux plantations intensives, mais les plantations partagent les mêmes problématiques de gestion durable, tout en réduisant les impacts environnementaux.

Un des aspects important auxquels l'humanité va être confrontée sont les changements climatiques dus à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre et à leur accumulation dans l'atmosphère. La compréhension du rôle des écosystèmes terrestres, et en particulier des forêts, dans le cycle global du carbone et de l'eau est nécessaire pour appréhender l'évolution future du CO₂ atmosphérique et donc l'amplitude des changements climatiques. Dans ce cadre, Jarvis and Dewar (1993) avaient mis en valeur il y a vingt ans quatre axes de recherches principaux : (1) améliorer les bases de données de changements d'occupation des sols, (2) mesurer les changements de stocks de carbone dans différents écosystèmes significatifs, (3) mesurer les flux nets de carbone sur ces mêmes écosystèmes et (4) développer les modèles de processus pour étudier la sensibilité au CO₂, aux dépôts azotés, aux changements de pluviométries et à l'augmentation de température à différentes échelles. Ces différents points restent parfaitement d'actualité aujourd'hui. D'autre part, la question de l'impact des changements climatiques sur l'agriculture ou sur les forêts, et en particulier leur possible adaptation est également essentielle (Bonan 2008; Zhang et al. 2017).

Mes recherches passées portent principalement sur **l'étude du fonctionnement carboné et hydrique des écosystèmes forestiers**, et s'intègrent donc dans le domaine **l'écologie fonctionnelle** (Calow 1987; Irschick et al. 2013). Dans ce cadre, mes recherches s'appuient sur deux approches complémentaires, la modélisation et la télédétection, que je décrirai dans la suite de ce document.

J'ai commencé à l'UMR Ecologie Systématique et Evolution à l'Université Paris Sud 11 en stage de DEA en 2002, puis dans le même laboratoire lors de ma thèse de Doctorat (2002-2005) après avoir

obtenu une Bourse de Docteur Ingénieur au CNRS. Après une année comme Attaché Temporaire à l'Enseignement et à la Recherche (ATER) à l'Université Paris Sud XI, j'ai effectué un stage Post-Doctoral à l'UMR LSCE à Saclay. En janvier 2008, j'ai été recruté dans l'Unité Propre de Recherche du Cirad « Fonctionnement et pilotage des écosystèmes de plantation » (FPEP), en poste à Montpellier, chercheur associé et accueilli à l'UMR « Territoires, environnement, télédétection et information spatiale » (TETIS). En 2010, l'UPR FPEP a fusionné avec une autre UMR pour donner l'UMR Eco&Sols, à laquelle j'appartiens actuellement. Depuis Juin 2015, je suis en poste à Campinas au Brésil, à l'Université UNICAMP, comme chercheur invité. Lors de ce parcours, j'ai pu au fil du temps et des collaborations approfondir les deux domaines de recherche décrits ci-dessus. J'ai encadré plusieurs étudiants de différents niveaux. Dans la partie « Bilan » de ce manuscrit d'HDR, je vais présenter quelques-uns des résultats de recherches marquants que nous avons obtenus, en mettant l'accent sur ceux qui ont été réalisés avec les étudiants que j'ai encadré.

II.1.2. Une stratégie de recherche s'appuyant sur deux approches complémentaires: télédétection et modélisation

Télédétection

La caractérisation structurale et biochimique des couverts végétaux par télédétection est un domaine de recherche très actif depuis plus de 40 ans. De nombreuses recherches ont montrées qu'il est possible de caractériser certaines variables comme l'indice foliaire (Peterson et al. 1987), le taux de couverture (Carreiras et al. 2006), le contenu en chlorophylle (Curran and Milton 1983) de couverts végétaux avec des niveaux de précision différents suivant les variables étudiées, les capteurs utilisés et les méthodes d'estimation employées. L'ensemble de nos travaux en télédétection s'inscrit à la suite de ces études, avec pour **objectif principal de quantifier par télédétection des variables intéressante pour l'analyse du fonctionnement spatialisé de la végétation.**

C'est donc sous cet angle de « fonctionnement spatialisé de la végétation », principalement le fonctionnement carboné et hydrique, que nous avons utilisé et développé des méthodes de télédétection. Mais au-delà de l'outil, l'analyse des images satellites apporte une base physique intéressante pour comprendre les interactions entre le rayonnement et un couvert végétal utile pour la modélisation écophysologique (cf Partie II.2).

Avant de présenter les travaux réalisés dans le thème de la télédétection, il est nécessaire de définir quelles caractéristiques « biophysiques » des couverts sont intéressantes à étudier pour pouvoir mieux appréhender la variabilité spatiale des bilans de carbone et d'eau à l'échelle inter-parcelle par exemple, et/ou en suivi pour une parcelle donnée.

Les caractéristiques biophysiques intéressantes en termes de fonctionnement de la végétation sont nombreuses. Par exemple, le modèle CASTANEA qui simule le bilan carboné et hydrique d'un couvert forestier (cf Partie II.2), comporte plus de 200 paramètres. Mais parmi ces dizaines de paramètres, les plus intéressants à obtenir par télédétection en vue de la spatialisé de ce modèle sont ceux qui sont à la fois sensibles dans le modèle et variables spatialement. L'analyse de sensibilité et d'incertitude du modèle CASTANEA, par exemple, ont été réalisées dans Dufrêne et al. (2005), et les travaux sur les non-linéarités ont été fait dans Davi et al. (2006a) pour les simulations de flux net de carbone d'une parcelle d'une hêtraie tempérée. Il est apparu, de façon assez classique, que les

paramètres suivants satisfont aux critères de sensibilité et de variabilité spatiale et sont donc intéressants à obtenir par télédétection :

- **Le contenu en azote des feuilles**, qui est directement utilisé dans le calcul de la photosynthèse foliaire. Des mesures expérimentales ont montrées que ce paramètre est bien corrélé au contenu en chlorophylle (CHL(en $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) de la feuille pour des feuilles de lumière
- **La masse surfacique des feuilles** (LMA g/m^2 , ou son inverse le SLA en m^2/g) des feuilles de flumière. Ce paramètre est impliqué dans les calculs de conversion entre la surface foliaire (e.g. utilisée dans les calcul d'interception de rayonnement et de photosynthèse) et la biomasse de feuille (e.g. utilisé dans les calcul d'allocation, de respiration, de litières), et est un trait fonctionnel foliaire important (Violle et al. 2007)
- **L'indice foliaire** (LAI, m^2 de feuilles/ m^2 de sol), impliqué dans les calculs d'absorption du rayonnement et de photosynthèse. Si certains modèles utilisent uniquement la valeur maximale du LAI sur la saison (ex. CASTANEA), d'autres nécessitent une série temporelle de LAI ou de fAPAR (la fraction de rayonnement photosynthétiquement actif absorbé). Enfin, la dynamique annuelle de LAI peut être analysée via des événements phénologiques comme le débourrement ou la sénescence des feuilles.
- **La biomasse des compartiments ligneux** (troncs, branches), utilisée par exemple dans les calculs de respiration autotrophe

D'autres paramètres ressortent également de cette liste, comme des paramètres caractérisant le sol ou la gestion de la parcelle.

L'objectif est donc de tester des méthodologies existantes et d'en développer de nouvelles pour obtenir des estimations de ces variables biophysiques spatialement et/ou temporellement à partir d'images acquises par des capteurs embarqués sur satellites, sur des parcelles forestières. Les travaux sont présentés dans ce rapport travaux en quatre parties: la télédétection hyperspectrale pour estimer le contenu en chlorophylle (II.2.1), l'estimation de l'indice foliaire (II.2.2), l'analyse des séries temporelles d'images (II.2.3) et l'estimation des biomasses des forêts (II.2.4).

Modélisation

Les recherches portant sur la modélisation des bilans de carbone et d'eau d'écosystèmes s'inscrivent dans le cadre de l'écologie fonctionnelle (Calow 1987; Irschick et al. 2013). Celle-ci a une définition assez large, qui intègre l'étude des processus liant un écosystème à son environnement biotique et abiotique, à différentes échelles de temps et d'espace (Lagadeuc and Bornette 2012). L'étude des cycles de matière et d'énergie au sein d'un écosystème est un des aspects essentiels de l'écologie fonctionnelle, qui peut être appréhendé d'un point de vue théorique, via l'expérimentation et via la modélisation mécaniste.

Un des thèmes principaux de mes recherches porte **sur l'estimation de la variabilité spatiale et temporelle du fonctionnement carboné et hydrique des écosystèmes forestiers, à différentes échelles**. L'enjeu de ces travaux est à la fois d'ordre théorique (quels sont les déterminants des processus, quels sont les mécanismes mis en jeu...), méthodologique (comment estimer les bilans, quelles sont les incertitudes associées...) et également d'ordre pratique ou appliqué (sylviculture, gestion des peuplements, impact des changements climatiques et adaptation, ...).

Une part importante du travail porte sur l'amélioration des modèles utilisés, que ce soit pour les adapter à de nouvelles conditions, pour y ajouter certain processus, ou simplement d'un point de vue

computationnel (vitesses d'exécution, etc.). Dans la Partie présentant le bilan des activités de modélisation, je vais présenter une synthèse de mes travaux sur les modèles de fonctionnement carbonés et hydrique de forêts tempérées et tropicales. Ces travaux ont porté sur l'utilisation de plusieurs modèles très différents : CASTANEA, ORCHIDEE, G'DAY et MAESPA. J'ai contribué au développement de ces quatre modèles, et à leur application sur des jeux de données de mesures, à leur analyse pour comprendre les déterminants des variabilités spatiales et temporelles. Le travail sur un modèle est intégrateur et prend en compte les travaux dans plusieurs domaines, et est aussi le résultat d'un travail d'équipe. J'introduirai donc cette partie de façon générale, en présentant la modélisation et les modèles utilisés (section II.3.1), pour me focaliser ensuite l'apport de la modélisation pour l'analyse de mesures expérimentales (II.3.2), pour la caractérisations des variabilités spatiales et temporelles des cycles du carbone et de l'eau dans les forêts (II.3.3), et la modélisation de la gestion sylvicole et des impacts des changements climatiques (II.3.4).

II.1.3. Des terrains diversifiés

Mes travaux ont porté sur des terrains et des types de forêts variés. Lors de mon doctorat, j'ai travaillé sur la forêt de Fontainebleau, une forêt tempérée, caractérisée à la fois par une variabilité d'espèces (entre autre *Fagus sylvatica*, le *Quercus petraea/robur* et le *Pinus sylvestris*), une variabilité de conditions édaphiques et une sylviculture principalement en futaie régulière. Lors de mon post-doctorat au CEA à Saclay, j'ai changé d'échelle pour travailler sur plusieurs forêts européennes, avec plusieurs espèces et climat (Sites Fluxnet). De même, je me suis intéressé à la variabilité de fonctionnement et de gestion existants à cette échelle. A mon arrivée au Cirad en 2008, j'ai commencé à travailler principalement sur deux écosystèmes : les plantations forestières tropicales à croissance rapides (Eucalyptus et Acacias), principalement au Brésil et au Congo, et les systèmes agroforestier de plantations de caféiers, principalement au Costa-Rica. Ces deux écosystèmes sont très différents d'un point de vue de leur gestion et de leur fonctionnement. J'ai essayé autant que possible de travailler sur des aspects complémentaires en termes d'outils, par exemple le choix d'utiliser le même modèle MAESPA sur les plantations d'Eucalyptus et les systèmes agroforestiers a permis que les développements bénéficient aux deux sites (dont une publication conjointe soumise, (Vezy et al. submitted)). Il en est de même en télédétection ou nous avons travaillé dans les deux systèmes sur des images MODIS et Pléiades par exemple.

Par ailleurs, j'ai également contribué à des travaux de modélisation et / ou télédétection sur d'autres écosystèmes : canne à sucre (Luciano et al. submitted), palmiers à huile (Fan et al. 2014; Fan et al. 2015; Sabajo et al. 2017), déforestation à Madagascar (Grinand et al. 2017), agroforesterie en Inde (Guillemot et al. in prep), entre autres.

II.2. Partie 1 : Apport de la télédétection pour la quantification des variabilités spatiales et temporelles de variables biophysiques de couverts forestiers utiles pour la modélisation de leur bilan de carbone, d'eau et d'énergie

II.2.1. Télédétection hyperspectrale pour l'estimation du contenu en chlorophylle et autres caractéristiques des couverts forestiers

La télédétection est ici définie comme l'acquisition d'information sur l'état et la condition d'un objet par une mesure distante, c'est-à-dire non-destructive et non-invasive. Cette information est transmise entre l'objet et le capteur sous la forme de rayonnement électromagnétique. L'analyse de ce rayonnement provenant de l'objet permet d'obtenir des informations sur cet objet. Mes travaux ont porté principalement sur l'analyse du rayonnement dans la gamme spectrale du visible et du proche infrarouge (longueur d'onde entre 400 et 2500 nm). Dans cette gamme spectrale, le rayonnement émis par les feuilles ou les couverts végétaux est principalement du rayonnement provenant d'une source lumineuse externe (lumière artificielle, soleil) et réfléchi par l'objet. Ce rayonnement réfléchi peut ensuite être mesuré par un capteur optique, dont les caractéristiques peuvent être très différentes et déterminent en partie quelle information pourra être estimée sur l'objet. Par exemple, la plupart des capteurs embarqués sur satellite mesurent le rayonnement dans des « bandes spectrales » larges, par exemple pour les capteurs SPOT4 et SPOT5 dans le vert (500-590 nm), rouge (610-680 nm), proche infrarouge (780-890 nm) et SWIR (1580-1750 nm). En télédétection hyperspectrale, les bandes spectrales sont bien plus nombreuses et fines, et couvrent l'ensemble du spectre : par exemple, le capteur satellite EO1-Hyperion a 242 bandes spectrales, tous les 10 nm entre 400 et 2500 nm. Il est donc possible, avec ce type de capteur hyperspectraux, d'obtenir un « spectre de réflectance » sur la gamme spectrale mesurée.

La réflectance d'un couvert est donc fonction des propriétés optiques des objets constituant le couvert, des propriétés structurales de ce couvert (nombre et position des objets), des caractéristiques de la prise de vue (angle du rayonnement incident, du capteur, effets atmosphériques, etc.), et des propriétés spectrales du capteur. L'analyse de ce signal de réflectance peut permettre d'estimer certaines caractéristiques structurales et biochimiques du couvert. L'avantage d'un signal hyperspectral réside dans le fait que certaines caractéristiques vont influencer la réflectance uniquement pour certaines longueurs d'ondes. Avoir le spectre de réflectance complet permet alors d'obtenir une estimation de ces variables, ce qui serait impossible avec des bandes spectrales larges.

Mes travaux de recherche dans ce domaine ont démarrés par mon stage de DEA en 2002, poursuivis lors de ma thèse en 2002-2005, tous deux sous la direction de Christophe François au laboratoire Ecologie, Systématique et Evolution (ESE) à Orsay. L'approche choisie a été de commencer à analyser le signal de réflectance à une échelle fine, celle de la feuille, pour ensuite passer à l'échelle du couvert forestier, et enfin à l'échelle multi-parcelles. Les variables sur lesquelles j'ai travaillé sont la concentration surfacique en chlorophylle des feuilles (toutes les échelles), la masse surfacique des feuilles (toutes les échelles) et l'indice foliaire (échelle du couvert et multi-parcelle).

A l'échelle de la feuille, le spectre de réflectance véhicule des informations sur les propriétés physiques et biochimiques de la feuille, comme par exemple le contenu en pigments (principalement dans le domaine visible du spectre), la masse surfacique ou encore le contenu en eau (Jacquemoud and Baret 1990). Chaque élément influence le spectre de réflectance selon une relation qui va évoluer également en fonction des autres éléments. La lumière visible va être fortement absorbée par les pigments, en particulier par les chlorophylles a et b qui collectent les photons pour la photosynthèse. La lumière proche infrarouge va être fortement absorbée par les molécules d'eau présentes dans la feuille, mais également par la structure cellulaire de la feuille (réflexions multiples dans les parenchymes). Le signal de réflectance foliaire est donc déjà le résultat de mécanismes complexes de réflexion/absorption dans la feuille. L'étude de ce signal a été faite selon deux approches complémentaires : 1) approche empirique : analyse de mesures expérimentales sur un grand nombre de feuilles 2) approche numérique : simulation des propriétés optiques des feuilles à partir d'un modèle

Des mesures expérimentales de réflectances foliaires, suivies de dosages de chlorophylle et mesures de LMA que j'ai réalisées pendant mon DEA ont permis de mettre en évidence de façon empirique les régions du spectres les plus sensibles à ces variables. Les indices de réflectances sont des combinaisons mathématiques de réflectances dans certaines longueurs d'ondes qui sont bien corrélées à une caractéristique donnée. Par exemple, un indice de réflectance de type « différence normalisée » est une combinaison de deux réflectances dans deux bandes spectrales de type :

$$ND = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}$$

De nombreuses « formes » d'indices et longueurs d'ondes choisies existent en fonction de la variable à estimer. Des indices de réflectances plus complexes utilisent la dérivée des spectres, les points d'inflexion, ou des modifications empiriques des spectres.

Après une revue bibliographique de l'ensemble des indices de réflectances corrélés au contenu en chlorophylle obtenus dans la littérature (le Maire et al. 2004), nous avons testés l'ensemble de ces données sur des spectres de réflectances foliaires mesurés. Il est apparu qu'un grand nombre d'indices de réflectance existaient dans la littérature (plus de 60). Testés sur nos données expérimentales, seuls une dizaine de ces indices donnaient des résultats satisfaisants en termes de prédiction (le Maire et al. 2004). Ceci s'explique en grande partie parce que ces indices de réflectances avaient été calibrées sur des feuilles d'espèces différentes, avec des gammes de variabilités différentes, avec des instruments différents, etc. La généralité de ces indices était donc faible pour la plupart de ces indices. Or cette généralité est nécessaire pour une approche multi-espèce et multi-capteurs. Nous avons donc utilisé un modèle simulant la réflectance foliaire, le modèle PROSPECT (Jacquemoud and Baret 1990), pour tester le degré de généralité des indices de réflectance trouvés dans la littérature. En effet, le modèle PROSPECT est un modèle semi-mécaniste qui utilise des coefficients d'absorption spécifiques de certaines molécules (eg. Chlorophylle, eau) ou d'un ensemble de molécules (e.g. matière sèche totale), ainsi qu'un paramètre de structure foliaire (nombre de couches de cellules) pour simuler un spectre de réflectance. Ce modèle avait été testé de nombreuses fois sur différentes espèces et se montrait assez général. En testant les indices de réflectance de la littérature sur des spectres simulés, nous sommes arrivés à la même conclusion que précédemment : de nombreux indices de réflectances de la littérature n'étaient pas génériques (le Maire et al. 2004). Le modèle PROSPECT a également permis de comprendre le « comportement » de certains indices de réflectance, comme par exemple le REIP (red-edge inflexion point) par rapport au contenu en chlorophylle. En conclusion, il a été montré que certains indices de réflectance bien choisis donnent des résultats plus précis pour la prédiction de la chlorophylle que des méthodes plus complexes (REIP, dérivées de spectres, etc.), à la fois sur nos données expérimentales et sur les spectres simulés.

Un premier essai de calibration d'indice spectral « générique » directement à partir de simulations PROSPECT a été mis au point, avec des résultats assez mitigés (le Maire et al. 2004). Le modèle PROSPECT, qui avait été déjà partiellement modifié pour ce travail, a été profondément repris lors de ma thèse et celle de Jean-Baptiste Feret, via entre autre une nouvelle calibration des spectres d'absorption spécifiques, des indices de réfractances, une amélioration de la résolution spectrale et la prise en compte des caroténoïdes (Feret et al. 2008).

Grâce à cette nouvelle version, un nouveau test de calibration d'indices spectraux génériques à l'échelle foliaire a été entrepris et publié en 2008 (le Maire et al. 2008). Cette fois, l'analyse a été faite pour des indices de chlorophylle et de LMA à l'échelle foliaire. Les meilleurs indices obtenus sur la

base de données des spectres simulés ont ensuite été appliqués sur des données expérimentales indépendantes, avec de bons résultats. Comme ces indices de réflectances ont été calibrés sur un très grand nombre de spectres, en faisant varier l'ensemble des paramètres d'entrée de PROSPECT, on suppose qu'ils sont plus génériques que ceux calibrés sur des données expérimentales uniquement. Cette méthode a également été utilisée sur les autres caractéristiques foliaires (voir Encadré 1). En continuation de ces travaux, nous avons récemment travaillé avec Jean-Baptiste Féret sur l'estimation de la masse surfacique et contenu en eau des feuilles, sur 6 bases de données différentes. Nous avons montré que l'inversion de PROSPECT donne de très bons résultats, de manière générique à travers de très nombreuses espèces, si l'inversion intègre une pondération des réflectances les plus importantes (Féret et al. in prep).

Si l'échelle foliaire est intéressante, c'est entre autre parce qu'elle nous permet de mieux comprendre l'origine du signal « chlorophylle » à une échelle supérieure, comme sur un couvert végétal. La réflectance du couvert est certes fonction de la réflectance foliaire (et donc des caractéristiques foliaires), mais également de l'arrangement des feuilles dans l'espace (leur surface, leurs angles, leur distribution) et d'autres éléments comme la réflectance du sol, des branches, du tronc. A noter que les feuilles peuvent avoir des propriétés optiques différentes au sein d'un couvert (différentes espèces, gradients verticaux, différences feuilles d'ombre/ feuille de lumière, etc.). Ainsi, la relation entre un indice de réflectance et la chlorophylle à l'échelle de la feuille n'est pas nécessairement transposable à l'échelle du couvert. Par contre, un indice bien corrélé à la chlorophylle à l'échelle du couvert doit être aussi corrélé à la chlorophylle à l'échelle de la feuille (même si la corrélation est plus faible que le meilleur indice à cette échelle). L'analyse conjointe des deux échelles permet donc de 1) mieux comprendre les composantes importantes dans le signal à l'échelle du couvert ; 2) déterminer le niveau de généralité des indices à l'échelle du couvert ; 3) tester l'influence des paramètres du couverts influençant les indices spectraux.

A l'échelle du couvert, il est encore plus complexe d'obtenir un jeu de données expérimental suffisamment grand pour calibrer des indices de réflectances de façon empirique. La généralité des indices de réflectances trouvés dans la littérature sont de ce fait encore plus questionnable. Une approche de tests d'indices de réflectance sur un modèle de réflectance à l'échelle du couvert est donc souhaitable avant une utilisation directe de ces indices sur des données expérimentales. Pour cela, j'ai utilisé le modèle PROSPECT couplé avec le modèle SAIL (Verhoef 1984) (modèle PROSAIL (Jacquemoud et al. 2009)). Ce dernier modèle prend en compte les réflexions multiples qui existent entre les feuilles dans un couvert, en fonction de leurs surfaces, de leurs angles et de leur agrégation. Une base de données de spectres de réflectances de couvert simulés et représentant une grande gamme de situations a permis de tester des indices de chlorophylle et de LAI de la littérature, et de calibrer des indices de chlorophylle, de LMA et de LAI (le Maire et al. 2008). Il est à noter qu'un bruit blanc gaussien de quelques pourcent doit être ajouté aux spectres simulés pour éviter une sélection de longueurs d'ondes trop proches. Les indices de réflectances ainsi trouvés ont été testés sur trois jeux de données expérimentaux :

- des mesures spectrales réalisées avec un spectromètre sur un « mini-couvert » de hêtre évoluant dans le temps
- des mesures spectrales réalisées depuis deux tours à flux
- des données hyperspectrales issues du satellite Hyperion, sur un réseau de parcelles en forêt de Fontainebleau.

L'ensemble de ces données ont été acquises lors de ma thèse, et leur traitement et analyse est décrite dans (le Maire et al. 2008). Lorsque les meilleurs indices de réflectances obtenus avec PROSAIL sont

utilisés sur ces données expérimentales, la prédiction de la chlorophylle, du LMA et de l'indice foliaire sont corrects (par rapport à la précision nécessaire pour une utilisation dans un modèle simulant le bilan de carbone de la parcelle). A l'issue de ce travail, s'il a été montré que des indices de réflectances pour la chlorophylle, pour le LMA et pour l'indice foliaire existent à l'échelle du couvert (voir Encadré 1), il a également été montré qu'une calibration de la relation entre la caractéristique et l'indice de réflectance est nécessaire pour éviter des biais éventuels. En effet, la généralité souhaitée dans la base simulée d'étalonnage des indices implique une moindre adaptation à la situation locale. En conclusion, la calibration de l'indice de réflectance par un modèle lui donne une généralité, car il est alors basé sur des propriétés réelles du couvert (par opposition à une corrélation indirecte), généralité nécessaire pour une application spatialisée. Cependant, une calibration locale entre l'indice de réflectance et la caractéristique biophysique du couvert reste nécessaire pour obtenir une précision suffisante (le Maire 2012; le Maire et al. 2008). L'utilisation d'une base de données plus réaliste, i.e. en adéquation avec la variabilité des couverts observés dans les données sur lesquels l'indice sera appliqué, permettrait d'obtenir une régression entre l'indice et la caractéristique étudiée non biaisée. C'est cette approche que j'ai développée plus tard dans un travail sur l'indice foliaire, qui sera décrit dans un chapitre suivant II.2.2 (le Maire et al. 2012).

On peut voir dans cette méthode de calibration d'indice et de la régression entre l'indice et la caractéristique étudiée sur une base de données de spectres simulés une façon d'inverser le modèle de transfert radiatif. L'inversion d'un modèle permet d'estimer les paramètres d'entrée nécessaires au modèle pour simuler une réflectance (ou un indice de réflectance) le plus proche possible de la réalité mesurée. Il existe de nombreuses méthodes dans la littérature pour inverser un modèle de transfert radiatif : méthodes itératives de recherche de minimums, méthodes basées sur une recherche dans une base de données préalablement simulée (Look-up table), méthodes basées sur la calibration de régressions non paramétriques (réseau de neurones, random Forest, etc.), etc. Il est donc intéressant de comparer cette méthode d'inversion de modèle basée sur des indices de réflectances par rapport à d'autres méthodes d'inversion ou d'autres méthodes empiriques. C'est ce qui a été fait dans Atzberger et al. (2015) et Féret et al. (in prep). Dans le premier travail, la méthode d'inversion du modèle PROSAIL basée sur la calibration des indices de réflectance et de la régression entre l'indice et la caractéristique étudiée (ici l'indice foliaire de prairies) donne une moins bonne précision qu'une inversion du modèle par LUT. Cependant, si la régression entre l'indice de réflectance et la caractéristique est calibrée localement, la précision devient comparable à l'inversion par LUT, voire meilleure. Le nombre de données nécessaires à la calibration de cette régression n'est pas nécessairement grand et peut être obtenu par stratification préalable (en choisissant de mesurer des parcelles ayant des indices de réflectances contrastés). A noter qu'une méthode entièrement empirique de calibration d'indice à partir des mesures de spectres de réflectances et des mesures de terrain du LAI a fait ressortir des longueurs d'ondes habituellement corrélées à l'eau dans la végétation. Ainsi, la corrélation empirique obtenue avec le LAI pour un tel indice est indirecte car elle provient probablement de la bonne corrélation sur ce jeu de données entre le LAI et le contenu en eau de la végétation (Atzberger et al. 2015). Ainsi, la recherche de généralité, c'est-à-dire d'une méthode basée sur la physique du signal par exemple via un modèle, et reliant la variable au signal de réflectance de façon mécaniste, peut parfois conduire à des estimations moins efficaces qu'une méthode empirique calibrée sur un jeu de données suffisamment important, mais le lien est « physiquement » direct. Une méthode intermédiaire serait de mieux prendre en compte les corrélations entre les paramètres d'entrée du modèle telles qu'elles sont observées sur le terrain. Une méthode d'inversion hybride, utilisant à la fois les mesures in situ et les modèles (Verrelst et al. 2015), comme celle présentée dans l'Encadré 1, permet à la fois d'obtenir une bonne précision tout en gardant une certaine généralité permettant une extrapolation locale.

Encadré 1 : Calibration d'indices de chlorophylle à différentes échelles

Dans le Maire et al. (2008), nous avons testé une méthode hybride entre empirique et mécaniste, consistant à trouver et calibrer des indices spectraux reliés au contenu en chlorophylle à partir de modèles de transfert radiatif, et de corriger éventuellement la corrélation entre indice et chlorophylle avec des mesures expérimentales. Ce travail a été fait à l'échelle foliaire et à l'échelle du couvert, et a donné des résultats satisfaisants en terme prédictifs (Figure 3). Les figures de gauche représentent la relation entre le meilleur indice calibré sur les simulations PROSPECT et PROSAIL et le contenu en chlorophylle. Les figures de droite représentent l'application de ces indices la comparaison entre les Chl prédites et mesurées. A l'échelle de la canopée, les mesures proviennent de 3 jeux de données : des mesures en proxydétection sur des couverts et mini-couverts, et des mesures issues du satellite hyperspectral Hyperion.

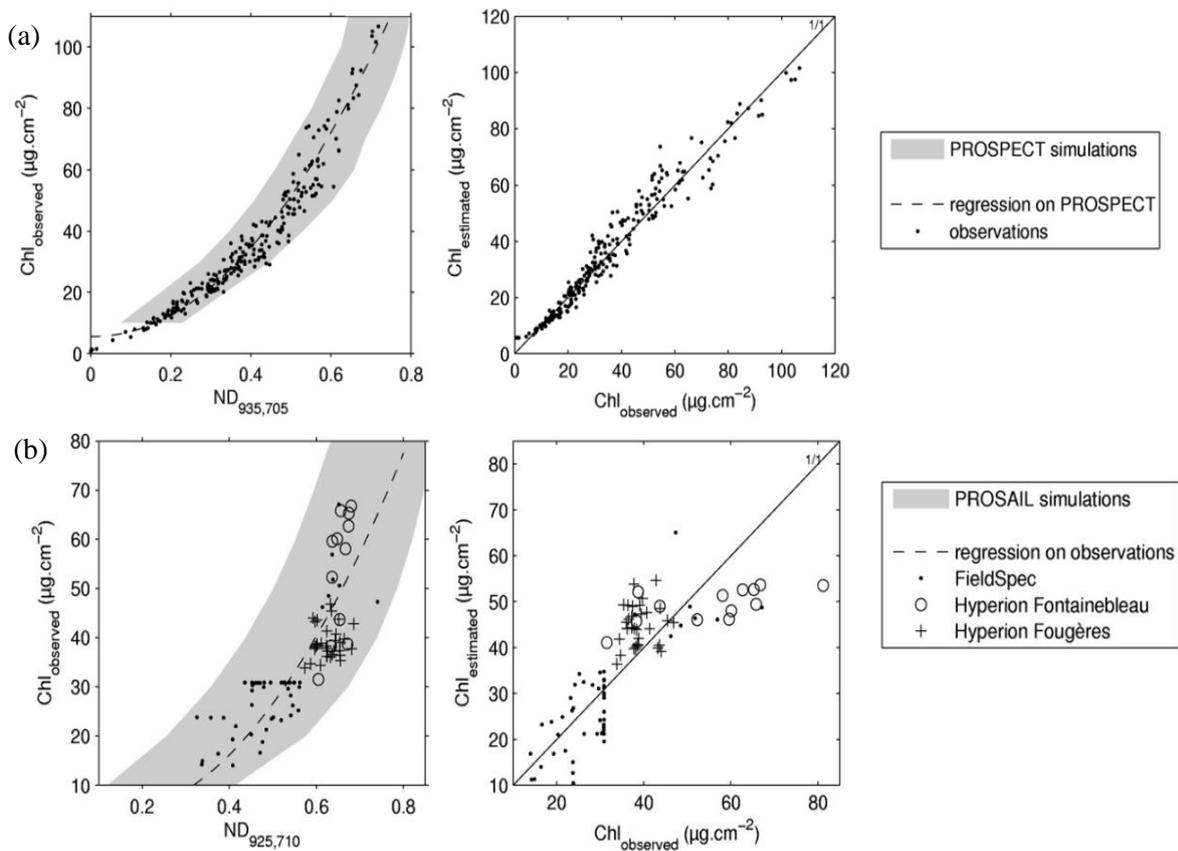


Figure 3 : Résultats de la calibration d'indices de chlorophylle (a) à l'échelle foliaire et (b) à l'échelle de couverts forestiers via les modèles PROSPECT et PROSAIL. D'après le Maire et al. (2008).

Remarques générales

Dans ce chapitre, l'apport de la télédétection hyperspectrale et de la modélisation du transfert radiatif pour l'étude des variabilités spatiales et temporelles de caractéristiques importantes du couvert ont été mises en avant. La méthode basée sur les indices de réflectance est une méthode intéressante pour

analyser le signal de réflectance et quantifier certaines variables. Etant également basée sur un modèle de transfert radiatif, cette méthode a les mêmes limitations que d'autres méthodes d'inversion de modèle : par exemple, le choix du modèle de transfert radiatif (2D vs 3D par exemple), l'espace des paramètres possibles, les corrélations entre paramètres, etc. Une conclusion générale est qu'on ne peut pas faire l'impasse sur les mesures de terrain, quelque soient les méthodes employées, ne serait-ce qu'en validation. Il semble que les approches couplées modélisation – expérimentation soient les plus efficaces pour l'estimation de caractéristiques structurales ou biochimiques du couvert.

Les images hyperspectrales ont cet avantage de couvrir l'ensemble du spectre : le choix des longueurs d'ondes utilisées dans les régressions (paramétriques via un indice de réflectance, ou non paramétrique via un réseau de neurone par exemple) n'est donc plus contraint a priori mais peut être choisi a posteriori en fonction de la caractéristique étudiée et du site d'étude. Par exemple, pour obtenir une information sur le contenu en chlorophylle du couvert ou son LMA, des bandes spectrales fines sont nécessaires (et généralement pas disponibles sur les images satellites classiques). Cependant, pour tirer au mieux parti de l'information contenue dans le spectre de réflectance, l'utilisation d'un modèle de transfert radiatif fin, comme par exemple le modèle 3D DART, ainsi qu'un jeu de données de terrain conséquent pour appréhender non seulement la variabilité des caractéristiques mais également leurs corrélations, est nécessaire. Les futurs satellites avec de nombreuses bandes spectrales (comme Venüs) voire même hyperspectraux (projet HypSIRI) permettront de mettre en œuvre ces méthodologies sur nos sites d'études tropicaux.

II.2.2. Estimation spatio-temporelle de l'indice foliaire et du fAPAR

Une des variables structurales les plus étudiées est l'indice foliaire (LAI), la surface de feuilles vertes d'un couvert par unité de surface de sol (Watson 1947). Cet indice foliaire est une variable essentielle du fonctionnement de la végétation. Les réflectances dans les bandes spectrales rouges et proche infrarouge varient en fonction de l'indice foliaire : quand le LAI augmente, la réflectance dans le rouge diminue alors que la réflectance dans le proche infrarouge augmente, les deux bandes tendant vers une asymptote. La plupart des indices de réflectance utilisés pour quantifier le LAI utilisent ces deux bandes spectrales, comme le NDVI $(NIR-R)/(NIR+R)$. Les travaux présentés dans le chapitre précédent en télédétection hyperspectrale, ont montrés que des indices de réflectances utilisant d'autres longueurs d'onde peuvent être utilisés (le Maire 2012; le Maire et al. 2008). De même, l'inversion de modèles de transfert radiatif donne de bons résultats (Atzberger et al. 2015). Le LAI est utilisé différemment dans les modèles de bilan de carbone. Dans les modèles CASTANEA et ORCHIDEE, c'est l'indice foliaire maximal de l'année qui est utilisé, la dynamique temporelle étant obtenue via le bilan de carbone (allocation de carbohydrate vers les feuilles) et des modèles phénologiques. Une fois le LAI maximal atteint, les allocations dans le modèle sont modifiées. Ainsi, l'estimation de l'indice foliaire à une date précise de l'année permet de paramétrer le modèle (par exemple, une mesure en juillet pour une parcelle de hêtre ou de chêne pour CASTANEA, comme dans (le Maire et al. 2005)). D'autres modèles, au contraire, n'ont pas de valeurs de LAI maximal directement en entrée : le modèle simule alors le LAI à chaque pas de temps. Ce type de modèle est alors très sensible aux coefficients d'allocation des carbohydrates vers les feuilles. Les mesures de LAI (sur le terrain ou via des images satellitaires pour une application à plus grande échelle), peuvent alors être utilisées comme validation du modèle, ou pour calibrer les coefficients d'allocations de ce modèle. Une approche par forçage du modèle est également possible, en prescrivant au modèle le LAI

à chaque pas de temps, les allocations étant alors modifiées en conséquence (le Maire et al. 2010b; Marsden et al. 2013). Enfin, dans d'autres modèles plus simples, comme les modèles de type « Monteith », ce n'est pas l'indice foliaire qui est utilisé mais le fAPAR (fraction absorbée du rayonnement photosynthétiquement actif). Comme le LAI, ce fAPAR peut être requis pour certaines dates clés ou en continu.

