Modélisation biophysique de la prodcution et des échanges atmosphériques des cultures forestières à croissance rapide du Sud-Ouest

A research fund of the Fondation Tuck
Enerbio industrial donors:

THESE 2008

Titre de la thèse	Modélisation biophysique de la production et des échanges atmosphériques des cultures forestières à croissance rapide du Sud-Ouest
Doctorant	Virginie Moreaux
Université-Ecole doctorale	ED 304, Sciences et Environnements, Université de Bordeaux 1
Directeur de thèse	Denis Loustau, Directeur de recherches INRA, Unité EPHYSE, Centre de Bordeaux Aquitaine, 71 Avenue Edouard Bourlaux, 33883 Villenave d'Ornon
Laboratoire d'accueil	Ephyse, Centre de Bordeaux Aquitaine, Villenave d'Ornon
Responsable de thèse	Denis Loustau
Durée	Trois ans fin 2008 à fin 2011

Résumé

L'objectif de ce projet est de développer un modèle de production végétale et de transfert sol-végétation-atmosphère décrivant les processus d'échange d'énergie (rayonnement, chaleur, turbulence) et de masse (CO_2, vapeur d'eau, ozone, autres gaz à effet de serre) adapté au cas des systèmes de culture de biomasse forestière à croissance rapide et rendant compte de leur réponse au changement climatique. Partant d'un modèle mécaniste biophysique monodimensionnel développé par le laboratoire EPHYSE de l'INRA, il s'agira de dépasser les hypothèses d'homogénéités verticale et horizontale du couvert pour obtenir une représentation en trois dimensions de couverts mélangés.
Sera traitée dans ce projet la seule hétérogénéité du microclimat lumineux et du bilan d'énergie. Ce projet comprend deux étapes. Le cas des effets d'hétérogénéité structurale et la phase du cycle de vie forestier allant de la plantation à la fermeture du couvert (10 ans) seront étudiés en premier. L'exemple étudié sera celui d'une plantation de pins maritimes à croissance rapide du Sud-Ouest, suivie de façon détaillée depuis sa plantation en 2003 par un ensemble complet de mesures des flux végétation-atmosphère et de la croissance des arbres à différentes échelles.
Une deuxième partie consistera à tester ce modèle pour des cultures à croissance rapide d'Eucalyptus et de Pins maritimes d'une vingtaine d'années, étudiées par le FCBA et l'INRA près de Toulouse (site de Longages) et de Bordeaux (site de Pierroton), et éventuellement sur d'autres sites avec des types de forêts dédiées et semi-dédiées du Sud-Ouest.

Résultats

Caractérisation des échanges d'énergie et de masse de couverts de Pin maritime et d'Eucalyptus au stade juvénile, présentant une variété de de structures, pendant deux ans avec plusieurs épisodes de sécheresse consécutifs,
Mieux renseigner le fonctionnement des stades juvéniles en taillis ou futaie,

Compléter les modèles existants et les faire évoluer vers une utilisation plus générique,
Mise en évidence du rôle de la structure du couvert végétal et de celui des pratiques sylvicoles et implémentation de nouveaux modules dans un modèle complet de fonctionnement et production basé sur les processus biophysiques et biogéochimiques,
Quantification du rôle des advantices dans la dynamique saisonnière des échanges énergétique, hydrique et du cycle du carbone,
Mise en évidence de la réponse simultanée de la transpiration des arbres à des contraintes climatiques et notamment de sécheresses,
Quantification par suivi dendrométrique de l'impact d'un débroussaillement et d'un dépressage sur la croissance en diamètre des arbres,
Vérification de la capacité du modèle à simuler la dynamique des flux d'échanges d'énergie et de masse en peuplement adulte et à prendre en compte les effets climatiques.

Toutes ces améliorations du modèle permettent de simuler les trajectoires à long terme des flux d'énergie, d'eau et de carbone ainsi que l'évolution temporelle des stocks de principaux compartiments du cycle biogéochimique du carbone tels que ceux de biomasse aérienne et souterraine des arbres et de la végétation du sous-étage et la dynamique des pools de carbone organique du sol.

Malgré plusieurs limites, ces recherches montrent que les pratiques de sylviculture associées à l'intensification (essence choisie, type de couvert, dépressages, éclaircies et durée des rotations, travail du sol et débroussaillement) sont déterminantes dans le fonctionnement des forêts de production à croissance rapide.

Ces recherches confirment que la modélisation représente une approche prédictive puissante qu'impose le contexte de changements environnementaux et socio-économiques rapides.

Livrables

Page de couverture du manuscrit

Manuscrit de la thèse (.pdf - 17 Mo)

Publications

Moreaux V, Lamaud E, Bosc A, Bonnefond JM, Medlyn B and Loustau D (2011). Paired comparison of water, energy and carbon exchanges over two young maritime pine stands (Pinus pinaster Ait.): effects of thinning and weeding in the early stage of tree growth. Tree Physiology 31, 903-921.

Moreaux V, O'Grady AP, Nguyen-The N and Loustau D (2012). Water use of young maritime Pine and Eucalyptus stands in response to climatic drying in south-western France. Plant Ecology and Diversity.

Communications

Moreaux V, Lamaud E, Bonnefond JM, Bosc A, Medlyn B, Trichet P and Loustau D (2012). Présentation orale : Controlling the inter-row vegetation in young coniferous stands : Impact on the energy water and carbon balances. A case study in South West of France. Centro Andaluz Medio Ambiente, Granada, Spain (7-8 June)

Moreaux V, Bosc A, Trichet P, Chipeaux C, Gu J, and Loustau D (2012). Poster (Young scientist poster award) : Forest management intensification : Present and future impacts on carbon cycle in South-West of France. GHG-Europe annual meeting, Pitesti, Romania (17-20 April)

Moreaux V, Loustau D, Lamaud E, Bonnefond JM and Bosc A (2010). Présentation orale (Best student paper award). Water energy and carbon exchanges in young coniferous plantations : effect of the presence of gorses. IUFRO Canopy Processes Working Group, Tasmanie, Australie (07-15 October)

Moreaux V (2009). Présentation orale. Modélisation biophysique de la production et des échanges atmosphériques de cultures forestières à croissance rapide : Application au cas de jeunes peuplements de Pins maritimes et d'Eucalyptus. Journée thèse des bois, Pôle Xylofutur, Mimizan, France (Janvier)

Contact

Denis Loustau
INRA, Unité EPHYSE, Centre de Bordeaux Aquitaine, 71 Avenue Edouard Bourlaux, 33883 Villenave d'Ornon
Tél. : 05 57 12 24 15
denis.Loustau@bordeaux.inra.fr

N° d'ordre : 4506

THÈSE

Présentée à

L'UNIVERSITÉ BORDEAUX-1

ÉCOLE DOCTORALE : SCIENCES ET ENVIRONNEMENTS

Par **Virginie MOREAUX**

Pour obtenir le grade de Docteur

SPÉCIALITÉ : Physique de l'Environnement

OBSERVATION ET MODÉLISATION DES ÉCHANGES D'ÉNERGIE ET DE MASSE DE JEUNES PEUPLEMENTS FORESTIERS DU SUD-OUEST DE LA FRANCE

Directeurs de thèse : Denis LOUSTAU
Eric LAMAUD
Belinda MEDLYN

Soutenue le : 26 mars 2012

Devant la commission d'examen composée de :

M. ALARD, Didier	Professeur de l'Université Bordeaux I	Président
M. GRANIER, André	DR. INRA Nancy	Rapporteur
M. VIOVY, Nicolas	DR. LSCE-Orme, Gif sur Yvette	Rapporteur
Mme MEDLYN, Belinda	MC. Université de Macquarie, Sydney, Australie	Examinateur
M. NOUVELLON, Yann	CR. CIRAD, Sao Paulo, Brésil	Examinateur
M. BAILLY, Alain	DR. FCBA, Station Sud-Ouest, Bordeaux	Examinateur
M. LOUSTAU, Denis	DR. INRA-EPHYSE, Bordeaux	Directeur de thèse

Laboratoire d'accueil

INRA - Institut National de la Recherche Agronomique
UR 1263 - **E**cologie fonctionnelle et **PHYS**ique de l'**E**nvironnement
Equipe Ecologie fonctionnelle et Télédétection
71, Avenue Edouard Bourlaux
33140 Villenave d'Ornon
France

Mission à l'étranger : 6 mois, Sydney-Hobart Australie

Université d'accueil

Department of Biological Sciences
Faculty of Science
Macquarie University NSW 2109
Australia
Contact : Belinda Medlyn

CSIRO Ecosystem Sciences - Hobart
College Road
Sandy Bay TAS 7005
Australia
Contacts : Michael Battaglia - Anthony O'Grady

Financements:

Novembre 2008 - Mars 2012

Remerciements

Au terme de ces quelques années de recherche, je tiens à remercier l'ensemble des personnes ayant permis à ce travail de se réaliser dans les meilleures conditions et d'aboutir. Quelques temps pour la lecture, mais j'y tiens….

Je remercie les membres du jury, Didier Alard (Président), André Granier et Nicolas Viovy (rapporteurs), Alain Bailly, Yann Nouvellon et Belinda Medlyn, qui ont pu en un temps accéléré se consacrer à la lecture de ce manuscrit. Je les remercie pour leurs précieux conseils et remarques enrichissantes au terme de ce travail. Merci Yann pour le déplacement depuis São Paulo ! Je remercie par ailleurs la fondation Tuck pour le financement de ce projet et Denis Loustau pour m'avoir accueillie au sein de son laboratoire à deux reprises pour le master et pour la thèse.

Denis : *« Tell me and I forget. Teach me and I remember. Involve me and I learn (B. Franklin) »:* quatre ans au total, et me voilà plongée dans le monde « microscopique » à mes yeux que représentent ces petits Pins des Landes devant l'immensité que représentent les courants atmosphériques, océaniques et qui avaient jusque là toujours éveillé ma curiosité. Alors loin de ces phénomènes planétaires indispensables à l'équilibre énergétique de la Terre, ce sont ces petits Pins et toutes les connaissances que tu m'as transmises qui m'ont donné un équilibre professionnel et une envie de toujours découvrir un peu plus les mystères de la forêt et d'apporter également ma pierre à l'édifice. Un mentor devrais-je dire tout en me montrant une réelle confiance dans mes propres choix. Merci de ton soutien, de ton aide, de ta patience également et pour tout ce que tu m'auras apporté.

Alex (Bosc), un grand merci pour ta participation active à ce travail, tant sur les aspects ingénierie (assistance à la fabrication de capteurs) que sur les aspects recherche qui ont plus qu'enrichi ce travail de thèse. A bout de souffle par moment, passer du temps avec toi et Denis à Pierroton m'a permis d'entretenir une réelle motivation. Je t'en suis très reconnaissante.

Eric (Lamaud), merci à toi également pour ton aide, ton écoute, et d'avoir mis à disposition les outils nécessaires pour la réalisation de mes tâches. Je n'aurais presque pas parlé ozone dans le présent manuscrit, mais sache que cette petite molécule ne me laisse pas indifférente. Je connais un peu ses secrets, et ça vaut le coup d'y consacrer du temps, alors affaire à suivre…

Tes nombreuses connaissances, Denis, m'ont permis de rencontrer des personnes et de réaliser des projets que je n'aurais pu imaginer avant de commencer. A savoir un séjour de 6 mois à Sydney qui m'a valu de nombreux échanges avec une communauté scientifique plus large. I sincerely thank you Belinda (Medlyn) for hosting me in your research team at Macquarie University. I really appreciated the scientific motivation that came from your team while I was there: Melanie, Martin, Ashehad, Jeff, Mikko Peltoniemi, and my dear Silvia Dezi. A special thank to Remko Duursma too for his help with Maestra. A little bit further, in Tasmania, I would like to thank Mike Battaglia for his helpful discussions at CSIRO. There, I also met Anthony O'Grady and that was a pleasure to see him few months later in Bordeaux. Thank you so much for having been involved in my work too. Je remercie Jean-Michel Carnus qui a rendu ce déplacement possible via le projet Tranzfor.

Je remercie la commune de Salles et Jean Michel Beau (ONF) pour avoir autorisé l'installation d'un deuxième site et retardé les opérations sylvicoles à notre demande. Un début de thèse marqué par la mise en place de nombreuses manip' : en ce sens, je tiens à remercier Jean-Marc Bonnefond qui m'a initiée à la technique d'eddy-covariance. Je remercie également Didier Garrigou pour sa disponibilité, sans oublier ses précieux conseils techniques qui m'ont beaucoup apporté. Je vous remercie tous deux pour le temps consacré à Bilos et pour son suivi. Merci à Sandra également pour son aide. Parce que le travail a nécessité de multiples forces techniques, je remercie également Michel Sartore pour le temps passé ensemble sur le terrain à se faire dévorer par les moustiques par 30°C sous couvert d'*Eucalyptus* ou percher à 18m (dans ton cas)…ou à installer des capteurs flux de sève, des microdendro, des pièges à litières sous une pluie battante. Quoiqu'il en soit, ce fut un plaisir de bénéficier de ton expérience de terrain. Christophe (Chipeaux), je te remercie sincèrement pour avoir permis le maintien du site de Bilos ainsi que les allers-retours à Montbartier et le suivi de ces deux sites. Enfin, un merci particulier à Pierre Trichet. Je dois dire, que pour avoir installé les gouttières avec Didier sous les ajoncs, ou encore les capteurs flux de sève et microdendro avec Michel entre les ajoncs, tu m'as épargné encore plus d' « attaques » par les aiguilles d'ajoncs en réalisant l'ensemble des prélèvements de biomasses sous-bois, accompagnés de tes stagiaires. Je pense également à l'unité expérimentale de Pierroton, Fred Bernier et son équipe, pour le suivi dendrométrique des trois sites suivis, pas toujours dans les meilleures conditions…distance des sites, ajoncs (je compte environ 8000 arbres échantillonnés !)….Côté *Eucalyptus*, un grand merci à Nicolas Nguyen The, Francis Melun et Sébastien Cavaignac pour leur contribution et les connaissances qu'ils m'ont transmises sur cet E. *gundal*.

J'apprécie tout particulièrement la disponibilité de chacun pour répondre à mes questions, me fournir des données ou nourrir les discussions de part leur expérience. Je pense ainsi à Jérôme Ogée, Sylvain Dupont, Dominique Guyon, Laurent

Augusto, Jean-Pierre (Lagouarde et Wigneron), Yves Brunet, Ajit Govind (données SAFRAN), Sylvia Dayau (données météo), Christophe Moisy (données SAFRAN). Merci également à Claudy Jolivet pour avoir mis à ma disposition les données de carbone de sol obtenues lors de son travail de thèse. Je n'oublie pas non plus Catherine Lambrot, Marc Irvine, Pauline Défossez, Lisa Wingate, et Isabelle Champion. Enfin, un merci particulier à Valérie, Françoise et Patricia pour la gestion de mon dossier administratif et pour votre soutien, Guy et Patrick pour mes problèmes informatiques. Enfin Anne-Marie, je te remercie pour ton efficacité de chaque instant où je t'ai sollicité pour la recherche d'articles, la correction de mes chapitres, c'est un temps précieux que tu m'as fait gagner tout au long de la thèse.

Aux collègues et amis de bureau : Marie, Marion, Heather, Steph, Jyiothi avec qui j'ai partagé le bureau pour mon plus grand plaisir, vous m'avez précédée dans la réalisation brillante de votre thèse ou de vos missions et plus qu'encouragée dans les moments de doutes, merci à vous. Nath (N), ça été une bonne surprise de voir que tu venais également de l'université de Versailles…et oui il n'y a pas que les Enitab ici, je te souhaite plein de bonnes choses! Merci pour votre bonne humeur partagée dans les couloirs d'Ephyse, les bureaux pour les discussions : Nathalie (YR), Jean-Charles, Julien, Nicolas, Tovo, Damien, Alain, Ali, Jiangxin, David, Christophe (C&M), Masako, Jérèm, Sylvain…Une pensée pour ma Kati (Spannraft) qu'il me tarde de visiter à Munich…Que de bons souvenirs partagés avec toi, Steph et Heather dans le bureau des oiseaux et en dehors…Je vous souhaite à tous de réussir dans vos projets personnels et professionnels.

Many thanks to the friendship of many people in Australia: Anne-Laurence (I'm sure that your fish will be very smart at the end of your PhD! I want to see it!!), Lucas, Jessica, Ernst, François le français, Jan, Brett, Kyioko…without forgetting that wonderful and generous Australian family Paul and Danielle Ainsworth with their three children that just offered me an amazing time with them. Few names that made me feel happy to work there.

Il y a les amis de toujours évidemment qu'on n'oublie jamais malgré les distances….Je pense à vous les filles : Fanny, Pauline, Aurélie, Clémence, Valentine, Julia…puis la « tennis team » : Dorothée, Eric, Mélanie, Florent, Aurélia, Sébastien, Sam. C'est bon je me sens d'attaque pour la tournée des tournois aux Sables….Merci pour votre soutien et pour les moments de détente partagés ! Une dédicace à Titis et Alex pour leur venue surprise à la soutenance et sous un soleil inattendu…j'annonce : finies les vacances ensemble sous la pluie !