Les travaux que j'ai menés sur l'estimation de l'indice foliaire grâce à des images satellites acquises dans le visible utilisent plusieurs techniques différentes :

Indices de réflectances

Nous avons montré dans le Maire et al. (2008) que des indices relativement simples, basés sur deux longueurs d'ondes, sont bien corrélés au LAI. Avec les indices de réflectances, les graphiques LAI mesurés vs. Prédits présentent généralement une hétéroscédasticité, avec une estimation plus précise pour les valeurs faibles que pour les valeurs fortes de LAI. En effet, les spectres de réflectance foliaires, et donc également les indices, montrent des saturations au-delà d'un indice foliaires d'environ 3. Des indices de réflectances calibrés spécifiquement pour un type de couvert végétal permettent de maximiser l'information sur l'indice foliaire sur l'ensemble de la gamme de variabilité de celui-ci. Par exemple, dans le Maire et al. (2012), un indice de réflectance calibré spécifiquement pour les plantations d'Eucalyptus, qui se trouve être proche d'un indice publié indépendamment dans la littérature (GESAVI), permet d'obtenir des estimations correctes d'indices foliaires entre 2 et 6 avec une incertitude de l'ordre de 12 %. Un travail sur l'estimation du fAPAR de parcelles d'Eucalyptus à partir du NDVI, réalisé lors de la thèse de Claire Marsden, est présenté dans l'Encadré 2.

Dans des plantations agroforestières au Costa-Rica, l'estimation de l'indice foliaire par télédétection est complexe car le couvert est très hétérogène : arbres d'ombrages isolées à des densités variables, plantations de caféiers en rangs, gestion des arbres et des caféiers par des tailles, variabilités locales du LAI des caféiers à l'intérieure d'une parcelle. Le travail de Simon Taugourdeau lors de son M2 a eu pour objectif de calibrer des relations LAI-NDVI empiriquement à partir de mesures sur le terrain, en collaboration avec Olivier Roupasrd (UMR Eco&Sols). L'utilisation d'images très haute résolution spatiale (comme QuickBird et Worldview) ont permis de mettre en place une méthodologie d'up-scaling de la relation LAI-NDVI depuis des mesures locales jusqu'à un pixel de 250 mètres de résolution (pixel du satellite MODIS) (Taugourdeau et al. 2014). La première étape a été de comparer des mesures de LAI des caféiers faite au LAI2000 (Licor) à des mesures de LAI in-situ obtenues par comptage de feuilles (multipliée par la surface moyenne d'une feuille). La mesure de LAI 2000 étant alors validée, la deuxième étape est la calibration d'une relation LAI-NDVI haute résolution. Des transects de LAI2000 ont été réalisés dans des zones contrastées de la ferme. Les NDVI correspondants, calculés sur les images très haute résolution, sont aussi extraits et corrélés au LAI mesurés. La troisième étape est la calibration de la relation LAI-NDVI MODIS. Pour cela, la relation LAI-NDVI haute résolution est appliquée sur l'ensemble de la ferme, et les valeurs moyennes de LAI sont extraites pour chaque pixel MODIS. Une relation LAI moyen vs NDVI MODIS est alors calibrée à cette date. En faisant l'hypothèse que cette relation ne change pas beaucoup au cours du temps, elle peut alors être appliquée sur une série temporelle de données MODIS pour suivre l'évolution du LAI de la ferme au cours du temps. Ces séries temporelles ont ensuite été utilisées dans différents modèles simulant le bilan hydrique du bassin versant ou encore la production en grains de la ferme (Taugourdeau et al. 2014).

Indices de texture

Une autre méthode développée, plus complexe, repose sur une corrélation entre l'indice foliaire d'une parcelle et l'écart type des NDVI des pixels inclus dans cette parcelle (un indicateur de la « texture » du NDVI). Cette relation avait été observée par Davi et al. (2006c) sur des parcelles de la forêt de Fontainebleau, et nous avons poursuivi ce travail. En analysant plus en détail les raisons de cette corrélation (le Maire et al. 2006), nous avons mis en évidence que cette corrélation a pour origine 1) la distribution intra-parcelle du LAI et son évolution en fonction du LAI moyen de la parcelle et 2) la saturation de la relation entre le LAI et le NDVI. En effet, la variabilité spatiale du LAI est faible pour des LAI faibles, atteint un maximum pour des parcelles de LAI intermédiaires, et diminue ensuite pour des LAI élevés. D'autre part, pour des LAI élevés, la plupart des pixels intra-parcelle ont des NDVI dans cette zone saturante du signal, et leur écart-type est donc faible. Ainsi, l'écart-type du NDVI diminue avec le LAI moyen de la parcelle. La corrélation est meilleure que celle avec le NDVI moyen car elle présente beaucoup moins de saturation. Si la relation change avec la résolution de l'image, elle est par contre très conservée entre les capteurs (pour une même résolution). En effet, l'écart type du NDVI est peu sensible à des gains et offset dans les NDVI entre plusieurs images. Ce type de différences entre les capteurs peut pourtant être important, comme nous l'avons montré dans Soudani et al. (2006), avec des différences de NDVI de l'ordre de 10% par exemple entre le capteur Ikonos et SPOT à cause de différence dans les réponses spectrales des capteurs. Il est à noter que cette méthode basée sur les écart-types a permis d'obtenir les LAI maximum annuels utilisés par CASTANEA appliqué spatialement (le Maire et al. 2005). Enfin, avec le développement des analyses d'image « orientées-objet », ce type d'analyse texturale pourrait-être utilisée à plus grande échelle, par exemple sur un massif forestier. Cependant, des tests de cette méthode sur une plantation d'Eucalyptus ont montrés des résultats plus contrastés : l'évolution de la variabilité du LAI en fonction du LAI moyen n'est pas aussi claire que dans les parcelles de la forêt de Fontainebleau. Ainsi, la structure de la parcelle et le mode de sylviculture ont une influence sur la variabilité intra-parcelle du LAI, qu'il serait intéressant d'étudier par exemple avec des images de très haute résolution spatiale.

Inversion de modèle de transfert radiatif

La troisième méthode repose sur l'inversion de modèle de transfert radiatif. Le suivi précis d'un réseau de parcelles d'Eucalyptus au Brésil (le Maire et al. 2011b) nous a montré que : l'indice foliaire varie en fonction du temps, avec une diminution en saison sèche entre Juin et Septembre et une augmentation en saison humide d'Octobre à Mai ; La masse spécifique des feuilles varie entre les saisons, avec des SLA moyens plus faibles en fin de saison des pluies, et varie aussi avec l'âge de la plantation, avec des SLA plus élevés pour les parcelles jeunes que pour les parcelles plus âgées; des angles foliaires qui augmentent entre 0 et 3 ans, puis qui diminuent jusqu'à la coupe à 6 ans ; un taux de couverture de la parcelle qui augmente la première année jusqu'à la fermeture du couvert. Toutes ces caractéristiques structurales influencent les réflectances des couverts. L'utilisation d'un unique indice de réflectance comme le NDVI tout au long de la rotation n'est donc pas possible, car celui-ci peut varier indépendamment de l'indice foliaire. Il faudrait connaître l'influence de chacun de ces changements structuraux sur le NDVI pour corriger celui-ci, ou plutôt corriger la régression LAI vs. NDVI. S'il est possible de faire cela empiriquement, cela nécessite pourtant un grand nombre de données. La meilleure option est d'utiliser un modèle de transfert radiatif, qui prend en compte l'ensemble de ces facteurs pour simuler la réflectance (donc le NDVI) du couvert. Dans ce travail, nous avons inversé le modèle couplé PROSPECT+SAIL+SOILSPECT sur les bandes rouges et proche infrarouge de données MODIS (produit MOD13Q2 à 250m). Nous avons fixé l'ensemble des paramètres du modèle, excepté l'indice foliaire, pour deux raisons : l'utilisation de seulement deux bandes spectrales apporte une information limitée sur le couvert ; les variables listées ci-dessus

peuvent avoir des effets similaires sur les réflectance, et il est donc difficile d'attribuer un changement de réflectance à une évolution de l'indice foliaire ou de l'angle foliaire par exemple. Une analyse de sensibilité est cependant faite par la suite sur les autres paramètres du modèle. Cette méthode s'est avérée efficace pour estimer l'indice foliaire sur des rotations entières d'Eucalyptus. La corrélation est meilleure que le meilleur indice de réflectance trouvé sur ces plantations, le GESAVI, car celui-ci ne prend pas en compte les évolutions structurales des parcelles autres que l'indice foliaire. Ces séries temporelles d'indices foliaires obtenus par inversion ont été utilisées dans le modèle G'Day (Marsden et al. 2013), présenté dans les chapitres II.3.1 et II.3.3.

Plus récemment, la thèse de Julianne Oliveira a porté sur l'utilisation d'un modèle de transfert radiatif tridimensionnel pour simuler les réflectances des couverts d'eucalyptus. Le modèle DART - Discrete Anisotropic Radiative Transfer model- (Gastellu-Etchegorry et al. 2015; Gastellu-Etchegorry et al. 1996) a été paramétré pour 16 géotypes d'eucalyptus contrastés en terme de structure (indices foliaires, angles foliaires, etc.) et caractéristiques biochimiques (pigments foliaires). Un premier travail a consisté à tester le modèle en sens direct en comparant les réflectances simulées avec des mesures du capteur orbital Pléiades (Oliveira et al. 2017). La paramétrisation d'un modèle de ce type peut se révéler complexe, puisque chaque arbre est décrit individuellement, voire en intégrant une variabilité structurale/biochimique au sein de chaque couronne. La représentation choisie dans ce travail est une représentation « en sucette » de chaque individu, bien adaptée pour les eucalyptus en plantations. Des gradients de propriétés optiques foliaires ont été mesurés au sein des couronnes et incorporés au modèle. Des variations d'angles foliaires ont également été prises en compte. Le test comparant les simulations DART aux mesures Pléiades ont été réalisés sur un essai clonal de grande taille : 16 géotypes très contrastés, provenant de différentes régions du Brésil et fournis par différentes entreprises, ont été plantés en 10 répétitions de 16 traitements disposées au sein d'une grande parcelle de 200 Ha (projet Eucflux). Chaque répétition fait 1.8 Ha, et la plantation avait 4.5 ans au moment de l'acquisition de l'image satellite. Les résultats, ont montrés que le modèle est capable de simuler les réflectances dans les bandes du visible et du proche infrarouge avec une erreur moyenne absolue de moins de 2% (Oliveira et al. 2017). Le modèle a été capable de simuler correctement, à une date donnée, les différences observées entre géotypes. Pour chaque géotype, les différences entre les 10 répétitions ont été plus difficiles à simuler, principalement parce que les caractéristiques structurales et biochimique des arbres étaient très proches (peu de variabilité inter-répétition), et l'incertitude du modèle était du même ordre de grandeur que la variabilité inter-parcelles des réflectances observées pour un géotype donné. Par contre, le modèle a été capable de simuler correctement les variations entre répétition quand les parcelles présentaient une variabilité inter-répétition dues à des différences de mortalité, créant une hétérogénéité dans le couvert. Une étude de sensibilité du modèle a montré dans ce travail que la variabilité des réflectances dans le visible entre les clones et les répétitions sont principalement dues à l'indice foliaire, aux propriétés optiques des feuilles et à l'orientation des rangs. Les mêmes variables influencent le proche infrarouge, avec en plus un plus fort effet de la dimension des arbres. Les angles foliaires, les réflectances des troncs ainsi que du sol ont un effet moindre, bien que leur variabilité inter-géotype soit élevée. Ces résultats ont également été obtenus à d'autres âges de la plantation (document de thèse). En conséquence, pour des applications en inversion, par exemple pour estimer les indices foliaires, il apparaît important de prendre en considération les variabilités entre géotypes (propriétés optiques foliaires, dimension des arbres) et les différences spatiales pour un géotype donné (âge, dimension des arbres et orientation des rangs). Le deuxième article de thèse de Julianne Oliveira, en cours de préparation pour une soumission proche (première version correspondant à son troisième chapitre de thèse), porte sur une méthode hybride d'inversion du modèle DART pour estimer les indices foliaires, en utilisant les indices de végétation calibrés sur les simulations. Dans ce travail, nous avons testé si une unique relation LAI-indice de végétation peut être

utilisée pour tous les génotypes, ou si les génotypes peuvent être groupés en fonctions de certaines caractéristiques, s'il est nécessaire d'intégrer la géométrie de la mesure comme une variable explicative supplémentaire au modèle, et si l'orientation des rangs doit être prise en compte ou non. Même si ces travaux sont encore en cours, nous avons montré que la calibration LAI-SVI clone spécifique reste la plus précise mais qu'une relation générique est envisageable. L'effet de l'orientation des rangs est important, et explique en partie la variabilité saisonnière des indices de végétation observés au début de la rotation, quand les effets d'ombrages dans la plantation sont les plus marqués. Si cet effet n'est pas pris en compte, les variations saisonnières du LAI pourraient être surestimées. Ce travail nous permettra à l'avenir de pouvoir affiner les modèles d'estimation du LAI des plantations d'eucalyptus.

Encadré 2 : Estimation du fAPAR de plantation d'eucalyptus

Ce travail porte sur des plantations d'eucalyptus à croissance rapide au Brésil. Les parcelles sont suffisamment grandes pour contenir plusieurs pixels MODIS de 250 m. L'écophysologie de ces plantations sera présentée dans la deuxième partie du manuscrit. Dans cet encadré, l'accent est mis sur une partie du travail de thèse de Claire Marsden (Marsden et al. 2010) sur l'utilisation de séries temporelles de NDVI MODIS pour estimer la fraction de rayonnement photosynthétiquement actif absorbé (fAPAR). L'estimation du APAR à partir du NDVI est détaillé dans le Tableau 3.

Tableau 3: Estimation du rayonnement photosynthétiquement actif absorbé (APAR) d'un couvert à partir du NDVI. f_{max} et k_d de l'équation 10 sont obtenus à partir d'analyses de photos hémisphériques (Marsden et al. 2010); α est obtenu en utilisant les valeurs de GF (photos hémisphériques) et NDVI mesuré la même journée. NDVI_{veg} et NDVI_s sont obtenus sur les séries temporelles d'images (Marsden et al. 2010) ; $k(\theta_v)$ est considéré constant pour des angles de visées zénithaux faibles ; α_i , τ_i et ρ_s sont estimés à partir de mesures indépendantes

N°	Equation	Explication
1	$GF(\theta) = \exp[-k(\theta)AP]$	Fractions de trous GF pour un angle zénithal θ donné est fonction de AP, l'indice de surface de plante effectif (« effective plant area index ») et $k(\theta)$ le coefficient d'extinction (Anderson 1966; Warren-Wilson 1963). Couvert homogène infini (milieu turbide).
2	$AP = PAI \times \lambda$	AP est le produit d'un facteur d'agrégation (« clumping factor », λ) et de l'indice de surface de plante (surface des feuilles, branches et troncs par mètre carré de sol) (Chen and Black 1991; Kucharik et al. 1999). Ici PAI est supposé égal au LAI
3	$k(\theta) = \frac{G(\theta)}{\cos \theta}$	Pour un couvert homogène avec une distribution spatiale aléatoire des feuilles dans le couvert, le coefficient d'extinction est fonction de la fraction de feuille projetée dans la direction θ , $G(\theta)$
4	$G(\theta) = \int_0^{\pi/2} A(\theta, \theta_1)g(\theta_1) d\theta_1$	Avec θ_1 l'inclinaison foliaire, $A(\theta, \theta_1)$ la projection selon θ des feuilles ayant un angle θ_1 (Wilson 1960) et $g(\theta_1)$ la distribution d'angle foliaire, qui peut être simulée par une distribution beta (Goel and Strebel 1984).
5	$\frac{NDVI(\theta_v) - NDVI_{veg}}{NDVI_s(\theta_v) - NDVI_{veg}} = \exp[-k_{NDVI}(\theta_v)AP]$	L'indice de végétation NDVI mesuré à un angle de visée θ_v peut être empiriquement relié à l'indice de surface de plante selon cette relation (Baret et al. 1995). NDVI _{veg} est le NDVI maximal, c'est-à-dire le NDVI d'une végétation dense couvrant complètement le sol, quand AP tends vers l'infini, et supposé indépendant de l'angle de visée. NDVI _s est le NDVI du sol nu, et k_{NDVI} est un coefficient d'extinction qui dépend de la structure de la canopée et de l'angle de visée.

6	$GF(\theta) = \left(\frac{NDVI(\theta_v) - NDVI_{veg}}{NDVI_s(\theta_v) - NDVI_{veg}} \right)^{k(\theta)/k_{NDVI}(\theta_v)}$	En combinant les équations 1 et 5, on obtiens cette relation entre les fractions de trous et le NDVI (Baret et al. 1995)
7	$k_{NDVI}(\theta_v) = \frac{k(\theta_v)}{\alpha}$	Les coefficients d'extinctions des équations 1 et 5 sont différents, mais pour un angle θ_v donné ils varient de manière proportionnelle pour des changements de structure de canopée
8	$GF(\theta) = \left(\frac{NDVI(\theta_v) - NDVI_{veg}}{NDVI_s(\theta_v) - NDVI_{veg}} \right)^{\alpha(k(\theta)/k(\theta_v))}$	En remplaçant k_{NDVI} de l'équation 7 dans l'équation 6, on obtient alors cette équation.
9	$f_d = 2 \int_0^{\pi/2} (1 - GF(\theta)) \cos \theta \sin \theta d\theta$	f_d , la fraction de rayonnement PAR diffus intercepté est constante dans une journée et ne dépend que de la structure du couvert. Elle est calculée en intégrant les fractions de trous directionnels entre 0 et $\pi/2$ (Welles and Norman 1991)
10	$f_d = f_{max} \times (1 - \exp(-k_d \times AP))$	f_d , peut aussi être estimée à partir de la surface foliaire effective AP, du coefficient d'extinction du rayonnement diffus k_d , et d'une valeur asymptotique f_{max} (Asrar et al. 1984; Hipps et al. 1983; Nouvellon et al. 2000)
11	$f_d = f_{max} \times [1 - GF(\theta)^{k_d/k(\theta)}]$	Combinaison des équations 1 et 10
12	$f_d = f_{max} \times \left[1 - \left(\frac{NDVI - NDVI_{veg}}{NDVI_s - NDVI_{veg}} \right)^{\alpha(k_d/k(\theta_v))} \right]$	Combinaison des équations 8 et 11
13	$f_b(\theta_s) = 1 - GF(\theta_s)$	La fraction de rayonnement PAR direct intercepté est fonction de la structure du couvert et de l'angle solaire θ_s
14	$f_b(\theta_s) = 1 - \left(\frac{NDVI - NDVI_{veg}}{NDVI_s - NDVI_{veg}} \right)^{\alpha(k(\theta_s)/k(\theta_v))}$	Combinaison des équations 8 et 13
15	$fPAR(t) = P_d(t) f_{d,RS} + (1 - P_d(t)) f_{b,RS}(t)$	A un temps t donné, $fPAR(t)$ est la somme de f_d et f_b , pondérés par la fraction de rayonnement PAR diffus dans le rayonnement PAR total $P_d(t)$
16	$fAPAR(t) = \alpha_l \times \{fPAR(t) + [1 - fPAR(t) \times (1 - \rho_s) \times f_{d,RS}]\}$	Estimation de $fAPAR$ à partir de $fPAR$, en fonction de l'absorbance foliaire α_l , de la transmittance foliaire τ_l et de la reflectance du sol ρ_s (Bégué 1992)
17	$APAR(t) = PAR(t) * fAPAR(t)$	Estimation finale du rayonnement absorbé au temps t, qui peut être ensuite cumulé sur une journée, une année ou la durée d'une rotation

A partir d'une série temporelle de NDVI MODIS (produit 250 m 16 jours, MOD13Q1), une série temporelle de NDVI est extraite pour chaque parcelle d'Eucalyptus sur 9 années. Pour cela, le meilleur pixel MODIS « représentatif » de la parcelle est choisi (cf Appendix A de Marsden et al. (2010)). Les données de meilleures qualités sont gardées. Les mesures NDVI sont ensuite interpolées via un « smoothing spline » pour obtenir des estimations journalières, et utilisées dans les équations 12 et 14 (un angle de visée moyen et faible est alors utilisé). Une série temporelle de rayonnement PAR mesurée par station météorologique est ensuite utilisée pour appliquer les équations 15, 16 et 17 et finalement obtenir le rayonnement PAR absorbé du couvert. Celui-ci est intégré sur différentes périodes et comparé à la production en bois de cette même période (Figure 4)

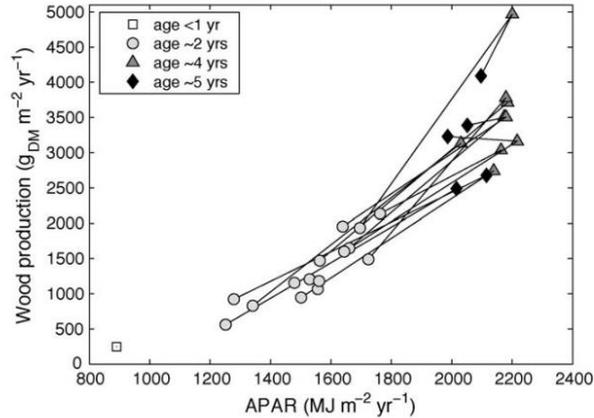


Figure 4 : Relation entre le APAR annuel (obtenus via la série temporelle de NDVI MODIS) et la production de bois annuelle (obtenue à partir d’inventaires forestiers). Les lignes relient les parcelles entre des inventaires successifs.

Il existe une bonne corrélation entre le APAR et la production de bois au début de la plantation, jusqu’à 2 ans ($r^2=0.78$). A 4 et 5 ans, cette corrélation n’existe plus entre les parcelles, la production de biomasse est alors indépendante du rayonnement absorbé. Cependant, on peut noter que les parcelles qui avaient une production élevée à 2 ans maintiennent cette production élevée par la suite. Aussi, le rayonnement absorbé à 5 ans est de manière générale inférieure à celui à 4 ans, tout comme la production. Ainsi, pour une parcelle donnée, la relation entre production et APAR semble maintenue au cours du temps. La variabilité inter-parcelle n’est plus expliquée par l’absorption du rayonnement après 2 ans. En conclusion, la variabilité inter-parcelle de la croissance est principalement limitée par le rayonnement aux premiers stades de croissance de la parcelle (jusqu’à sa fermeture). Une fois le couvert fermé, d’autres facteurs expliquent les différences de croissance entre les parcelles, mais le rayonnement absorbé reste un facteur explicatif potentiel pour chaque parcelle. Nous verrons dans d’autres chapitres (II.3.2 ;II.3.3) que ces limitations, dans ces peuplements fertilisés, est principalement liée à l’eau disponible (Christina et al. 2017; Nouvellon et al. 2011; Ryan et al. 2010), qui explique la variabilité spatiale, ainsi que des différences de matériel génétique (allocation). Cependant, on peut voir que la production de bois initiale est également corrélée à la production de bois finale à la récolte. Ainsi, l’information contenue dans les deux premières années de la série temporelle de NDVI, est un bon indicateur de la productivité moyenne de la parcelle (Marsden et al. 2010). Cette observation a permis de mettre au point par la suite une méthode pour estimer la biomasse des parcelles en utilisant uniquement les séries temporelles de NDVI comme source d’information (le Maire et al. 2011a).

Remarques générales

Les différents travaux menés sur l’estimation de l’indice foliaire et le fAPAR ont montrés avant tout la difficulté d’obtenir une information précise sur ces variables, et la nécessité d’adapter les méthodes selon les cas d’études et les images utilisées. Si l’utilisation d’indice de réflectance reste la méthode la plus simple, elle montre clairement des limites lorsque la variabilité structurale du couvert végétal étudié est grande et indépendante du LAI. Les méthodes basées sur les modèles de transfert radiatifs sont alors plus indiquées, mais nécessitent de facto une meilleure connaissance du système étudié, pour contraindre les inversions. Les modèles de transfert radiatifs tridimensionnels comme DART (Gastellu-Etchegorry et al. 2004) peuvent mieux prendre en compte les caractéristiques structurales de parcelles. Le travail débuté par Julianne Oliveira sur ce modèle, appliqué à un essai clonal de 16

clones structurellement très différents, permettra de poursuivre l'amélioration des méthodes pour estimer l'indice foliaire : images acquises à différents angles de visée, contraintes a priori sur les variables structurales, comparaison de méthodes d'inversion, etc.

II.2.3. Les séries temporelles d'images satellites pour la classification, l'analyse phénologique et le suivi de la gestion des écosystèmes forestiers

L'analyse de séries temporelles d'images satellites permet d'obtenir des informations spatialisées sur la phénologie des couverts forestiers, et sur certaines pratiques de gestion culturale/sylvicoles pouvant apparaître dans des changements de réflectances de couverts. Les dates associées aux stades phénologiques d'apparition et de chute des feuilles (débourrement et sénescence) des forêts décidues sont importantes car elles conditionnent la durée de la saison de végétation, facteur très important dans l'estimation des bilans de carbone et d'eau d'une parcelle à l'échelle annuelle (Crucifix et al. 2005). Sous les tropiques, les dates phénologiques portent plus sur l'effet des saisons sèches sur la quantité de feuilles du couvert (Zhang et al. 2005). On a donc la date de démarrage de la diminution de la biomasse foliaire, et la date de reprise de la croissance foliaire. Si ces dates ne sont pas utilisées directement dans les modèles de bilan de carbone, elles permettent soit de paramétrer localement des modèles (par exemple sommes de températures, allocations, etc.), soit de valider les résultats de tels modèles.

Phénologie

Mes travaux ont principalement porté sur l'analyse de séries temporelles d'images acquises par le capteur MODIS (sur les satellites Terra ou Aqua). Ce satellite a plusieurs avantages, entre autres les données sont gratuites, la résolution moyenne (250m pour les bandes rouges et proche infrarouge) est compatible avec la taille de grandes parcelles forestières, les données sont traitées au préalable avant la mise à disposition de « produits MODIS », la couverture est quasiment globale et à une haute répétitivité temporelle (environ 2 jours). Nous avons montré dans Soudani et al. (2008) que la date de débournements de forêts décidues en France (réseau de parcelles RENECOFOR) pouvait être estimée avec une précision d'environ 8.5 jours en utilisant les données de NDVI MODIS (Produit MOD09GQK). Celles-ci doivent être au préalable filtrées, puis une sigmoïde est ajustée sur la phase de croissance du NDVI au printemps. Les corrélations entre les paramètres de cette courbe et les mesures phénologiques in-situ sont alors analysées. Plusieurs paramètres issus de l'ajustement ont été testés par rapport aux données phénologiques, comme les dates du point d'inflexion, du démarrage ou de la fin de la sigmoïde, des moyennes entre ces dates, etc. De même, deux indicateurs phénologiques mesurés in situ ont été comparés à ces paramètres correspondant à 10 (resp 90%) des arbres ayant atteint un taux de débournement d'au moins 20%. Il n'est pas évident de trouver un lien direct entre les dates mesurées in situ et les dates estimées via les séries temporelles MODIS, par contre, il peut y avoir des corrélations indirectes : dans ce cas, la date estimée avec MODIS sera biaisée d'une constante. Par exemple, le point d'inflexion sur la série temporelle de NDVI correspond probablement à un stade précoce de la croissance en LAI dans les forêts tempérées, car le signal NDVI sature rapidement, avant que l'expansion foliaire ne soit achevée.

Sur les systèmes caféiers agroforestiers, les travaux présentés dans le chapitre précédent (II.2.2) ont permis d'aboutir à une dynamique temporelle de 10 ans d'indice foliaire à l'échelle de la ferme d'Aquières au Costa-Rica (Taugourdeau et al. 2014). Les données MODIS MOD13Q2, qui sont des

données composites très utiles car déjà filtrées en amont : pour une période de 16 jours données, une image composite est générée dans ce produit en prenant pour chaque pixel la meilleure donnée sur ces 16 jours. La sélection se fait en fonction de l'enneigement et des angles de visées principalement. Les principaux résultats de l'analyse des séries temporelles sont présentes en Encadré 3. Il est à noter que des études plus précises de la dynamique de l'indice foliaire des arbres d'ombrages ont été réalisées début 2014 dans le cadre du stage de césure de Florian Rançon (SupAgro) (le Maire et al. 2014b).

Classification

L'analyse des séries temporelles de NDVI des plantations d'Eucalyptus mesurées par le capteur MODIS est très riche en information. Tout d'abord, la dynamique de croissance du NDVI suite à une plantation est très rapide, puisque le NDVI passe d'une valeur d'un sol nu (environ 0.3) à une valeur de NDVI élevée (supérieure à 0.8) en l'espace de deux ans. Cette croissance du NDVI a d'ailleurs été utilisée comme un critère de classification des plantations d'Eucalyptus et ce à l'échelle du Brésil (le Maire et al. 2014a). Quasiment aucun autre écosystème, cultivé ou non, ne présente une telle croissance sur deux années. Dans ce travail, nous avons utilisé une méthode basée sur la comparaison de séries entre des séries temporelles de référence (pixels couverts à 100% par une unique parcelle d'Eucalyptus, vérifiés in situ) et les séries temporelles à classer. Les séries de référence correspondaient aux deux premières années de la rotation de chaque parcelle, et intégraient une variabilité de clones, types de sols et climats. Plusieurs fonctions de comparaisons ont été testées, mais une des plus simples a été retenue (une variante de la distance euclidienne). Les classifications ont ensuite été comparées à plusieurs sources de données : photointerprétation d'images Google Earth, inventaires forestiers d'entreprises et classification basée sur une image Landsat. Nous avons montré que les erreurs de classification provenaient en grande partie de la résolution du satellite MODIS induisant un pourcentage élevés de pixels mélangés avec d'autres occupations de sol ou avec d'autres parcelles d'Eucalyptus d'âge différent. L'algorithme en lui-même a par contre montré une forte robustesse, une faible sensibilité aux incertitudes sur la série temporelle et à la présence de nuages. Ces conclusions ont été confirmées par une analyse plus récente faite sous Google Earth Engine, montrant que le même algorithme appliqué sur une série d'images Landsat sans re-calibration préalable donne de très bons résultats (résultats non publiés). Cette dernière étude permettra d'estimer les évolutions de surfaces plantées en Eucalyptus plus précises que celles obtenues avec MODIS. Quoi qu'il en soit, le travail publié dans le Maire et al. (2014a) est la première carte des plantations d'Eucalyptus au Brésil obtenue par analyse d'images satellites.

Gestion sylvicole

Les évènements de gestion du cycle cultural (plantation, coupe, durée de rotation et durée entre les rotations) sont des informations essentielles pour estimer le bilan de carbone et d'eau des plantations (Christina et al. 2015; Christina et al. 2016a; Marsden et al. 2013). Par exemple, la date de plantation peut avoir un impact différent sur la croissance en fonction de la saison de plantation. Une parcelle installée avant une saison sèche aura sa croissance retardée la première année (moins de surfaces foliaire donc moins de photosynthèse), alors qu'une plantation avant la saison humide pourra atteindre plus rapidement des indices foliaires élevés, et sa productivité annuelle sera ainsi améliorée (Marsden et al. 2010). La durée entre deux rotation influence la possibilité de recharge en eau du sol et de la nappe phréatique, ce qui a un impact à long terme sur la parcelle, l'eau étant un facteur limitant à partir de 2 ans (Christina et al. submitted; Christina et al. 2017). La date de la première rotation, par exemple sur des anciens pâturages, est également une information importante en terme de bilan carboné du sol par exemple.

Nos travaux ont permis d'obtenir les informations suivantes :

- la date de la mise en place de la première rotation est obtenue à partir de séries temporelles de NDVI MODIS, si les eucalyptus ne remplacent pas une forêt (donc uniquement une afforestation ou reforestation) et si celle-ci a eu lieu pendant la période couverte par la série temporelle (le Maire et al. 2014a).
- La date de plantation de chaque rotation peut aussi être extraite des séries temporelles facilement, en analysant le début d'augmentation du NDVI (Figure 5), et donc on peut ainsi connaître l'âge de la plantation avec une précision de l'ordre de deux mois (le Maire et al. 2011a)
- La date de coupe est aussi détectable sur les séries temporelles, au moment de la chute du NDVI, permettant ainsi de connaître la durée des rotations, et la durée de la période entre la coupe à blanc de la rotation précédente et le démarrage de la rotation suivante (le Maire et al. 2011a)

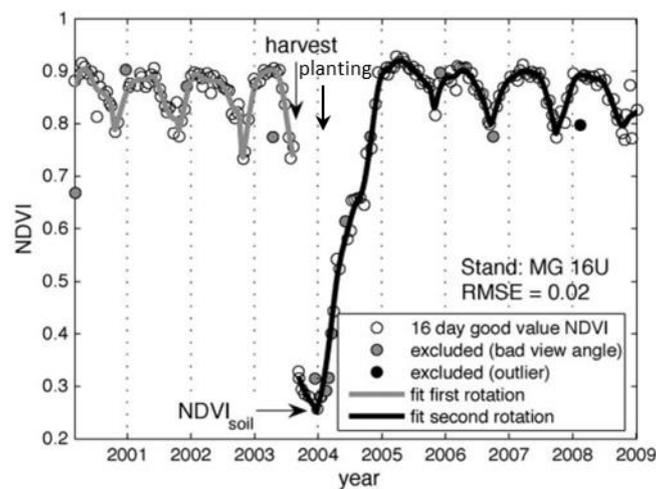


Figure 5 : Série temporelle de NDVI du satellite MODIS sur une parcelle d'eucalyptus. D'après Marsden et al. (2010)

Résumé des utilisations sur parcelles d'Eucalyptus

L'analyse des séries temporelles de NDVI de parcelles d'Eucalyptus à partir du satellite MODIS permet également d'obtenir des informations intéressantes en termes de modélisation des bilans de carbone à l'échelle régionale:

- classification des eucalyptus
- date de la première rotation
- date de plantation
- date de récolte
- indice foliaire (décrit au chapitre II.2.2)
- productivité du site (décrit au chapitre II.2.4)
- biomasse (décrit au chapitre II.2.4)

Ces informations sont utiles pour une application spatialisée de modèles de bilan carboné et hydrique des plantations. Ce sujet est développé dans le chapitre II.3.3 et dans la partie Perspectives (III). Ces méthodologies, développées pour MODIS, gagneront à être appliquées aux données Sentinel et aux séries Landsat pour améliorer leur résolution spatiale.

Encadré 3 : Série temporelles de LAI de caféiers agroforestiers

Les évolutions du LAI ont permis de mettre en évidence les évolutions saisonnières de l'indice foliaire, sur une ferme agroforestière d'environ 500 Ha proche de Turrialba au Costa-Rica (Taugourdeau et al. 2014). Les variations sont dues à la fois à la phénologie du caféier et aux pratiques de taille des caféiers (Figure 6). La phénologie du caféier est relativement complexe et est décrite dans la discussion de l'article en détail. L'évolution à long terme du LAI a été mis en rapport avec des données climatiques (voir Figure 8 PCA dans Taugourdeau et al. (2014)) et avec les pratiques de gestion des parcelles agroforestières, en particulier le type de taille appliquées aux caféiers : taille sévère, normale, ou pas de taille (voir Figure 9 PCA dans Taugourdeau et al. (2014)). Les évolutions de l'indice foliaire ont été forcées dans un modèle hydrologique à l'échelle du bassin versant. Les variations saisonnières de LAI obtenues par télédétection n'ont pas amélioré les simulations du débit de la rivière à l'exutoire ou de l'évapotranspiration par rapport à l'utilisation d'un indice foliaire constant tout au long de l'année. Par contre, l'impact d'une taille sévère des caféiers est important sur ces variables, et l'utilisation de séries temporelles est donc utile pour estimer ces services écosystémiques spatialement ou temporellement. Concernant la production de fruits, le LAI est une variable explicative uniquement certains mois de l'année, mais non en moyenne (Figure 7). Par exemple, les LAI de Juin et Juillet de l'année précédente correspondent à une période de reprise de la croissance de nouvelles branches qui porteront les futurs fruits à l'année N. Un LAI plus important à ces périodes serait donc un indicateur de la production potentielle l'année suivante. Nous avons construit un modèle de prédiction du rendement (kg café vert/ ha/ an) en utilisant le LAI des mois de Janvier à Avril et des mois de Aout à Septembre, le niveau de fertilisation en azote et le niveau d'importance de la taille des caféiers. Une régression multiple de ces covariables donne un $R^2=0.8$ sur 11 années consécutives de rendements. Ce travail a permis de discuter de l'intérêt de quantifier l'indice foliaire et ses variations spatio-temporelles pour deux services écosystémiques, le rendement en café et les services hydrologiques (Taugourdeau et al. 2014). Une approche empirique similaire est mise en œuvre actuellement dans le projet de thèse de Ana Cláudia dos Santos Luciano (que je co-encadre) à partir de séries temporelles d'images Landsat sur des parcelles de canne à sucre au Brésil.

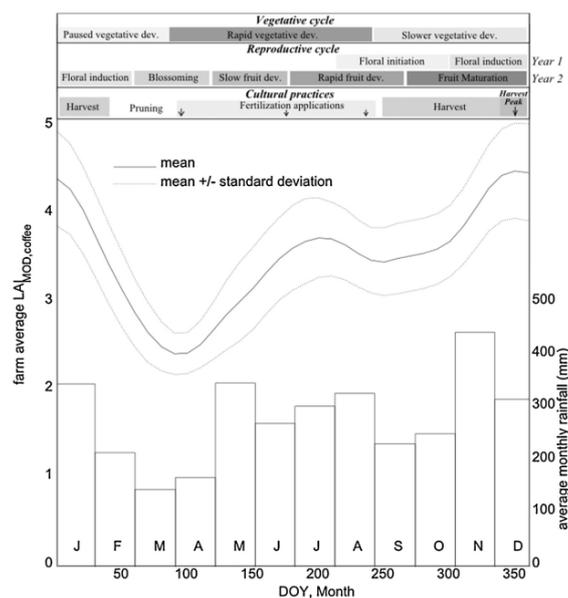


Figure 6 : Evolution saisonnière de l'indice foliaire estimé à partir de données MODIS et moyennées sur une ferme agroforestière (91 pixels de 250m) et 10 années consécutives. Les principales étapes du

cycle cultural du café sont indiquées au-dessus du graphique, et les précipitations mensuelles moyennes en dessous.

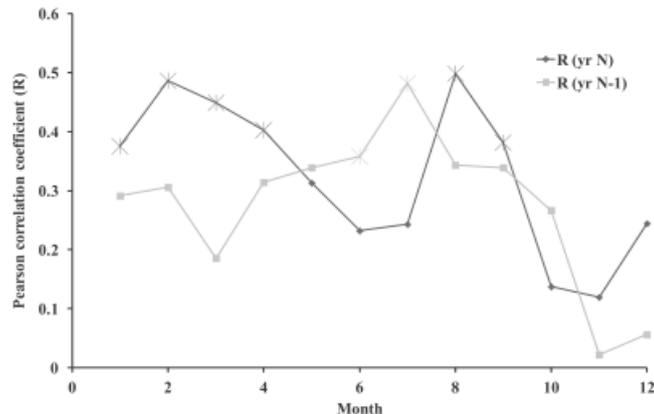


Figure 7 : Coefficient de corrélation de Pearson entre le rendement de l'année actuel (année N) et le LAI moyen des mois de l'année N et de l'année N-1. Les LAI sont estimés via des séries temporelles de NDVI du satellite MODIS. Les corrélations significatives ($p < 0.05$) sont indiquées par des symboles en étoile

Remarques générales

L'analyse de séries temporelles d'images satellite permet d'estimer des variables essentielles aux modèles simulant le bilan carboné et hydrique des plantations : soit en procédant à une analyse des images indépendamment les unes des autres, par exemple via les techniques proposées dans les deux premiers chapitres ci-dessus (II.2.1 et II.2.2), soit en utilisant des méthodes spécifiques décrites ci-dessus. En particulier, la connaissance a priori d'une dynamique possible du LAI permet de procéder à un lissage temporel des données et ainsi réduire l'incertitude associée à une date particulière. Dans l'inversion du LAI à partir de données de NDVI présentée dans le chapitre précédent, une contrainte supplémentaire sur l'évolution du LAI avait été testée. Ainsi, l'inversion ne porte plus directement sur le LAI mais sur les paramètres de l'équation représentant l'évolution temporelle du LAI. Pour aller plus loin dans cette analyse, des méthodes d'assimilation de données dans les modèles de dynamique du carbone, simulant l'évolution du LAI serait souhaitable et donnerait une base fonctionnelle à l'évolution du LAI (voir Partie III).

L'ensemble de ces travaux repose sur l'extraction de série temporelle à l'échelle de la parcelle. Plusieurs méthodes ont été testées, y compris le démixage linéaire des réflectances (le Maire et al. 2011a), mais l'arrivée du satellite Sentinel-2, combinant à la fois une haute résolution temporelle et spatiale, va faciliter beaucoup l'accès à une information à l'échelle de la parcelle. Cela va probablement permettre de nombreuses avancées dans le domaine du suivi de l'agriculture et des forêts (exemple du pôle THEIA <https://www.theia-land.fr/>).

II.2.4. Estimation des biomasses des forêts

L'estimation de la biomasse des parcelles forestières par télédétection représente un enjeu important pour répondre à des problématiques environnementales (stocks de carbone) et économiques (pour les gestionnaires). C'est également une variable d'entrée de certains modèles simulant les bilans de carbone (comme CASTANEA, présenté dans le chapitre suivant), ou une variable simulée par le modèle (e.g. modèle G'DAY). Dans ce deuxième cas, les estimations spatialisées de biomasse peuvent permettre de valider le modèle, ou bien également de contraindre les paramètres du modèle (assimilation de données par exemple). Lors de la thèse de Valentin Bellassen, nous avons évalué l'intérêt d'obtenir des estimations de cette variable à grande échelle pour les modèles simulant les flux de carbone, avec l'exemple du modèle ORCHIDEE (Bellassen et al. 2011a), en se plaçant dans le cadre de la future mission satellite « BIOMASS » de l'Agence Spatiale Européenne. Nous avons montré par exemple que l'assimilation de valeurs de biomasses mesurées dans le modèle, par rapport aux valeurs simulées par celui-ci, peut améliorer certains flux de carbone comme la respiration ou l'échange net de carbone entre l'écosystème et l'atmosphère de 30 à 50%. Par contre, une incertitude sur ces estimations, telles que généralement trouvées dans la littérature, réduit en partie ces bénéfices (entre 13 et 21% suivant l'incertitude considérée). Dans le cas du modèle ORCHIDEE, qui est généralement utilisé en mode « steady-state », l'utilisation de la biomasse estimée par télédétection permettrait de connaître le « stade de croissance » de la forêt, qui va ensuite améliorer les estimations de production primaire nette et de flux net de carbone.

L'estimation de la biomasse ou d'autres caractéristiques reliées comme le volume de troncs ou en encore la hauteur des arbres n'est pas évidente par télédétection. Nous avons testé trois méthodes d'estimation des biomasses de parcelles d'eucalyptus utilisant trois techniques complètement différentes : la télédétection dans le domaine du visible, la télédétection radar et la télédétection Lidar. Après avoir décrit brièvement ces travaux, je décrirai les avantages respectifs de ces méthodes, et leur domaine de validité.

La première méthode utilise une fois encore les séries temporelles de NDVI MODIS. En effet, nous avons remarqué dans un travail antérieur (Marsden et al. 2008; Marsden et al. 2010), sur un réseau de 16 parcelles, que le NDVI cumulé entre la date de plantation et la date de mesure est très bien corrélée au volume de bois ou à la hauteur dominante des parcelles. Cette intégrale est évidemment corrélée à l'âge de la parcelle, qui explique en soit une grande partie de la biomasse et de la hauteur des parcelles, mais une analyse plus détaillée sur les rayonnements absorbés ont montré que l'information sur les deux premières années uniquement donne déjà une bonne idée de la productivité du site. A contrario, le rayonnement absorbé après 2 ans est moins bien corrélé à la biomasse de la parcelle. D'autre part, la production de bois par unité de rayonnement absorbé (efficacité d'utilisation de la lumière pour la production de bois) est variable selon les parcelles et l'âge des parcelles. Les sites ayant un « indice de site » (la production potentielle d'une parcelle) plus élevé, ont également un APAR plus élevé pendant les deux premières années, et une meilleure efficacité d'utilisation de la lumière.

Nous avons ensuite extrapolé ces résultats sur environ 15000 Ha de plantations (le Maire et al. 2011a). Pour cela, nous avons testé une régression non linéaire non paramétrique (Random Forest) entre une série de prédicteurs issus de données climatiques, pédologiques et de NDVI. La base de données de calibration comprenait une grande gamme de conditions pédoclimatiques, d'âges et de clones. Les variables à prédire étaient le volume des troncs des parcelles ou leurs hauteurs dominantes. A noter

que l'âge des parcelles est un des prédictors, mais celui-ci a été obtenu uniquement à partir de la série temporelle de NDVI. Donc tous les prédictors peuvent être obtenus à partir de bases de données et sont de ce fait simples à obtenir (par rapport à des mesures de terrain ou des données des entreprises). Les résultats sont les suivants :

- l'âge des parcelles uniquement explique déjà 80% de la variabilité des volumes et hauteurs dominantes des parcelles, ce qui est logique mais qui montre déjà l'importance de son estimation.
- l'intégrale du NDVI pendant les 2 premières années explique également le volume et la hauteur dominante, comme seconde variable explicative tout de suite après l'âge. A contrario, le NDVI « instantané » à une date donnée n'est évidemment pas du tout corrélée à la biomasse de la parcelle.
- les variabilités climatiques, en particulier liées à la température (par exemple, les températures minimales sur l'année) ou aux précipitations (par exemple précipitations pendant la « saison sèche »), améliorent les prédictions.
- il y a peu d'amélioration du modèle en prenant en compte le type de sol. En effet, une partie de l'information est probablement déjà intégrée dans les paramètres du NDVI.

Au final, l'estimation du volume et de la hauteur dominante a une précision de $25\text{m}^3/\text{ha}$ pour le volume (15% de la moyenne) et 1.6 m pour la hauteur dominante (8% de la moyenne), ce qui est tout à fait correct, particulièrement pour une méthode basée uniquement sur de images acquises dans le visible (voir Encadré 4).

Fort de cette expérience et du jeu de données préparé pour ce travail, nous avons testé deux autres méthodes de référence pour l'estimation des biomasses sur ces parcelles d'Eucalyptus : le lidar et le radar. Pour cela, nous nous sommes rapprochés de Nicolas Baghdadi, de l'UMR TETIS, spécialiste de l'analyse de ces types de données.

Le satellite ICESat a enregistré des mesures Lidar grâce au capteur Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) entre 2003 et 2009. Après un pulse de lumière dans une longueur d'onde du proche infrarouge, l'énergie réfléchiée est enregistrée en fonction du temps, donnant une forme d'onde. L'emprunte au sol de la mesure est de l'ordre de 60 m, et une mesure est faite environ tous les 170m le long de la trace. De nombreux articles ont montrés les possibilités d'exploiter ce signal pour estimer la biomasse de forêts, mais il y a toujours un doute existant provenant de la mesure de la biomasse elle-même, de la topographie, de l'emprunte spatiale (Baghdadi et al. 2014). D'autres données externes sont alors utilisées pour améliorer les prédictions ou filtrer les données utilisables (image optique, modèle numérique de terrain, etc.). Le travail sur les plantations d'Eucalyptus offre ici un cas « idéal » pour tester la méthode elle-même en minimisant les autres sources d'incertitudes : les biomasses sont précises, les parcelles grandes et très homogènes, la topographie relativement plane. Après avoir extrait et traité les données, plusieurs métriques ont été extraites des ondes lidar : premier echo, dernier echo, etc. Plusieurs équations ont alors été testées à partir de ces métriques. La meilleure a été celle utilisant l'étendue totale de l'onde, et les étendues des premiers et derniers pics (correspondant à la canopée et au sol). La précision sur la hauteur dominante est de 1.89 m. Une fois la hauteur dominante calculée, une régression non linéaire entre la hauteur dominante et la biomasse des parcelles d'Eucalyptus a été appliquée : la précision finale sur la biomasse est alors de 16 t/ha, ce qui correspond à environ 25% de la valeur moyenne (Encadré 4). Si l'utilisation de GLAS est très limitée opérationnellement (6 ans de données, peu de mesures), cette étude a montré les potentialités du Lidar spatial pour cette application.

Une autre technique testée est l'imagerie radar (Baghdadi et al. 2015). Nous avons testé l'utilisation de la bande L du Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar (PALSAR-1) pour estimer la biomasse de parcelles d'Eucalyptus au Brésil. Il est généralement montré que le signal en bande L est sensible à la biomasse des forêts, mais sature à partir d'un certain seuil. Des études sur des forêts de pins maritime ont par exemple montré des saturations vers 100t/h. En forêt naturelle tropicale, ce seuil est plutôt de l'ordre de 60 t/ha (Luckman et al. 1997). En plus de cette question de niveau de saturation, il y a le problème de la précision de la régression avant ces valeurs, qui peut être parfois faible (forte dispersion des points). Le signal de rétrodiffusion radar n'est pas directement lié à la biomasse d'un point de vue physique, mais à la structure du couvert et sa variabilité spatiale : hauteurs des arbres, densités, distributions spatiales, branches, feuilles, etc. peuvent influencer le signal. La structure particulière des plantations d'Eucalyptus, avec de très fortes densités (~1500 trees/ha), leur grande hauteur, et leur homogénéité, sortent des cas classiquement étudiés. Nos résultats, sur la même base de donnée que précédemment, montrent que le signal sature très vite dans ces couverts, à environ 50 t/ha (des plantations de 2 à 3 ans). Avant cette saturation, la corrélation est par contre bonne (précision de l'ordre de 5 t/ha). L'utilisation de l'âge de la parcelle comme co-variable aux données PALSAR améliore grandement les prédictions sur l'ensemble de la gamme des biomasses. L'âge seul explique déjà 88% de la variabilité de la biomasse, mais sa combinaison avec le signal radar augmente cette valeur à 92%. L'âge de la parcelle peut aussi être facilement déterminé à l'aide d'une série temporelle d'image PALSAR. Il est possible que les futures mesures dans la bande P amélioreront ces estimations.

Encadré 4 : Estimation des biomasses de parcelles d'Eucalyptus par télédétection satellitaire radar, lidar ou optique

Méthode	Optique	Lidar	Radar
Publication	Le Maire G., Marsden C., Nouvellon, Y., Grinand C., Hakamada R., Stape JL. & Laclau JP. 2011. MODIS NDVI time-series allow the monitoring of Eucalyptus plantation growth. Remote Sensing of Environment, 115:2613-2625	Baghdadi, N., Le Maire, G., Fayad, I., Bailly, J.S., Nouvellon, Y., Lemos, C., Hakamada, R. (2014). Testing different methods of forest height and aboveground biomass estimations from ICESat/GLAS data in eucalyptus plantations in Brazil. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing 7 (1) , art. no. 6521496 , pp. 290-299	Baghdadi, N., le Maire, G., Bailly, J.S., Osé, K., Nouvellon, Y., Zribi, M., Lemos, C., Hakamada, R., Evaluation of ALOS/PALSAR L-band data for the estimation of Eucalyptus plantations aboveground biomass in Brazil (2015) IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 8, 3802-3811
Type de donnée	Terra/MODIS (résolution 250 m, couverture totale)	ICESat/GLAS (résolution 60m, 1 mesure tous les 170 m le long des transects)	ALOS/PALSAR (résolution 12.5 m, images de ~80 km)
Méthode	Extraction de caractéristiques de la série temporelle NDVI depuis la date de plantation ; variables bioclimatiques et classe de type de sol	Extraction de métriques de la forme d'onde ; utilisation conjointe d'un DEM	L-band SAR backscatter HH et HV; test utilisant l'âge de la plantation
Algorithme	Random Forest	Multilinear regression model	Random Forest
Variables prédites	VOLUME en bois (V), hauteur dominante (Hdom)	Biomasse (B), hauteur dominante (Hdom)	Biomasse (B)
Précisions obtenues	V : rmse=25 m ³ /ha (15% de la moyenne) Hdom : rmse=1.6 m (8% de la moyenne)	B : 16 t/ha (25% de la moyenne) Hdom : rmse=1.89 m (10 % de la moyenne)	B : 46.7 t/ha (70% de la moyenne) B en utilisant l'âge en plus des données SAR : 18.9 t/ha (28% de la moyenne)
Commentaire	L'âge et le NDVI cumulé les deux premières années expliquent la plupart des variable prédites	Mesure « directe », pas de couverture spatiale complète, mesures satellitaires arrêtées	Mesure corrélée à la biomasse uniquement pour des biomasses très faibles (<50m ³) soit des plantations jeunes (<3 ans). Peut servir comme info complémentaire si on connaît l'âge de la parcelle.
Avantages/inconvénient	Gratuit, couverture globale, historique depuis 2000, uniquement grandes parcelles, zones sans nuages	bonne précision mais couverture spatiale et temporelle très limitée.	Couverture globale sur commande et payante, pas de problèmes de nuages, haute résolution, simplicité de l'application, faible précision

Remarques générales

L'estimation des biomasses des forêts par des méthodes de télédétection est encore un sujet de recherche prometteur, et nécessaire dans l'objectif d'une meilleure estimation de leurs stocks et flux de carbone. Les modèles simulant les bilans de carbones des forêts peuvent en effet être soit contraint par des mesures (forçage, assimilation), soit utilisés comme validation des sorties du modèle. C'est également une sortie pratique qui intéresse particulièrement les gestionnaires. Par exemple, les industriels qui plantent de grandes surfaces en Eucalyptus au Brésil estiment les volumes via un réseau dense de placettes permanentes visitées tous les deux ans. Si les méthodes développées ci-dessus ne remplaceront pas entièrement ces inventaires, il serait possible de réduire par exemple leur nombre au cours de la croissance (par exemple l'inventaire à 2 ans pourrait être remplacé par une image Radar, un inventaire plus tardif par une mesure Lidar, etc.). Cela apporte également une estimation de la variabilité spatiale de la biomasse, alors que les inventaires n'échantillonnent en général une petite surface de la parcelle. Dans cet objectif, il est également possible d'utiliser l'imagerie très haute résolution spatiale pour estimer la densité locale des arbres (la mortalité étant une des cause de diminution de biomasse) et les dimensions des arbres (le Maire et al. 2014b; Zhou et al. 2013). Les hauteurs peuvent également être estimées par tri-stéréo (travail en cours avec l'UMR TETIS).

II.3. Partie 2 : La modélisation du bilan de carbone et d'eau d'écosystèmes forestiers : de la plante à la région

II.3.1. Bilans carbonés, hydrique et énergétique d'écosystèmes forestiers : de l'observation à la modélisation mécaniste

Le bilan de carbone, le bilan d'eau et le bilan d'énergie d'un écosystème forestier, c'est-à-dire la quantification de l'ensemble des stocks et des flux entre les compartiments constituant le système, découle d'une série de processus touchant à différents domaines scientifiques, à différentes échelles d'espace et de temps (Bohn et al. 2014; Landsberg and Sands 2010). Une forêt est un système complexe, où un grand nombre de processus physiques, biologiques et biochimiques se déroulent et interagissent, eux-mêmes éventuellement modifiés par des interventions extérieures. De nombreux modèles de bilans de carbone d'écosystèmes forestiers existent dans la littérature, chacun ayant des propriétés qui leur sont propres mais un certain nombre de processus communs (Fontes et al. 2010; Porté and Bartelink 2002). Si aucun des modèles n'est entièrement mécaniste (i.e. basé sur des processus élémentaires « universels »), il existe tout de même un fort gradient allant des modèles les plus empiriques aux modèles les plus mécanistes. La plupart des modèles écophysologiques SVAT (soil Vegetation Atmosphere) et modèles de croissance sont déterministes et ne prennent pas en compte de phénomènes aléatoires.

Ces modèles mécanistes, dont je tenterai de donner une définition plus précise par la suite, sont des outils de recherche très utiles et complémentaires à l'expérimentation pour de nombreux aspects :

- **Comprendre** : La démarche de modélisation et le modèle obtenu permettent : d'aider à la compréhension des observations qui sont parfois incomplètes, ou difficilement interprétables directement ; de chercher et mettre en avant une base mécaniste à des relations empiriques ;

d'orienter l'expérimentation et les recherches ; d'intégrer des données parfois très nombreuses et en interaction

- **Décrire** : Le modèle permet de synthétiser les connaissances, de hiérarchiser les différents processus, de créer des liens entre des variables et de prendre en compte des interactions et rétroactions, parfois dans des domaines d'études différents; il permet de conceptualiser et partager des connaissances ; de quantifier des variables qui ne sont pas toujours mesurables, tout en conservant les principes et lois physiques sous-jacentes.
- **Explorer** : Enfin, quand le modèle a été correctement paramétré et validé, il peut être utilisé pour explorer quels sont les paramètres ou les processus les plus sensibles ; ils peuvent permettre de réaliser des expérimentations *in silico*, de tester des hypothèses, ou réaliser des prédictions ; il peut être un outil d'aide à la décision. La prédiction au sens large est une des finalités importantes des modèles mécanistes, le « comprendre pour prédire »

Quelle modélisation : statistique, conceptuelle ou mécaniste ?

Un modèle est avant tout une représentation simplifiée de la réalité, une construction permettant une certaine abstraction de cette réalité. Seules certaines caractéristiques de la réalité sont conservées, celles qui permettent de répondre aux objectifs de modélisation fixés. Ainsi, dans sa définition large, tout observateur d'un phénomène essayant de comprendre le fonctionnement de celui-ci réalise déjà une modélisation.

On comprend ainsi que pour une même réalité il existe de nombreuses possibilités de la modéliser, et donc de nombreux modèles (Fontes et al. 2010; Pretzsch et al. 2015). De manière générale, on peut distinguer trois grandes familles de modèles qui sont très différents à la fois dans leurs objectifs et leurs formulations: les modèles conceptuels qui ont un haut degré de généralisation, les modèles statistiques qui ont une plus grande précision, et les modèles mécanistes qui sont plus réalistes (Levins 1966). Suivant l'objectif recherché (la question scientifique posée), le choix de ces types de modèles peut paraître évident. Cependant il est également possible, dans une même modélisation, d'inclure un certain niveau de chacun de ces types de modèles, même si il est difficile de combiner au sein d'un modèle à la fois la généralité, la précision et le réalisme (Rigg and Hartmann 2017).

En écologie et plus particulièrement en écophysiologie végétale, les 3 types de modèles existent dans la littérature, chacun répondant à des questionnements différents. Pour l'objectif de modéliser les cycles du carbone et de l'eau (voire de nutriments) d'écosystèmes forestiers, et de quantifier les flux et les stocks, les modèles statistiques et les modèles mécanistes peuvent être utilisés. Mais quand on ajoute un objectif de prédiction (extrapolation temporelle, spatiale) et d'analyse et de compréhension fine des causes, il apparaît clairement que les modèles mécanistes sont plus appropriés. Cependant, la complexité du fonctionnement intégré des écosystèmes est telle qu'une dose d'empirisme, c'est-à-dire de modélisation statistique est généralement présente dans ces modèles (Fontes et al. 2010). La conception d'un modèle est subordonné à la réflexion du modélisateur autour d'un objectif déterminé, depuis l'observation, l'analyse, le questionnement scientifique, le développement de théories et jusqu'à la mise en équation du phénomène, avec les nombreux va-et-vient entre ces étapes via des validations/invalidations.

Observations, expérimentations, modélisation

Le modélisateur tente de représenter la réalité d'un processus par un modèle, puis mettre ce modèle en équation sous forme d'un langage informatique permettant ensuite de réaliser des simulations, et de vérifier si le modèle permet de reproduire les observations. Les observations peuvent être par exemple

des mesures de biomasses des arbres, d'indices foliaires, de flux de dioxyde de carbone et d'eau depuis une tour à flux, d'humidité en eau du sol, de photosynthèse foliaire, etc. Les observations peuvent concerner des phénomènes en conditions standards « naturelles », mais peuvent aussi être des expérimentations permettant de sortir de ces conditions standards pour tester des hypothèses ou mieux construire le modèle.

Démarche de construction d'un modèle : variabilités, déterminismes, complexités

Dans le cas de la modélisation d'un système, les entités le constituant sont en interaction, via des échanges d'information, de matière, d'énergie. Ce système peut être décrit mathématiquement par des équations comportant des variables d'états (qui renseignent sur l'état du système) qui découlent des échanges au sein du système, ces échanges étant décrits par d'autres variables généralement appelées variables de flux ; des variables d'entrées ou variables de forçage contraignent le système par rapport à son environnement extérieur. Les variables de sorties sont certaines variables d'état ou de flux qui intéressent le modélisateur. Le modèle peut également contenir un certain nombre de paramètres, considérés comme des constantes lors de la simulation. La notion de paramètre est cependant contextuelle : un paramètre peut être constant dans le temps et dans l'espace pour certaines applications du modèle, ou variable dans une ou dans ces deux dimensions et devenant ainsi une variable d'entrée. Certains paramètres sont des constantes physiques qu'il n'a pas lieu de changer, et sont généralement inscrite directement « en dur » dans le code (e.g. 15% des ~200 paramètres de CASTANEA). D'autres, au contraire, doivent être obtenues localement (régionalement ou même au niveau de la parcelle), via des mesures directes (exemple : indice foliaire maximal), ou via une calibration d'un modèle local via une expérimentation dédiée (e.g. paramètres photosynthétiques). Dans ce cas, le paramètre peut être modifié selon l'application des modèles, ou un nouveau modèle peut être construit en amont permettant lui-même de simuler ce paramètre.

La construction d'un modèle de simulation mécaniste va donc dépendre du niveau de réalisme, précision et généralité souhaité. Conceptuellement, on voit bien que la démarche de construction et d'utilisation d'un modèle de bilan de carbone et d'eau va dépendre principalement de l'objectif recherché : que souhaite-t-on simuler ? Quelle variabilité spatiale et temporelle ? Avec quelle précision et quel niveau de généralité ?

Le modèle se construit donc comme un réseau d'équations mathématiques, dont des termes peuvent dans certains cas devenir des variables d'état, elles-mêmes obtenues via d'autres équations. On peut ainsi représenter le modèle comme une arborescence d'équations, allant à des niveaux de détails plus ou moins élevés. Certains embranchements peuvent rester à des niveaux relativement bas, c'est-à-dire que certaines variables sont considérées constantes dans le temps et dans l'espace pour le système étudié et pour l'objectif fixé. Dans ce cas, toute cette « branche » du système est en quelque sorte « élaguée », et le modèle est ainsi « simplifié ».

Pour simuler un phénomène réel, le modélisateur fait un certain nombre d'hypothèse *a priori*, comme le fait que certaines « branches » du modèle n'auront jamais une importance suffisante pour qu'il soit nécessaire de les prendre en compte dans le modèle pour un objectif donné. Il en résulte que ces modèles peuvent être structurellement inadaptés pour répondre à d'autres objectifs. Ainsi, le triptyque réalité/objectif/modèle est constamment questionné, l'objectif donnant en quelque sorte le schéma général des niveaux nécessaires, le modèle ayant lui-même sa propre structure et donc ses propres

niveaux fixés lors de son écriture, et la « réalité » est déterministe mais seulement partiellement connue. Dans le cas le plus simple, il y a une correspondance entre les « schéma objectif » et « schéma modélisé », dans un « schéma réel » correspondant à une zone de connaissance bien décrite et éprouvée. Mais dans la plupart des cas cette adéquation est imparfaite. Plusieurs écueils sont possibles : confondre le « schéma réel » et le « schéma modélisé », considérer une compatibilité *a priori* du « schéma objectif » et du « schéma modélisé », mal construire le « schéma objectif » par manque de connaissance du « schéma réel », etc.

L'exercice est donc fortement contraint par nos connaissances et par nos capacités à mettre en équation les processus, sans compter la complexité (nombre d'équations et de niveaux, interactions possibles entre branches, etc.) qu'impose le « schéma objectif ». Les objectifs d'une étude de modélisation peuvent parfois être construits en utilisant un « schéma modèle » donné, et donc les objectifs sont contraints par le choix du modèle. Le modèle peut alors être lui-même modifié pour prendre en compte les embranchements du « schéma objectif » et leurs niveaux. La notion de niveau peut correspondre à la notion d'échelle dans les modèles, suivant les processus. Ainsi, les modèles « basés sur les processus » prennent souvent en considération les processus à des échelles inférieures pour simuler une variable donnée.

Il en résulte qu'un modèle prenant en compte des processus complexes à un haut niveau de précision, peut en théorie intégrer un plus grand nombre de « schéma objectif ». En théorie donc, il serait plus approprié de travailler avec ce type de modèle « complexe », et de procéder ensuite à une phase de « simplification ». En pratique, on se heurte à deux problèmes : il n'existe pas de modèle qui pourrait prendre en compte tous les processus, et on est donc toujours éloigné d'un « schéma réel » exhaustif ; les modèles les plus complexes peuvent être structurellement difficile à simplifier, multiplient le temps de calcul et les sources d'erreur possibles. Ainsi, une partie du travail réside dans la recherche de la meilleure adéquation possible entre les 3 schémas. En pratique, l'approche est le plus souvent pragmatique, et l'adéquation se fait en premier lieu au niveau du choix des objectifs atteignables, en second lieu au niveau du choix du modèle, en troisième lieu via des simplifications/complexification du modèle, dans un cadre très contraint par les connaissances actuelles des processus et leur mise en équations déterministes. Je présente les principales caractéristiques de chaque modèle sur lesquels j'ai travaillé (Castanea, Orchidée, G'Day et Maestra/Maespa) ci-dessous sous la forme d'un tableau dans l'Encadré 5.

Encadré 5 : Résumé des modèles écophysologiques basés sur les processus utilisés

Les 4 modèles peuvent être distingués par leur échelle d'application. Orchidée a clairement vocation à simuler les bilans de carbone et d'eau à l'échelle régionale, G'Day et Castanea à l'échelle de la parcelle forestière, et MAESPA à l'échelle de l'arbre dans un peuplement. Il y a aussi une notion d'échelle temporelle : la plupart des modèles ont un pas de temps semi-horaire pour intégrer les variabilités météorologiques intra-journalières, et peuvent être intégrées sur des périodes plus longues. Les modèles se situent à différents niveau d'un gradient de complexité telle qu'on l'a défini chapitre II.3.1.

	Orchidée	G'Day	Castanea	Maestra/Maespa
Références	(Krunner et al. 2005)	(Comins and McMurtrie 1993)	(Dufrêne et al. 2005)	(Duursma and Medlyn 2012; Medlyn 2004; Wang and Jarvis 1990)
Années d'utilisation	2007-2008	2010-2017	2002-2005	2017-2017
Système modélisé				
Ech. élémentaire d'espace	parcelle/point de grille	parcelle	parcelle	voxels, arbres, parcelle
Ech. élémentaire de temps	horaire/jour	jour	horaire/jour	horaire
Ech. d'application spatiale	local à global	parcelle/ multi-parc.	parcelle/ multi-parc.	arbre à parcelle
Ech. d'application temporelle	année à siècle	année à siècle	jour à siècle	jour à quelques années
initialisation	"steady-state"	"steady state" du sol	mesures	mesures
langage	fortran	C++	fortran	fortran
processus simulés				
transpiration	X	X	X	X
évaporation du sol	X	X	X	X
hydrique sol (bucket-model)	X	X	X	
hydrique sol (Richards)				X
flux chaleur sensible	X		X	X
photosynthèse	X	X	X	X
respiration autotrophe	X	X	X	X
allocation et croissance biomasse	X	X	X	
mortalité organes	X	X	X	
décomposition litières	X	X	X	
stocks de carbone du sol	X	X	X	
respiration hétérotrophe	X	X	X	
cycle azote		X		
cycle P et K				
exportations		X	X	
parcelles equiennes seulement	X	X	X	
mélange d'espèces				X
Objectifs				
cycles C, H ₂ O	X	X	X	X
impact des C.C.	X	X	X	
couplage climat	X			
dynamique de la végétation	X			
cycle de l'azote		X		
Séquestration de C	X	X	X	
écophysiologie			X	X
compétition inter/intra sp.				X
hétérogénéité intra-parcelle				X
croissance / production bois		X	X	
Développements réalisés				
	module de croissance	croissance racinaire	petites modifications	dyn. de la nappe phréatique
	cohortes de classes d'âge	prélèvements hydriques profonds		remontées capillaires de l'eau depuis la nappe
	module gestion sylvicole	option MOMOS C sol		temp. air canopée et des feuilles
		assimilation du carbone selon MATEY modifications Ra		potentiel gravitaire de l'eau (sol et plante)
		modifications des allocations		croissance racinaire profonde
				interception des pluies
Publications avec le modèle				
	(Jung et al. 2007)	(le Maire et al. 2010b)	(Dufrêne et al. 2005)	(le Maire et al. 2013)
	(Ciais et al. 2008)	(Marsden et al. 2013)	(le Maire et al. 2005)	(Campoe et al. 2013)
	(Gerten et al. 2008)		(Davi et al. 2006a)	(Charbonnier et al. 2013)
	(Luo et al. 2008)		(Davi et al. 2006b)	(Forrester et al. 2014)
	(Bellassen et al. 2010)		(Delpierre et al. 2012)	(Christina et al. 2015)
	(le Maire et al. 2010a)			(Christina et al. 2016b)
	(Mahecha et al. 2010)			(Charbonnier et al. 2017)
	(Bellassen et al. 2011a)			(Christina et al. 2017)
	(Bellassen et al. 2011b)			(Christina et al. submitted)
	(Bellassen et al. 2011c)			(Vezy et al. submitted)

remarques générales

La modélisation des bilans carbonés, hydriques et énergétiques est un domaine extrêmement intéressant car il offre une vision « systémique » et fonctionnelle des écosystèmes forestiers. Au cours de mes travaux passés, j'ai pu travailler sur différents modèles, ce qui me permet d'avoir une vision relativement complète du spectre des possibilités de modèles. L'approche des modèles « structure fonction » pourrait apporter des informations différentes et complémentaires au modèle MAESPA. Cependant, malgré les nombreuses années de développement des modèles, il y a encore beaucoup à faire, et je propose en perspective quelques pistes, dans le cadre particulier de la spatialisation d'un modèle à l'échelle régionale. D'autre part, une part importante du travail repose sur les maintenances de codes, leur partage, leurs tests et débogage, etc. N'étant pas spécialiste, j'ai jusqu'ici eu une approche relativement « simple » de ces aspects, mais l'arrivée récente dans notre UMR de Céline Blitz, ingénieure en calcul scientifique, apportera une plus-value importante sur ces aspects, et sur l'amélioration de la performance des codes.

II.3.2. Apport de la modélisation pour l'analyse de mesures expérimentales

Lors de mes travaux de recherche passés, la modélisation a servi à plusieurs reprises à analyser en détail des données expérimentales pour mieux les comprendre, et donc mieux comprendre le fonctionnement du système étudié. C'est particulièrement le cas lorsque les mesures sont nombreuses et intégrées, et que les liens entre des mesures de paramètres (ou traits fonctionnels) et les fonctions (flux, réponses, etc.) sont nombreux. L'analyse statistique des corrélations entre variables, directes ou indirectes, peut parfois être limitée car elle n'explique pas les causes des relations. Dans un modèle mécaniste, les relations sont explicites via une série d'équation représentant le phénomène.