À Papy dont le souvenir m'est si cher. Je me souviens encore de tes encouragements sur les courts de tennis, et plus sérieusement de ton soutien à la sortie de la prépa et pendant la thèse, de ton discours sur la persévérance à maintenir dans toutes les situations. Ce sont sans doute toutes ces discussions, qui reflétaient simplement une vie exemplaire, qui m'ont accompagnée dans ces nombreux défis. Tes paroles de guide ainsi résumées : *This life is yours. Take the power to choose what you want to do and do it well. Take the power to love what you want in life and love it honestly. Take the power to walk in the forest and be a part of nature. Take the power to control your own life. No one else can do it for you. Take the power to make your life happy (Susan Polis Schutz) ».*

Est-ce un signe que toi et mamie ayez donné le nom de Sylvie à ma très chère maman ? Sylvie, du latin « silva, silvae (forêt) », et puis toi, mon cher papa, papy et mamie bis avaient choisi : Yves, qui très sérieusement contient la racine « iv, ivos (étymologie celtique) » et qui signifie « if (un conifère) » et me voilà travaillant sur la forêt…J'ai donc pensé à vous chaque jour de cette thèse, et même loin de la famille à Bordeaux ou en Australie, papa et maman, vous m'avez toujours encouragée dans la voie que j'ai choisie. Je vous remercie pour votre soutien permanent et les moments partagés ces dernières années qui ont toujours su me faire sortir le nez de mes bouquins. Promettez-moi de ne plus prendre la voiture pour vous rendre au marché, au centre ville et au tennis !!! Encore faudrait-il que je m'y engage aussi…..Christophe et Caro : nos domaines d'activité diffèrent…et je comprends que savoir qu'un petit pin peut transpirer 2 mm par jour peut vous laisser perplexe sur l'intérêt de cela…mais rien de tel pour partager des moments inoubliables entre frères et sœurs et pouvoir vous dire que j'ai toujours besoin de vous (et pas seulement pour les places gratuites à des matchs ou pour avoir un bel intérieur de maison)….La famille s'est agrandie avec Adèle et maintenant la petite dernière des Moreaux, Soline, que j'ai hâte de voir grandir. Vous m'avez apporté beaucoup de joie ces derniers temps pas si faciles…Domino, je ne t'oublie pas ! Tu es cette petite boule de poil silencieuse à qui l'on peut tout confier sans faille ! En plus je sais que tu es pour le maintien de la forêt…sinon finies les balades…

Le soutien, je l'ai trouvé également auprès de vous Vio, Olimpiu et Marius. Je vous remercie pour votre contribution à notre bonheur quotidien. Votre expérience de la vie est un exemple de persévérance que je ne peux que reconnaître et estimer. Enfin maintenant, fini le stress ! A nous les parties de tennis, les sorties à droite à gauche, profitons, le temps passe trop vite ! Ce n'est pas que moi qui le dis ! Daniel aussi votre fils….mon charmant assistant Dan (pour reprendre les termes que tu avais utilisés en parlant de moi lors de ta soutenance de thèse il y a 5 ans de cela….!). Alors voilà Dan, je dois reconnaitre toute la force que tu m'as transmise au quotidien ces dernières années. J'admire la personne que tu es dans la vie, dans le travail et l'humilité que tu dégages qui font de toi une personne unique. Dans le travail, je sais que ça te mènera très loin, tu le mérites, en tout cas sache que je te soutiens. Merci à toi d'être là.

Titre

Observation et modélisation des échanges d'énergie et de masse de jeunes peuplements forestiers du Sud-Ouest de la France.

Résumé

Ce projet a porté sur la prise en compte de la phase juvénile des peuplements forestiers du Sud-Ouest de la France dans la caractérisation des échanges sol-végétation-atmosphère. L'étude s'est focalisée sur des structures contrastées de jeunes peuplements de Pins maritimes et d'*Eucalyptus*.

La première partie de ces recherches a consisté à étudier de façon expérimentale les échanges de masse et d'énergie de jeunes plantations d'*Eucalyptus* et de Pins maritimes du Sud-Ouest. Trois sites instrumentés pour la détermination en continu des échanges de CO_2 et H_2O, bilan d'énergie, flux de sève et de croissance et production des arbres ont été suivis durant deux années marquées par des épisodes répétés de sécheresse. Le comportement des essences présentes a été comparé ainsi que les effets de l'environnement et des pratiques culturales sur le fonctionnement de ces écosystèmes. Les bilans annuels d'eau, de carbone et la croissance et la production des trois peuplements ont été établis et comparés.

A partir de ces mesures enrichies par des données déjà disponibles et en se basant sur le modèle de production forestière et de transfert sol-végétation-atmosphère GRAECO (INRA-EPHYSE), modèle mécaniste biophysique monodimensionnel, la deuxième partie a consisté à développer une nouvelle évolution de ce modèle pour l'adapter au cas des systèmes de culture de biomasse forestière à croissance rapide. L'approche proposée en couplant ce modèle avec le modèle MAESTRA (Medlyn 2004) a permis de dépasser les hypothèses d'homogénéités verticale et horizontale du couvert pour rendre compte de l'effet de la structure en trois dimensions de peuplements jeunes à couronnes disjointes et sous-étage développé sur les transferts radiatifs, de CO_2 et vapeur d'eau. De plus, le modèle a été complété par trois nouveaux modules décrivant respectivement la dynamique du carbone du sol (Roth-C) et la croissance et fonctionnement du sous-étage et du taillis. Il a été évalué sur les données existantes couvrant différents sites et séries temporelles et incluant une série d'interventions de type labour, désouchage, disquage superficiel, semis, dépressages, éclaircies et recépées.

Enfin, ce modèle a été implémenté sur un jeu de données décrivant le climat local sous le forçage du scénario climatique A2 régionalisé sur un point de la grille SAFRAN de Météo-France pour trois itinéraires sylvicoles de Pin maritime et *Eucalyptu*s, afin d'évaluer, à titre exploratoire, les potentialités de productivité de ces itinéraires.

Mots-clés : *Pinus pinaster*, *Eucalyptus*, bilan d'énergie, bilan hydrique, bilan de carbone, forêts intensifiées, modélisation, changement climatique.

Title

Observation and modelling of energy and mass exchanges in young forest stands in south-western France.

Abstract

In this thesis, the juvenile phase of forest stands of southwestern France was studied in order to characterise soil-vegetation-atmosphere exchanges. The study focused on contrasted structures of young pines and *Eucalyptus* stands.

The first part of this research was to study experimentally the mass and energy exchanges of young plantations of pines and *Eucalyptus* growing in southwestern France. Continuous measurements of CO_2 and H_2O fluxes, energy balance, sapflow and tree growth and production were carried out for two years, a period marked by repeated episodes of drought. The behavior of these species was compared, as well as the effects of the environment and cultural practices on these ecosystems. The annual water and carbon balances, growth and production of the three stands were established and compared.

These measurements were enriched by data already available and allowed in a second part to develop a new version of the 1D-mechanistic model of forest production and soil-vegetation-atmosphere transfer GRAECO (INRA-EPHYSE) in order to be applied to crop systems for fast-growing forest. By coupling this evolution of the model with the 3D-model MAESTRA (Medlyn 2004), the assumptions of vertical and horizontal homogeneities in the canopy can be exceeded thus accounting for the effect of the three-dimensional structure on the radiative, CO_2 and water vapor transfers in young stands, where crowns are separate and the understorey is well-developed. In addition, the model was supplemented by three new modules describing the dynamics of soil carbon (Roth-C) and the growth and functioning of the understory and coppice. It was evaluated on existing data covering different sites and time series and including a series of forest practices, such as plowing, stump removal, superficial disking, seeding, early thinning, thinnings and cutting down close to the ground.

Finally, as an exploratory work, this model has been implemented on a data set describing the local climate forced by the A2 climate scenario which was regionalized on a SAFRAN grid point ('Météo-France') for three forest itineraries of maritime pine and *Eucalyptus*, in order to assess the potential productivity of these systems.

Keywords: *Pinus pinaster*, *Eucalyptus*, energy balance, water balance, carbon cycle, forest intensification, modelling, climate change.

Sommaire général

Remerciements ..... *iv*

Résumé……..……..……*vi*

Abstract……..……....*vii*

Chapitre 1. Introduction générale **1**

1.1 Contexte de l'étude 3

1.1.1 Contexte global..... 3
1.1.2 Contexte scientifique 6

1.2 Etat de l'art..... 7

1.2.1 Pins maritimes dans le massif des Landes de Gascogne..... 9
1.2.2 *Eucalyptus* dans la région Midi-Pyrénées..... 10
1.2.3 Etats des connaissances sur le Pin maritime et l'*Eucalyptus* 12
1.1.2 Eléments de modélisation: généralités..... 14

1.2 Problématique et objectifs de la thèse 18

1.3 Structure générale de la thèse et plan des chapitres 19

Chapitre 2. Matériel et méthodes..... **21**

2.1 Sites expérimentaux dans leurs contextes géographique et sylvicole 23

2.1.1 Site expérimental de Pins maritimes: Bilos..... 23
2.1.2 Site expérimental d'*Eucalyptus*: Montbartier 27

2.2 Outils expérimentaux et traitement des données 30

2.2.1 Equipement des sites et campagnes de mesures..... 30
2.2.2 Traitement des données..... 33

2.3 Les outils de modélisation 47

2.3.1 MAESTRA 47
2.3.2 GRAECO 47

Chapitre 3. Caractérisation des échanges d'énergie, d'eau et de carbone de deux jeunes peuplements de Pins maritimes à structures contrastées……..**49**