Prenons l'exemple d'un essai sylvicole sur lequel notre unité Eco&Sols a travaillé : un essai sylvicole sur un clone d'Eucalyptus au Brésil croisant deux traitements, une exclusion des pluies (30%) et une fertilisation potassique (Battie-Laclau et al. 2014b). Cet essai a été mis en place entre autre pour voir à quel point la fertilisation potassique pouvait influencer le fonctionnement des eucalyptus soumis à un stress hydrique. Dans cet essai, des mesures d'indices foliaires ont été réalisées au cours de la rotation, et il est apparu que les grandes différences de productivités entre les traitements étaient corrélées statistiquement à ces indices foliaires. Cependant, le lien de cause à effet n'est pas évident, car de nombreux autres traits fonctionnels changent suivant les traitements : paramètres photosynthétiques foliaires, angles foliaires, profils racinaires, etc. Le modèle MAESPA a été utilisé dans la thèse de Mathias Christina pour trouver quels sont les paramètres, et donc les fonctions qui expliquent le plus les différences de productivités (Christina et al. 2015). Une fois paramétré précisément pour chaque traitement, MAESPA permet d'estimer des variables comme le rayonnement absorbé des parcelles (aPAR), l'efficacité d'utilisation de la lumière (LUE) et la photosynthèse brute (GPP) pour chaque traitement, et ainsi de vérifier si les différences de production proviennent uniquement de différences de rayonnement absorbé (comme on pourrait le penser avec les analyses indirectes du LAI). Les résultats montrent que l'exclusion de pluie et la fertilisation modifient significativement à la fois aPAR et LUE. Le modèle a permis d'aller plus loin. Pour chaque variable aPAR, LUE et GPP, il est possible de voir quel paramètre (ou trait fonctionnel) explique le plus les modifications de ces variables en fonction des traitements. Il est alors possible de classer les paramètres en fonction de leur impact sur la variable (qui est à la fois fonction des variations du paramètre lui-même mais aussi de la sensibilité de

la variable simulée à ce paramètre). Par exemple, certains paramètres très variables entre les traitements n'expliquent pas les changements de aPAR ni de LUE. Au travers des paramètres, ce sont bien les processus qui sont analysés. Par exemple, l'humidité du sol minimale atteignable augmente en cas de déficience potassique, ce qui provoque une diminution significative de LUE. Ainsi le processus d'absorption d'eau, et plus particulièrement la différence d'eau extractible lors d'évènement sec est une des causes de la modification de LUE (et de GPP). Cet exemple montre que l'expérimentation reste un préalable essentiel à une meilleure compréhension du fonctionnement d'un écosystème, mais que la modélisation mécaniste permet 1) d'estimer d'autres variables d'intérêt non mesurables directement (aPAR, LUE, GPP) et d'analyser leurs changements 2) d'explorer les relations entre ces paramètres/traits et les variables, et de chercher quels sont ceux qui expliquent au mieux les changements (seuls ou en interactions) et 3) via les paramètres, comprendre quels sont les processus les plus importants. Un autre exemple semblable est l'utilisation de ce modèle MAESPA, préalablement modifié, pour analyser le bilan hydrique et en particulier le prélèvement profond en eau dans les sols (voir Encadré 6).

Le modèle MAESTRA a également servi dans le cadre d'une analyse de la croissance d'une plantation mélangée entre *Eucalyptus grandis* et *Acacia mangium* (le Maire et al. 2013). L'idée de cette expérimentation est de tester des effets de complémentarité et/ou de facilitation entre espèces, l'acacia étant une plante fixatrice d'azote. Les plantations mélangées de ces deux espèces à rotation courte pourraient ainsi avoir un besoin moindre en engrais azoté. Un des facteurs critiques dans les plantations mélangées est le partage de la lumière. En effet, de ce partage de la lumière découle une différence de photosynthèse, pouvant éventuellement conduire à une différence de NPP et de croissance. Or l'absorption du rayonnement dépend de multiples caractéristiques structurales et optiques des arbres : position des arbres par rapport à leur voisin, indices foliaires, angles foliaires, propriétés optiques des feuilles, branches et troncs, etc. Il est également souvent impossible de pouvoir mesurer cette absorption à l'échelle de l'espèce, et encore moins à l'échelle de l'arbre. Dans un essai expérimental, se pose également la question des effets de voisinage entre traitements. La modélisation tridimensionnelle peut aider à estimer l'absorption de chaque arbre et espèce au sein d'une expérimentation, pour ensuite l'analyser en fonction de la croissance. Le modèle MAESTRA a été paramétré à l'aide de nombreuses mesures expérimentales à l'échelle de la feuille ou de l'arbre, sur différents traitements. Dans cette expérimentation, il apparaissait clairement que les acacias avait une croissance bien moindre que les eucalyptus, et se retrouvaient surcimés par les eucalyptus. Il était cependant impossible de dire si leur moindre croissance du tronc provenait uniquement de ce manque de lumière, ou si d'autres facteurs jouaient comme la compétition pour l'eau ou les nutriments, ou des changements d'allocation du carbone au sein de l'arbre. De même, le résultat des mélanges peut changer certaines caractéristiques globales à l'échelle du peuplement, comme par exemple le LAI de la plantation mélangée (50% acacias et 50% eucalyptus) qui est plus élevé que la moyenne des LAI des plantations pures. Le rayonnement APAR de chaque arbre de l'essai a donc été calculé par MAESTRA, pour chaque année. Il a été ensuite rapporté à la croissance de l'arbre annuelle mesurée, donnant une efficacité d'utilisation de la lumière pour la production de bois du tronc (LUE). En plantation mélangées, les LUE à la fois des eucalyptus et des acacias diminuent en fin de rotation, alors qu'ils sont plutôt stables en plantation pures. Cette diminution est spécialement forte pour les acacias en mélange, avec une LUE quasiment divisée par deux. Dans les plantations mélangées, cette diminution de LUE explique la diminution de la productivité alors que le LAI total augmente. Ainsi, bien que le couvert absorbe plus de rayonnement, la production est moindre, car d'autres facteurs entrent en compte, comme le manque d'eau ou les changements d'allocations, comme montrés dans les articles de Nouvellon et al. (2012a) et Laclau et al. (2012). L'utilisation d'un modèle a permis ici d'estimer le rayonnement absorbé de chaque arbre, permettant alors de comparer les arbres entre eux

en fonction de leur taille, et de tester l'effet des mélanges. La hauteur des arbres est un facteur influençant cette LUE pour les acacias, suggérant qu'un mécanisme lié à la hauteur serait à l'origine de cette baisse d'efficacité. Les travaux de Nouvellon et al. (2012a) et Laclau et al. (2012) ont ainsi montrés que la compétition interspécifiques pour l'eau et des changements d'allocation du carbone sont responsables de ces changements d'efficacité d'utilisation de la lumière pour la production de bois. Il est ainsi probable que les acacias les plus grands en peuplement mélangés aient accès à plus d'eau, auquel s'ajoute probablement un changement d'allocation du carbone vers le tronc par rapport aux organes capteurs de ressources (racines fines, feuilles). Il semble donc que ce soit une principalement des mécanismes de compétition qui dominent entre les espèces, l'eucalyptus étant un largement meilleur compétiteur dans ces conditions.

Encadré 6 : Bilan hydrique d'une plantation d'Eucalyptus

Lors de la thèse de Mathias Christina, le bilan hydrique d'un peuplement d'eucalyptus au Brésil (site Eucflux) a été modélisé avec le modèle MAESPA. Les mesures d'humidité du sol et de l'évapotranspiration par eddy-correlation ne suffisent pas à comprendre le fonctionnement de l'écosystème dans son ensemble, l'évolution des mesures de hauteur de nappe, le rôle des racines profondes, et ne permettent pas non plus de réaliser un bilan hydrique complet. Les travaux de thèse de Mathias, ont fournis de nombreuses réponses et ont permis de mieux comprendre le fonctionnement hydrique des plantations d'eucalyptus. Dans Christina et al. (2017), le modèle est tout d'abord testé sur les flux d'ETR, le contenu en eau du sol jusqu'à 10 mètres et la hauteur de la nappe (Figure 8).

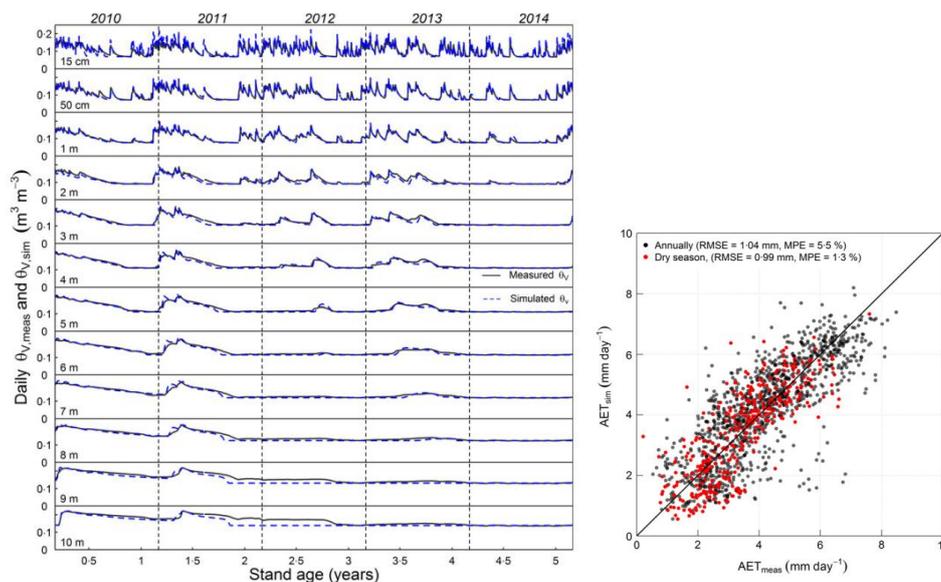


Figure 8 : Comparaison entre mesures et simulations du modèle MAESPA sur une parcelle d'Eucalyptus (Eucflux) pendant 5 ans. A gauche : pour les contenus en eau dans le sol à différentes profondeurs (jusqu'à 10 mètres). A droite : pour l'évapotranspiration réelle. D'après Christina et al. (2017)

Les simulations sur les 5 premières années après plantation sont présentées dans la Figure 9 ci-dessous. La figure du haut présente la simulation de l'évapotranspiration de la parcelle, avec une séparation selon l'origine : Ev est l'évaporation du sol et du feuillage humide, les gradients de rouges correspondent à la profondeur de prélèvement de l'eau, et WT est l'eau prélevée à proximité de la nappe phréatique. La figure du milieu présente le prélèvement en eau par les racines, en fonction du temps et de la profondeur. La courbe verte correspond à la profondeur racinaire maximale mesurée et

forcée dans le modèle. La figure du bas présente le contenu en eau du sol en fonction du temps et de la profondeur. La zone en bleu foncé est le sol à saturation, c'est-à-dire la nappe phréatique simulée. La courbe verte est la profondeur racinaire maximale. La courbe rouge est la limite supérieure mesurée de la nappe phréatique.

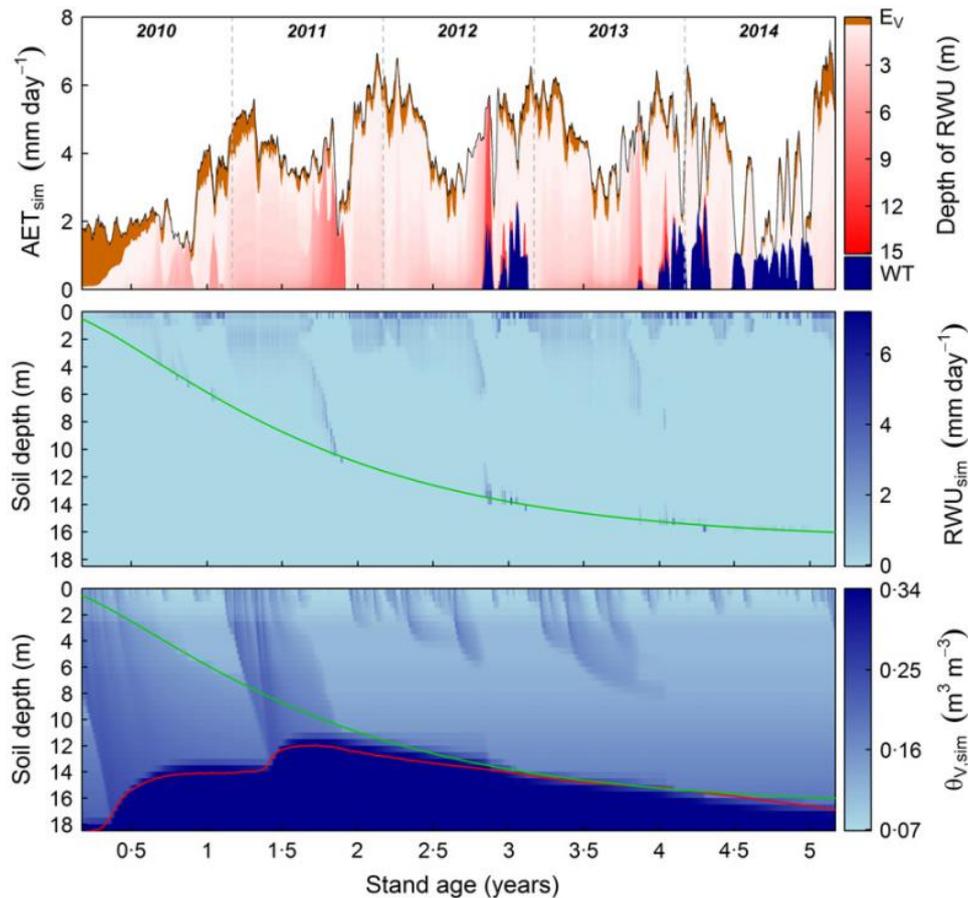


Figure 9 : Résultat des simulation du bilan hydrique MAESPA sur la parcelle d'Eucalyptus Eucflux.

Les conclusions sont les suivantes ont été obtenues grâce au modèle (Figure 9) :

- L'évaporation du sol contribue très peu à l'évapotranspiration de la parcelle, sauf au début de la rotation quand les eucalyptus sont encore petits et le couvert non fermé
- Les prélèvements racinaires ont surtout lieu principalement dans les 2 premiers mètres : le système racinaire « dual », avec une forte densité de racines superficielles latérales utilisant l'eau en saison humide, et un nombre limité mais fonctionnellement important de racines explorant le sol en profondeur et utiles pendant la saison sèche (Canadell and Zedler 1995).
- En fin de saison sèche, quand le sol de surface est sec, les racines prélèvent progressivement plus profondément, asséchant peu à peu le sol en profondeur, et permettent de maintenir la production brute durant les saisons sèches, comme montré dans d'autres travaux sur des écosystèmes tropicaux (Alton 2014; Jackson et al. 1999; Oliveira et al. 2005)
- Vers l'année 2, les racines ont atteint la nappe phréatique (12 m) et peuvent éventuellement prélever dedans
- Après 2 ans, les précipitations s'infiltrant dans le sol sont progressivement prélevées par les racines et n'atteignent jamais plus de 6 mètres.
- L'eau des précipitations n'atteint plus la nappe, qui diminue donc à la fois sous l'effet des prélèvements racinaires et de sa dynamique propre à l'échelle du bassin versant (flux de subsurface). Les prélèvements racinaires permettent d'assurer un accès à l'eau en saison sèche, mais ne constituent pas une grande quantité d'eau transpirée.
- La nappe phréatique s'élève de 6 mètres pendant 1.5 ans après la plantation, car à cette période

les eucalyptus prélèvent moins d'eau (moins d'indice foliaire, moins de surface racinaire, et profil de sol moins profond), ce qui a déjà été observé dans plusieurs autres travaux (Adelana et al. 2015; Dean et al. 2015; Manzione et al. 2014; Smethurst et al. 2015)

- La croissance rapide du système racinaire en profondeur permet un triple avantage adaptatif d'un point de vue hydrique (Reich 2014) : 1) pouvoir progressivement atteindre un stock d'eau du sol accumulé lors de la coupe et pendant la première saison des pluies ; 2) avoir le temps de prélever le flux d'eau gravitaire tout au long du profil dans ce sol sableux avec un régime hydrique de fortes pluies ; 3) pouvoir éventuellement atteindre la nappe phréatique
- La croissance en profondeur des racines précède largement le manque d'eau, et est un trait commun aux espèces pionnières ou de début de succession (*E. Grandis* a les caractéristiques de ces espèces (Tng et al. 2014)).
- Les bilans annuels de transpiration sont très variables, principalement en fonction de l'âge de la parcelle et des variabilités des précipitations. Après 2 ans, l'évapotranspiration est égale voire supérieure aux précipitations.

Au vu de ces résultats, certaines applications pratiques ont pu être formulées :

- La durée et la saison entre la coupe et la plantation d'une nouvelle rotation permettent une recharge du sol et de la nappe. Un choix peut donc être fait pour permettre d'optimiser cette période, dans l'objectif par exemple d'améliorer la recharge de la nappe.
- La sélection des eucalyptus sur leur vitesse de croissance racinaire en profondeur pourrait être un critère intéressant pour des zones où le stress hydrique est plus important
- Les niveaux de nappe phréatique évoluent beaucoup dans le temps, avec une profondeur maximale correspondant à la profondeur racinaire maximale en fin de rotation. Il y a toujours un débit alimentant le bassin versant (rivière) grâce à la recharge les deux premières années (ici quantifié à environ 200 mm/an, soit environ 15% des précipitations)
- Une gestion à l'échelle du bassin versant permettrait de maintenir un ration eau bleue/eau verte à un compromis permettant à la fois une production élevées sur certaines parcelles, et donc une consommation en eau élevée, et une recharge des nappes phréatiques suffisantes pour les autres usages.

remarques générales

La modélisation est une approche pertinente pour analyser des observations, en particulier lorsqu'elles sont nombreuses et en interaction. Les sites instrumentés sont particulièrement intéressants dans ce cadre, car de nombreux paramètres et variables sont mesurés, mais également parce que des paramètres du modèle peuvent être estimés via des mesures dédiées. Les expérimentations où certaines variables sont modulées, permettent de tester le modèle dans des conditions extrêmes, ce qui est un atout pour vérifier leur généralité. Cela permet également de hiérarchiser les processus mis en jeu à la suite de ces perturbations du système. La modélisation permet d'avoir une approche intégrée du système, et de comprendre les liens cause effet existant entre l'environnement et la plante. Dans la plupart des cas, il est au préalable nécessaire d'adapter le modèle en y ajoutant des processus, et c'est donc un aller-retour entre modèle et observation qui permet d'avancer. Pour cela, il est nécessaire de travailler conjointement avec les chercheurs responsables des observations, et que ces mêmes chercheurs participent également au développement et à l'évaluation des résultats du modèle.

II.3.3. Variabilités spatiale et temporelle du fonctionnement carboné et hydrique des écosystèmes forestiers

La « spatialisation » des flux et des bilans de carbone et d'eau (et de nutriments), est une demande importante en termes d'application, et est un challenge en terme scientifique. En terme d'application, par exemple en foresterie, l'intégration des fonctionnements propres à chaque unité de gestion pour définir les pratiques adéquates est actuellement basée principalement sur l'historique de la parcelle et l'expertise du forestier. La modélisation pourrait permettre d'adapter la sylviculture plus localement. Autre exemple, les estimations d'émissions de gaz à effets de serre sont largement variables spatialement et temporellement à l'échelle locale, par exemple à l'échelle d'une région administrative. L'estimation des potentiels d'atténuation d'émission de gaz à effet de serre est nécessaire à l'application de réformes et programmes nationaux (exemple du Brésil et du programme « agriculture bas carbone »). Actuellement, la plupart des estimations sont réalisées via des approches IPCC Tier 1 et Tier 2 qui reposent principalement sur des émissions par défaut et des changements de stocks, mais une approche Tier 3, plus localisée est recommandée dans le futur, permettant entre autre d'adapter plus localement les stratégies régionales d'atténuation d'émission de gaz à effet de serre et d'augmentation de séquestration de carbone (IPCC 2006).

La spatialisation du fonctionnement des écosystèmes est aussi un front de recherche actif, avec de très nombreuses solutions et exemples proposés dans la littérature (e.g. Drolet et al. 2005; Swenson et al. 2005; Turner et al. 2004a). Les freins actuels concernent à la fois les connaissances des déterminants de la variabilité temporelle et spatiale à différentes échelles, qui sont propres à chaque écosystème et espèce étudiée ; l'accès à une information spatialisée et complète sur des caractéristiques de la végétation, de son environnement et de sa gestion à l'échelle considérée, et son adéquation aux besoins des modèles employés ; l'incertitude sur les résultats obtenus, résultat des paramètres d'entrée, des équations du modèle ou des simplifications du modèle.

Le fonctionnement carboné et hydrique des écosystèmes peut être décrit à différentes échelles, depuis la feuille (ou même une zone de la feuille), jusqu'au globe, en passant par des échelles intermédiaires (arbre ou couche de feuilles, parcelle, paysage, région). Les ordres de grandeurs des variations au sein de chaque échelle spatiale va dépendre du système étudié, mais n'a pas de lien direct avec l'échelle étudiée : la variabilité de la photosynthèse à la surface d'une feuille peut être plus grande que la variabilité de la photosynthèse moyenne entre parcelles, ou inversement. La notion de variabilité du bilan de carbone et d'eau est donc intimement liée à l'échelle étudiée et au cas d'étude. Il en est de même pour la variabilité temporelle des processus, qui peuvent montrer des variabilités importantes aux échelles horaire jusqu'aux échelles interannuelles, voire au-delà.

Comme décrit précédemment, le propre de la modélisation en écophysiologie végétale est de prendre en compte les processus *importants* permettant de modéliser une sortie donnée à une échelle de temps et d'espace donnée (objectif). La plupart du temps, le modèle est construit en décrivant les processus à une échelle plus fine et en les intégrant, par exemple un paysage est constitué de parcelle, ou bien encore une parcelle est constituée d'arbres ou de couches de feuilles. La notion *d'importance* des processus peut paraître assez floue, mais regroupe en réalité trois notions: la notion de sensibilité du modèle, la notion de variabilité spatiale et temporelle du processus, et la notion de non-linéarité du processus. Ainsi, selon la description donnée au premier chapitre, il faut pour un objectif donné intégrer certains processus (« branches ») du modèle jusqu'à un niveau adéquat. La détermination de ces processus, leur intégration dans le modèle, la quantification de la variabilité spatiale des paramètres, et enfin la confrontation des simulations à la réalité expérimentale constituent la démarche générale des recherches menées dans ce domaine. Ce chapitre présente quelques exemples obtenus sur différents modèles, et ce thème sera abordé de nouveau dans la partie Perspectives (Partie III).

Echelle massif forestier et réseau de parcelles

Le sujet de ma thèse était l'étude du bilan de carbone du massif forestier de Fontainebleau en France, sur une année. L'approche suivie a été d'utiliser le modèle CASTANEA, qui est un modèle fonctionnant à l'échelle de la parcelle, sur l'ensemble des parcelles du massif (le Maire 2005; le Maire et al. 2005). Dans ce cas, le modèle est pré-existant à ce travail grâce à l'important investissement que mène depuis de nombreuses années l'équipe Ecophysiologie végétale de l'UMR ESE à Orsay. Le modèle n'a pas été largement modifié du point de vue des processus pour cette utilisation mais seuls quelques processus ont été améliorés et adaptés aux différentes espèces du massif forestier. Ce modèle a été développé à l'échelle de la parcelle, et testé sur de nombreuses données expérimentales à cette échelle, grâce aux sites instrumentés (Davi et al. 2005; Delpierre et al. 2012).

Il est à noter que considérer certains paramètres/processus variables spatialement et d'autres non variables spatialement constitue une modification *de facto* du schéma de modélisation adopté (cf II.3.1.). Le fait d'imposer une variabilité spatiale ou temporelle des paramètres crée une variabilité « externe » au modèle, par rapport à une variabilité « interne » issue des processus eux-mêmes et de leurs interactions. Prenons l'exemple de l'indice foliaire, puisqu'il fait aussi le lien avec la partie télédétection. Dans CASTANEA, le LAI maximal de l'année est un paramètre d'entrée du modèle (). Le modèle est sensible à ce paramètre, qui est variable spatialement entre les parcelles au sein d'une même espèce, et en plus a un effet non-linéaire sur la GPP. Ainsi, ce paramètre doit être estimé pour chaque parcelle, ce qui a été fait dans le Maire et al. (2005). MAESTRA est un exemple encore plus extrême, car l'indice foliaire (entre autre) est un paramètre d'entrée prescrit à chaque pas de temps. Dans ce modèle l'ensemble des processus simulant la croissance de l'arbre et de la dynamique de l'indice foliaire est éliminée, et celles-ci doivent donc être prescrites. Dans les deux cas ci-dessus (LAI maximal de Castanea ou LAI à chaque pas de temps de MAESPA), on peut déplorer qu'ils ne soient pas plutôt issus d'un sous-modèle, mais en pratique cette variable est difficile à modéliser (cf travaux sur G'Day dans Marsden et al. (2013) ou sur CASTANEA dans Davi et al. (2009)), et il est donc souvent préférable de la borner/paramétrer/forcer par des mesures, sous peine d'augmenter énormément l'incertitude des simulations. On voit bien que le choix du modèle et de ses propres limites (quels sous-modèles ?), des paramètres considérés comme constants ou variables spatialement ou temporellement, est une question complexe, dont la réponse repose à la fois sur la bonne connaissance de l'écosystème étudié, sur la possibilité d'intégrer des sous-modèles, et sur l'analyse de sensibilité des paramètres par rapport à une sortie donnée. Les résultats de la spatialisation à Fontainebleau montrent que pour une année donnée, le puit de carbone était de 371 gC/m²/an, avec une productivité primaire nette moyenne de 630 gC/m²/an. Les résultats à cette échelle ont été comparés aux statistiques de production données par l'IFN et donnent le même ordre de grandeur. Le travail publié porte sur une seule année, mais a été poursuivi dans la thèse (le Maire 2005) et une variabilité interannuelle de 8% a été obtenue sur la croissance en volume du bois aérien de la forêt.

La démarche mise en place sur l'étude à Fontainebleau a été utilisée dans un autre contexte, lors de la thèse de Claire Marsden, et publié dans Marsden et al. (2013) (Encadré 7).

Echelle régionale

A l'échelle régionale, nous nous sommes intéressés à la variabilité interannuelle des flux de carbone (NEE, GPP et TER) d'écosystèmes forestiers à travers l'Europe (le Maire et al. 2010a). Les distributions spatiales et temporelles des « périodes critiques » (période expliquant le plus la variabilité interannuelle des flux), a été simulée par ORCHIDEE à l'échelle de l'Europe, après avoir testé la méthodologie sur 7 sites Fluxnet contrastés. Les périodes critiques expliquant la variabilité interannuelle des flux de GPP sont le printemps et l'été, alors que les périodes s'étalent tout au long de l'année pour les flux de respiration TER. Un fort contraste a été observé entre le Nord de l'Europe, ou

et le Sud : au Nord, les périodes critiques sont contrôlées positivement par les variations de température, et par l'eau disponible dans le sol au Sud. Pour la GPP, la transition latitudinale entre une variabilité interannuelle due à la température ou au contenu en eau du sol varie dans la saison. Les périodes critiques de NEE sont principalement dues aux périodes critiques de NEE.

Un autre exemple est issu du travail de thèse de Valentin Bellassen (Bellassen et al. 2011c), qui portait sur les simulations des flux de carbone et des croissances des forêts à l'échelle de l'Europe avec le modèle ORCHIDEE, et analysait des principaux déterminants de l'augmentation de la productivité primaire nette entre 1950 et 2000. La prise en compte de la structure en âge des forêts par sous-région dans le modèle, et donc une spatialisation de certains paramètres du modèle a permis de mettre en avant cette structuration comme étant un des facteurs expliquant l'augmentation de la NEP, derrière l'effet fertilisation du CO₂ et les changements du climat.

Echelle intra-parcelle

A l'échelle intra-parcelle, la variabilité spatiale du fonctionnement à différents niveaux (arbres, position des feuilles dans la couronne) doit être prise en compte pour les sorties données comme l'absorption du rayonnement, la photosynthèse, les respirations, etc. Lors de la thèse de Fabien Charbonnier (Charbonnier et al. 2013), le modèle MAESTRA a été utilisé pour quantifier l'effet d'arbres, des érythrinae, sur le fonctionnement carboné et hydrique de plantations de caféiers au Costa-Rica. L'utilisation d'un modèle tridimensionnel et séparant le rayonnement direct et diffus a permis de montrer que le rayonnement PAR disponible pour les caféiers est diminué de 14% annuellement alors que la densité des érythrinae est faible (5.2 arbres par hectare). La dichotomie ombre/lumière, souvent utilisée dans les études des systèmes agroforestiers, est ainsi levée grâce à la simulation du rayonnement absorbé par chaque caféier, ce qui permet d'obtenir une estimation du gradient de rayonnement incident. De plus, un modèle simplifié d'absorption du rayonnement pour chaque couche (arbres et caféiers) a été obtenu à partir de MAESTRA en augmentant, dans les simulations, la densité des arbres d'ombrage. Ce travail a été poursuivi dans la thèse de Rémi Vezy, où il a pu tester l'effet de différents types d'ombrages des caféiers sur le rayonnement transmis et disponible pour les caféiers, dans un essai expérimental très contraint (petites parcelles, hétérogénéité forte, etc.) (Vezy et al. submitted). Comme montré dans le chapitre II.3.2, MAESTRA a aussi permis de simuler les compétitions interspécifiques entre des eucalyptus et des acacias au sein d'un essai expérimental, où les variabilités spatiales étaient très grande. En particulier, il existait un effet de bordure fort sur le rayonnement, que nous avons mis en évidence par la suite grâce à ses simulations spatialisées (non publié).

Cependant, ce type d'utilisation du modèle peut rapidement conduire à une grande complexité de paramétrisation, avec de nombreux paramètres à mesurer in situ, et cela peut aussi conduire à une complexité d'application du modèle d'un point de vue computationnel. Ainsi, comme abordé précédemment, et selon le principe énoncé au début, une approche analysant 1) la variabilité spatiale des paramètres ; 2) la sensibilité des paramètres et 3) leur non linéarité dans le modèle peut aussi être appliquée à l'échelle intra-parcelle à partir d'un modèle comme MAESPA. C'est ce qui a été fait dans Christina et al. (2016b), où de très nombreuses mesures de terrain ont permis de sélectionner les paramètres sensibles sur une plantation d'Eucalyptus. Le modèle a tout d'abord été paramétré de façon la plus complète possible, pour chaque arbre, en ne considérant que les variabilités spatiales existantes (mesurées) sur les paramètres. Ensuite, une analyse de sensibilité et d'incertitude ont été effectuées sur MAESPA de façon à isoler les effets du climat, des traits morphologiques et physiologiques et de la

compétition entre les arbres sur l'aPAR, la production primaire brute (GPP), la transpiration (TR), l'efficacité d'utilisation de la lumière (LUE) et l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE) via une approche par méta-modélisation. Cette approche permet à la fois de connaître les principaux déterminants des variables, mais également d'en obtenir un modèle paramétrique de prédiction de ces variables à partir des paramètres du modèle qui peuvent dans certain cas être des paramètres agrégés. Le métamodèle de prévision journalière des TR individuelles des arbres a été évalué à l'aide de mesures de flux de sève mesurés pendant un an : le pourcentage moyen d'erreur était de 11 %. Un pourcentage maximal d'erreur de 10 % sur les paramètres du métamodèle a mené à des incertitudes respectives de 18, 17, 16, 9 et 18 % pour l'aPAR, la GPP, la TR, la LUE et la WUE. Les incertitudes de la TR étaient les plus grandes chez les plus petits arbres. Cette étude met en évidence le besoin de prendre en considération la variation spatiale et temporelle des traits des arbres et des conditions environnementales pour les simulations à l'échelle de l'arbre. Dans la thèse de Rémi Vézy, des méta-modèles de ce type ont été utilisés pour réaliser un couplage entre MAESPA et un modèle de croissance et de production des caféiers (Vezy et al. in prep-a; Vezy et al. in prep-b).

Encadré 7 : Application du modèle G'Day sur un réseau de parcelles

Le modèle G'Day a été utilisé lors de la thèse de Claire Marsden pour simuler spatialement la productivité des parcelles (Marsden et al. 2013). L'objet simulé était ici un réseau de parcelles d'Eucalyptus au Brésil, choisies dans des conditions de sol contrastées. Ce travail a consisté tout d'abord à intégrer de nouveaux processus dans le modèle G'Day, processus pour certains spécifiques à l'Eucalyptus (e.g. enracinement profond) (cf section II.3.1). Ensuite, le modèle a été paramétré pour simuler la croissance de ces parcelles depuis leur date de plantation (

Figure 10). Dans ce cas, le nombre de variables spatialisées était plus faible. Dans ce système, l'âge de la parcelle est le premier critère déterminant la variabilité spatiale du fonctionnement carboné et hydrique de la plantation. Ajouté à cela la simple prise en compte des propriétés locales du sol sur le cycle de l'eau permet d'expliquer plus de 85 % de la variabilité spatiale de la croissance des troncs grâce au modèle (Figure 11). De façon intéressante, les résultats initiaux obtenus avec G'Day montraient qu'il était nécessaire de forcer l'indice foliaire avec des mesures obtenues par satellite pour obtenir des résultats satisfaisant (le Maire et al. 2010b). Après un travail approfondi sur le module de simulation de l'indice foliaire lors de la thèse de Claire, le modèle a été finalement capable de simuler l'indice foliaire plus efficacement, et ainsi il n'a plus été nécessaire de forcer l'indice foliaire, augmentant ainsi sa généricité.

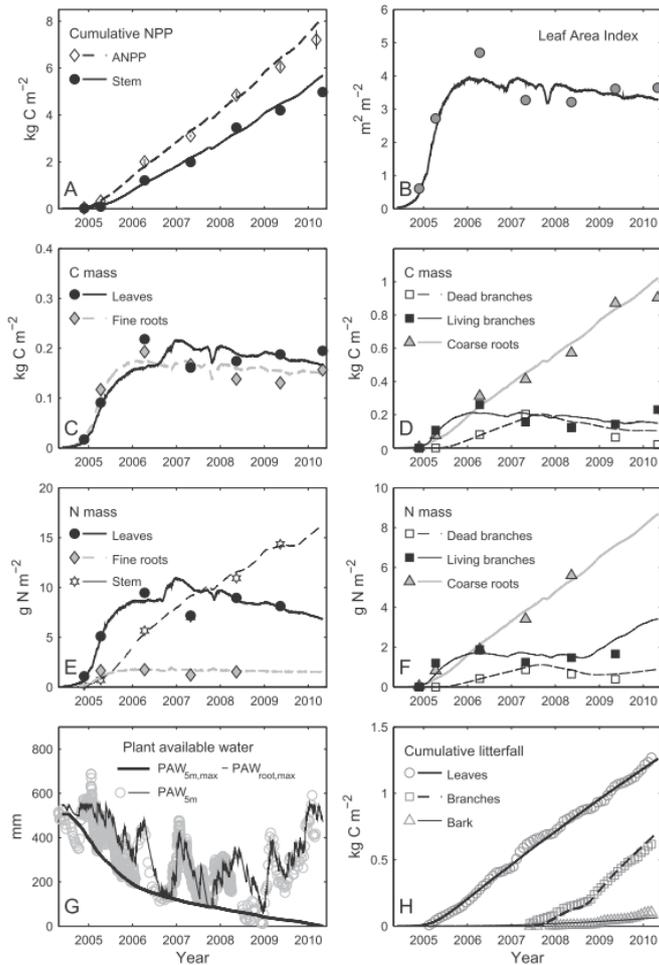


Figure 10 : Comparaison des simulations avec le modèle G'Day (lignes) et des mesures (symboles) sur une parcelle d'eucalyptus à la station d'Itatinga (São Paulo, Brésil). D'après Marsden et al. (2013)

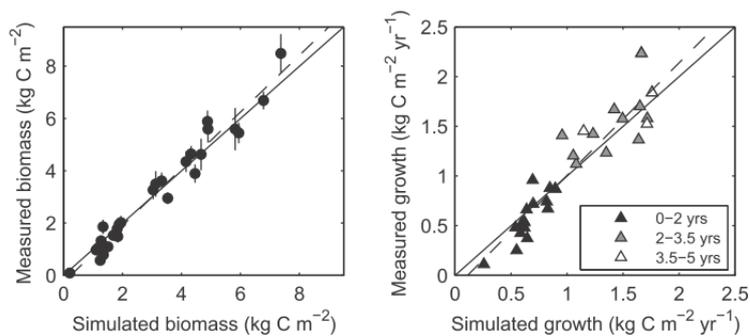


Figure 11 : Application du modèle G'Day sur 16 parcelles différentes, avec une prise en compte des types de sols différents. D'après Marsden et al. (2013)

Remarques générales

Dans ce chapitre, l'apport de la modélisation pour l'étude des variabilités spatiales et temporelles du fonctionnement (bilans radiatif, carboné et hydrique) des peuplements a été mis en avant. Cette thématique est abordée de diverses manières, suivant l'échelle considérée et les sorties attendues. La stratégie est bien de disposer d'une gamme de modèles permettant de s'adapter facilement au contexte, sans trop de modifications nécessaires. On voit cependant que cette thématique de recherche est

complexe car le modèle doit être suffisamment complet pour prendre en compte l'ensemble des processus qui peuvent être variables spatialement, mais également suffisamment simple pour pouvoir être paramétré de façon efficace. On aboutit parfois à des impasses, par exemple quand le modèle ne prends pas (ou mal) en compte un processus important. Une possibilité est alors de forcer les variables correspondantes via des estimations obtenues par ailleurs. Ainsi, une bonne connaissance du système dans différentes conditions rencontrées *in situ* est primordial pour modéliser de façon spatialisée les flux d'eau et de carbone, la production et les rendements des écosystèmes étudiés. Nous avons vu dans le chapitre précédent que des sites instrumentés offrent des mesures idéales, mais nous montrons ici que ceux-ci doivent être complétés par des réseaux de parcelles dans des conditions contrastées en vue de calibrer et / ou tester les modèles dans une gamme de variabilité spatiale et temporelle permettant d'obtenir une spatialisation (cartes) de ces sorties. Cette thématique de spatialisation est au centre du projet de recherche que je propose (Partie III).