3.1 Introduction……..……...…..53

3.2 Matériel et méthodes…….....55

3.2.1 Sites expérimentaux……....55
3.2.2 Mesures météorologiques…….…..56
3.2.3 Température, humidité et flux de chaleur dans le sol…….....57
3.2.4 Densité de flux de sève et croissance radiale…….....57
3.2.5 Flux turbulents de chaleur, vapeur d'eau et CO_2 et traitement des données……..…..…58

3.2.6 Fermeture du bilan d'énergie……..……58
3.2.7 Bilan hydrique……..... 59
3.2.8 Échanges net de carbone de l'écosystème……..59
3.2.9 Mesures de la biomasse du sous-bois……..……...60

3.3 Résultats…….....62

3.3.1 Conditions météorologiques…….....62
3.3.2 Bilan d'énergie……....62
3.3.3 Fermeture du bilan d'énergie……..64
3.3.4 Répartition du flux net d'énergie entre *H* et *LE*……..65
3.3.5 Bilans hydriques saisonnier et annuel……66
3.3.6 Flux et bilan de carbone……..……69

3.4 Discussion…….……72

3.4.1 Fermeture du bilan d'énergie……..72
3.4.2 Modification dans le transfert radiatif……... 72
3.4.3 Bilan hydrique…….…... 74
3.4.4 Échanges de carbone……...76

3.5 Conclusion……78

Chapitre 4. Bilan hydrique et croissance d'une jeune plantation d'*Eucalyptus* dans le Sud-Ouest de la France..... 81

4.1 Introduction..... 85

4.2 Matériels et méthodes 88

4.2.1 Sites expérimentaux..... 88
4.2.2 Dispositif expérimental 89
4.2.3 Détermination de la conductance de couvert..... 93
4.2.4 Bilan hydrique 94
4.2.5 Analyses statistiques..... 95

4.3 Résultats..... 95

4.3.1 Conditions météorologiques 95
4.3.2 Conditions édaphiques..... 96
4.3.3 Bilan hydrique des peuplements..... 99
4.3.4 Contrôles environnemental et physiologique de la consommation en eau 102
4.3.5 Croissance des arbres et efficience d'utilisation de l'eau 106

4.4 Discussion 109

4.4.1 Utilisation en eau totale 109
4.4.2 Composantes de l'évapotranspiration..... 111
4.4.3 Contrôles physiologiques et édaphiques..... 113
4.4.4 Utilisation de l'eau et réponse de la croissance..... 114

4.5 Conclusion 115

Chapitre 5. Modélisation des échanges de masse et d'énergie et de la production de jeunes plantations forestières à croissance rapide 117

5.1 Introduction générale 119

5.2 Transferts atmosphériques de masse et d'énergie des jeunes peuplements ..... forestiers 124

5.2.1 Introduction 124
5.2.2 Paramétrisation du modèle Maestra 125
5.2.3 Simulations au niveau peuplement (étape 2) 131
5.2.4 Tests de sensibilité additionnels 143
5.2.5 Dégradation de Maestra dans Graeco (étape 3) 145
5.2.6 Discussion : PARTIE Maestra 150

5.3 Développement et adaptation du modèle de carbone du sol sous forêt 152

5.3.1 Introduction 152
5.3.2 Adaptation de Roth-C au cas des forêts gérées 158
5.3.3 Evaluation avec les données disponibles 160
5.3.4 Conclusion 162

5.4 Développement du module 'croissance du sous-bois' 163

5.4.1 Introduction 163
5.4.2 Modélisation de la croissance du sous bois : concept 163
5.4.3 Tests de validité du modèle implémenté dans GRAECO 168

5.5 Conclusion……...169

Chapitre 6. Simulations de cycles sylvicoles complets dans le Sud-Ouest de la France. 171

6.1 Introduction générale 173

6.2 Évaluation du modèle en peuplement adulte de Pins maritimes : ..... Cas du Bray 1980-2009 176

6.2.1 Données mobilisées 176
6.2.2 Résultats et discussion 176

6.3 Adaptation et évaluation du modèle en jeune peuplement de Pins maritimes : ..... Étude de l'historique sylvicole de Bilos : 2000-2010 180

6.3.1 Chronologie des évènements et calage GRAECO 180
6.3.2 Expérience 1. Opérations de préparation du sol post coupe ras: calage 2000-2005 180
6.3.3 Expérience 2. Du semis à 7 ans : calage 2006-2010 184

6.4 Adaptation et évaluation du modèle sur une nouvelle essence : ..... Étude de deux rotations d'un peuplement d'*Eucalyptus* 187

6.4.1 Rotation 1 : calage GRAECO à partir de Montbartier 2005-2011 187
6.4.2 Rotation 2 191

6.5 Application à des révolutions entières sous différents scénarios climatiques 194

6.5.1 Genèse des expériences de simulation 194
6.5.2 Données et scénario climatiques 194
6.5.3 Itinéréraires sylvicoles sélectionnés et initialisation des simulations 197
6.5.4 Résultats 198

6.6 Discussion générale 203

6.7 Conclusion 207

Chapitre 7. Conclusion générale 209

7.1 Bilan général et apport du travail de thèse 211

7.2 Principaux résultats 212

7.3 Limites 216

7.4 Perspectives à court et long termes 218

Références bibliographiques 221

Annexes 245

Annexe 1 246

Annexe 2 251

Annexe 3 252

Annexe 4 256

Annexe 5 258

Chapitre 1

Introduction générale

Plan du chapitre

Chapitre 1. Introduction générale 3

1.1 Contexte de l'étude 3

1.1.1 Contexte global 3
1.1.2 Contexte scientifique 6

1.2 Etat de l'art 7

1.2.1 Pins maritimes dans le massif des Landes de Gascogne 9
1.2.2 *Eucalyptus* dans la région Midi-Pyrénées 10
1.2.3 Etats des connaissances sur le Pin maritime et l'*Eucalyptus* 12
1.1.2 Eléments de modélisation: généralités 14

1.2 Problématique et objectifs de la thèse 18

1.3 Structure générale de la thèse et plan des chapitres 19

Chapitre 1. Introduction générale

Notre travail de thèse s'est effectué grâce au soutien du fonds de recherche dédié ***Enerbio***. Ce fonds s'est créé dans le cadre de la **Fondation *Tuck***, et permet de soutenir des travaux de recherche liés à la valorisation de la biomasse. Notre travail s'inscrit dans la thématique « développer la collecte, l'analyse et la modélisation des données sur le cycle de l'eau dans les filières bioénergies pour mieux comprendre l'impact potentiel de ces filières sur les ressources en eau des écosystèmes impactés » de l'appel à projet *Enerbio* lancé en avril 2008. Nous avons étendu les recherches aux bilans d'énergie et de carbone pour une analyse plus complète de l'impact potentiel de systèmes forestiers intensifiés sur ces bilans et pour une analyse de la productivité potentielle de ces systèmes sous un climat changeant. Ce travail s'est réalisé en développant une double approche d'**observation et de modélisation**. Par ailleurs, ces recherches se sont effectuées en parallèle du projet de recherche *OPTIMAL* «Optimisation de la culture des ligneux à courte rotation vis-à-vis des ressources en eau et de la fertilité des sols » mené conjointement par le FCBA et l'INRA (Coordinateur : N. Nguyen The). Cette introduction générale donne le cadre global de notre étude dans son contexte environnemental et sylvicole. Elle fait un bref état de l'art et introduit les objectifs de notre étude, l'organisation de nos recherches et le plan de ce mémoire.

1.1 Contexte de l'étude

1.1.1 Contexte global

Devant l'augmentation continuelle des émissions des gaz à effet de serre (GES) d'origine anthropique (Friedlingstein et al. 2010) et ses implications pour l'évolution du climat aux niveaux global et régional (dernier rapport du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat (GIEC ou IPCC pour son équivalent anglais, IPCC 2007), l'atténuation des changements climatiques est devenue un enjeu sociétal majeur au XXIème siècle. Parallèlement, dans un paysage où la population mondiale et par conséquent la consommation énergétique vont croissantes, la demande pour diversifier le portefeuille énergétique et accroître la part de l'énergie renouvelable est prégnante dans les appels à recherche de disciplines scientifiques variées : biogéochimie, écologie fonctionnelle, agronomie, physique de l'environnement. En vue de la parution de la première partie de son 5ème rapport en 2013 et 2014, le GIEC a présenté une première synthèse concluant que près de 80% de l'approvisionnement mondial en énergie pourrait être assuré par des sources d'énergies renouvelables d'ici à 2050 (IPCC 2011). Les 120 experts contributeurs affirment que le potentiel technique des énergies renouvelables dépasse la demande actuelle et que ce sont les politiques énergétiques des Etats qui permettront à ces énergies de prendre une place prépondérante dans le mix énergétique mondial si l'effort est soutenu par des politiques publiques adéquates (Arvizu et al.