II.3.4. Gestion sylvicole et adaptation aux changements climatiques

Nous avons vu précédemment que la modélisation mécaniste du fonctionnement des écosystèmes forestiers permet à la fois de synthétiser les connaissances, d'aider à la compréhension des mesures *in situ* et aux déterminants biotiques ou abiotiques de certains processus, d'intégrer des mesures locales pour changer d'échelle spatiale et temporelle, mais elle a également une autre fonction, probablement une des plus intéressantes : elle permet de réaliser des prédictions. Ce peut être de tester des scénarios de gestion, des scénarios de changements de climat, etc. En plus, elle permet de voir l'importance relative des changements de certaines variables du modèle, comme par exemple une augmentation du CO₂ par rapport à une augmentation des températures dans les scénarios de changement climatiques. Pour réaliser de telles prédictions, le modèle devrait en toute logique avoir été au préalable testé et validé dans les mêmes gammes d'environnement et avec les mêmes types de gestion. Cependant, en ce qui concerne les prédictions futures, malgré certaines expérimentations (environnement contrôlés, dispositifs FACE d'enrichissement en CO₂, (Duursma et al. 2016)), il n'existe souvent pas de mesures permettant de valider les simulations. Dans ce cas, on considère que si le modèle représente bien les processus à des échelles temporelles ou spatiales fines, et l'ensemble des processus entrant en jeu pour la gamme de variation du paramètre considéré, il aura un pouvoir prédictif suffisant. Ainsi, la modélisation mécaniste peut permettre par exemple de simuler un effet d'augmentation du CO₂, qui aura un impact direct (et positif) sur la photosynthèse foliaire, couplé par exemple à une diminution des précipitations qui aura aussi un effet indirect (et négatif) sur la photosynthèse via la régulation stomatique.

Ainsi, la modélisation mécaniste du fonctionnement permet d'intégrer les multiples effets d'actions ou de changements qui peuvent se produire dans un écosystème forestier, dans la limite 1) des mécanismes qui sont connus et intégrés dans le modèle sous forme d'équations; 2) des interactions qui peuvent se dérouler entre les processus au sein du système ; 3) de pouvoir évaluer les incertitudes sur les simulations. Le modèle peut ainsi, dans les conditions énoncées ci-dessus, permettre de réaliser des simulations prédictives pour des scénarios futurs ou des « expérimentations *in silico* ». Comme les interactions sont nombreuses entre les processus, soit de façon directes à un pas de temps fin, soit sont la conséquence de l'historique de l'écosystème sur des pas de temps plus long (eg. Contenu en eau du sol, biomasse, etc.), il est nécessaire d'avoir un modèle suffisamment complet pour pouvoir simuler des scénarios complexes comme ceux intégrant la gestion sylvicole ou le climat futur.

Une des problématiques importante dans nos recherches est l'effet potentiel des changements climatiques sur le fonctionnement des forêts, et cela pour différents objectifs :

- Pour une meilleure évaluation des futurs échanges entre la surface et l'atmosphère dans les modèles globaux, par exemple via la prise en compte de la séquestration du carbone dans les écosystèmes
- Pour une estimation de la productivité des forêts dans le futur, et éventuellement les risques de mortalité associés (événements extrêmes, aire de distribution, etc.)
- Pour une adaptation de la gestion des forêts dans le but de maintenir un objectif de production ou d'autres services écosystémiques.

Ainsi, l'implémentation de la croissance et des effets de la gestion sylvicole dans les modèles de fonctionnement carboné et hydrique est essentielle. Au cours de mon post-doctorat, j'ai entamé des travaux sur la prise en compte de la gestion sylvicole dans le modèle ORCHIDEE, travaux qui ont été poursuivis et approfondis par Valentin Bellassen dans sa thèse que j'ai co-encadrée. L'objectif était tout d'abord de pouvoir intégrer la croissance des peuplements forestiers dans le modèle, ce qui n'était pas le cas car le modèle ORCHIDEE est un modèle fonctionnant à l'équilibre, et représente donc, quand il est appliqué à l'échelle d'une parcelle, un fonctionnement de peuplement dont les flux sont en équilibre stationnaire avec le climat. Cela avait pour conséquence de surestimer la biomasse (Ciais et al. 2008) et de sous-estimer les puits de carbone dus à la croissance forestière en particulier dans les forêts gérées. Le premier problème est que pour un point de grille de simulation de ORCHIDEE, le PFT « forêt » comprends une très grande variabilité d'espèces et d'âges de parcelles, certaines âgées et donc plus proche de leur fonctionnement à l'équilibre, d'autres plus jeunes et donc dans une phase de croissance plus élevée. D'autre part, au sein d'un peuplement il existe aussi une hétérogénéité de dimensions d'arbres, qui vont être un des drivers de la gestion forestière telle que pratiquée en Europe, par exemple via les éclaircies. L'introduction explicite de classes d'âge et de dynamique intra-peuplement via un modèle de croissance inspiré du modèle FAGACEE, est illustré dans l'Encadré 8. L'intégration de ce type de modèle dans ORCHIDEE (Bellassen et al. 2010), qui a présenté en soi un challenge, a permis des avancées intéressantes : la première a été de pouvoir simuler la biomasse des forêts à différentes échelles, pouvant être validé avec des données classiquement mesurées lors d'inventaires forestiers (Bellassen et al. 2011b). La deuxième avancée a été de pouvoir réaliser des simulations sur des longues séries climatiques. Par exemple, des simulations ont été réalisées à l'échelle de l'Europe sur une série climatique entre 1950 et 2000, en prenant en compte à la fois les changements du climat, l'augmentation en CO₂ et l'évolution de la distribution en âge des forêts, et de simuler de manière plus adéquate leur production nette (NEP) sans passer par une modélisation « à l'équilibre » (Bellassen et al. 2011c). Localement, l'effet des changements du climat ou de la structure en âge peut avoir un effet important sur les flux nets de carbone (qui sont en moyenne de 175 gC/m² dans les années 90), mais l'augmentation de 1 g/m²/an de cette NEP à l'échelle européenne est due principalement à l'augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique. Auparavant, le modèle étant un modèle à l'équilibre, l'augmentation de la séquestration avec le temps ne pouvait être expliquée dans le modèle que par l'augmentation en CO₂ et le changement du climat, maintenant on peut estimer dans cette période due l'augmentation de la séquestration du carbone par les forêts européennes a été due à 61% à l'augmentation du CO₂, 26% au climat et 13% à l'évolution de la structure en âge des peuplements.

Au-delà d'une meilleure compréhension du fonctionnement (bilans de carbone, eau, etc.) des peuplements face aux changements climatiques, une des utilisations des modèles est de pouvoir tester des scénarios de gestion permettant d'évaluer les possibilités d'adaptation du système aux

changements climatiques. L'impact des changements climatiques sur les cultures, et leur éventuelle adaptation, est un des enjeux les plus importants pour la recherche agronomique et forestière actuelle. L'agriculture actuelle risque de ne plus être adaptée aux climats futurs, entraînant des pertes de productions sans précédents (Bugmann et al. 2010). En effet, si les émissions de gaz à effet de serre maintiennent leur augmentation actuelle (RCP 8.5), les changements climatiques commenceront à amplifier la vulnérabilité des systèmes agricoles à court (10 ans), moyen (50 ans) et long terme (siècle prochain).

Les premières pertes de productions risquent de devenir significatives par rapport à la variabilité inter-annuelle à partir de 2020 dans les zones semi-arides en Afrique (IPCC AR5 WG2 <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/> [22.3.4]), puis progressivement en Amérique centrale et du Sud, au Mexique, et en Asie (IPCC AR5 WG2 [24.4.4,25.2,25.7,27.3.4]). Ces pertes seront principalement dues à des températures plus élevées et des changements dans le régime des précipitations. Les tropiques sont vulnérables mais bénéficient d'une expérience séculaire dans la gestion des agroécosystèmes à bas intrants et sous contrainte. Chaque agroécosystème est défini par une plage de température et de ressources au-delà duquel il n'est plus viable et devrait être remplacé (cultures), ou adapté via la gestion (plantations pérennes). On peut citer entre autre adaptation la sélection génétique, le changement de la date de semis pour les cultures annuelles, la facilitation entre espèces, ou encore le déplacement géographique. Dans le cas des forêts ou des plantations pérennes, l'adaptation est plus difficile à cause du cycle de croissance long. Certaines pratiques peuvent accroître la résilience: la création d'hétérogénéité (multi-couches) et de diversité (multi-espèces, plusieurs sources de revenus) dans les plantations pérennes peut améliorer le microclimat, les effets de facilitation pour la capture des ressources (lumière, eau, nutriments), la fourniture de services écosystémiques. Une des hypothèses testée dans le projet ANR MACACC est que certains systèmes multicouches comme l'agroforesterie sont intrinsèquement plus résilients. Le projet MACACC intègre une étude socio-économique de l'adoptabilité de certaines pratiques et de la possibilité de mettre en place des paiements pour services écosystémiques pour atteindre des objectifs.

C'est dans le cadre de ce projet que se déroule actuellement la thèse de Rémi Vézy. Il étudie l'effet des changements climatiques sur des plantations de caféiers cultivés dans des systèmes agroforestiers et tente de répondre à la question suivante : quel sont les itinéraires les mieux adaptés pour le système agroforestier caféier face aux changements climatiques? L'exemple concerne la culture de caféiers arabica au Costa-Rica, qui est associée à des arbres d'ombrages. Les arbres d'ombrage, leurs espèces, leur densité et leur éventuelle gestion par la taille est une des composantes essentielle à ce système. Outre son apport en termes de qualité du café, d'augmentation de la biodiversité et de son effet positif sur plusieurs services écosystémiques, la gestion des arbres d'ombrage peut être un levier intéressant pour adapter ce système de production aux changements climatiques. En effet, la présence d'arbres d'ombrage change le microclimat des caféiers, principalement en termes de rayonnement incident et de température des feuilles de caféiers et de l'air (Charbonnier et al. 2013). La température est une des variables climatiques les plus importantes, par exemple lorsque la température moyenne annuelle dépasse les 23°C commence une dégradation de la qualité de maturation des graines et donc du café. Plusieurs études prédisent des pertes de production énormes dans le futur (Bunn et al. 2015; Craparo et al. 2015) ou des pertes de surfaces (Baca et al. 2014). Les arbres d'ombrage pourraient atténuer ces effets en fonction de la gestion employée, ainsi que l'effet fertilisant du CO₂.

Les travaux de Rémi consistent modéliser l'impact de plusieurs modes de gestion des caféiers sous ombrage, à travers la densité des arbres d'ombrage, leur espèce, leur gestion (e.g. élagage). L'hétérogénéité spatiale de tels systèmes requiert l'utilisation de modèles tridimensionnels (Charbonnier et al. 2013), mais leur utilisation sur de longues périodes de temps est une limite à leur

couplage avec des modèles d'allocation et de croissance des peuplements. L'alternative au couplage direct est l'utilisation des sorties des métamodèles comme décrit dans la section II.3.3. Les métamodèles basés sur MAESPA simulant l'absorption du rayonnement des caféiers et leur efficacité d'utilisation de la lumière sont ensuite utilisés dans des modèles d'allocation et de croissance à l'échelle de la parcelle, incluant les processus importants comme les étapes phénologiques de la production de baies de café modulés par la température et l'état hydrique du sol (Vezy et al. in prep-a). Le modèle couplé permet alors de prendre en compte l'influence des arbres d'ombrage, et différents scénarios de gestion de ces arbres, sur la production des caféiers. Le modèle ainsi obtenu peut alors être utilisé avec des données de scénarios climatiques futurs issus de modèles climatiques. Les premiers résultats montrent que l'augmentation de la température a un effet négatif sur la NPP, mais qui est compensé par l'augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique. La NPP augmente donc dans le futur. Cependant, les rendements en baies de café diminuent dans le futur à cause de l'augmentation de température influençant directement les différents stades de production des fruits. Certains modes de gestion, et l'augmentation de la NPP permettent de limiter partiellement cet effet, sans pour autant parvenir à le contrebalancer (Vezy et al. in prep-b).

Encadré 8 : couplage d'un modèle de gestion forestière et un modèle écophysologique

Le modèle Orchidée est un DGVM, donc conçu pour fonctionner à l'échelle d'une grille spatiale, typiquement de l'ordre de grandeur de 0.1 à 0.5° de résolution. Il peut être aussi appliqué à l'échelle d'une parcelle, par exemple pour une validation locale des simulations de flux de carbone ou d'eau. Comme la plupart des DGVM, les compartiments de carbone du sol et de la biomasse sont obtenus après une phase d'initialisation (« spinup ») consistant à amener le modèle à un état d'équilibre, c'est-à-dire que l'ensemble des compartiments évoluent autour d'un état stationnaire. Ainsi, il s'établit un équilibre entre croissance et mortalité des pools (Le Quere et al. 2009). Cet équilibre climatique atteint s'approche de la situation réelle des vieilles forêts naturelles non perturbées, comme par exemple l'Amazonie. Pour les forêts gérées, en particulier les forêts européennes, cela conduit par contre à des estimations irréalistes des flux et des stocks de carbone (Ciais et al. 2008; Luysaert et al. 2010), car il n'y a pas de prise en compte de la structuration en âge de la forêt (et donc de l'évolution de la production en fonction de l'âge), ni de l'exportation de bois aux récoltes (gestion forestière). Une possibilité est de forcer une exportation de biomasse de manière empirique (Zahle et al. 2006). Les travaux de Valentin Bellasse pendant sa thèse ont permis d'intégrer la simulation de ces nouveaux processus dans le modèle ORCHIDEE.

Il existe de nombreux modèles statistiques de croissance des peuplements forestiers, mais rares sont ceux qui permettent d'intégrer également une simulation des événements associés à la gestion de manière suffisamment mécaniste pour pouvoir être appliquées dans des contextes climatiques différents, y compris des climats futurs. Le modèle forestier FAGACEES (Dhôte and Hervé 2000) a ces avantages et ses principales équations ont donc été intégrées au modèle ORCHIDEE sous forme d'un module de gestion forestière (FMM, Figure 12).

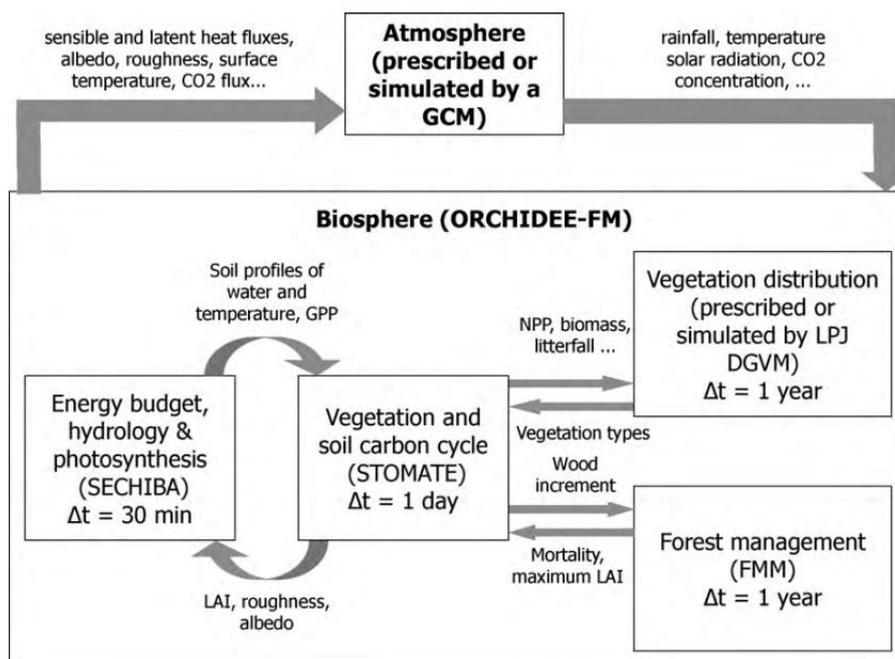


Figure 12 : Schéma du modèle couplé ORCHIDEE – FMM. D’après Bellassen et al. (2010)

La productivité primaire nette annuelle simulée par Orchidée est transmise au module FMM, qui en retour simule la mortalité des arbres ainsi que l’indice foliaire maximal. Le FMM est un modèle basé sur les distribution des dimensions individuelles des arbres dans le peuplement. Cette distribution est utilisée à la fois pour répartir la croissance totale de la parcelle (NPP, fournie par Orchidée) à l’échelle de l’individu, et pour calculer la mortalité des arbres. Cette mortalité des arbres peut être évitée par une gestion adaptée, basée sur le critère de « rdi », lui-même fonction de la distribution des dimensions des arbres. Ainsi, le modèle ORCHIDEE ne simule plus un « arbre moyen », mais une « parcelle moyenne », équienne, et ayant une distribution de dimension d’arbres évoluant dans le temps (Tableau 4). Le mode de gestion correspond à ce qui se pratique en majorité en Europe, c’est-à-dire une gestion équienne et monospécifique, avec un certain nombre d’éclaircies permettant d’éviter la mortalité naturelle des arbres et permettant d’atteindre des arbres de grandes dimensions en fin de rotation (Nabuurs et al. 2002).

Tableau 4 : Fonctionnement du modèle couplé

1	Un effet de l’âge de la parcelle est intégré dans Orchidée via une diminution de la photosynthèse. A cela s’ajoute l’effet déjà présent d’augmentation de la respiration autotrophe avec la biomasse, et donc de la diminution de la NPP. Un effet de l’âge a été également ajouté sur les coefficients d’allocation, avec moins d’allocation vers les racines dans les peuplements âgés
2	Ajout d’un compartiment “branches” à ORCHIDEE, avec ses propres allocations et taux de mortalité. Ajout d’un compartiment de litières pour les branches et les grosses racines au modèle de décomposition de la matière organique du sol.
3	L’allocation de la NPP aux arbres du peuplement se fait selon un modèle empirique utilisé par FAGACEE (Dhote 1996) montrant que les arbres les plus gros en diamètre ont une croissance plus rapide. Ce modèle comporte deux paramètres. Un de ces paramètres est uniquement fonction de la densité en arbre de la parcelle. Un autre paramètre prend en compte la variabilité entre les sites du aux caractéristiques pédoclimatiques. Ce deuxième paramètre est donc ajusté pour que la croissance totale obtenue avec le modèle empirique (somme des croissance de tous les arbres) corresponde à la NPP prescrite par ORCHIDEE
4	La mortalité naturelle (« self-thinning ») se produit quand la densité à une biomasse donnée dépasse un seuil. Pour une biomasse donnée, le ratio de cette densité réelle et de la densité

	maximale donne l'indice rdi de Reineke (Reineke, 1933). Si cet indice atteint 1, alors les arbres les plus petits meurent de telle façon que cet indice reste à la valeur de 1.
5	La gestion sylvicole doit permettre de maintenir le rdi à un niveau « cible » plus bas que 1, en fonction de l'intensité de la gestion souhaitée. Des coupes sélectives sont ainsi pratiquées pour que le rdi reste proche du rdi cible (c'est-à-dire entre $rdicible + d$ et $rdicible - d$, d étant un paramètre relié à l'intensité des coupes) tout au long de la rotation. L'éclaircie a lieu quand le rdi atteint la valeur ($rdicible + d$), et celle-ci ramène le rdi à la valeur plus basse ($rdicible - d$)
6	Lors d'une éclaircie, plusieurs stratégies peuvent exister : soit ce sont les arbres les plus petits qui sont coupés et exportés (éclaircie par le bas), soit ce sont les plus grands (éclaircie par le haut). Le choix entre les deux options se fait à travers un nouveau paramètre du modèle FMM.
7	L'indice foliaire maximum que le modèle peut atteindre est réduit à la suite d'une éclaircie, et met un certain temps (typiquement 3 ans) pour retrouver son niveau avant éclaircie. La biomasse de tronc exportée est calculée, et les racines, branches et feuilles des arbres morts vont dans les différents pools de décomposition de la matière organique du sol.
8	La coupe finale est soit prescrite à un âge donné, soit quand le peuplement a atteint un âge donné. Une nouvelle rotation peut alors commencer (Figure 13).

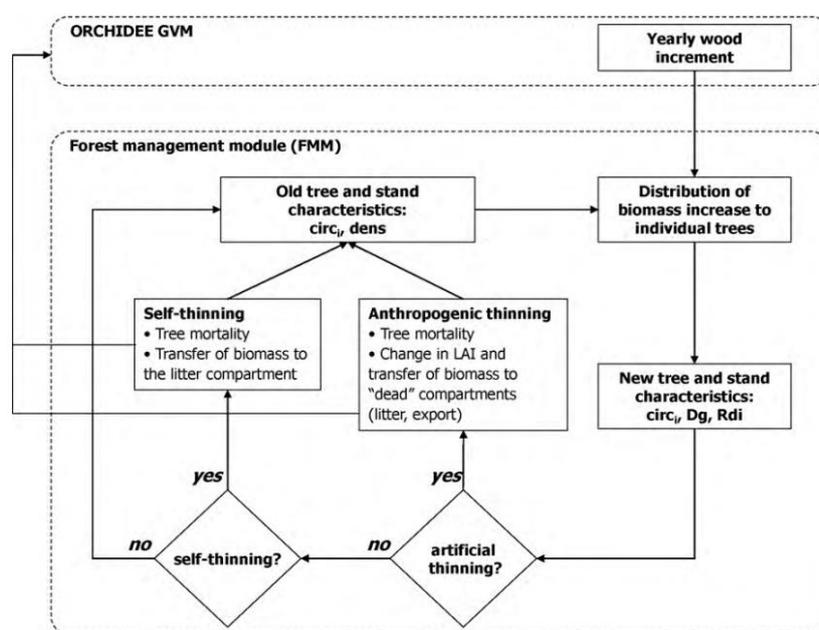


Figure 13 : Schéma du fonctionnement du module de croissance et de gestion forestière et de son couplage à Orchidée. D'après Bellassen et al. (2010)

Pour une simulation spatialisée à l'échelle régionale, des cohortes de peuplements d'âge différents sont simulés pour chaque point de grille. Cela alourdi de façon conséquente les simulations, ce qui rends le couplage à un modèle climatique complexe, mais permet cependant de mieux connaître les effets de la prise en compte d'une structuration en âge et d'une gestion des forêts. L'implémentation de ce modèle de gestion sylvicole a permis d'améliorer le modèle ORCHIDEE pour les forêts européennes de différentes façons : estimation de la croissance en biomasse des forêts, et *in fine* du flux net de carbone, évolution des flux en fonction de l'âge des peuplements, estimation des exportations en bois, évolution des dates d'éclaircie et de récolte en climat futur, etc. Un des avantages important est de pouvoir valider le modèle sur de nombreuses données habituellement mesurées en forêts via les inventaires et des bases de données à différentes échelles (Bellassen et al. 2011b). Ce modèle a permis d'analyser les puits de carbone des forêts européennes entre 1950 et 2000 (Bellassen et al. 2011c), et d'attribuer 61% de la croissance des puits de carbone à un effet de fertilisation du CO₂ atmosphérique, 26% pour les changements du climat et 13% seulement pour le changement de la structuration en âge des forêts (l'effet des nutriments n'étant pas inclus dans le modèle).

Remarques générales

La prise en compte de la sylviculture dans les modèles de fonctionnement des forêts gérées est essentielle, que ce soit pour les simulations à long terme, les tests de scénarios d'adaptation aux changements climatiques, ou plus simplement l'évaluation d'un changement de pratique. Ce dernier aspect est probablement celui qui est le plus attendu d'un point de vue appliqué pour les gestionnaires. Si certains processus sont bien connus et simulés et permettent d'utiliser le modèle de façon prédictive (exemple : choix de la date de plantation), il n'en n'est pas de même pour tous les processus (exemple : fertilisations). Il est donc nécessaire de s'orienter, dans les futurs développements vers une introduction progressive des processus clés qui peuvent être des leviers de gestion. C'est en particulier le cas pour les plantations d'eucalyptus où la gestion a un impact énorme sur les rendements et sur les cycles du carbone et de l'eau (cf Partie III).

II.4. Conclusion

Au cours de mes recherches passées, les différents projets auxquels j'ai participé ont permis progressivement une certaine spécialisation dans les domaines de la télédétection (principalement optique) et de la modélisation des systèmes forestiers. Pour synthétiser mes 15 années de recherche depuis le DEA, je pourrais dire que mes fils conducteurs pourraient se résumer dans les deux questions suivantes :

- Quelles informations utiles peut-on extraire d'images de télédétection pour une meilleure caractérisation des écosystèmes, de leur structure et de leur fonctionnement ?
- Comment développer et appliquer des modèles représentant au mieux la réalité du fonctionnement des écosystèmes, pour une meilleure compréhension de leur bilan carboné et hydrique

Ces deux domaines se sont parfois rencontrés dans certains travaux publiés, mais assez peu au final (le Maire et al. 2005; le Maire et al. 2010b; Marsden et al. 2013). Ceci est dû au fait que les études conjointes modélisation écophysologique-télédétection ne sont pas simples à mener, et qu'il est souvent plus simple de publier des méthodes ou résultats dans les domaines respectifs. Dans mes perspectives de recherche (Partie III), je souhaite faire converger ces deux domaines sur un cas concret sur lequel nous avons déjà bien avancé, à la fois en télédétection et en modélisation : la spatialisation des cycles du carbone et de l'eau des plantations d'eucalyptus au Brésil. Les méthodes développées dans ce cadre pourront alors servir à d'autres écosystèmes de plantations.

III) PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

III.1. Contexte professionnel, projet personnel et collectif

Mes perspectives de recherche prennent en compte à la fois mes compétences et trajectoires de recherches passées, mon attrait pour certaines nouvelles thématiques, un contexte de recherche collectif au niveau de l'UMR ou de collaborations avec d'autres unités, et un contexte professionnel plus large influencé par les grands enjeux scientifiques et de recherche pour le développement portés par mon institut, le CIRAD, et par la société en général.

Ceci s'inscrit aussi dans un contexte d'avancées considérables en termes de quantité et la qualité de données satellitaires disponibles, et d'une augmentation de la puissance des capacités de calculs (serveurs de calculs, clouds, etc.) et des algorithmes (fouilles de données, intelligence artificielle, etc.). Il faut réussir à suivre ces avancées, à la fois d'un point de vue théorique et pratique, pour pouvoir s'en servir au mieux, et de manière plus générale pour être en phase avec les avancées globales de la recherche dans ces domaines.

Je souhaiterai continuer de mettre à l'avenir mes compétences en télédétection et en modélisation au service du développement de nouveaux outils et méthodes de spatialisation du fonctionnement des agro-écosystèmes, à différentes échelles spatiales et temporelles, pour la recherche agronomique dans les pays du Sud. Ces recherches auront aussi des aspects appliqués pour l'aide au développement, qui est un des engagements forts du Cirad. Ainsi, ces perspectives s'inscrivent principalement dans l'axes stratégique du Cirad, « Agriculture écologiquement intensive », et en particulier dans les défis « Concevoir des systèmes de production durables valorisant les processus biologiques et écologiques » et « Concevoir des indicateurs et des procédures d'évaluation de la performance des systèmes de production ».

Le projet de recherche que je propose se situe à l'interface entre la télédétection et la modélisation, l'un et l'autre apportant des informations complémentaires sur le fonctionnement de la végétation, en plus des autres mesures *in situ*. **L'objectif principal est de pouvoir comprendre et intégrer la diversité spatiale et temporelle du fonctionnement carboné et hydrique des plantations forestières à différentes échelles, pour estimer leurs services écosystémiques et améliorer leur gestion afin de réduire leurs impacts environnementaux.** Un des aspects clé est le caractère multi-objectif, ne se limitant pas à la maximisation des rendements, mais prenant en compte l'ensemble des enjeux posés par les plantations forestières, comme les services écosystémiques.

La synergie entre mesures *in situ*, modélisation et télédétection sera approfondie, en essayant d'utiliser un grand nombre d'informations disponibles et informatives de l'imagerie satellitaire pour améliorer les estimations faites par les modèles. Ce projet repose sur des problématiques de modélisation et de télédétection, que je décris par la suite (III.3). Il s'inscrit dans la continuité des travaux et acquis antérieurs, et laisse une large part à de nouvelles approches et de nouveaux objectifs.

Ce projet de recherche à long terme n'est pas un projet personnel isolé, mais il reposera sur des partenariats avec des chercheurs et ingénieurs de différentes disciplines, en particulier en écophysiologie végétale, en science du sol, en informatique appliquée, et en télédétection, venant de

laboratoire des pays du Nord comme du Sud. De nombreuses compétences existent dans notre unité de recherche Eco&Sols, qui plus est sur des terrains communs. D'autres collaborations, par exemple avec l'UMR TETIS ou l'UMR CESBIO, seront essentielles à ce projet de recherche, comme elles l'ont été par le passé dans différents projets communs. De même, les collaborations avec l'UMR AMAP et l'UMR ESE seront poursuivies autour des problématiques de modélisation du fonctionnement des écosystèmes, sans bien sur fermer la porte à de nouvelles collaborations possibles avec d'autres unités en France ou à l'étranger. Dans les pays du Sud, la collaboration que j'ai mise en place dans le projet SEMP (FAPESP-Microsoft Research) avec différents laboratoires du campus UNICAMP et de l'EMBRAPA, à Campinas, se poursuivra sur un partenariat à long terme, comme c'est déjà le cas avec l'USP-ESALQ et un certain nombre d'entreprises produisant des eucalyptus au Brésil.

Outre les collaborations, le projet de recherche reposera également sur des doctorants à la fois de pays du Nord et du Sud, que je continuerai à encadrer. Mes premières expériences m'ont montrées qu'un accompagnement régulier des étudiants en début de thèse crée les conditions favorables au succès de la thèse. Le projet de recherche que je propose servira de cadre général à des propositions de thèse plus ciblées en télédétection et modélisation.

Les plantations d'eucalyptus au Brésil resteront à moyen terme mon objet d'étude privilégié, mais certaines méthodes pourront par la suite être adaptées à d'autres pays ou à d'autres types de culture (par exemple les plantations d'hévéa, de palmier à huile, etc.). De même, le projet de recherche que je décris porte sur une approche « inter-parcelles », mais certains développements pourront être utilisés à une échelle plus fine, par exemple à l'échelle de l'arbre (simulations intra-parcelle), dans la continuité des travaux réalisés en agroforesterie et avec MAESPA. Enfin, le travail sur les plantations d'eucalyptus est un travail d'équipe, avec des chercheurs et ingénieurs de différentes spécialités qui travaillent ensemble, et qui ont permis d'avoir une vision bien complète du fonctionnement des plantations. Le travail de modélisation et de télédétection repose en grande partie sur ces connaissances issues de nombreux travaux de terrain, d'observation en conditions réelles ou de manipulations expérimentales.

III.2. Contexte et enjeux des plantations forestières tropicales

III.2.1. Etat actuel des plantations forestières tropicales

Ces dernières décennies, le commerce de produits ligneux a fortement augmenté, suivant la demande mondiale en bois industriel (e.g. panneaux de particules), le papier et le carton, de charbon pour l'industrie (e.g. sidérurgie), entre autre. Ces besoins vont continuer à augmenter, de l'ordre de 20% d'ici 2060 (Elias and Boucher 2014). Etant donné la raréfaction de la ressource forestière naturelle, les plantations forestières productives ont vues leurs surfaces augmenter fortement.

Les surfaces de forêts plantées sont ainsi passées de 168 à 278 millions d'hectares entre 1990 et 2015, alors que dans le même temps les surfaces de forêts naturelles sont passées de 3961 à 3271 millions d'hectares (FAO 2015; Keenan et al. 2015; MacDicken 2015). En 2015, 7% des forêts mondiales sont des forêts plantées alors qu'elles ne représentaient que 4% en 1990 (Payn et al. 2015). Parmi les forêts plantées, les trois quarts sont « productives » (Del Lungo et al. 2006) bien que la typologie ne soit pas toujours évidente (Batra and Pirard 2015). Le rythme d'augmentation des surfaces plantées était de l'ordre de 2.1% par an entre 1990 et 2010, mais a légèrement diminué à 1.2% entre 2010 et 2015, et reste deçà de l'augmentation des besoins estimés à 2.4% par an (Payn et al. 2015). Selon le Millenium

Ecosystem Assessment, les plantations forestières représentaient 5% de la surface forestière mondiale en 2000 mais fournissaient 33% du bois récolté (MEA 2005). En 2012, cette proportion atteignait 46% (Payn et al. 2015). Elle pourrait atteindre 69% de la demande en 2030, avec une augmentation conjointe des surfaces et des productivités (Carle and Holmgren 2009). Cependant, il y a de nombreuses contraintes à l'augmentation des surfaces (Piketty et al. 2009), comme la concurrence avec l'agriculture « alimentaire » plus rentable, et les plantations forestières occupent les espaces moins favorables, allant parfois jusqu'aux conflits. La tendance générale est donc plutôt à l'amélioration de la productivité des plantations, qui passe par une intensification des pratiques et une sélection génétique.

Les plantations forestières tropicales, qui représentaient 29% des surfaces des plantations mondiales en 2015, ont les plus fortes productivité : $8.4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$, alors que la productivité moyenne globale des forêts est de $4.6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ (Payn et al. 2015). Dans la zone tropicale et sub-tropicale d'Amérique du Sud, la productivité atteint $24 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ en moyenne, avec principalement des espèces exotiques (88% des forêts plantées) des genres *Eucalyptus* et *Acacia*.

III.2.2. Cas des plantations d'Eucalyptus au Brésil

Les plantations du genre *Eucalyptus* représentent 33% des plantations forestières tropicales, soit environ 20 millions d'hectares dans le monde (Iglesias-Trabado et al. 2009), alors qu'en 1950 seuls 700 000 hectares étaient recensés. Originaires principalement d'Australie, les eucalyptus sont maintenant plantés dans de nombreux pays à travers le monde, les plus grandes surfaces étant au Brésil (4.2 M ha en 2009), en Inde (3.9 M ha) et en Chine (2.6 Mha) (Iglesias-Trabado et al. 2009). Sur les plus de 700 espèces, un nombre restreint est utilisé, principalement *E. grandis*, *E. urophylla*, *E. saligna*, *E. globulus*, *E. nitens*, *E. camaldulensis*, *E. tereticornis*, *E. pellita* et *E. citriodora* et des hybrides. Les eucalyptus présentent de nombreux intérêts, entre autre leur adaptabilité à de nombreuses conditions pédoclimatiques, leur forte productivité y compris sur les sols très pauvres (Goncalves et al. 2008; Laclau et al. 2003), leur faible vulnérabilité phytosanitaire, la possibilité de rejeter après la coupe. En outre, ils présentent des qualités industrielles pour la pâte à papier et les panneaux de particules. Les plantations varient beaucoup dans le monde, allant de petites plantations d'agriculteurs pour leur propre consommation, à des grandes parcelles appartenant et gérées par des industries, avec entre ces deux extrêmes de nombreux cas intermédiaires. Par exemple, la moitié de l'énergie domestique d'Antananarivo (Madagascar) ou de Pointe Noire (Congo) provient de plantations d'Eucalyptus établies autour de ces villes (Bertrand 1999; M. 2008) ; certaines entreprises au Brésil ont une surface plantée avoisinant les 500 000 hectares, et l'équivalent en aire de préservation permanente et réserves (Figure 14).



Figure 14 : Plantations d'eucalyptus au Brésil et aire de préservation permanente

En 2014, les plantations d'eucalyptus atteignaient les 5 Mha au Brésil, plantées principalement dans la moitié sud du pays, et qui représentent 71% des plantations et 81% de la production en bois du pays (Gonçalves et al. 2013). Les plantations d'eucalyptus sont en majorité (75%) des plantations industrielles, et génèrent environ 5% du PIB et 4% de la valeur des produits exportés par le Brésil (ABRAF 2012). La production moyenne est de $40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pour des rotations de 6 à 8 ans. De fortes disparités existent cependant, avec des productivités qui peuvent être comprises entre 20 et $60 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ en fonction des conditions pédoclimatiques et de la gestion (ABRAF 2012). Avec une production primaire brute de l'ordre de $4200 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ (Epron et al. 2013; Nouvellon et al. 2012a; Stape et al. 2008) et une NPP pouvant atteindre environ $3000 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$, il se place parmi les écosystèmes forestiers les plus productifs au monde (Figure 15). La productivité était d'environ $25 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ au début des années 1990 (Colodette et al. 2014) : les gains de productivités réalisés viennent à la fois d'une meilleure sylviculture, mais surtout de l'amélioration génétiques avec le développement d'hybrides adaptés aux conditions locales et facilement multipliées par bouturage (plantations clonales).

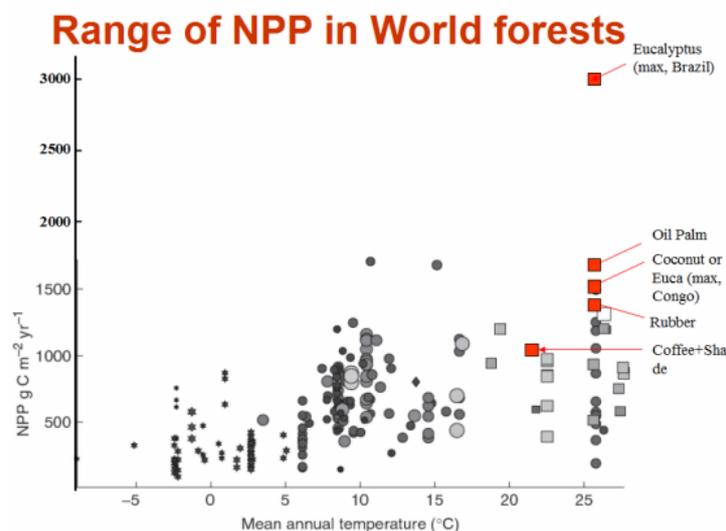


Figure 15 : Productivité primaire nette en fonction de la température moyenne d'écosystèmes forestiers dans le monde, d'après Luyssaert et al. (2007). Des écosystèmes de plantations tropicales sur lesquels travaillent l'UMR Eco&Sols ont été ajoutés, dont une valeur (haute) pour des eucalyptus dans de bonnes conditions au Brésil. Figure extraite de Roupsard et al. (2008).

III.2.3. Principaux enjeux : production, environnement, changements climatiques

Les plantations d'eucalyptus au Brésil, qui présentent des surfaces considérables, sont porteuses d'enjeux à la fois économiques, environnementaux, sociaux et culturels. Si la rentabilité économique est claire au Brésil (malgré le ralentissement dû aux dernières crises économiques), elle doit s'accompagner d'une quantification réelle de la durabilité des systèmes, des impacts environnementaux, éventuellement des services écosystémiques, et cela en prenant en compte les évolutions futures, en particulier sous l'angle des changements globaux. Les principaux enjeux associés au projet de recherche proposé sont décrits ci-dessous.

Impacts environnementaux et services écosystémiques :

La forte transpiration des plantations d'eucalyptus après ~2 ans peut entraîner une diminution du débit des cours d'eau, du niveau des nappes phréatiques, et affecter la ressource en eau pour d'autres utilisations (agriculture, eau potable) (Scott and Prinsloo 2008; van Dijk et al. 2007; van Dijk and Keenan 2007; Vanclay 2009). La gestion spatialisée à l'échelle du bassin versant, en associant d'autres cultures ou zones de conservation moins consommatrices en eau, la plantation en mosaïque de parcelles d'âges différentes, l'allongement de la durée entre récolte et plantation, la diminution de la fertilisation, un choix raisonné des dates de récoltes ou encore une sélection de génotypes moins consommateurs en eau peuvent contribuer à réduire ces impacts négatifs. D'autre part, il serait également intéressant de pouvoir quantifier l'impact de ces fortes transpirations sur le climat régional, via une diminution des températures de surfaces et une augmentation de l'humidité de l'air, comme c'est le cas pour les forêts tropicales naturelles (Alkama and Cescatti 2016; Aragao 2012; Bonan 2008; Ellison et al. 2017).

Concernant le cycle du carbone, plusieurs aspects sont à souligner : 1) il peut y avoir une séquestration de carbone dans les sols, par exemple dans le cas d'établissement des plantations sur des pâturages dégradés, même si une grande disparité existe (Assad et al. 2013; Lima et al. 2006; Maquere et al. 2008; Novaes et al. 2017); 2) la biomasse de bois présente en permanence sur les parcelles constitue également un stock de carbone non négligeable, et une séquestration nette si les plantations se sont établies sur d'anciens pâturages par exemple et sont maintenues en plantations; 3) même si le devenir du bois produit a une durée de vie relativement courte, et ne présente pas un potentiel de séquestration sur le long terme, l'utilisation du bois comme source d'énergie permet d'éviter l'usage d'énergie fossile (e.g. charbon de bois dans l'industrie sidérurgique au lieu de charbon minéral) (Piketty et al. 2009). Cependant, la quantification de la séquestration de carbone est difficile et passe généralement par des approches « Tier 1 » ou « Tier 2 » (IPCC 2006). L'approche de spatialisation se rapproche d'une estimation « Tier 3 ». Plus généralement, ces enjeux entrent dans le cadre de la quantification des services écosystémiques des plantations (Baral et al. 2016).

Durabilité:

La forte productivité conduit à un niveau élevé d'exportation de nutriments au moment de la récolte, qui ne sont pas compensés par le rythme d'altération des roches, par les dépôts atmosphériques ou la fixation symbiotique locale. Ils doivent donc être compensés par des apports extérieurs pour assurer la durabilité du système (Laclau et al. 2005). Les études de Laclau et al. (2010) ont montré qu'il n'y a pas de pertes par drainage profond, et donc pas de pollution associées à cette fertilisation, même en cas de légère sur-fertilisation. Cependant, l'impact environnemental de la production des engrais minéraux, le coût élevé de ces engrais et les perspectives de diminutions de la ressource posent la question à plus long terme de modifier les pratiques actuelles. Outre la disponibilité en éléments minéraux, la durabilité du système peut être réduite par compaction des sols, la diminution de la teneur en matière organique ou l'acidification (Cannell 1999; Powers 1999). De façon générale, la durabilité du système est primordiale pour le planteur, qui va ajuster sa gestion de manière à limiter les impacts futurs sur la productivité.

Changements climatiques :

Une hausse des températures moyennes et une augmentation des sécheresses sont prédites par les modèles dans de nombreuses régions du monde (IPCC 2014). Pour le Brésil, les prédictions sont relativement contrastées : les précipitations annuelles pourront augmenter dans certaines régions, mais le nombre de jours sans pluies augmentera également. Les plantations forestières à croissance rapide

étant très dépendantes des précipitations et de la durée de la saison sèche, on peut s'attendre à un fort effet sur la production, qui peut être variables spatialement.

III.2.4. La spatialisation du fonctionnement à différentes échelles : une approche intégrative

Les écosystèmes réagissent en permanence à l'évolution de facteurs biotiques et abiotiques sur des échelles de temps et d'espace différenciées. Pour répondre aux enjeux décrits ci-dessus, des estimations du fonctionnement carboné (production, séquestration de carbone, etc.) et hydriques (déficit et stress, pertes des surfaces, etc.) des plantations doivent être réalisées aux échelles temporelles et spatiales qui intéressent les gestionnaires et les décideurs : agriculteur ou technicien à l'échelle intra-parcellaire, entreprise sylvicole, municipalités à l'échelle multi-parcelle ou d'un massif forestier, et jusqu'aux institutions régionales ou étatiques pour mettre en place des réglementations à grande échelle par exemple.

L'approche de « spatialisation » consiste à réaliser des estimations spatialisées, localisées, de certaines variables ou fonctions d'intérêt, à une échelle donnée. Outre les besoins concrets décrits auparavant, cette approche questionne nos connaissances scientifiques sur le fonctionnement des plantes dans leur environnement, et pose la problématique de l'articulation des diverses échelles spatiales auxquelles les processus doivent être considérés (voir partie Bilan II.3.3). Cette démarche de spatialisation suppose que la variabilité spatiale de ces fonctions est connue et peut être observée, et que les causes sous-jacentes de cette variabilité peuvent être séparées et comprises. La modélisation est un outil essentiel ici, en particulier la modélisation mécaniste, car elle permet de synthétiser notre niveau de compréhension du fonctionnement local, et de prendre en compte les interactions entre différents processus qui peuvent être à l'origine de cette variabilité spatiale. Cette approche de spatialisation des modèles permet de tester la généralité des processus dans différentes conditions. Elle permet également de hiérarchiser et d'extrapoler spatialement les processus les plus importants, qui peuvent être étudiés localement sur des sites expérimentaux instrumentés par exemples. L'approche sous-jacente consiste à étudier le fonctionnement fin des plantations sur quelques sites instrumentés (observatoires, ou expérimentation avec manipulation), d'en déduire des modèles de processus, et de tester ces modèles dans d'autres conditions.

L'emboîtement de différents niveaux spatiaux et temporels, depuis l'arbre jusqu'à la région et de la demi-heure à la décennie, requiert l'utilisation de modèles différents qui représentent les fonctionnements mis en jeu à chaque niveau, et qui participent à la variabilité spatiale de la variable ou de la fonction étudiée. En outre, il est nécessaire de distinguer l'échelle de fonctionnement à laquelle les processus sont simulés, et l'échelle d'intégration des sorties des modèles. Ainsi, en présence de fortes non-linéarités d'une fonction par rapport à un gradient spatial d'une variable, le fonctionnement moyen se calcule par la moyenne des fonctionnements, c'est-à-dire via la spatialisation de la fonction (inégalité de Jensen). La spatialisation des modèles pose aussi la question de la prise en compte ou non dans les modèles d'interactions spatiales entre les entités simulées. Cette prise en compte est classique pour les modèles hydrologiques spatialisés, elle l'est beaucoup moins pour les modèles de bilan carboné des écosystèmes.

La paramétrisation des modèles à une échelle spatiale donnée est un préalable de l'approche de modélisation spatialisée. L'utilisation de données spatialisées peut également servir pour valider les sorties du modèle. Étant donné les incertitudes sur les différents processus des modèles, et la difficulté

de les paramétrer spatialement avec précision, il est nécessaire de mettre en place des systèmes permettant de contraindre le modèle à simuler correctement des sorties mesurées.

De ces observations découlent trois problématiques essentielles qui constituent les 3 axes de recherches que je souhaite mener à l'avenir :

- Un axe sur l'amélioration des modèles de fonctionnement carboné et hydrique des plantations forestières, d'analyse et de modélisation des mécanismes déterminant la variabilité spatiale de ces fonctions, et/ou pouvant impacter les sorties intégrées du modèle
- Un axe sur les observations spatialisées et la caractérisation des plantations forestières par télédétection, et d'analyse des bases de données spatiales
- Un axe sur l'assimilation de données expérimentales ou satellitaires dans les modèles de fonctionnement

Ces trois axes de recherches permettent d'élaborer une approche analytique intégrée et pertinente des variabilités spatiales à différentes échelles, en s'inspirant de travaux similaires déjà réalisés (e.g. Almeida et al. 2010; Tickle et al. 2001). Comme souligné en introduction de ce chapitre, je vais décrire l'approche en prenant comme exemple la spatialisation des bilans carbonés et hydriques des plantations d'eucalyptus à l'échelle du massif forestier, ou de la « mosaïque de parcelles ». Pour cela, le modèle G'Day paraît bien adapté comme nous l'avons montré lors de la thèse de Claire Marsden.

III.3. Synergie expérimentation-modélisation-télédétection pour la spatialisation du fonctionnement des plantations tropicales

III.3.1. Axe 1 : Amélioration de la compréhension du fonctionnement des écosystèmes par la modélisation

L'objectif général des perspectives que je présente ici est de pouvoir estimer les échanges nets de carbone entre les plantations et l'atmosphère, la simulation de la croissance des peuplements et en particulier de la biomasse des troncs, le stockage de carbone dans les sols et l'évapotranspiration à l'échelle régionale et annuelle (typiquement à l'échelle d'un état ou d'un pays, ici le Brésil). Si des méthodes empiriques peuvent arriver à ces estimations, l'utilisation de modèle mécaniste est plus appropriée (Almeida et al. 2010).

Les modèles à base mécaniste sont des outils privilégiés de synthèse des connaissances des fonctionnements des plantations pérennes, d'amélioration de la compréhension des processus et de leurs interactions, d'analyse de leurs importances relatives (sensibilités et incertitudes), et d'analyse de réponse via des simulations prédictives. Ils permettent d'estimer quels sont les déterminants d'origines abiotiques, biotiques ou anthropique, et leurs interactions, sur les variables simulées. De tels modèles reposent essentiellement sur des observations expérimentales, et comme décrits dans la partie Bilan II), leur construction est avant tout une question d'ajout ou de suppression de certains processus en fonction de l'objet simulé et de la variabilité des fonctions dans la gamme d'application du modèle. La construction d'un modèle en vue d'une spatialisation régionale devra donc intégrer au mieux les mécanismes mis en jeu, variables spatialement et significatifs (sensibles) dans le modèle pour une sortie donnée. On comprend donc qu'une des étapes préalable et essentielle à la spatialisation d'un modèle est bien la construction du modèle lui-même, qui doit être réfléchi suivant ces questions : Quelle sortie du modèle sera analysée ? Quels sont les processus sensibles et variables spatialement qui déterminent cette sortie ? Peut-on simuler ces processus, et avec quelle précision ? Peut-on accéder

à une paramétrisation spatialisée de ces processus ? Peut-on accéder à une validation spatialisée ou intégrée des sorties du modèle ? Ceci sachant qu'il y a un manque de connaissances sur certains processus (Fontes et al. 2010).

Nous avons vu au cours du travail de thèse de Claire Marsden que le modèle G'Day est un modèle qui peut être appliqué sur un gradient de types de sols pour simuler les croissances de plantations d'eucalyptus. Ce modèle est relativement simple par rapport aux autres modèles que j'ai utilisé, mais il a plusieurs avantages (cf II.3.1). La variabilité entre parcelles est en premier lieu impactée par les différences de réserve en eau maximale disponible par la plante, ce qui est en accord avec d'autres observations (Harper et al. 2009). Il est cependant nécessaire de poursuivre le travail d'amélioration du modèle dans l'optique d'une application spatialisée : le modèle doit intégrer les processus « nécessaires et suffisants » pour les variables de sortie considérées. Quelques une des pistes qui seront développées à l'avenir sont décrites ci-dessous :

Variabilités spatiales des sols et interactions avec la nappe phréatique

La dynamique de croissance racinaire en profondeur et l'accès à une nappe phréatique est un processus essentiel dans les plantations d'eucalyptus (Christina et al. 2017) et même de manière plus générale (Boyce et al. 2017). Nous avons vu dans le travail de Claire Marsden que la variabilité spatiale de la productivité, pour un climat similaire, s'explique en partie par la variabilité édaphique. Jusque-là ce sont les paramètres décrivant la réserve utile des sols qui ont été utilisés, tout en prenant en compte une dynamique d'exploration racinaire en profondeur. Au vu des résultats obtenus plus tard par Mathias Christina lors de sa thèse avec MAESPA, il semble que deux notions supplémentaires doivent être ajoutées : i) une notion de dynamique des flux verticaux d'eau dans les sols en lien avec un profil racinaire, qui peut créer une différence par rapport au modèle « bucket » utilisé actuellement dans G'Day ii) un accès à la nappe phréatique grâce aux racines profondes. Implémenter une modélisation plus fine des flux hydriques dans le sol ou l'accès à une nappe phréatique de profondeur connue dans G'Day est possible, mais se fera nécessairement au dépend du temps de calcul. La question de l'accès des racines à une nappe phréatique est critique, car elle peut expliquer des différences de fonctionnement entre des parcelles. Des premiers éléments d'analyse empirique montrent par exemple sur des images satellites des gradients de température de surface en fonction de la distance au cours d'eau le plus proches en saison sèche. Si de tels résultats se confirment, il sera nécessaire de prendre en compte ce processus et de trouver une façon de le paramétrer spatialement. Un couplage à un modèle hydrologique spatialisé, qui serait en théorie le plus informatif et permettrait de prendre en compte une dynamique à l'échelle du bassin versant, semble illusoire à grande échelle. Par contre, deux pistes sont possibles : i) utiliser des estimations de profondeurs de nappes basées sur la géomorphologie des bassins versants (<http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/English/hand.php>), en prenant en compte la forte incertitude associées à ce type de carte ; ii) accéder à ces informations via l'analyse d'images satellites, en particulier d'images thermiques ou d'images de NDVI, comme cela a été fait dans d'autres études (e.g. Koide and Koike 2012).

Variabilité génotypique, allocation du carbone

Une autre source de variabilité spatiale concerne la variabilité génotypique. Il existe un grand nombre de variétés génotypiques d'eucalyptus ou de croisements, de nombreuses entreprises ayant mis en place leur propre programme d'amélioration (Gonçalves et al. 2013). Ces génotypes sont donc adaptés aux climats et aux types de sols locaux. Une comparaison de génotypes réalisés sur un site au Brésil (projet Eucflux) a montré une forte variabilité de la croissance en biomasse, avec des différences maximales de l'ordre de 30%. Cependant, dans ce cas certains génotypes provenaient d'autres régions,

et n'étaient donc pas les mieux adaptés aux conditions locales. De nombreuses différences morphologiques et de traits fonctionnels ont été mesurés entre ces génotypes. Par exemple, il existe de grandes différences d'indices foliaires, de dimension des couronnes et d'angles foliaires, qui suggèrent une forte variabilité du rayonnement absorbé. Une étude en préparation avec le modèle MAESPA (Le Maire et al. in prep) montre que cette absorption différente n'explique pas entièrement les différences de productivité entre les génotypes. Des travaux utilisant la méthode des TBCA sur 6 de ces génotypes montrent par contre que la GPP est très variable entre les génotypes, et explique en partie les différences de production de bois entre les génotypes, tout comme, des différences d'allocation entre tronc, feuilles et système racinaire. Il est donc nécessaire d'avoir une réflexion sur la possibilité de modéliser de telles différences. La plupart des processus mis en jeu sont déjà présent dans le modèle (absorption du rayonnement, photosynthèse, allocation) et il s'agira plutôt d'adapter les paramètres du modèle à ces différences génotypiques. De nombreuses mesures réalisées au cours de différents projets permettront d'avoir une idée de la variabilité des paramètres en question, et donc de la faisabilité de l'approche : projet Eucflux, projet TECHS, etc. S'il est impossible pour un objectif de spatialisation de connaître précisément les génotypes utilisés et leur jeu de paramètres associés, il serait possible d'obtenir une information de classification fonctionnelle des génotypes par l'analyse des images satellites (cf III.3.2), et d'associer un jeu de paramètres à ces groupes. Un autre aspect concernant l'allocation est la possibilité de séparer les parcelles plantées des parcelles en taillis. Les allocations changent fortement entre ces deux types de gestion, et il sera nécessaire de pouvoir séparer ces deux types de gestion par télédétection.

Effets directs et indirects du climat sur la croissance

Des travaux récents ont montré que la croissance en biomasse des forêts peut être à la fois fonction de l'offre (photosynthétats) mais également d'une limitation de la croissance de façon directe soit par la température, soit par le potentiel hydrique (force de puit). Cet effet pouvant être relativement important, il est important à la fois d'avoir plus de données expérimentales, mais également de l'implémenter dans le modèle utilisé. Cela passe par la simulation d'un compartiment de réserve, mais également par une possibilité de limitation de la croissance de façon directe par les variables climatiques dans certaines conditions. L'exemple d'implémentation de Guillemot et al. (2017), maintenant basé à Eco&Sols au Brésil, sera suivi.

Décomposition de la MO et respiration hétérotrophe,

Le modèle G'Day intègre plusieurs modèles de décomposition de la matière organique du sol : historiquement, le modèle Century, puis le modèle Century avec des modifications apportées par Corbeels et al. (2005a; 2005b; 2005c), et plus récemment une implémentation du modèle MOMOS (Pansu et al. 2010) réalisée au cours des stages de Laure Vogel et Amandine Dionnau. Les deux types de modèles sont relativement semblables d'un point de vue conceptuels, avec une entrée de litières qui se répartit dans des compartiments en fonction de sa qualité, des compartiments de carbone plus ou moins labiles, des flux entre compartiments qui sont fonction des conditions de température et d'humidité, une respiration fonction des flux. Pour une application spatialisée, certains paramètres de ces modèles peuvent varier en fonction des propriétés du sol, en particulier la texture. Ces modèles sont cependant difficile à appliquer localement, et l'hypothèse est souvent faite que la plupart des paramètres sont génériques, et que la prise en compte de la propriété des sols, de l'humidité et de la température permettent à eux seuls d'expliquer les vitesses et dynamiques de décomposition. Cependant, cela reste en grande partie une hypothèse difficile à tester localement. Les travaux de stage de Laure Vogel et Amandine Dionnau ont montré qu'il pouvait être nécessaire de calibrer certains paramètres localement pour obtenir des simulations de stocks et de flux de respiration proches des

mesures. Un travail consistera donc à vérifier sur les jeux de données dont nous disposons (Eucflux, Itatinga, etc.) (Nouvellon et al. 2012b; Nouvellon et al. 2009; Nouvellon et al. 2011) si une même paramétrisation peut représenter correctement la variabilité observées, et de voir comment cette variabilité peut être prise en compte autrement. Ceci se fera en collaboration avec les chercheurs de l'UMR Eco&Sols spécialistes de la décomposition de la matière organique. La problématique générale de couplage des cycles C-N-P est une question centrale (Achat et al. 2016), qui peut avoir des répercussion sur les autres processus (Ellsworth et al. 2017), et c'est un des « défis » affiché au sein de l'UMR Eco&Sol.

Rôle des nutriments

Les plantations d'eucalyptus sont fertilisées, donc les conditions nutritives ne devraient pas être limitantes pour les plantations, et on constate même une consommation « de luxe » de certains nutriments (Laclau 2012). D'autre part, les analyses des anions, cations et carbone organiques dissous des solutions des sols sous plantation d'eucalyptus dans des sols tropicaux profonds (Laclau et al. 2010) ou la composition chimique des eaux de rivière de bassin versants incluant des plantations à croissance rapide (Hopmans and Bren 2007; Lima and Zakia 2006), Lima et Zakia 2006) montrent qu'il y a peu de perte (ou de pollution) par drainage profond. Il n'est donc a priori pas indispensable, que ce soit pour des questions de simulation de la production (conditions non-limitantes), ou pour des questions de sorties de modèles (e.g. enjeu environnemental de la pollution par lessivage et drainage profond) d'inclure une modélisation détaillée des différents nutriments dans le modèle. Il y a cependant plusieurs problématiques qui méritent toutefois de s'atteler à ce travail : i) il est probable que les ressources mondiales en P (Roy et al. 2016) et en K (Manning 2010) diminuent et que leurs coût augmente. Les pratiques de fertilisation changeront donc dans le futur, et certains nutriments pourraient devenir plus limitants pour certains processus ii) la quantité de N arrivant au sol dans les litières va influencer leur coefficients de décomposition, et également la biomasse microbienne ; pour les parties aériennes l'azote influence directement ou indirectement les simulations de respiration autotrophe et de photosynthèse foliaire ; le potassium peut influencer la durée de vie des feuilles, et d'autres traits (Battie-Laclau et al. 2014a; Battie-Laclau et al. 2014b) autant de processus impactant le cycle du carbone et de l'eau, iii) c'est un sujet important pour les gestionnaires, qui peuvent ainsi avoir des bilans à l'échelle de leur plantation, éventuellement connaître les besoins ou les périodes d'apports, et qui modulent leur production en utilisant ce levier (e.g. certaines parcelles éloignées sont laissées pour produire *a minima* en période de surproduction). Il est donc nécessaire de poursuivre ce travail de couplage des bilans hydriques, carbonés et de nutriments, par des approches simplifiée, en complétant l'approche de G'Day. Une possibilité est de s'inspirer du modèle ForNBM (Zhu et al. 2003), mais cette question sera aussi traitée dans un projet qui sera développé en collaboration avec l'UMR ESE (Univ Paris Sud, Orsay).

III.3.2. Axe 2 : Sources d'information spatiales, observation et expérimentation

Une partie importante de la démarche de spatialisation repose sur la paramétrisation locale du modèle. Comme décrit en II.3.3, les paramètres qui devraient en théorie être spatialisés sont ceux i) pour lequel le modèle est sensible sur la gamme de variation observée ; ii) qui sont variables spatialement de manière significative en terme de différences de surfaces. Il est aussi possible de stratifier ou de grouper les parcelles présentant un fonctionnement proche et donc ayant une paramétrisation commune. La démarche préalable à la spatialisation est donc de réaliser une étude de sensibilité sur les

paramètres, et ensuite parmi les paramètres sensibles (au-dessus d'un seuil par exemple) de ne garder que ceux qui sont variables spatialement, entre parcelles (Figure 16).

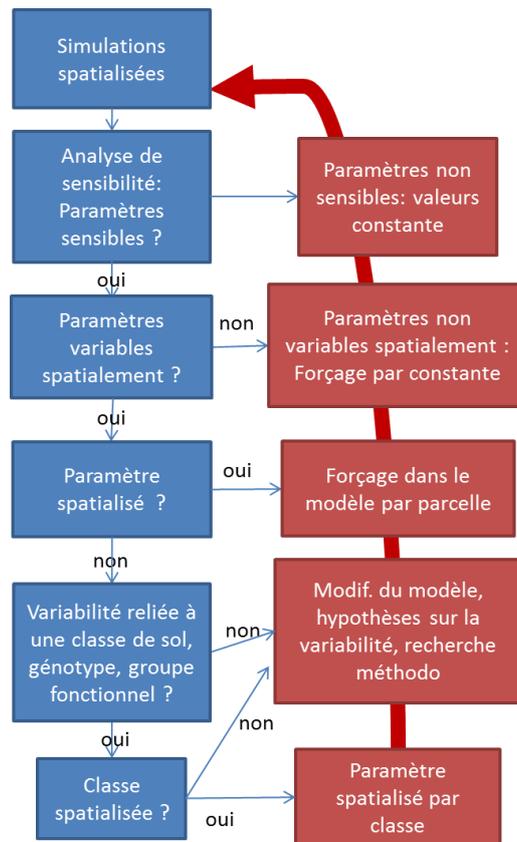


Figure 16 : Analyse de sensibilité du modèle et typologie des paramètres en vue de la spatialisation du modèle

Observations in situ, réseaux de parcelles expérimentales

Les réseaux de parcelles expérimentales choisies pour être diverses et représentatives de l'ensemble des parcelles, permettent d'avoir une mesure de la variabilité spatiale de certains paramètres du modèle. Cette approche avait été réalisée lors de ma thèse à Fontainebleau, et lors de la thèse de Claire Marsden sur un réseau de parcelles au Brésil. Je propose de poursuivre cette approche en se basant sur des réseaux de parcelles existants, comme ceux des projets EUCFLUX et TECHS (Binkley et al. 2017). Ces réseaux de parcelles ne peuvent pas être instrumentés de la même manière qu'un site de tour à flux, mais des mesures ponctuelles peuvent déjà apporter des informations utiles (LAI, courbes A/Ci et A/Par, azote ou chlorophylle foliaires, etc). Ces réseaux de parcelles peuvent également servir pour calibrer et/ou valider des modèles d'estimation basés sur des données satellites par exemple.

Les données des entreprises produisant des eucalyptus sont aussi très intéressantes, car elles complètent bien les réseaux de parcelles. Les réseaux de parcelles permettent des mesures de paramètres écophysologiques propres à nos modèles, tandis que les données des entreprises sont souvent plus basiques : inventaire forestiers en circonférence et hauteur, souvent tous les deux ans, et parfois des mesures plus fines de volume et de biomasses. Elles sont cependant essentielles dans les travaux de spatialisation, car elles donnent une information spatialisée d'une sortie du modèle très intégrative, le volume en bois.

Les sites instrumentés, en particulier les sites mesurant les flux selon la méthode des corrélations turbulentes sont indispensables à la démarche de spatialisation : outre le fait qu'ils permettent de comprendre et modéliser les processus, ils offrent un jeu de mesure complet (météo, eau du sol, flux d'énergie et de carbone, etc.) auxquels peuvent s'ajouter des mesures continues intéressante pour la télédétection. La tour à flux du projet Eucflux, appartenant au SOERE est par exemple équipé de plusieurs capteurs NDVI, PRI, thermoradiomètres, et d'un spectromètre dans le visible et le proche infrarouge, autant de mesures qui permettent de tester les relations temporelles entre les variables obtenues par proxydétction et des variables mesurées in situ et qui nous intéressent particulièrement (indice foliaire, Bowen Ratio, évapotranspiration, etc.). D'autres mesures eddy-covariance ont été réalisées de 2006 à 2008 sur une autre parcelle (Cabral et al. 2011; Cabral et al. 2010), et ces données serviront de tests de la méthodologie d'estimation spatialisée des flux.

Les observations réalisées à ces différentes échelles (réseau de parcelle, site instrumentés) doivent être pensées de manière à ce que ces mesures puissent alimenter efficacement l'approche intégrée. En particulier, il est nécessaire de questionner la possibilité/nécessité de réaliser de nouvelles mesures in situ plus en adéquation avec les caractéristiques des futures images. C'est ce qu'on essaie de faire sur le site instrumenté Eucflux (capteurs NDVI, PRI, spectromètre, thermo radiomètre, mesures de contenus en chlorophylle).

L'imagerie satellitaire

L'imagerie satellitaire offre de nombreuses possibilités d'obtenir une information spatialisée utile au modèle. La Figure 17 présente plusieurs de ces possibilités. Une partie importante du travail consiste à proposer des méthodologies d'estimation de variables « utiles » au modèle en vue d'une spatialisation (sensibilité, variabilité spatiale, non linéarité de réponse), que ce soit pour paramétrer ou pour tester le modèle (étape de validation).

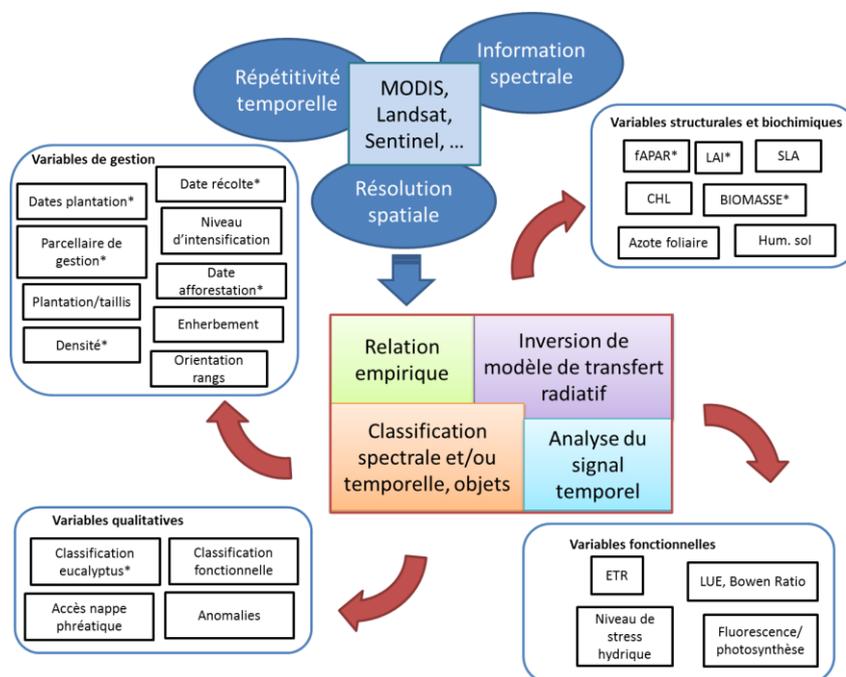


Figure 17 : Possibilités d'utilisation de l'imagerie satellite pour l'étude des plantations d'eucalyptus. (*) méthodologie déjà développées sur des parcelles d'eucalyptus au Brésil

L'imagerie satellite est en évolution continue, les méthodes sont de plus en plus sophistiquées et interdisciplinaires et les perspectives d'utilisation sont nombreuses. L'échelle du projet envisagée est celle de la région, donc les méthodes décrites concernent l'imagerie haute résolution (~30m) ou moyenne résolution (~250 à 500m), cette dernière étant compatible avec l'échelle de la parcelle vu leur taille, éventuellement via des méthodes de désagrégation comme celle utilisée dans le Maire et al. (2011a). Je vais ci-dessous présenter trois axes de recherches que je souhaite développer en lien avec le projet d'intégration télédétection-modélisation :

- **La haute répétitivité temporelle et spatiale**

Les études réalisées sur les images satellites à haute répétitivité temporelle ont apporté une information riche sur les plantations d'eucalyptus au Brésil (cf II.2.3). Ces travaux seront poursuivis, avec principalement un passage à des mesures à haute résolution spatiale (Sentinel, Venus), et la poursuite de travaux avec le modèle de transfert radiatif tridimensionnel DART, initiés lors de la thèse de Julianne Oliveira. Des résultats préliminaires ont montrés par exemple que l'orientation des rangs pourrait être une source d'incertitude importante lors de l'inversion de l'indice foliaire, spécialement en début de rotation. D'autre part, d'autres caractéristiques des canopées seront analysées, comme les teneurs en chlorophylle ou les SLA. Ceci avait été réalisé lors de mon doctorat, et sera en premier lieu testé sur les données Venus (<http://www.cesbio.ups-tlse.fr/fr/indexvenus.html>) qui vont être acquises dans la région d'Itatinga où se situe la tour à flux. Cette zone expérimentale fait également partie des sites traités dans THEIA (séries corrigées Sentinel, etc.).

- **Les images dans le domaine thermique**

Le lien entre les températures de surfaces et le fonctionnement de la végétation est établi depuis longtemps (Jackson et al. 1977), et en particulier utilisé pour estimer l'évapotranspiration via un simple modèle de bilan d'énergie (Bastiaanssen et al. 1998; Consoli and Vanella 2014). L'approche a été testée avec succès sur des plantations de palmier à huile lors de la thèse de Clifton Sabajo (Sabajo et al. 2017). La méthodologie proposée par SEBAL est une bonne option pour estimer l'ETR : elle se base sur des données de rayonnement global incident et de température de l'air, disponible localement dans des bases de données météorologiques, des images dans le visibles permettant d'estimer l'albédo, et également, si possible, les paramètres d'émissivité. Cependant, il faudra se demander si le modèle G'Day lui-même ne pourra pas être utilisé pour ce bilan d'énergie, qui devrait a priori être plus proche de la réalité. Plusieurs satellites ont des capteurs mesurant le rayonnement thermique, en particulier MODIS et Landsat, même si la résolution spatiale de Landsat est plus appropriée. Ces informations ponctuelles permettent de valider et/ou calibrer le modèle de manière spatiale pour une variable intéressante pour le bilan hydrique. Elles peuvent permettre également d'obtenir des informations qualitatives sur les parcelles (voir ci-dessous). Les thermoradiomètres installés sur ta tour et des mesures ponctuelles de caméra thermique permettront de comparer les températures *in situ* et celles mesurées par satellites (Aragao 2012; Ballester et al. 2013).

- **Les futurs satellites**

Outre les développements propres qui seront faits sur les eucalyptus, il s'agira également de tester les produits issus de futures missions spatiales, comme par exemple BIOMASS ou FLEX. BIOMASS est une mission de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) qui permettra d'estimer les biomasses des forêts tropicales, grâce à un capteur radar en bande P, dont le lancement est prévu en 2020. La résolution spatiale de 200 mètres est compatible avec son utilisation sur les parcelles d'eucalyptus. Il sera intéressant de tester ces données et de les comparer aux travaux antérieurs (cf II.2.4). FLEX est aussi un satellite du programme Living Planet de l'ESA, avec un capteur imageur multispectral qui mesurera des bandes spectrales fines permettant d'estimer la fluorescence, la chlorophylle et l'indice PRI, à une résolution spatiale de l'ordre de 300 mètres, et une revisite mensuelle. Comme pour

BIOMASS, les produits pourront être testés avec les données *in situ*, et éventuellement intégrées dans l'approche de spatialisation, comme données de calibration ou de validation des simulations.

- Des informations non quantitatives

Outre les caractéristiques quantitatives, un certain nombre d'informations critiques peuvent être obtenues à partir d'images satellites, information qui peuvent permettre d'améliorer les estimations des modèles, ou simplement de tester la réponse du modèle (Figure 17). Par exemple, une information importante consistera à classer les différentes parcelles d'eucalyptus en une typologie de « groupes fonctionnels », c'est-à-dire grouper les parcelles qui mettent en œuvre des processus similaires. Cela peut par exemple être des clones semblables d'un point de vue des évolutions temporelles des caractéristiques estimées, permettant par la suite de leur associer des jeux de paramètres communs (Figure 16). Cette classification peut intégrer également une catégorisation du niveau d'intensification, repéré par exemple par la durée entre deux rotations, par le niveau de désherbage réalisé après une récolte, par la durée de la rotation, l'homogénéité la dimension de la parcelle, etc. Cela peut être également le test de présence de certains processus, par exemple des impacts de gelées, accès à une nappe phréatique, présence d'une strate herbacée, une conduite du peuplement en taillis ou en plantation ou tout autre comportement particulier par rapport au fonctionnement moyen local (anomalies).