2011, Moomaw 2011). Les grands vecteurs énergétiques sont représentés par les combustibles carbonés (e.g. pétrole, gaz), le nucléaire, et par les formes d'énergie renouvelables (EnR). Six familles bien connues constituent des sources d'énergie renouvelable: l'énergie solaire (photovoltaïque et thermique), l'énergie géothermique, l'énergie hydraulique, l'énergie marémotrice, l'énergie éolienne et enfin les bioénergies dont la biomasse. Plus spécifiquement, la biomasse est définie par la directive européenne (Pöttering et Necas 2009) relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables comme la «*fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales, de la sylviculture et des industries connexes ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers*» (e.g. bois, charbon de bois, déchets divers, biocarburants, biogaz). Certains systèmes de cultures dédiés peuvent délivrer entre 80 et 90% de la réduction des émissions de GES comparés à l'énergie fossile. Cependant, la conversion d'usage des terres et la gestion des forêts peuvent dans certains cas neutraliser l'impact positif de l'atténuation des émissions des GES (Chum et al. 2011). En conséquence, l'énergie obtenue à partir de la biomasse est considérée comme renouvelable tant que l'équilibre entre les rejets de dioxyde de carbone (CO_2) du cycle complet de vie du bois (de sa production à son exploitation) et sa mobilisation naturelle par le processus de photosynthèse pour la croissance du bois est respecté. Cette énergie est également soutenable si les impacts environnementaux sont maîtrisés, tel que le maintien de la fertilité des sols et de la diversité. D'un point de vue économique, le caractère soutenable se manifeste si la compétition excessive d'usages est évitée.

L'Union Européenne à travers sa directive 2009/28/CE se fixe pour objectif que la part d'énergie renouvelable dans la consommation finale brute d'énergie des états membres d'ici à 2020 atteigne 20% (Pöttering et Necas 2009). En France, suite aux assises du Grenelle de l'Environnement mises en place en 2007, ce pourcentage s'élève à 23% dont 60% devraient provenir de la biomasse. Avec une surface couvrant près de 30 % du territoire métropolitain, le massif forestier français est l'un des plus importants d'Europe après un doublement de sa surface depuis 1950. En 2009, la ressource en biomasse constituait ainsi la première source d'énergie renouvelable devant les sources d'origines hydraulique, solaire et éolienne (Figure 1.1).

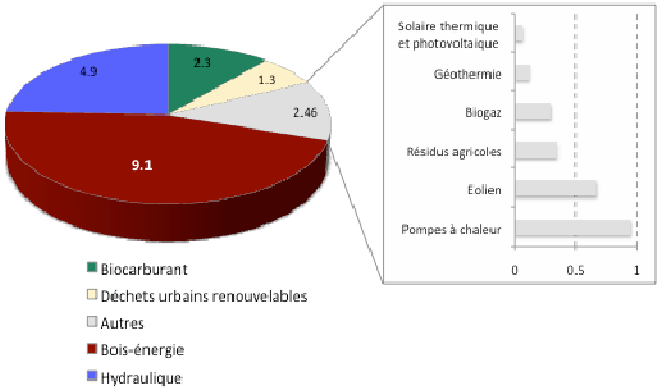


Figure 1.1 Production d'énergies renouvelables par filière en 2009 exprimée en Mtep. *Graphique adapté du Service de l'observation et des statistiques*

L'objectif d'accroître la production annuelle nationale de bois biomasse – énergie de 21 millions de m^3 à l'horizon 2020 a incité différents organismes à évaluer la ressource en biomasse ligneuse disponible à cet horizon. L'étude sollicitée par l'ADEME (2009), menée conjointement par l'IFN, le FCBA et SOLAGRO, estime que les ressources forestières durables et mobilisables représentent 12 millions de m^3 par an supplémentaires à comparer avec les 65 millions de m^3 récoltés en 2009 (Landmann et al. 2009). Ce chiffre est compatible avec les objectifs fixés sous conditions d'apporter des efforts de gestion durable sur les peuplements délaissés. Deux fonds de soutien à la filière bois ont été proposés pour atteindre les objectifs de mobilisation du bois et la mise en valeur de la forêt française (Puech 2009). A plus courte échéance, dans le cadre des Assises de la forêt et du Grenelle Environnement, il a été considéré que l'on pouvait miser d'ici 2012 sur un volume supplémentaire mobilisable annuel de l'ordre de 12 millions de m^3. A l'aube de cette échéance, qu'en est-il réellement? Dans tous les cas, pour répondre à ces objectifs, la sylviculture est amenée à être gérée d'une manière plus dynamique pour permettre d'effectuer un bond quantitatif en termes de production. Les plantations à vocation de production intensive de biomasse sont une des voies envisagées tels que les cultures d'espèces ligneuses en Taillis à Courte Rotation (TCR) voire en Futaies résineuses à Courte Rotation (FCR) mais leur déploiement est encore peu étendu en France.

Les récents évènements climatiques extrêmes viennent accroître l'intérêt porté à la production de biomasse. En effet, dans le cas particulier du massif des Landes de Gascogne, une des priorités suite aux tempêtes Martin en 1999 et Klaus en 2009, consiste à reconstituer les peuplements dégradés. Devant les importantes pertes en peuplements de Pins maritimes, une véritable réflexion sur l'avenir du Massif landais est engagée. En mars 2009, une lettre de mission du ministre en date Michel Barnier destiné au Vice président du Conseil Général de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Espaces Ruraux évoquait comme indispensable « *une réflexion globale sur le modèle aquitain de sylviculture dans le contexte de changement climatique dont les termes demeurent incertains* » et une question était soulevée *« Pourrait-on notamment promouvoir la conduite de peuplements diversifiés en structures et en essences, afin d'atteindre un certain niveau de résilience des peuplements et d'en accroître la multifonctionnalité ?* » (Lafitte et Lerat 2009). Une synthèse établie par le groupe de réflexion prospective animée par le Ministère de l'Agriculture (Gip-Ecofor) évoque la possibilité d'itinéraires sylvicoles diversifiés en passant d'une sylviculture dite 'économe' à une sylviculture dite 'intensive' (Lesgourgues et Drouineau 2009). Elle propose par exemple des itinéraires sylvicoles basés sur une révolution courte destinée à la production de biomasse (Tableau 1.1). Le Pin maritime, autochtone, reste l'essence privilégiée, mais d'autres essences sont évoquées qui permettraient à la fois de maintenir la biodiversité et d'augmenter la résilience du massif forestier contre les adversités (ravageurs, tempêtes). Quelques espèces indigènes sont citées, et des espèces introduites sont également suggérées telles que diverses espèces ou variétés d'*Eucalyptus*. Le mélange d'espèces pourrait aussi représenter des possibilités d'adaptation élargie aux changements climatiques rapides. Ce contexte nous amené à se focaliser sur ces deux espèces indigènes et exogènes, le Pin maritime et l'*Eucalyptus* respectivement.

Tableau 1.1 Itinéraires sylvicoles novateurs proposés pour le Pin maritime (autres que pour l'obtention de bois d'œuvre). (Lesgourgues et Drouineau 2009).

	Courte révolution	Semi dédié	Biomasse
Durée de révolution (ans)	25	9 et 35	10 - 15
Objectifs	Petits sciages	Biomasse et Bois d'oeuvre	Biomasse
Densité initiale	1200-1500	2000 à 2500 tiges/ha	1500-2500
Intervention	Sans ou 1 éclaircie	1 éclaircie 'biomasse' puis 3 ou 4 éclaircies	Pas d'intervention après semis, pas d'éclaircie

1.1.2 Contexte scientifique

Les forêts jouent un rôle prépondérant dans le système climatique, notamment pour leur contribution à la séquestration du dioxyde de carbone (CO_2). Les travaux récents montrent que les forêts tempérées d'Europe représentent un puits de carbone conséquent (Nabuurs et al. 2003, Loustau 2010). Entre 2000 et 2007, Pan et al. (2011) évoque un chiffre de 0.24 PgC an^{-1} de carbone fixé dans les forêts tempérées européennes, chiffre plutôt stable par rapport à la période 1990-1999. La production primaire nette (NPP) des forêts a augmenté de 67% en Europe au cours des 50 dernières années (Ciais et al. 2008b). Les raisons évoquées relèvent de plusieurs facteurs : structures jeunes des peuplements forestiers, augmentations de la concentration de CO_2 contenus dans l'atmosphère ayant un effet de fertilisation (Ciais et al. 2008b, Luyssaert et al. 2010). L'augmentation des dépôts azotés et son effet positif sur la croissance sont également suggérés (Van Oijen et al. 2008, Dezi 2010). Cependant le poids de la contribution de ces différents facteurs reste sujet à discussion. Bellassen et al. (2011) ont récemment simulé l'évolution de la production nette (NEP) des écosystèmes forestiers en Europe sur la période 1950-2000 et analysé les facteurs causaux des simulations obtenues, excepté l'effet de fertilisation azotée. Ils mettent en avant le rôle prépondérant de la fertilisation par le CO_2 à l'échelle européenne. A une échelle plus locale par contre, un effet dominant de la structure des peuplements et du changement climatique est invoqué pour expliquer cette évolution. D'autres études en modélisation suggèrent que ces facteurs auront un effet positif sur la production forestière à venir (Loustau et al. 2005, Ciais et al. 2008b, Dezi et al. 2010). Cependant, sur une plus longue échelle temporelle, cet effet pourrait être inversé (Ciais et al. 2008b) en raison de changements dans les régimes de perturbations des écosystèmes forestiers, qu'ils soient d'origine naturelle, tels que les feux, les maladies, les sécheresses ou l'intensification des vagues de chaleur (Granier et al. 2007, Sohngen 2008) ou qu'ils soient d'origine anthropique tels les changements de pratiques sylvicoles comme la préparation du sol ou les fréquence et intensité des

éclaircies et des coupes rases (Kowalski et al. 2003, Chen et al. 2004, Misson et al. 2005, Dore et al. 2010).