Bases de données climatiques et sur les sols

Une partie des données importantes pour la spatialisation des bilans de carbone et d'eau par modélisation est la qualité des autres données de forçage du modèle, comme les données météorologiques (e.g. Xavier et al. 2016) ou les données de caractéristiques édaphiques (e.g. <https://soilgrids.org/>). L'analyse de la pertinence du jeu de donnée utilisé par rapport aux mesures locales, et l'estimation de l'erreur associée à l'utilisation de ces informations est nécessaire pour évaluer les erreurs lors de la spatialisation du modèle.

III.3.3. Axe 3 : Assimilation de l'information de télédétection dans les modèles de fonctionnement

Même si les modèles utilisés sont les plus mécanistes possibles, il est souvent nécessaire de calibrer tout ou partie des processus, voire de forcer certaines variables, pour simuler correctement des variables de sorties, d'autant plus dans une approche spatialisée où la généricité des modèles est questionnée. Pour cela, il est intéressant de mettre en place une approche intégrée qui utilise conjointement les observations ou expérimentations *in situ*, la modélisation et la télédétection. L'assimilation de données (au sens large) permet cela : elle a pour objectif général de réduire au maximum les incertitudes des résultats du modèle en exploitant au mieux les observations *in situ* et de télédétection. L'assimilation de données est utilisée dans d'autres domaines de la physique de la surface terrestre, comme en météorologie, océanographie ou en hydrologie, et de plus en plus dans les modèles simulant les bilans de carbone et les croissances des forêts (Peylin et al. 2016; Revill et al. 2013; Scholze et al. 2017; Turner et al. 2004b). Il existe de nombreuses méthodes d'assimilation de données dans les modèles, et il sera utile de s'appuyer sur l'expérience de groupes de recherches ayant déjà pratiqué ce type d'approche (e.g. le CESBIO ou le LSCE, <https://orchidas.lsce.ipsl.fr/>). Cependant, au moins deux méthodes peuvent simplement être utilisées, au moins dans un premier temps : la calibration de paramètres du modèle et le forçage.

Le forçage intègre les observations directement dans le modèle, soit comme paramètre d'entrée ou initialisation de variable, soit en substituant une variable qui n'est pas ou plus modélisée, soit en

modifiant en continu un ou des paramètres pour que la variable simulée soit égale à la mesure. Ainsi, des modèles très simples comme le modèle de Monteith (Monteith 1972) peuvent inclure le fAPAR estimé par télédétection comme une variable de forçage directe, au même titre qu'une autre donnée météorologique. Dans les modèles plus complexes, par exemple simulant le LAI, les LAI estimés par télédétection peuvent être forcés dans le modèle en modifiant en continu les paramètres d'allocation et en gardant ainsi un bilan de carbone bouclé à l'échelle de l'écosystème (le Maire et al. 2010b). On se rapproche d'une calibration du modèle, à la différence que l'observation reste indispensable à chaque instant de la simulation. Cela implique d'avoir une estimation continue de la variable, ou tout du moins interpolable. La calibration de paramètre utilise des observations pour estimer des paramètres du modèle, éventuellement uniquement sur une période donnée et dans ce cas le paramètre calibré évolue dans le temps (réétalonnage).

L'échelle des simulations pertinente semble l'échelle de la parcelle, ou d'un groupe de parcelles proches ayant les mêmes caractéristiques (unité homogène): même type de clone, même gestion et même sol. La région sera d'abord classifiée entre eucalyptus/autre (suivant (le Maire et al. 2014a)), croisés avec la grille des données de sol (<https://soilgrids.org/>) et celle des données météorologiques (Xavier et al. 2016). Un autre niveau serait une typologie des plantations (cf III.3.2). L'approche d'assimilation de données la plus pertinente à mettre en place passe par la caractérisation intermédiaire d'informations de surface utile pour le modèle (Figure 17), et non via une assimilation directe de la mesure physique « d'origine » dans le modèle, à la condition que l'incertitude sur le produit soit faible. C'est une approche qui permet de pouvoir se concentrer sur les variables d'intérêts et leurs incertitudes associées, de développer des méthodologies externes à la simulation selon différentes approches, qui peuvent être empirique (relations statistiques) ou même mécaniste (inversion de modèle de transfert radiatif, etc.). Cette approche multi-variable permet d'utiliser au maximum les informations disponibles, qu'elles soient issues de mesures *in situ* ou des données de télédétection. Une autre approche consiste à utiliser un modèle simulant la réflectance de la canopée (modèle de transfert radiatif) couplé au modèle de fonctionnement (Nouvellon et al. 2001) avec ainsi une assimilation de données faite au niveau de la mesure radiométrique, dans la configuration de mesure exacte, pour ce qui concerne les données de télédétection. Cette approche peut être utile si par exemple le modèle couplé utilisé nous paraît meilleur que celui servant à dériver le produit. Dans notre cas, cette approche pourrait être indiquée pour le rayonnement thermique, puisque les modèles simulant l'ETP utilisent un bilan d'énergie nettement moins élaboré que celui du modèle MAESPA par exemple. Pour d'autres variables cette approche est moins indiquée: par exemple, il est plus simple d'estimer les dates de plantations et leur incertitude directement à partir d'une série temporelle de NDVI, et de forcer ces dates dans le modèle, plutôt que de devoir faire de nombreuses itérations du modèle pour calibrer la date de plantation. De même, l'inversion du signal de réflectance pour obtenir une estimation du LAI peut nécessiter un modèle de transfert radiatif complexe (e.g. DART, cf thèse de J Oliveira), dont la complexité n'est pas nécessaire pour le modèle de fonctionnement lui-même.

Le schéma d'assimilation proposé repose sur des méthodes de calibration ou calage de paramètres, ou de forçage de variables ou paramètres (Figure 18). Cette méthode simple utilise à la fois les données très nombreuses des tours à flux, mais ponctuelles dans l'espace, avec des données de réseaux de parcelles ou de données d'entreprises, et des données entièrement spatialisées comme les indices foliaires ou les dates de plantations. Les unités de simulations sont considérées comme indépendantes dans l'espace. En réalité, il peut exister des interactions par exemple via les nappes phréatiques, via des transferts d'énergie et des micro-climat, via l'interception du rayonnement ou des transferts de masse comme les feuilles, ou via la topographie. Cependant, l'hypothèse que ces phénomènes ne sont pas essentiels aux échelles considérées est plausible, même si elle est difficile à tester.

Une des difficultés majeures de la paramétrisation réside dans les problèmes liés à la représentativité spatiale ou temporelle des mesures. Comme décrit précédemment, l'approche qui semble la plus pertinente est celle d'une spatialisation hiérarchisée de la paramétrisation (Figure 16) en procédant à des classifications typologiques des parcelles. On suppose alors que des parcelles similaires ont un comportement similaire pour certains processus, et que le jeu de paramètre associé à ce processus est identique. Le croisement de différentes classes typologiques (e.g. types de sol, typologie des plantations, etc.) donne un nombre élevé de classes possibles qui représente l'hétérogénéité spatiale. Une paramétrisation du modèle est alors réalisée à l'échelle de la classe, éventuellement via une calibration. Cette approche est intéressante mais repose sur 1) la possibilité d'effectivement pouvoir segmenter et classer l'ensemble des parcelles dans une typologie commune, 2) la possibilité de pouvoir caler les paramètres (ne pas être dans un cas mal défini). A l'échelle du réseau, il est alors intéressant de tester si le forçage ou la calibration de certaines variables ou paramètre à l'échelle de la parcelle améliore les résultats, et dans ce cas pourra constituer une solution pour une application à plus grande échelle, en fonction des temps de calculs. La Figure 18 présente une proposition de schéma d'assimilation de données multi-sources et multi-échelle.

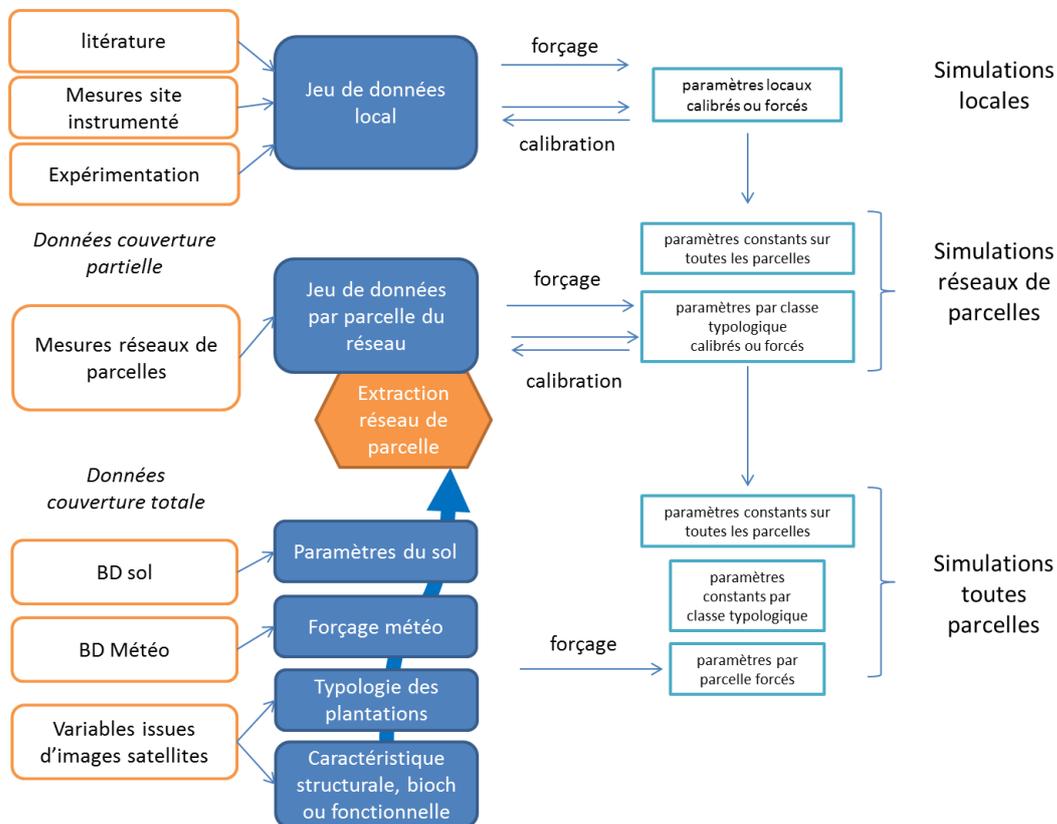


Figure 18 : Proposition d'un schéma d'assimilation des données multi-échelle

D'un point de vue technique, il est donc envisagé de se placer dans un schéma d'assimilation « simple », i.e. une calibration du modèle, et il n'est donc pas nécessaire dans ce cas d'utiliser des techniques complexes d'estimation ou contrôle optimal (filtres de Kalman, 3D Var, etc.). Vu les niveaux d'incertitudes très différents et les nombreuses sorties, une approche de calibration bayésienne comme MCMC (Monte Carlo Markov Chain) sera privilégiée (Van Oijen et al. 2005). Il est important également de considérer la problématique propre au calage des modèles, comme les problèmes l'équifinalité des paramètres, qui peuvent efficacement être mis en avant par des procédure de type Monte-Carlo. Dans le schéma proposé, il y aura plusieurs objectifs lors du calage du modèle, et il

faudra donc agréger les fonctions objectifs en une unique fonction mono-objectif (Madsen 2000). La calibration bayésienne permet d'utiliser de façon synergique de nombreuses informations disponibles à différents niveaux, et de prendre en compte leurs incertitudes. Cela donne également une vision intéressante de la sensibilité du modèle aux paramètres, et des effets interactions existantes entre les paramètres du modèle.

III.4. Projets en cours et à venir

Les perspectives de recherche décrites ci-dessus sont ambitieuses, mais toutefois réalistes considérant que 1) les méthodes en télédétection et les modèles ont déjà été en grande partie éprouvées ; 2) plusieurs projets déjà en cours ou planifiés permettront d'avancer sur certains points particuliers ; 3) les étapes du projets sont suffisamment intéressantes pour pouvoir en elles-mêmes constituer des sujets indépendants. En outre, ce projet est un projet à long terme, qui sera nécessairement ajusté en fonction des opportunités de financement, des recrutements, etc.

Concrètement, le projet en cours FAPESP – Microsoft (2016-2020) (cf Partie I) va permettre de mettre en place le schéma d'assimilation de données, en commençant par des données relativement simple : jeux de paramètres associés aux types de sol, forçage des dates de plantation et de récolte, et validation sur des données de biomasses de réseaux de parcelle des entreprises et de séries temporelles de fAPAR inversés. Le post-doc de Ahmed Attia (UNICAMP, Brésil) devrait permettre d'avancer sur cette problématique.

Le projet Eucflux, coordonné par Yann Nouvellon (UMR Eco&Sols) entre 2008 et 2017, et maintenant par Joannès Guillemot (UMR Eco&Sols), est prolongé pour 7 ans. Il permettra de poursuivre des travaux d'analyse des flux en lien avec les séries temporelles d'image dans le visible et le thermique, en s'appuyant sur les mesures de proxy-détection réalisées depuis la tour à flux. Sur ce site, des expérimentations seront développées dans le cadre de la mission Venus.

Une thèse devrait commencer en 2018 en partenariat avec l'UMR ESE (Nicolas Delpierre) et des chercheurs de notre unité (Jean-Paul Laclau, Louis Marechal) sur la modélisation du cycle des nutriments de plantation d'eucalyptus au Brésil. Même si le travail sera réalisé sur le modèle CASTANEA, cette thèse permettra à terme de mettre en place un effet « nutrition » dans le modèle G'Day.

L'expérimentation « Exclusion de pluie » sur le site d'Itatinga au Brésil a permis de tester le modèle MAESPA lors de la thèse de Mathias Christina, et sera utile pour tester également le modèle G'Day dans des conditions de pluviométries différentes mais sur le même type de sol. Ceci sera réalisé dans le cadre du travail de Ahmed, qui regroupe une analyse de plusieurs expérimentations. La poursuite de l'essai en taillis (commencé en 2016) nous renseignera sur les différences de fonctionnement entre taillis et plantation.

Le projet TOSCA CESOSO (faisant partie de THEIA), et plus particulièrement la composante CIRAD de ce projet portée par TETIS (Raffaele Gaetano, Stéphane Dupuy, Valentine Lebourgeois), vise à développer et tester des méthodologies de classification de paysages agricoles tropicaux est une excellente opportunité pour tester plus finement la possibilité de réaliser des sous-classes de parcelles d'eucalyptus. Ce projet permet aussi de me familiariser avec les images Sentinel 2 et les chaînes de traitement associées.

Le projet TOSCA Hypertropic, en collaboration avec le CESBIO (Jean-Philippe Gastellu) et TETIS (Jean-Baptiste Feret), et dans lequel s'inscrivait la thèse de Julianne Oliveira, porte sur l'analyse d'images satellites hyperspectrales pour estimer la biodiversité des forêts. Les plantations des expérimentations de tests clonaux du site Eucflux présentent une large gamme de « diversité structurale », permettant d'analyser les réponses spectrales de nombreux paramètres structuraux des couverts, soit directement, soit indirectement via la modélisation.

Un début de collaboration fin 2017 avec l'UMR HydroSciences Montpellier (Jérôme Demarty) sur l'utilisation du modèle SCOPE permettra d'avancer sur la thématique de l'analyse des images thermiques sur les plantations d'Eucalyptus, et en particulier sur le site Eucflux.

La poursuite des travaux sur MAESPA, en particulier sur le rôle d'une strate herbacée/culture sous les arbres servira indirectement à ce travail de spatialisation en estimant les effets de la compétition pour l'eau, qui peut aussi exister dans les plantations d'eucalyptus. Il est prévu de travailler sur ce sujet sur les systèmes agroforestiers Faidherbia au Sénégal, avec Olivier Roupsard (UMR Eco&Sols), et d'aller jusqu'à une implémentation de la croissance dans le modèle MAESPA pour des arbres individuels et isolés.

IV) References

- ABRAF (2012). Chapter 01, Planted forests in Brazil. *Statistical yearbook 2012*
- Achat, D.L., Augusto, L., Gallet-Budynek, A., & Loustau, D. (2016). Future challenges in coupled C–N–P cycle models for terrestrial ecosystems under global change: a review. *Biogeochemistry*, 131, 173-202
- Adelana, S.M., Dresel, P.E., Hekmeijer, P., Zydor, H., Webb, J.A., Reynolds, M., & Ryan, M. (2015). A comparison of streamflow, salt and water balances in adjacent farmland and forest catchments in south-western Victoria, Australia. *Hydrological Processes*, 29, 1630-1643
- Alkama, R., & Cescatti, A. (2016). Biophysical climate impacts of recent changes in global forest cover. *Science*, 351
- Almeida, A.C., Siggins, A., Batista, T.R., Beadle, C., Fonseca, S., & Loos, R. (2010). Mapping the effect of spatial and temporal variation in climate and soils on Eucalyptus plantation production with 3-PG, a process-based growth model. *Forest Ecology and Management*, 259, 1730-1740
- Alton, P.B. (2014). Reconciling simulations of seasonal carbon flux and soil water with observations using tap roots and hydraulic redistribution: A multi-biome FLUXNET study. *Agricultural and Forest Meteorology*, 198-199, 309-319
- Anderson, M.C. (1966). Stand Structure and Light Penetration. II. A Theoretical Analysis. *Journal of Applied Ecology*, 3, 41-54
- Aragao, L.E.O.C. (2012). The rainforest's water pump. *Nature*, 489
- Asrar, G., Fuchs, M., Kanemasu, E.T., & Hatfield, J.L. (1984). Estimating Absorbed Photosynthetic Radiation and Leaf Area Index from Spectral Reflectance in Wheat1. *Agronomy Journal*, 76, 300-306
- Assad, E.D., Pinto, H.S., Martins, S.C., Groppo, J.D., Salgado, P.R., Evangelista, B., Vasconcellos, E., Sano, E.E., Pavão, E., Luna, R., Camargo, P.B., & Martinelli, L.A. (2013). Changes in soil carbon stocks in Brazil due to land use: paired site comparisons and a regional pasture soil survey. *Biogeosciences*, 10, 6141-6160
- Atzberger, C., Darvishzadeh, R., Immitzer, M., Schlerf, M., Skidmore, A., & le Maire, G. (2015). Comparative analysis of different retrieval methods for mapping grassland leaf area index using airborne imaging spectroscopy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 43, 19-31

- Baca, M., Läderach, P., Haggard, J., Schroth, G., & Ovalle, O. (2014). An Integrated Framework for Assessing Vulnerability to Climate Change and Developing Adaptation Strategies for Coffee Growing Families in Mesoamerica. *Plos One*, *9*, e88463
- Baghdadi, N., Le Maire, G., Bailly, J., Ose, K., Nouvellon, Y., Zribi, M., Lemos, C., & Hakamada, R. (2015). Evaluation of ALOS/PALSAR L-Band Data for the Estimation of Eucalyptus Plantations Aboveground Biomass in Brazil. *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of*, *8*, 3802-3811
- Baghdadi, N., le Maire, G., Fayad, I., Bailly, J.S., Nouvellon, Y., Lemos, C., & Hakamada, R. (2014). Testing Different Methods of Forest Height and Aboveground Biomass Estimations From ICESat/GLAS Data in Eucalyptus Plantations in Brazil. *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of*, *7*, 290 - 299
- Ballester, C., Jiménez-Bello, M.A., Castel, J.R., & Intrigliolo, D.S. (2013). Usefulness of thermography for plant water stress detection in citrus and persimmon trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, *168*, 120-129
- Baral, H., Guariguata, M.R., & Keenan, R.J. (2016). A proposed framework for assessing ecosystem goods and services from planted forests. *Ecosystem Services*, *22*, 260-268
- Baret, F., Clevers, J.G.P.W., & Steven, M.D. (1995). The robustness of canopy gap fraction estimates from red and near-infrared reflectances: A comparison of approaches. *Remote Sensing of Environment*, *54*, 141-151
- Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A., & Holtslag, A.A.M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, *212-213*, 198-212
- Batra, P., & Pirard, R. (2015). *Is a typology for planted forests feasible, or even relevant?* Bogor, Indonesia: Center for International Forestry Research (CIFOR)
- Battie-Laclau, P., Laclau, J.P., Beri, C., Mietton, L., Muniz, M.R., Arenque, B.C., M, D.E.C.P., Jordan-Meille, L., Bouillet, J.P., & Nouvellon, Y. (2014a). Photosynthetic and anatomical responses of Eucalyptus grandis leaves to potassium and sodium supply in a field experiment. *Plant Cell and Environment*, *37*, 70-81
- Battie-Laclau, P., Laclau, J.P., Domec, J.C., Christina, M., Bouillet, J.P., de Cassia Piccolo, M., de Moraes Goncalves, J.L., e Moreira, R.M., Krusche, A.V., Bouvet, J.M., & Nouvellon, Y. (2014b). Effects of potassium and sodium supply on drought-adaptive mechanisms in Eucalyptus grandis plantations. *New Phytologist*, *203*, 401-413
- Bégué, A. (1992). Modeling hemispherical and directional radiative fluxes in regular-clumped canopies. *Remote Sensing of Environment*, *40*, 219-230
- Bellassen, V., Delbart, N., Le Maire, G., Luysaert, S., Ciais, P., & Viovy, N. (2011a). Potential knowledge gain in large-scale simulations of forest carbon fluxes from remotely sensed biomass and height. *Forest Ecology and Management*, *261*, 515-530
- Bellassen, V., Le Maire, G., Dhôte, J.F., Ciais, P., & Viovy, N. (2010). Modelling forest management within a global vegetation model—Part 1: Model structure and general behaviour. *Ecological Modelling*, *221*, 2458-2474
- Bellassen, V., le Maire, G., Guin, O., Dhôte, J.F., Ciais, P., & Viovy, N. (2011b). Modelling forest management within a global vegetation model—Part 2: Model validation from a tree to a continental scale. *Ecological Modelling*, *222*, 57-75
- Bellassen, V., Viovy, N., Luysaert, S., Le Maire, G., Schelhaas, M.-J., & Ciais, P. (2011c). Reconstruction and attribution of the carbon sink of European forests between 1950 and 2000. *Global Change Biology*, *17*, 3274-3292
- Bertrand, A. (1999). La dynamique séculaire des plantations d'eucalyptus sur les Hautes Terres malgaches. *Le Flamboyant*, *49*, 45-48
- Binkley, D., Campoe, O.C., Alvares, C., Carneiro, R.L., Cegatta, Í., & Stape, J.L. (2017). The interactions of climate, spacing and genetics on clonal Eucalyptus plantations across Brazil and Uruguay. *Forest Ecology and Management*, *405*, 271-283

- Bohn, F.J., Frank, K., & Huth, A. (2014). Of climate and its resulting tree growth: Simulating the productivity of temperate forests. *Ecological Modelling*, 278, 9-17
- Bonan, G.B. (2008). Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320, 1444-1449
- Boyce, C.K., Fan, Y., & Zwieniecki, M.A. (2017). Did trees grow up to the light, up to the wind, or down to the water? How modern high productivity colors perception of early plant evolution. *New Phytologist*, 215, 552-557
- Bugmann, H., Palahi, M., Bontemps, H.D., & Tome, M. (2010). Trends in modeling to address forest management and environmental challenges in Europe: Introduction. *2010*, 19, 5
- Bunn, C., Läderach, P., Ovalle Rivera, O., & Kirschke, D. (2015). A bitter cup: climate change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. *Climatic Change*, 129, 89-101
- Cabral, O.M.R., Gash, J.H.C., Rocha, H.R., Marsden, C., Ligo, M.A.V., Freitas, H.C., Tatsch, J.D., & Gomes, E. (2011). Fluxes of CO₂ above a plantation of Eucalyptus in southeast Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 49-59
- Cabral, O.M.R., Rocha, H.R., Gash, J.H.C., Ligo, M.A.V., Freitas, H.C., & Tatsch, J.D. (2010). The energy and water balance of a Eucalyptus plantation in southeast Brazil. *Journal of Hydrology*, 388, 208-216
- Calow, P. (1987). Towards a Definition of Functional Ecology. *Functional Ecology*, 1, 57-61
- Campoe, O.C., Stape, J.L., Nouvellon, Y., Laclau, J.-P., Bauerle, W.L., Binkley, D., & Le Maire, G. (2013). Stem production, light absorption and light use efficiency between dominant and non-dominant trees of Eucalyptus grandis across a productivity gradient in Brazil. *Forest Ecology and Management*, 288, 14-20
- Canadell, J., & Zedler, P.H. (1995). Underground Structures of Woody Plants in Mediterranean Ecosystems of Australia, California, and Chile. In M.T.K. Arroyo, P.H. Zedler & M.D. Fox (Eds.), *Ecology and Biogeography of Mediterranean Ecosystems in Chile, California, and Australia* (pp. 177-210). New York, NY: Springer New York
- Cannell, M.G.R. (1999). Environmental impacts of forest monocultures: water use, acidification, wildlife conservation, and carbon storage. In J.R. Boyle, J.K. Winjum, K. Kavanagh & E.C. Jensen (Eds.), *Planted Forests: Contributions to the Quest for Sustainable Societies* (pp. 239-262). Dordrecht: Springer Netherlands
- Carle, J.B., & Holmgren, L.P.B. (2009). Wood from planted forests: global outlook to 2030
- Carreiras, J.M.B., Pereira, J.M.C., & Pereira, J.S. (2006). Estimation of tree canopy cover in evergreen oak woodlands using remote sensing. *Forest Ecology and Management*, 223, 45-53
- Charbonnier, F., le Maire, G., Dreyer, E., Casanoves, F., Christina, M., Dauzat, J., Eitel, J.U.H., Vaast, P., Vierling, L.A., & Rouspard, O. (2013). Competition for light in heterogeneous canopies: Application of MAESTRA to a coffee (*Coffea arabica* L.) agroforestry system. *Agricultural and Forest Meteorology*, 181, 152-169
- Charbonnier, F., Rouspard, O., le Maire, G., Guillemot, J., Casanoves, F., Lacoïnte, A., Vaast, P., Allinne, C., Audebert, L., Cambou, A., Clément-Vidal, A., Defrenet, E., Duursma, R.A., Jarri, L., Jourdan, C., Khac, E., Leandro, P., Medlyn, B.E., Saint-André, L., Thaler, P., Van Den Meersche, K., Barquero Aguilar, A., Lehner, P., & Dreyer, E. (2017). Increased light-use efficiency sustains net primary productivity of shaded coffee plants in agroforestry system. *Plant, Cell & Environment*, 40, 1592-1608
- Chen, J.M., & Black, T.A. (1991). Measuring leaf area index of plant canopies with branch architecture. *Agricultural and Forest Meteorology*, 57, 1-12
- Christina, M., Le Maire, G., Battie-Laclau, P., Nouvellon, Y., Bouillet, J.-P., Jourdan, C., de Moraes Gonçalves, José L., & Laclau, J.-P. (2015). Measured and modeled interactive effects of potassium deficiency and water deficit on gross primary productivity and light-use efficiency in Eucalyptus grandis plantations. *Global Change Biology*, 21, 2022-2039
- Christina, M., le Maire, G., Nouvellon, Y., Vezy, R., Bordron, B., Battie-Laclau, P., Gonçalves, L., Delgado-Rojas, J.S., Bouillet, J.-P., & Laclau, J.-P. (submitted). Simulating the effects of different

- potassium and water supply regimes on soil water content and water table depth over a rotation of a tropical *Eucalyptus grandis* plantation. *Forest Ecology and Management*
- Christina, M., Nouvellon, Y., Laclau, J.-P., Stape, J.L., Bouillet, J.-P., Lambais, G.R., & le Maire, G. (2016a). Importance of deep water uptake in tropical eucalypt forest. *Functional Ecology*, doi: 10.1111/1365-2435.12727
- Christina, M., Nouvellon, Y., Laclau, J.-P., Stape, J.L., Bouillet, J.-P., Lambais, G.R., & le Maire, G. (2017). Importance of deep water uptake in tropical eucalypt forest. *Functional Ecology*, *31*, 509-519
- Christina, M., Nouvellon, Y., Laclau, J.P., Stape, J.L., Campoe, O.C., & le Maire, G. (2016b). Sensitivity and uncertainty analysis of the carbon and water fluxes at the tree scale in Eucalyptus plantations using a metamodeling approach. *Canadian Journal of Forest Research*, *46*, 297-309
- Ciais, P., Schelhaas, M.J., Zaehle, S., Piao, S.L., Cescatti, A., Liski, J., Luyssaert, S., le Maire, G., Schulze, E.D., Bouriaud, O., Freibauer, A., Valentini, R., & Nabuurs, G.J. (2008). Carbon accumulation in European forests. *Nature Geoscience*, *1*, 425-429
- Colodette, J.L., Gomes, C.M., Gomes, F.J., & Cabral, C.P. (2014). The Brazilian wood biomass supply and utilization focusing on eucalypt. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, *1*, 25
- Comins, H.N., & McMurtrie, R.E. (1993). Long-Term Response of Nutrient-Limited Forests to CO² Enrichment; Equilibrium Behavior of Plant-Soil Models. *Ecological Applications*, *3*, 666-681
- Consoli, S., & Vanella, D. (2014). Comparisons of satellite-based models for estimating evapotranspiration fluxes. *Journal of Hydrology*, *513*, 475-489
- Corbeels, M., McMurtrie, R.E., Pepper, D.A., Mendham, D.S., Grove, T.S., & O'Connell, A.M. (2005a). Long-term changes in productivity of eucalypt plantations under different harvest residue and nitrogen management practices: A modelling analysis. *Forest Ecology and Management*, *217*, 1-18
- Corbeels, M., McMurtrie, R.E., Pepper, D.A., & O'Connell, A.M. (2005b). A process-based model of nitrogen cycling in forest plantations: Part I. Structure, calibration and analysis of the decomposition model. *Ecological Modelling*, *187*, 426-448
- Corbeels, M., McMurtrie, R.E., Pepper, D.A., & O'Connell, A.M. (2005c). A process-based model of nitrogen cycling in forest plantations: Part II. Simulating growth and nitrogen mineralisation of *Eucalyptus globulus* plantations in south-western Australia. *Ecological Modelling*, *187*, 449-474
- Craparo, A.C.W., Van Asten, P.J.A., Läderach, P., Jassogne, L.T.P., & Grab, S.W. (2015). *Coffea arabica* yields decline in Tanzania due to climate change: Global implications. *Agricultural and Forest Meteorology*, *207*, 1-10
- Crucifix, M., Betts, R.A., & Cox, P.M. (2005). Vegetation and climate variability: a GCM modelling study. *Climate Dynamics*, *24*, 457-467
- Curran, P.J., & Milton, E.J. (1983). The relationship between the chlorophyll concentration, LAI, and reflectance of a simple vegetation canopy. *Int. J. of Remote Sensing*, *4*, 247-255
- Davi, H., Barbaroux, C., Francois, C., & Dufrêne, E. (2009). The fundamental role of reserves and hydraulic constraints in predicting LAI and carbon allocation in forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, *149*, 349-361
- Davi, H., Bouriaud, O., Dufrene, E., Soudani, K., Pontailler, J.Y., le Maire, G., Francois, C., Breda, N., Granier, A., & Le Dantec, V. (2006a). Effect of aggregating spatial parameters on modelling forest carbon and water fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, *139*, 269-287
- Davi, H., Dufrene, E., Francois, C., Le Maire, G., Loustau, D., Bosc, A., Rambal, S., Granier, A., & Moors, E. (2006b). Sensitivity of water and carbon fluxes to climate changes from 1960 to 2100 in European forest ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, *141*, 35-56
- Davi, H., Dufrene, E., Granier, A., Le Dantec, V., Barbaroux, C., Francois, C., & Breda, N. (2005). Modelling carbon and water cycles in a beech forest: Part II.: Validation of the main processes from organ to stand scale. *Ecological Modelling*, *185*, 387-405
- Davi, H., Soudani, K., Deckx, T., Dufrene, E., Le Dantec, V., & Francois, C. (2006c). Estimation of forest leaf area index from SPOT imagery using NDVI distribution over forest stands. *International Journal of Remote Sensing*, *27*, 885-902

- Dean, J.F., Webb, J.A., Jacobsen, G.E., Chisari, R., & Dresel, P.E. (2015). A groundwater recharge perspective on locating tree plantations within low-rainfall catchments to limit water resource losses. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, *19*, 1107-1123
- Del Lungo, A., Ball, J., & Carle, J. (2006). Global planted forests thematic study. Results and analysis. *FAO, Rome (Italy). Forest Resources Div.*
- Delpierre, N., Soudani, K., François, C., Le Maire, G., Bernhofer, C., Kutsch, W., Misson, L., Rambal, S., Vesala, T., & Dufrêne, E. (2012). Quantifying the influence of climate and biological drivers on the interannual variability of carbon exchanges in European forests through process-based modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*, *154–155*, 99-112
- Dhôte, J.-F., & Hervé, J.-C. (2000). Changements de productivité dans quatre forêts de chênes sessiles depuis 1930 : une approche au niveau du peuplement. *Annals of Forest Science*, *57*, 651-680
- Dhote, J.F. (1996). A model of even-aged beech stands productivity with process-based interpretations. *Annales Des Sciences Forestieres*, *53*, 1-20
- Drolet, G.G., Huemmrich, K.F., Hall, F.G., Middleton, E.M., Black, T.A., Barr, A.G., & Margolis, H.A. (2005). A MODIS-derived photochemical reflectance index to detect inter-annual variations in the photosynthetic light-use efficiency of a boreal deciduous forest. *Remote Sensing of Environment*, *98*, 212-224
- Dufrêne, E., Davi, H., François, C., le Maire, G., Le Dantec, V., & Granier, A. (2005). Modelling carbon and water cycles in a beech forest: Part I: Model description and uncertainty analysis on modelled NEE. *Ecological Modelling*, *185*, 407-436
- Duursma, R.A., Gimeno, T.E., Boer, M.M., Crous, K.Y., Tjoelker, M.G., & Ellsworth, D.S. (2016). Canopy leaf area of a mature evergreen Eucalyptus woodland does not respond to elevated atmospheric [CO₂] but tracks water availability. *Glob Chang Biol*, *22*, 1666-1676
- Duursma, R.A., & Medlyn, B.E. (2012). MAESPA: a model to study interactions between water limitation, environmental drivers and vegetation function at tree and stand levels, with an example application to [CO₂] × drought interactions. *Geosci. Model Dev.*, *5*, 919-940
- Elias, P., & Boucher, D. (2014). Planting for the Future. How Demand for Wood Products Could Be Friendly to Tropical Forests. In: Union of Concerned Scientists
- Ellison, D., Morris, C.E., Locatelli, B., Sheil, D., Cohen, J., Murdiyarso, D., Gutierrez, V., Noordwijk, M.v., Creed, I.F., Pokorny, J., Gaveau, D., Spracklen, D.V., Tobella, A.B., Ilstedt, U., Teuling, A.J., Gebrehiwot, S.G., Sands, D.C., Muys, B., Verbist, B., Springgay, E., Sugandi, Y., & Sullivan, C.A. (2017). Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change*, *43*, 51-61
- Ellsworth, David S., Anderson, Ian C., Crous, Kristine Y., Cooke, J., Drake, John E., Gherlenda, Andrew N., Gimeno, Teresa E., Macdonald, Catriona A., Medlyn, Belinda E., Powell, Jeff R., Tjoelker, Mark G., & Reich, Peter B. (2017). Elevated CO₂ does not increase eucalypt forest productivity on a low-phosphorus soil. *Nature Climate Change*, *7*, 279
- Epron, D., Nouvellon, Y., Mareschal, L., Moreira, R.M.e., Koutika, L.-S., Geneste, B., Delgado-Rojas, J.S., Laclau, J.-P., Sola, G., Gonçalves, J.L.d.M., & 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
- Fan, Y., Knohl, A., Bernoux, M., Rouspard, O., Panferov, O., le Maire, G., & Tölle, M. (2014). Simulating carbon, water and energy fluxes of a rainforest and an oil palm plantation using the Community Land Model (CLM4.5). In, *EGU General Assembly 2014: Geophysical Research Abstracts Vol. 16, EGU2014-PREVIEW, 2014*
- Fan, Y., Rouspard, O., Bernoux, M., Le Maire, G., Panferov, O., Kotowska, M.M., & Knohl, A. (2015). A sub-canopy structure for simulating oil palm in the Community Land Model (CLM-Palm): phenology, allocation and yield. *Geosci. Model Dev.*, *8*, 3785-3800
- FAO (2006). Global Forest Resources Assessment 2005. Progress towards sustainable forest management. . In, *FAO Forestry Paper:147*. Rome, Italy
- FAO (2015). Global Forest Resources Assessment 2015

- Feret, J.-B., François, C., Asner, G.P., Gitelson, A.A., Martin, R.E., Bidel, L.P.R., Ustin, S.L., le Maire, G., & Jacquemoud, S. (2008). PROSPECT-4 and 5: Advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments. *Remote Sensing of Environment*, *112*, 3030-3043
- Féret, J.-B., le Maire, G., Jay, S., Barbier, N., Bendoula, R., Berveiller, D., Chave, J., Etchegorry, J.-P.G., Hmimina, G., Lefèvre, M.-J., Nouvellon, Y., Oliveira, J., Ponzoni, F., Porcar-Castell, A., Proisy, C., Solanki, T., Soudani, K., & Vincent, G. (in prep). Physical modeling vs. machine learning estimation of leaf mass per area and leaf water content based on leaf optical properties. *Remote Sensing of Environment*
- Fontes, L., Bontemps, J.-D., Bugmann, H., Lindner, M., Rötzer, T., Oijen, M.V., Gracia, C., & Skovsgaard, J.P. (2010). Models for supporting forest management in a changing environment. *Forest Systems*, *19*, 8-29
- Forrester, D., Guisasola, R., Tang, X., Albrecht, A., Dong, T., & le Maire, G. (2014). Using a stand-level model to predict light absorption in stands with vertically and horizontally heterogeneous canopies. *Forest Ecosystems*, *1*, 17
- Gastellu-Etchegorry, J.-P., Yin, T., Lauret, N., Cajgfinger, T., Gregoire, T., Grau, E., Feret, J.-B., Lopes, M., Guilleux, J., Dedieu, G., Malenovský, Z., Cook, B., Morton, D., Rubio, J., Durrieu, S., Cazanave, G., Martin, E., & Ristorcelli, T. (2015). Discrete Anisotropic Radiative Transfer (DART 5) for Modeling Airborne and Satellite Spectroradiometer and LIDAR Acquisitions of Natural and Urban Landscapes. *Remote Sensing*, *7*, 1667
- Gastellu-Etchegorry, J.P., Martin, E., & Gascon, F. (2004). DART: a 3D model for simulating satellite images and studying surface radiation budget. *International Journal of Remote Sensing*, *25*, 73-96
- Gastellu-Etchegorry, J.P., Zagolski, F., & Romier, J. (1996). A simple anisotropic reflectance model for homogeneous multilayer canopies. *Remote Sensing of Environment*, *57*, 22-38
- Gerten, D., Luo, Y., Le Maire, G., Parton, W.J., Keough, C., Weng, E., Beier, C., Ciais, P., Cramer, W., Dukes, J.S., Hanson, P.J., Knapp, A.A.K., Linder, S., Nepstad, D., Rustad, L., & Sowerby, A. (2008). Modelled effects of precipitation on ecosystem carbon and water dynamics in different climatic zones. *Global Change Biology*, *14*, 2365-2379
- Goel, N.S., & Strebel, D.E. (1984). Simple Beta Distribution Representation of Leaf Orientation in Vegetation Canopies. *Agronomy Journal*, *76*, 800-802
- Gonçalves, J.L.d.M., Alvares, C.A., Higa, A.R., Silva, L.D., Alfenas, A.C., Stahl, J., Ferraz, S.F.d.B., Lima, W.d.P., Brancalion, P.H.S., Hubner, A., Bouillet, J.-P.D., 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
- Goncalves, J.L.M., Stape, J.L., Laclau, J.P., Bouillet, J.P., & Ranger, J. (2008). Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: the Brazilian experience. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, *70*, 105-118
- Grinand, C., Maire, G.L., Vieilledent, G., Razakamanarivo, H., Razafimbelo, T., & Bernoux, M. (2017). Estimating temporal changes in soil carbon stocks at ecoregional scale in Madagascar using remote-sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *54*, 1-14
- Guillemot, J., Francois, C., Hmimina, G., Dufrêne, E., Martin-StPaul, N.K., Soudani, K., Marie, G., Ourcival, J.-M., & Delpierre, N. (2017). Environmental control of carbon allocation matters for modelling forest growth. *New Phytologist*, *214*, 180-193
- Guillemot, J., le Maire, G., Munishamappa, M., Charbonnier, F., & Vaast, P. (in prep). Native coffee agroforestry conserves carbon stocks and tree diversity in the Indian Western Ghats, exotic agroforestry does not
- Harper, R.J., Smettem, K.R.J., Carter, J.O., & McGrath, J.F. (2009). Drought deaths in Eucalyptus globulus (Labill.) plantations in relation to soils, geomorphology and climate. *Plant and Soil*, *324*, 199-207
- Hipps, L.E., Asrar, G., & Kanemasu, E.T. (1983). Assessing the interception of photosynthetically active radiation in winter wheat. *Agricultural Meteorology*, *28*, 253-259

- Hopmans, P., & Bren, L.J. (2007). Long-term changes in water quality and solute exports in headwater streams of intensively managed radiata pine and natural eucalypt forest catchments in south-eastern Australia. *Forest Ecology and Management*, 253, 244-261
- Iglesias-Trabado, G., Carballeira-Tenreiro, R., & Folgueira-Lozano, J. (2009). Eucalyptus universalis: Global cultivated Eucalyptus forests Map Version 1.2. Dans GIT Forestry Consulting's; EUCALYPTOLOGICS: Information resources on Eucalyptus cultivation worldwide. Retrieved from <http://www.git-forestry.com> [October 19th 2009]
- IPCC (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories
- IPCC (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland
- Irschick, D.J., Fox, C., Thompson, K., Knapp, A., Baker, L., & Meyer, J. (2013). Functional ecology: integrative research in the modern age of ecology. *Functional Ecology*, 27, 1-4
- Jackson, P.C., Meinzer, F.C., Bustamante, M., Goldstein, G., Franco, A., Rundel, P.W., Caldas, L., Iglar, E., & Causin, F. (1999). Partitioning of soil water among tree species in a Brazilian Cerrado ecosystem. *Tree Physiology*, 19, 717-724
- Jackson, R.D., Reginato, R.J., & Idso, S.B. (1977). Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources Research*, 13, 651-656
- Jacquemoud, S., & Baret, F. (1990). PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment*, 34, 75-91
- Jacquemoud, S., Verhoef, W., Baret, F., Bacour, C., Zarco-Tejada, P.J., Asner, G.P., François, C., & Ustin, S.L. (2009). PROSPECT+SAIL models: A review of use for vegetation characterization. *Remote Sensing of Environment*, 113, S56-S66
- Jarvis, P.G., & Dewar, R.C. (1993). Forests in the global carbon balance: from stand to region. In J.R. Ehleringer & C.B. Field (Eds.), *Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe* (pp. 191-221). San Diego, CA: Academic Press Inc.
- Jung, M., Le Maire, G., Zaehle, S., Luysaert, S., Vetter, M., Churkina, G., Ciais, P., Viovy, N., & Reichstein, M. (2007). Assessing the ability of three land ecosystem models to simulate gross carbon uptake of forests from boreal to Mediterranean climate in Europe. *Biogeosciences*, 4, 647-656
- Keenan, R.J., Reams, G.A., Achard, F., de Freitas, J.V., Grainger, A., & Lindquist, E. (2015). Dynamics of global forest area: Results from the FAO Global Forest Resources Assessment 2015. *Forest Ecology and Management*, 352, 9-20
- Koide, K., & Koike, K. (2012). Applying vegetation indices to detect high water table zones in humid warm-temperate regions using satellite remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 19, 88-103
- Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudre, N., Ogee, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S., & Prentice, I.C. (2005). A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles*, 19, GB1015, doi:10.1029/2003GB002199
- Kucharik, C.J., Norman, J.M., & Gower, S.T. (1999). Characterization of radiation regimes in nonrandom forest canopies: theory, measurements, and a simplified modeling approach. *Tree Physiology*, 19, 695-706
- Laclau, J.-P., Nouvellon, Y., Reine, C., Gonçalves, J.d., Krusche, A., Jourdan, C., le Maire, G., & Bouillet, J.-P. (2012). Mixing Eucalyptus and Acacia trees leads to fine root over-yielding and vertical segregation between species. *Oecologia*, 1-11
- Laclau, J.-P., Ranger, J., de Moraes Gonçalves, J.L., Maquère, V., Krusche, A.V., M'Bou, A.T., 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, J.P. (2012). Bilan : une approche écosystémique du fonctionnement minéral des plantations forestières. Perspectives : améliorer la compréhension du contrôle environnemental des cycles biogéochimiques; Habilitation à diriger des recherches. In (p. 108): Nancy : Université de Nancy I
- Laclau, J.P., Deleporte, P., Ranger, J., Bouillet, J.P., & Kazotti, G.U.Y. (2003). Nutrient Dynamics throughout the Rotation of Eucalyptus Clonal Stands in Congo. *Annals of Botany*, *91*, 879-892
- Laclau, J.P., Ranger, J., Deleporte, P., Nouvellon, Y., Saint-Andre, L., Marlet, S., & Bouillet, J.P. (2005). Nutrient cycling in a clonal stand of Eucalyptus and an adjacent savanna ecosystem in Congo 3. Input-output budgets and consequences for the sustainability of the plantations. *Forest Ecology and Management*, *210*, 375-391
- Lagadeuc, Y., & Bornette, G. (2012). Prospective Ecologie fonctionnelle. In CNRS (Ed.), *Les Cahiers Prospectives*
- Landsberg, J.J., & Sands, P. (2010). Physiological ecology of forest production: principles, processes and models. *Academic Press*
- le Maire, G. (2005). Détermination du bilan de carbone de la forêt de Fontainebleau : apports de la télédétection pour la spatialisation des paramètres d'entrée (200 p + annexes), PhD Thesis. In Orsay: Université Paris Sud
- le Maire, G. (2012). Hyperspectral indices and forest characteristics. In, *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International* (pp. 7317-7320)
- le Maire, G., Davi, H., François, C., Soudani, K., Le Dantec, V., & Dufrêne, E. (2005). Modelling annual production and carbon fluxes of a large managed temperate forest using forest inventories, satellite data and field measurements. *Tree Physiology*, *25*, 859-872
- le Maire, G., Delpierre, N., Jung, M., Ciais, P., Reichstein, M., Viovy, N., Granier, A., Ibrom, A., Kolari, P., Longdoz, B., Moors, E.J., Pilegaard, K., Rambal, S., Richardson, A.D., & Vesala, T. (2010a). Detecting the critical periods that underpin interannual fluctuations in the carbon balance of European forests. *Journal of Geophysical Research*, *115*, G00H03, doi:10.1029/2009jg001244
- le Maire, G., Dupuy, S., Nouvellon, Y., Loos, R.A., & Hakamada, R. (2014a). Mapping short-rotation plantations at regional scale using MODIS time series: Case of eucalypt plantations in Brazil. *Remote Sensing of Environment*, *152*, 136-149
- le Maire, G., Francois, C., & Dufrene, E. (2004). Towards universal broad leaf chlorophyll indices using PROSPECT simulated database and hyperspectral reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*, *89*, 1-28
- le Maire, G., François, C., Soudani, K., Berveiller, D., Pontailier, J.-Y., Bréda, N., Genet, H., Davi, H., & Dufrêne, E. (2008). Calibration and validation of hyperspectral indices for the estimation of broadleaved forest leaf chlorophyll content, leaf mass per area, leaf area index and leaf canopy biomass. *Remote Sensing of Environment*, *112*, 3846-3864
- le Maire, G., Francois, C., Soudani, K., Davi, H., Le Dantec, V., Saugier, B., & Dufrene, E. (2006). Forest leaf area index determination: A multiyear satellite-independent method based on within-stand normalized difference vegetation index spatial variability. *Journal of Geophysical Research*, *111*, G02027, doi:10.1029/2005JG000122
- le Maire, G., Marsden, C., Laclau, J.-P., Stape, J.-L., Corbeels, M., & Nouvellon, Y. (2010b). Spatial and temporal variability of the carbon budget of tropical eucalyptus plantations assessed using ecosystem modelling and remote sensing (<http://www.symposcience.fr/exl-doc/colloque/ART-00002412.pdf>). In, *International Conference on Integrative Landscape Modelling (Landmod2010)* Montpellier: Edition Quae Symposcience
- le Maire, G., Marsden, C., Nouvellon, Y., Grinand, C., Hakamada, R., Stape, J.-L., & Laclau, J.-P. (2011a). MODIS NDVI time-series allow the monitoring of Eucalyptus plantation biomass. *Remote Sensing of Environment*, *115*, 2613-2625
- le Maire, G., Marsden, C., Nouvellon, Y., Stape, J.-L., & Ponzoni, F. (2012). Calibration of a Species-Specific Spectral Vegetation Index for Leaf Area Index (LAI) Monitoring: Example with MODIS Reflectance Time-Series on Eucalyptus Plantations. *Remote Sensing*, *4*, 3766-3780

- le Maire, G., Marsden, C., Verhoef, W., Ponzoni, F.J., Lo Seen, D., Bégué, A., Stape, J.-L., & Nouvellon, Y. (2011b). Leaf area index estimation with MODIS reflectance time series and model inversion during full rotations of Eucalyptus plantations. *Remote Sensing of Environment*, *115*, 586-599
- le Maire, G., Nouvellon, Y., Christina, M., Ponzoni, F.J., Gonçalves, J.L.M., Bouillet, J.P., & Laclau, J.P. (2013). Tree and stand light use efficiencies over a full rotation of single- and mixed-species Eucalyptus grandis and Acacia mangium plantations. *Forest Ecology and Management*, *288*, 31-42
- Le Maire, G., Nouvellon, Y., Stape, J.-L., Campoe, O., Vezy, R., Bouillet, J.-P., & Laclau, J.-P. (in prep). Dynamic of canopy structure, PAR absorption and light-use efficiency of 16 Eucalyptus genotypes along a full rotation. *Forest Ecology and Management*
- le Maire, G., Rançon, F., Charbonnier, F., & Rouspard, O. (2014b). Characterizing the structure of coffee agroforestry systems in Costa Rica (Poster). In, *Pléiades Days, 1-3 April 2013*. Toulouse
- Le Quere, C., Raupach, M.R., Canadell, J.G., Marland, G., & et al. (2009). Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. *Nature Geosci*, *2*, 831-836
- Levins, R. (1966). The strategy of model building in population biology. *American Scientist*, *54*, 421-431
- Lima, A.M.N., Silva, I.R., Neves, J.C.L., Novais, R.F., Barros, N.F., Mendonça, E.S., Smyth, T.J., Moreira, M.S., & Leite, F.P. (2006). Soil organic carbon dynamics following afforestation of degraded pastures with eucalyptus in southeastern Brazil. *Forest Ecology and Management*, *235*, 219-231
- Lima, W.P., & Zakia, M.J.B. (2006). *As Florestas Plantadas e a Água: Implementando o conceito da microbacia hidrográfica como unidade de planejamento: São Carlos, Brazil*
- Luciano, A.C.d.S., Picoli, M.C.A., Rocha, J.V., Franco, H.C.J., Sanches, G.M., Leal, M.R.L.V., & le Maire, G. (submitted). Generalized space-time classifiers for monitoring sugarcane areas in Brazil *Remote Sensing of Environment*
- Luckman, A., Baker, J., Kuplich, T.M., da Costa Freitas Yanasse, C., & Frery, A.C. (1997). A study of the relationship between radar backscatter and regenerating tropical forest biomass for spaceborne SAR instruments. *Remote Sensing of Environment*, *60*, 1-13
- Luo, Y.Q., Gerten, D., Le Maire, G., Parton, W.J., Weng, E.S., Zhou, X.H., Keough, C., Beier, C., Ciais, P., Cramer, W., Dukes, J.S., Emmett, B., Hanson, P.J., Knapp, A., Linder, S., Nepstad, D., & Rustad, L. (2008). Modeled interactive effects of precipitation, temperature, and [CO₂] on ecosystem carbon and water dynamics in different climatic zones. *Global Change Biology*, *14*, 1986-1999
- Luyssaert, S., Ciais, P., Piao, S.L., Schulze, E.D., Jung, M., Zaehle, S., Schelhaas, M.J., Reichstein, M., Churkina, G., Papale, D., Abril, G., Beer, C., Grace, J., Loustau, D., Matteucci, G., Magnani, F., Nabuurs, G.J., Verbeeck, H., Sulkava, M., van der Werf, G.R., Janssens, I.A., & Team, C.-I.S. (2010). The European carbon balance. Part 3: forests. *Global Change Biology*, *16*, 1429-1450
- Luyssaert, S., Inglima, I., Jung, M., Richardson, A., Reichstein, M., Papale, D., Piao, S.L., Schulze, E.-D., Wingate, L., Matteucci, G., Aragao, L., Aubinet, M., Beer, C., Bernhofer, C., Black, K., Bonal, D., Bonnefond, J.M., Chambers, J.Q., Ciais, P., Cook, B., Davis, K.J., Dolman, A.J., Gielen, B., Goulden, M.L., Grace, J., Granier, A., Grelle, A., Griffis, T., GrÅ¼nwald, T., Guidolotti, G., Hanson, P.J., Harding, R., Hollinger, D.Y., Hutyrá, L.R., Kolari, P., Kruijt, B., Kutsch, W., Lagergren, F., Laurila, T., Law, B.E., Le Maire, G., Lindroth, A., Loustau, D., Malhi, Y., Mateus, J., Migliavacca, M., Misson, L., Montagnani, L., Moncrieff, J., Moors, E.J., Munger, J.W., Nikinmaa, E., Ollinger, S.V., Pita, G., Rebmann, C., Rouspard, O., Saigusa, N., Sanz, M.J., Seufert, G., Sierra, C., Smith, L.K., Tang, J., Valentini, R., Vesala, T., & Janssens, I.A. (2007). CO₂ balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database. *Global Change Biology*, *13*, 2509-2537
- M., N. (2008). Rapport d'enquête sur l'approvisionnement de la ville de Pointe Noire en bois énergie (Congo). *UR2PI*
- MacDicken, K.G. (2015). Global Forest Resources Assessment 2015: What, why and how? *Forest Ecology and Management*, *352*, 3-8
- Madsen, H. (2000). Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. *Journal of Hydrology*, *235*, 276-288

- Mahecha, M.D., Reichstein, M., Jung, M., Seneviratne, S.I., Zaehle, S., Beer, C., Braakhekke, M.C., Carvalhais, N., Lange, H., Le Maire, G., & Moors, E. (2010). Comparing observations and process-based simulations of biosphere-atmosphere exchanges on multiple timescales. *Journal of Geophysical Research*, *115*, G02003, doi:02010.01029/02009JG001016
- Manning, D.A.C. (2010). Mineral sources of potassium for plant nutrition. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *30*, 281-294
- Manziona, R.L., Tanikawa, D.H., & Soldera, B.C. (2014). RELAÇÃO ENTRE A RESPOSTA ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO EM DIFERENTES CULTIVOS AGRICOLAS E NÍVEIS FREÁTICOS EM ÁREA DE RECARGA DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI. *Águas Subterrâneas*, *28*, 1-13
- Maquere, V., Laclau, J.P., Bernoux, M., Saint-Andre, L., Gonçalves, J.L.M., Cerri, C.C., Piccolo, M.C., & Ranger, J. (2008). Influence of land use (savanna, pasture, Eucalyptus plantations) on soil carbon and nitrogen stocks in Brazil. *European Journal of Soil Science*, *59*, 863-877
- Marsden, C., le Maire, G., Nouvellon, Y., & Stape, J. (2008). Analysis of Modis NDVI time-series over Eucalyptus plantations of south-eastern Brazil (oral presentation). In *IUFRO - Processes Controlling Productivity in Tropical Plantation* 13th November 2008, Porto Seguro (Brazil)
- Marsden, C., le Maire, G., Stape, J.-L., Seen, D.L., Rouspard, O., Cabral, O., Epron, D., Lima, A.M.N., & Nouvellon, Y. (2010). Relating MODIS vegetation index time-series with structure, light absorption and stem production of fast-growing Eucalyptus plantations. *Forest Ecology and Management*, *259*, 1741-1753
- Marsden, C., Nouvellon, Y., Laclau, J.-P., Corbeels, M., McMurtrie, R.E., Stape, J.L., Epron, D., & le Maire, G. (2013). Modifying the G'DAY process-based model to simulate the spatial variability of *Eucalyptus* plantation growth on deep tropical soils. *Forest Ecology and Management*, *301*, 112-128
- MEA (2005). *Millennium Ecosystem Assessment, Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*: Island Press, Washington, DC.
- Medlyn, B.E. (2004). A MAESTRO Retrospective. In Mencuccini M., Moncrieff J., McNaughton K. & G. J. (Eds.), *Forests at the Land-Atmosphere Interface* (pp. 105-122). Wallingford, UK: CABI Publishing
- Monteith, J.L. (1972). Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, *9*, 747-766
- Nabuurs, G.-J., Pussinen, A., Karjalainen, T., Erhard, M., & Kramer, K. (2002). Stemwood volume increment changes in European forests due to climate change—a simulation study with the EFISCEN model. *Global Change Biology*, *8*, 304-316
- Nouvellon, Y., Begue, A., Moran, M.S., Lo Seen, D., Rambal, S., Luquet, D., Chehbouni, G., & Inoue, Y. (2000). PAR extinction in shortgrass ecosystems: effects of clumping, sky conditions and soil albedo. *Agricultural and Forest Meteorology*, *105*, 21-41
- Nouvellon, Y., Laclau, J.-P., Epron, D., Le Maire, G., Bonnefond, J.-M., Gonçalves, J.L.M., & Bouillet, J.-P. (2012a). Production and carbon allocation in monocultures and mixed-species plantations of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* in Brazil. *Tree Physiology*, *32*, 680-695
- Nouvellon, Y., Laclau, J.P., Epron, D., Le Maire, G., Bonnefond, J.M., Goncalves, J.L., & Bouillet, J.P. (2012b). Production and carbon allocation in monocultures and mixed-species plantations of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* in Brazil. *Tree Physiology*, *32*, 680-695
- Nouvellon, Y., Moran, M.S., Lo Seen, D., Bryant, R., Rambal, S., Ni, W.M., Begue, A., Chehbouni, A., Emmerich, W.E., Heilman, P., & Qi, J.G. (2001). Coupling a grassland ecosystem model with Landsat imagery for a 10-year simulation of carbon and water budgets. *Remote Sensing of Environment*, *78*, 131-149
- Nouvellon, Y., Stape, J.-L., Bonnefond, J.-M., Bouillet, J., Saint-André, L., Hamel, O., Epron, D., Thongo M'Bou, A., Kinana, A., Le Maire, G., Rouspard, O., Da Rocha, H.R., 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 *Knowledge-based management of tropical rainforests*. Cayenne, French Guiana

- Nouvellon, Y., Stape, J.L., Le Maire, G., Epron, D., Gonçalves, J.L.M., Bonnefond, J.M., Campoe, O., Loos, R., Chavez, R., Bouillet, J.P., & Laclau, J.P. (2011). Factors controlling carbon and water balances on fast growing Eucalyptus plantations. In, *Proceedings IUFRO Improvement and Culture of Eucalypts* (pp. 43-46). Porto-Seguro, Brazil
- Novaes, R.M.L., Pazianotto, R.A.A., Brandao, M., Alves, B.J.R., May, A., & Folegatti-Matsuura, M.I.S. (2017). Estimating 20-year land-use change and derived CO₂ emissions associated with crops, pasture and forestry in Brazil and each of its 27 states. *Global Change Biology*, *23*, 3716-3728
- Oliveira, J.d.C., Féret, J.-B., Ponzoni, F.J., Nouvellon, Y., Gastellu-Etchegorry, J.-P., Campoe, O.C., Stape, J.L., Rodriguez, L.C.E., & le Maire, G. (2017). Simulating the canopy reflectance of different Eucalypt genotypes with the DART 3D model. *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *10*, 4844-4852
- Oliveira, R.S., Bezerra, L., Davidson, E.A., Pinto, F., Klink, C.A., Nepstad, D.C., & Moreira, A. (2005). Deep root function in soil water dynamics in cerrado savannas of central Brazil. *Functional Ecology*, *19*, 574-581
- Pansu, M., Sarmiento, L., Rujano, M.A., Ablan, M., Acevedo, D., & Bottner, P. (2010). Modeling organic transformations by microorganisms of soils in six contrasting ecosystems: Validation of the MOMOS model. *Global Biogeochemical Cycles*, *24*
- Payn, T., Carnus, J.-M., Freer-Smith, P., Kimberley, M., Kollert, W., Liu, S., Orazio, C., Rodriguez, L., Silva, L.N., & Wingfield, M.J. (2015). Changes in planted forests and future global implications. *Forest Ecology and Management*, *352*, 57-67
- Peterson, D.L., Spanner, M.A., Running, S.W., & Teuber, K.B. (1987). Relationship of thematic mapper simulator data to leaf area index of temperate coniferous forests. *Remote Sensing of Environment*, *22*, 323-341
- Peylin, P., Bacour, C., MacBean, N., Leonard, S., Rayner, P., Kuppel, S., Koffi, E., Kane, A., Maignan, F., Chevallier, F., Ciais, P., & Prunet, P. (2016). A new stepwise carbon cycle data assimilation system using multiple data streams to constrain the simulated land surface carbon cycle. *Geosci. Model Dev.*, *9*, 3321-3346
- Piketty, M.-G., Wichert, M., Fallot, A., & Aimola, L. (2009). Assessing land availability to produce biomass for energy: The case of Brazilian charcoal for steel making. *Biomass and Bioenergy*, *33*, 180-190
- Porté, A., & Bartelink, H.H. (2002). Modelling mixed forest growth: a review of models for forest management. *Ecological Modelling*, *150*, 141-188
- Powers, R.F. (1999). On the sustainable productivity of planted forests. *New Forests*, *17*, 263-306
- Pretzsch, H., Forrester, D.I., & Rötzer, T. (2015). Representation of species mixing in forest growth models. A review and perspective. *Ecological Modelling*, *313*, 276-292
- Reich, P.B. (2014). The world-wide 'fast-slow' plant economics spectrum: a traits manifesto. *Journal of Ecology*, *102*, 275-301
- Reville, A., Sus, O., Barrett, B., & Williams, M. (2013). Carbon cycling of European croplands: A framework for the assimilation of optical and microwave Earth observation data. *Remote Sensing of Environment*, *137*, 84-93
- Rigg, R., & Hartmann, S. (2017). Models in Science. In E.N. Zalta (Ed.). URL = <<https://plato.stanford.edu/archives/spr2017/entries/models-science/>>. : The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Spring 2017 Edition)
- Roupsard, 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., Chantuma, A., le Maire, G., Hamel, O., & Bouillet, J.-P. (2008). Partitioning NPP into growth, litter and exports: impacts on ecosystem carbon fluxes. A review for tropical perennial plantations. . In, *IUFRO: Productivity of tropical plantations*. Porto Seguro, Bahia, Brasil. 10-15 of November 2008. Oral presentation
- Roy, E.D., Richards, P.D., Lins, M., Vazquez, F.F., & Porder, S. (2016). The phosphorus cost of agricultural intensification in the tropics. *Nature Plants*, *2*, 1-6
- Ryan, M.G., Stape, J.L., Binkley, D., Fonseca, S., Loos, R.A., Takahashi, E.N., Silva, C.R., Silva, S.R., Hakamada, R.E., Ferreira, J.M., Lima, A.M.N., Gava, J.L., Leite, F.P., Andrade, H.B., Alves, J.M., &

- Silva, G.G.C. (2010). Factors controlling Eucalyptus productivity: How water availability and stand structure alter production and carbon allocation. *Forest Ecology and Management*, 259, 1695-1703
- Sabajo, C.R., le Maire, G., June, T., Meijide, A., Roupsard, O., & Knohl, A. (2017). Expansion of oil palm and other cash crops causes an increase of the land surface temperature in the Jambi province in Indonesia. *Biogeosciences*, 14, 4619-4635
- Saxe, H., Cannell, M.G.R., Johnsen, Ø., Ryan, M.G., & Vourlitis, G. (2001). Tree and forest functioning in response to global warming. *New Phytologist*, 149, 369-399
- Scholze, M., Buchwitz, M., Dorigo, W., Guanter, L., & Quegan, S. (2017). Reviews and syntheses: Systematic Earth observations for use in terrestrial carbon cycle data assimilation systems. *Biogeosciences*, 14, 3401-3429
- Scott, D.F., & Prinsloo, F.W. (2008). Longer-term effects of pine and eucalypt plantations on streamflow. *Water Resources Research*, 44
- Smethurst, P.J., Almeida, A.C., & Loos, R.A. (2015). Stream flow unaffected by Eucalyptus plantation harvesting implicates water use by the native forest streamside reserve. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3, 187-198
- Soudani, K., Francois, C., le Maire, G., Le Dantec, V., & Dufrene, E. (2006). Comparative analysis of IKONOS, SPOT, and ETM+ data for leaf area index estimation in temperate coniferous and deciduous forest stands. *Remote Sensing of Environment*, 102, 161-175
- Soudani, K., le Maire, G., Dufrêne, E., François, C., Delpierre, N., Ulrich, E., & Cecchini, S. (2008). Evaluation of the onset of green-up in temperate deciduous broadleaf forests derived from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data. *Remote Sensing of Environment*, 112, 2643-2655
- Stape, J.L., Binkley, D., & Ryan, M.G. (2008). Production and carbon allocation in a clonal Eucalyptus plantation with water and nutrient manipulations. *Forest Ecology and Management*, 255, 920-930
- Sutherland, W.J., Freckleton, R.P., Godfray, H.C.J., Beissinger, S.R., Benton, T., Cameron, D.D., Carmel, Y., Coomes, D.A., Coulson, T., Emmerson, M.C., Hails, R.S., Hays, G.C., Hodgson, D.J., Hutchings, M.J., Johnson, D., Jones, J.P.G., Keeling, M.J., Kokko, H., Kunin, W.E., Lambin, X., Lewis, O.T., Malhi, Y., Mieszkowska, N., Milner-Gulland, E.J., Norris, K., Phillimore, A.B., Purves, D.W., Reid, J.M., Reuman, D.C., Thompson, K., Travis, J.M.J., Turnbull, L.A., Wardle, D.A., Wiegand, T., & Gibson, D. (2013). Identification of 100 fundamental ecological questions. *Journal of Ecology*, 101, 58-67
- Swenson, J.J., Waring, R.H., Fan, W., & Coops, N. (2005). Predicting site index with a physiologically based growth model across Oregon, USA. *Canadian Journal of Forest Research*, 35, 1697-1707
- Taugourdeau, S., le Maire, G., Avelino, J., Jones, J.R., Ramirez, L.G., Jara Quesada, M., Charbonnier, F., Gómez-Delgado, F., Harmand, J.-M., Rapidel, B., Vaast, P., & Roupsard, O. (2014). Leaf area index as an indicator of ecosystem services and management practices: An application for coffee agroforestry. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 192, 19-37
- Tickle, P.K., Coops, N.C., & Hafner, S.D. (2001). Assessing forest productivity at local scales across a native eucalypt forest using a process model, 3PG-SPATIAL. *Forest Ecology and Management*, 152, 275-291
- Tng, D.Y.P., Goosem, S., Jordan, G.J., Bowman, D.M.J.S., & Sheppard, A. (2014). Letting giants be - rethinking active fire management of old-growth eucalypt forest in the Australian tropics. *Journal of Applied Ecology*, 51, 555-559
- Turner, D.P., Ollinger, S.V., & Kimball, J.S. (2004a). Integrating Remote Sensing and Ecosystem Process Models for Landscape- to Regional-Scale Analysis of the Carbon Cycle. *Bioscience*, 54, 573-584
- Turner, D.P., Ollinger, S.V., & Kimball, J.S. (2004b). Integrating remote sensing and ecosystem process models for landscape-to regional-scale analysis of the carbon cycle. *AIBS Bulletin*, 54, 573-584

- van Dijk, A.I.J.M., Hairsine, P.B., Arancibia, J.P., & Dowling, T.I. (2007). Reforestation, water availability and stream salinity: A multi-scale analysis in the Murray-Darling Basin, Australia. *Forest Ecology and Management*, 251, 94-109
- van Dijk, A.I.J.M., & Keenan, R.J. (2007). Planted forests and water in perspective. *Forest Ecology and Management*, 251, 1-9
- Van Oijen, M., Rougier, J., & Smith, R. (2005). Bayesian calibration of process-based forest models: bridging the gap between models and data. *Tree Physiology*, 25, 915-927
- Vanclay, J.K. (2009). Managing water use from forest plantations. *Forest Ecology and Management*, 257, 385-389
- Verhoef, W. (1984). Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 16, 125-141
- Verrelst, J., Camps-Valls, G., Muñoz-Marí, J., Rivera, J.P., Veroustraete, F., Clevers, J.G.P.W., & Moreno, J. (2015). Optical remote sensing and the retrieval of terrestrial vegetation biogeophysical properties – A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 108, 273-290
- Vezy, R., Christina, M., Rouspard, O., Nouvellon, Y., Duursma, R., Medlyn, B., Soma, M., Charbonnier, F., Blitz-Frayret, C., Stape, J.-L., Laclau, J.-P., Filho, E.d.M.V., Rapidel, B., Do, F., Rocheteau, A., Picart, D., Borgonovo, C., Loustau, D., & le Maire, G. (submitted). Measuring and modelling energy partitioning in canopies of varying complexity using MAESPA model. *Agricultural and Forest Meteorology*
- Vezy, R., le Maire, G., Christina, M., Georgiou, S., Imbach, P., Hidalgo, H.G., Alfaro, E.J., Blitz-Frayret, C., Laclau, J.-P., Picart, D., Loustau, D., Charbonnier, F., Duursma, R., Medlyn, B., Lehner, P., & Rouspard, O. (in prep-a). Modeling Yield, Net Primary Productivity, Energy, And Water Partitioning in Heterogeneous Agroforestry Systems: A New Coffee Agroforestry Dynamic Model Driven by Metamodels From MAESPA
- Vezy, R., Rouspard, O., Georgiou, S., Imbach, P., Rapidel, B., Charbonnier, F., Blitz-Frayret, C., Loustau, D., Hidalgo, H.G., Alfaro, E.J., & le Maire, G. (in prep-b). Modelling Coffea arabica adaptation to future climate change: neither CO2 nor shade remediate projected yield losses at low elevations
- Violle, C., Navas, M.-L., Vile, D., Kazakou, E., Fortunel, C., Hummel, I., & Garnier, E. (2007). Let the concept of trait be functional! *Oikos*, 116, 882-892
- Wang, Y.P., & Jarvis, P.G. (1990). Influence of crown structural properties on PAR absorption, photosynthesis, and transpiration in Sitka spruce: application of a model (MAESTRO). *Tree Physiology*, 7, 297-316
- Warren-Wilson, J. (1963). Estimation of foliage denseness and foliage previous term anglenext term by inclined point quadrats. *Australian Journal of Botany*, 11, 95-105
- Watson, D.J. (1947). Comparative Physiological Studies on the Growth of Field Crops: I. Variation in Net Assimilation Rate and Leaf Area between Species and Varieties, and within and between Years. *Annals of Botany*, 11, 41-76
- Welles, J.M., & Norman, J.M. (1991). Instrument for indirect Measurement of Canopy Architecture. *Agronomy Journal*, 83, 818-825
- Wilson, J.W. (1960). Inclined Point Quadrats. *The New Phytologist*, 59, 1-8
- Xavier, A.C., King, C.W., & Scanlon, B.R. (2016). Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). *International Journal of Climatology*, 36, 2644-2659
- Zaehle, S., Sitch, S., Prentice, I.C., Liski, J., Cramer, W., Erhard, M., Hickler, T., & Smith, B. (2006). The importance of age-related decline in forest NPP for modeling regional carbon balances. *Ecological Applications*, 16, 1555-1574
- Zhang, P., Zhang, J., & Chen, M. (2017). Economic impacts of climate change on agriculture: The importance of additional climatic variables other than temperature and precipitation. *Journal of Environmental Economics and Management*, 83, 8-31
- Zhang, X., Friedl, M.A., Schaaf, C.B., Strahler, A.H., & Liu, Z. (2005). Monitoring the response of vegetation phenology to precipitation in Africa by coupling MODIS and TRMM instruments. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110, n/a-n/a

- Zhou, J., Proisy, C., Descombes, X., le Maire, G., Nouvellon, Y., Stape, J.-L., Viennois, G., Zerubia, J., & Couteron, P. (2013). Mapping local density of young Eucalyptus plantations by individual tree detection in high spatial resolution satellite images. *Forest Ecology and Management*, *301*, 129-141
- Zhu, Z., Arp, P.A., Meng, F., Bourque, C.P.A., & Foster, N.W. (2003). A forest nutrient cycling and biomass model (ForNBM) based on year-round, monthly weather conditions, part I: assumption, structure and processing. *Ecological Modelling*, *169*, 347-360