Les forêts sont donc reconnues pour leur rôle majeur dans la mitigation du changement climatique et présentent l'avantage d'être facilement contrôlable par l'homme (Prieur 2004). Leur établissement et notre capacité à établir des plans de gestion adaptés ont permis en effet d'augmenter le stockage de carbone par cet écosystème (Ciais et al. 2008, Whitehead 2011) mais également d'accroître leur capacité de production d'énergie par l'augmentation des surfaces les plus productives. Cependant, les pratiques sylvicoles évoquées précédemment génèrent aussi des modifications du stock de carbone dans les sols, notamment les opérations de travail du sol qui viennent éloigner la distribution du carbone dans le système de son point d'équilibre en favorisant la décomposition et la minéralisation de la matière organique. Le potentiel d'atténuation peut être alors réduit dans le temps et dans l'espace (GIS sol 2011). Le caractère « intensif » des systèmes destinés à la production de biomasse sur de courte révolution, freine leur réelle mise en place par la méconnaissance de leurs besoins en eau, minéraux et carbone ainsi que de leurs interactions avec le continuum sol-végétation-atmosphère. Leurs réponses aux changements environnementaux et aux évènements extrêmes sont également peu connues. Il convient donc de mettre en regard de façon précise les potentialités forestières régionales d'une part et les exigences de ces nouveaux systèmes de sylviculture d'autre part, en complétant les connaissances sur leur fonctionnement biophysique. Il apparait que le recours à des modèles de fonctionnement biophysique soit un outil essentiel pour rendre compte de l'évolution des écosystèmes dans le contexte de changement global (Bellassen et al. 2011).

1.2 Etat de l'art

Espèce la mieux adaptée aux conditions particulières des Landes de Gascogne, il est manifeste que le Pin maritime ne présente pas les performances de croissance requises pour être utilisé dans un système à courte rotation dédié bois-énergie comme évoqué précédemment (Bastien et al. 2009). Mais son rôle dans le stockage de carbone, dans la production pour la valorisation du bois d'œuvre principalement puis dans une moindre mesure pour valorisation de la biomasse via les nouveaux itinéraires techniques reste essentiel, ce qui en fait encore l'espèce la plus mise en valeur dans le massif landais. Au cours des dernières décades, une amélioration significative de la gestion sylvicole à travers un contrôle des pratiques culturales, la fertilisation et le drainage ont d'ailleurs permis d'en accroitre la productivité moyenne de 4 à près de 12 $m^3.ha.an^{-1}$ en moyenne dans le massif de Landes de Gascogne (inventaires de l'Inventaire Forestier National). L'*Eucalyptus*, quant à lui, répond a priori mieux aux attentes de productivité sur une révolution courte avec une production attendue allant de 16 à 30 $m^3.ha.an^{-1}$ (Cavaignac et al. 2011) mais son adaptation au climat du grand Sud Ouest reste encore méconnue.

Les systèmes forestiers ou agro-forestiers dédiés à la production intensive de bois sont caractérisés par l'importance relative de la période précédant la phase de fermeture du couvert, pendant laquelle celui-ci présente une structure spatiale fortement hétérogène. Durant cette partie du cycle de vie de la forêt, les contributions respectives du sol et de la végétation aux échanges atmosphériques changent rapidement et de façon interdépendante. Les arbres, composante négligeable au stade plantation prennent progressivement le pas sur les composantes « sol » et « végétation accompagnatrice » qu'ils dominent complètement à la fermeture du couvert, atteinte à un âge allant de 3 à 10 ans suivant la vitesse de croissance et donc l'espèce considérée. Dans le cas des essais d'*Eucalyptus* dans le Sud-Ouest de la France, nous verrons par la suite que l'itinéraire sylvicole adopté évite la compétition entre végétation adventice et *Eucalyptus* dès les plus jeunes âges, maintenant donc une certaine homogénéité de structure.

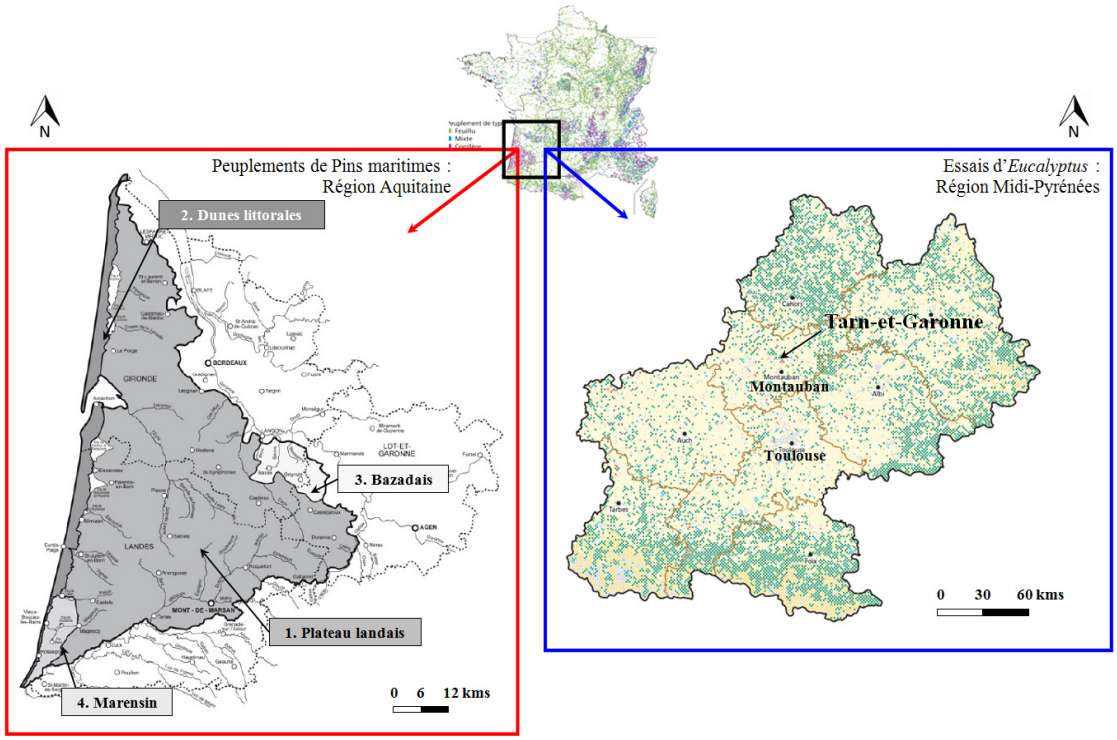


Figure 1.2 Situation des régions d'étude dans le sud-ouest de la France (Sources IFN, 2010).

1.2.1 Pins maritimes dans le massif des Landes de Gascogne

Le massif landais fait partie de la forêt d'Aquitaine avec le massif périgourdin et le massif pyrénéen. Il se situe sur trois départements de la région aquitaine : la Gironde, les Landes et le Lot et Garonne et se compose de quatre régions forestières (Figure 1.2). Le dernier inventaire forestier fait état d'une superficie de plus de 1.3 million d'hectares dont la surface forestière occupe 974 000 ha. Essence dominante du massif, le Pin maritime représente 84% des forêts de production pour une surface de 803 000 ha (Colin et al. 2010, IFN 2010). Les peuplements sont conduits en futaie régulière ce qui caractérise la structure homogène du massif malgré un morcellement avéré.

Historiquement, les premiers rôles attribués à la plantation massive de pins maritimes concernaient la fixation des dunes du littoral (fin du XVIIIème siècle) puis l'assainissement des zones humides des Landes (loi de 1857) (Sargos 1949). D'un point de vue économique, le massif est d'abord exploité pour sa gemme (fin du XIXème siècle et jusqu'en 1970). Il est aujourd'hui exploité pour son bois dont la production est destinée à la fabrication de meubles, de parquets et lambris et une grande partie est également destinée à la fabrication de pâte à papier. La mobilisation de la ressource bois, à destination de la filière bois énergie notamment, permettrait de mieux exploiter les potentialités de la forêt française, tout en contribuant à répondre aux objectifs fixés par le Grenelle de l'environnement. Pour répondre à cette demande en bois-énergie, le massif landais est propice à cette spéculation et de nouvelles pistes de réflexions sont mises en œuvre pour de nouveaux systèmes de cultures, forestiers et mixtes.

Le massif forestier des Landes de Gascogne est soumis à un climat océanique atlantique mais la pauvreté et l'acidité des sols landais ainsi que leur faible réserve utile en réserve la valorisation forestière à des espèces considérées comme frugales. Les contraintes d'adaptation d'une essence à ce biotope sont donc la capacité à supporter les sécheresses estivales, canicules mais aussi gel, et la tolérance à des sols drainants, acides et pauvres en éléments minéraux.

i. Jeunes peuplements dans le cycle sylvicole

Le schéma présenté sur la figure 1.3 rappelle brièvement l'itinéraire technique majoritairement adopté pour optimiser la production de bois à partir d'un peuplement équien de Pins maritimes (Merzeau 1995, Lesgourgues 1997). La coupe rase (8) laisse une végétation spontanée recoloniser la parcelle. Après préparation du sol par girobroyage des rémanents, désouchage éventuel et labour (1) qui laissent un sol minéral nu dont les couches organiques, OL, OF, OH sont plus ou moins enfouies, la surface est plantée à raison de 1500 tiges/ha ou semée (2) généralement 3 ans après la dernière coupe. Les premiers dépressage et dégagement éventuels ont lieu lorsque les arbres atteignent 3 à 5 ans (3), laissant de nouveau le sol nu. Pour obtenir une densité en fin de cycle d'environ 300 tiges/ha (CRPFA, 2008), 3 ou 4 éclaircies sont nécessaires au cours du cycle (4, 5, 6, 7). La récolte finale a lieu entre 35 (stations les plus fertiles) et 50 ans. Chaque éclaircie est précédée de débroussaillage pouvant

suivant les pratiques, affecter ou non les couches organiques et l'horizon superficiel du sol (rouleau lourd, gyrobroyeur..).

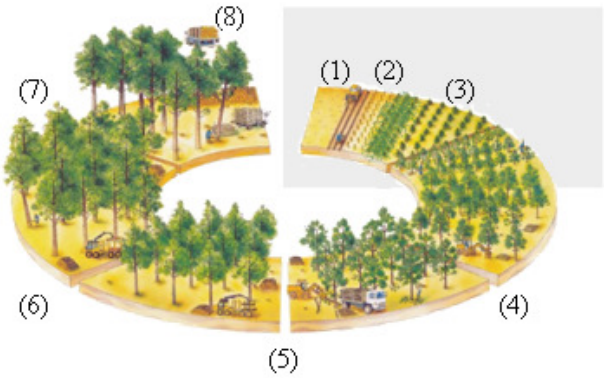


Figure 1.3. Schéma de l'itinéraire technique adopté dans la gestion des peuplements de Pins maritimes. Les chiffres indiquent les étapes d'opération menées présentées dans le texte principal. Les phases numérotées de 1 à 4 représentent la partie du cycle étudiée dans ce travail de thèse (Source : Merzeau 1995).

La phase précédant la fermeture du couvert forestier de Pins maritimes se situe entre 0 et 10 ans. La superficie de ces jeunes peuplements représente une part importante du massif forestier, avec une proportion atteignant près de 20% de la surface totale en peuplements forestiers de Pins maritimes destinés à la production de bois (IFN, 2010), un chiffre sans doute accru après la tempête Martin de décembre 1999 et voué à augmenter suite à la tempête Klaus en janvier 2009 (Guillot 2011). On comprend aussi aisément que le raccourcissement de la durée de révolution entraînerait un accroissement corrélatif de ce pourcentage.

1.2.2 *Eucalyptus* dans la région Midi-Pyrénées

i. Une vision d'ensemble

Sur la région Midi-Pyrénées, l'IFN recense une surface forestière de production d'environ 1.3 million d'hectares (IFN 2010), soit 29.8% de la superficie régionale (contre 43.2% en Aquitaine). Si depuis plus de 50 ans les essais d'*Eucalyptus* sont conduits sur le territoire national, c'est en Midi-Pyrénées que l'on trouve la majorité des essais sur les thématiques suivantes : amélioration génétique, reboisement, sylviculture et pépinière. Les peuplements sont conduits en Taillis à Courte Rotation (TCR).

Historiquement, les *Eucalyptus* introduits en France dans les années 30 se sont révélés très sensibles au froid et avaient plus un rôle d'ornement. Après la seconde guerre mondiale, la question de rompre la monoculture du Pin maritime dans les Landes alors ravagées par les incendies dans le Sud-Ouest se pose déjà et l'*Eucalyptus* apparait une essence alternative envisageable. Ainsi les premiers plants d'*Eucalyptus dalrympleana* naissent en 1951 dans les Landes et en Gironde. Mais leur

résistance au froid est encore bien limitée. Durant les 40 dernières années, les différents essais menés par le FCBA (anciennement l'AFOCEL) ont permis la mise en avant des clones E. *gunnii* et dans une moindre mesure l'hybrides E. *Gundal* (E. *gunnii* × E. *dalrympleana*). Dans la région Midi-Pyrénées, l'*Eucalyptus* évolue sur 1 000 ha depuis les années 1990. Les clones 121 sont parmi les *Eucalyptus gundal* les plus performants en terme de capacité de croissance et présentent une bonne résistance au gel, bien que n'ayant pas résistés à l'extrême climatique de 1985 dans la région de Toulouse. Ils sont aujourd'hui mis en avant auprès des sylviculteurs pour cette capacité de croissance (Melun et Nguyen The, 2006) et sont principalement exploités pour l'industrie papetière. Cet arbre fournit un matériau de qualité particulièrement résistant, qui sert notamment à la fabrication du papier glacé. Aujourd'hui, l'usine de traitement de papier *Tembec*, de Saint-Gaudens (Haute-Garonne) préconise le développement de 10 000 ha supplémentaire pour assurer un approvisionnement local en bois d'*Eucalyptus*, et ainsi réduire l'importation depuis l'Espagne et la Portugal voire le Congo. Ainsi, le département du Tarn-et-Garonne, bien que n'étant pas une zone d'exploitation forestière majeure de la région, présente un intérêt pour la plantation d'*Eucalyptus* par son climat propice à l'adaptation de ces espèces d'après les météorologues de Météo-France, qui présentent cette zone comme un berceau idéal pour la croissance des *Eucalyptus*, du moins en ce qui concerne la tolérance aux faibles températures (Référence Météo France, doc synthèse aire de répartition).

ii. Jeunes peuplements dans le cycle sylvicole

De part leur cycle de production à courte rotation voire très courte rotation, les essais d'*Eucalyptus* représentent des peuplements jeunes. En effet, les cycles sont basés sur 3 rotations de 10 ans chacune en moyenne (Tableau 1.2).

Tableau 1. 2 Caractéristiques de l'itinéraire technique adopté dans la gestion des peuplements d'*E. gundal* (Adapté de Melun, 2011).

Espèce :	E. *gundal*		
Cycle sylvicole :	3 rotations de 10 ans en moyenne		
Année 0 :	Préparation du sol		
	apport de fertilisants en plein (150 U/ha de P_2O_5)		
	herbicide		
	labour en plein		
1ère rotation :	Plantation des plants de 5 mois en moyenne (sur 4 × 2.50 m)		
(0-10 ans)	Densité	Débroussaillement	Eclaircie
	1250 tiges/ha	Année 1, 2, 3	-
2ème rotation :	Rejet des souches de la rotation précédente		
(et suivantes)	Densité	Débroussaillement	Eclaircie
	De 2 à 5 rejets par souche	-	-

La structure du couvert évolue rapidement passant d'un couvert ouvert à un couvert quasiment fermé à 4 ans (1ère rotation) voire moins (2ème rotation et suivante). De ce fait, la représentativité de ces peuplements dans le cycle de fonctionnement a également toute son importance.

1.2.3 Etats des connaissances sur le Pin maritime et l'*Eucalyptus*

La dynamique des échanges d'énergie, d'eau et de carbone dans les écosystèmes forestiers a pu être largement étudiée depuis les années 1990 grâce à l'évolution des techniques micrométéorologiques de mesure des flux de masse et d'énergie permettant à la fois de quantifier les transferts d'énergie et de matière des échelles les plus fines (stomates, feuilles) aux plus grandes échelles (peuplement, écosystème, région) sous différentes conditions environnementales.

i. Pins maritimes

Le Pin maritime (*Pinus Pinaster* Ait.) a fait l'objet de nombreuses études au cours des deux dernières décennies. Un travail conséquent a été réalisé sur l'enrichissement des connaissances liées à la compréhension de son fonctionnement aussi bien en termes de processus physiques, biologiques et écophysiologiques (photosynthèse, transpiration) qu'en termes de croissance ou d'interactions avec un environnement contraignant (sécheresse édaphique, tempête, canicule). Différentes échelles spatiales ont été abordées dans ces études depuis l'organe (racine, feuille, branches) à l'arbre, au couvert, au bassin versant et à la région. L'écophysiologie de cette espèce a été abordée d'abord sous l'angle de la sélection pour la résistance à la sécheresse puis pour caractériser les échanges entre sol, plante et atmosphère et leur relation avec la croissance et la productivité de l'arbre et du peuplement. Historiquement, on se reportera aux travaux de recherche de mes prédécesseurs, le plus souvent doctorants ou post doctorants à l'Inra de Bordeaux : Régis Demounem (1979), pionnier de l'écophysiologie du Pin maritime, Anne Nguyen-Queyrens sur la résistance à la sécheresse (1986), Farid El Hadj Moussa (1989), Sylvain Delzon (2005) et Jean-Christophe Domec (1996) sur les transferts hydriques ; Mohamed Ben Brahim (1996), Annabel Porté (1999), Alexandre Bosc (1999), Belinda Medlyn (2002) sur le métabolisme du carbone ; Adama Diawara (1991), Jérôme Ogée (2000) et Andrew S. Kowalski (2003) sur les transferts sol–plante–atmosphère ; Alissar Cheaib (2005) et Olfa Shaiek (2011) sur l'allocation et l'allométrie ; Etienne Saur (1990) et David Achat (2009) sur la nutrition minérale.

Les premières mesures de flux de sève, de transpiration, d'interception des précipitations par le couvert, de micrométéorologie et croissance ont été effectuées dès 1987 (Gash et al. 1989, Loustau et al. 1990 et 1992, Granier et al. 1990, Berbigier et al. 1991, Diawara et al. 1991). Les flux de CO_2 entre forêt et atmosphère ont commencé à être mesurés en routine par la technique des covariances turbulentes sur le site du Bray en juin 1996 (Berbigier et al. 2001, Lamaud et al. 2001) et celui de Bilos en juillet 2000 (Kowalski et al. 2003).

Le pin maritime est une espèce à comportement isohydrique ou d'évitement avec une forte régulation stomatique de sa transpiration en liaison avec une vulnérabilité relativement élevée à la cavitation pour un conifère (Delzon et al. 2004, Martinez-Vilalta et al. 2002). Les couverts relativement ouverts de forêt de pins maritimes (indice foliaire de 2 à 3), essences de lumière, favorisent le couplage végétation-atmosphère avec une forte régulation du flux d'évaporation par le fonctionnement des stomates à l'échelle du couvert (e.g. Granier et Loustau 1994, Loustau et al. 1996, Delzon et Loustau 2005). Elle présente une capacité de photosynthèse relativement élevée avec un optimum thermique qui varie saisonnièrement autour de 20-25°C (Medlyn et al. 2002). Cette capacité de photosynthèse explique pour une part la productivité primaire atteinte dans le contexte pédoclimatique plutôt défavorable des Landes de Gascogne, qui culmine pour un peuplement de 28 ans à plus de 2200 $gC.m^{-2}.an^{-1}$ avec une moyenne annuelle proche de 2000 $gC.m^{-2}.an^{-1}$ (Berbigier et al. 2001, Kowalski et al. 2003, Medlyn et al. 2005, Stella et al. 2009). Une valeur proche est observée dans les dunes littorales méditerranéennes en Italie (Chiesi et al. 2005). Cependant, les observations de Jarosz et al. (2008) confirment la forte sensibilité à la sécheresse du Pin maritime avec une réduction de 45% de la production primaire brute de l'écosystème durant l'année 2002, particulièrement déficitaire en précipitations. Cette réduction est essentiellement due à une réduction de la conductance stomatique (Delzon et Loustau 2005). Le phosphore et l'azote sont des facteurs limitant la production du pin maritime dans le contexte des Landes de Gascogne (Trichet et al. 2008, 2009), cette limitation se traduisant essentiellement par une réduction de la croissance et de l'indice foliaire du peuplement d'arbres. La photosynthèse proprement dite est peu sensible à la nutrition minérale, les effets de celle-ci s'exerçant essentiellement à travers le contrôle de la surface foliaire (Ben Brahim 1996, Loustau et al. 1999) et la photosynthèse n'étant directement affectée qu'en cas de carence sévère et brutale (Loustau et al. 1999).

ii. Eucalyptus

Le genre *Eucalyptus* compte près de 700 sous-espèces dont les plus aptes à une exploitation forestière font l'objet de nombreuses études à travers le monde. La croissance rapide des *Eucalyptus* s'accompagne a priori d'un fort besoin en eau (Cabral et al. 2010), soupçonné d'amener à la raréfaction de la ressource. Les recherches menées sur les peuplements d'*Eucalyptus* en Australie ont montré que la consommation en eau varie suivant les régions, les espèces considérées, les conditions environnementales et les pratiques culturales (O'Loughlin et al. 2001. En conditions climatiques plus comparables à celles du Sud-Ouest de la France, l'*Eucalyptus* peut s'adapter à des situations de sécheresse importante. Il possède une capacité de régulation stomatique de la transpiration ainsi qu'une capacité à mobiliser l'eau à des niveaux de potentiel hydrique bas (Poore et Fries 1986, David et al. 1997, Mielke et al. 1999, Soares et Almeida 2001, O'Grady et al. 2008). Mais dans ces conditions climatiques typiques des zones méditerranéennes, le facteur important permettant de maintenir une croissance juvénile forte est très probablement la capacité de recharge en eau du sol pendant la période hivernale (Pereira De Almeida et Riekerk 1990, Silberstein et al. 2001).

Parallèlement, on attribue à l'*Eucalyptus* une bonne efficience d'utilisation de l'eau (Stape et al. 2004), d'autant plus s'il est conduit en peuplement mixte (Forrester et al. 2010). Si le peuplement est soumis à un apport d'eau par irrigation, certains auteurs montrent que l'efficience d'utilisation de l'eau augmente (Stape et al. 2004, 2008) ou se maintient (Olbrich et al. 1993, Le Roux, et al. 1996, Hubbard et al. 2010). Peu d'études ont été menées sur le bilan hydrique de peuplements d'*Eucalyptus* en France. La plupart concernaient l'adaptation de différentes espèces aux contraintes climatiques comme le gel (Lacaze, 1962). Whitehead et Beadle (2004) ont réalisé une synthèse des connaissances sur l'écophysiologie du genre *Eucalyptus* dans laquelle nous soulignons plusieurs points communs avec le Pin maritime : une stratégie d'évitement avec un fort contrôle stomatique, une capacité de photosynthèse relativement élevée, une forte sensibilité au déficit en eau du sol (Stape et al. 2010), une densité intra-couronne du feuillage plutôt faible. En revanche plusieurs particularités distinguent le genre *Eucalyptus* du Pin. La première est la capacité d'expansion et de prélèvement hydrique du système racinaire est potentiellement plus élevée (Dye 1996, Christina et al. 2011, Feikema et al. 2010). La deuxième est une capacité de régulation de la surface de feuillage par abscission foliaire (Le Maire et al. 2011) qui s'accompagne chez certaines espèces d'une évolution rapide de la surface d'aubier (Gominho et Pereira 2000).

A travers cette synthèse, nous nous rendons largement compte de l'évolution accrue des connaissances sur le fonctionnement de ces espèces à la fois dans un environnement sans contrainte, et également en réponse aux stress environnementaux naturels ou anthropiques. Comme nous l'avons évoqué précédemment, le recours aux modèles de fonctionnement pour améliorer la compréhension des phénomènes globaux observée est requis. Le développement des recherches sur la modélisation du fonctionnement des écosystèmes continentaux depuis maintenant de nombreuses années a largement contribué à la compréhension des mécanismes permettant de simuler les échanges d'énergie, d'eau et de carbone des écosystèmes en réponse aux changements globaux. Nous nous proposons d'en rappeler quelques éléments.

1.1.2 Eléments de modélisation: généralités

La phytocénose des écosystèmes continentaux peu anthropisés constitue un système complexe, en perpétuelle évolution, formant un ensemble de structure physique spatialement et temporellement hétérogène. Son couplage avec le sol et l'atmosphère est d'autant plus complexe qu'un grand nombre d'interactions et de rétroactions s'établissent dans le continuum sol–végétation–atmosphère, régies par des processus de transferts (radiatifs, turbulents, changements d'états, conduction, diffusion) soumis à des régulations biologiques (ex. contrôle stomatique). La modélisation biophysique des échanges atmosphériques rend compte de ces transferts en s'attachant à reproduire les processus impliqués. Ainsi, ces modèles basés sur ces processus de transfert intègrent les connaissances sur les mécanismes biologiques et physiques qui conditionnent les différents flux. Les limites de cette approche liées à la difficulté à disposer de jeux de données cohérents pour calibrer et évaluer la pertinence du modèle à reproduire les processus impliqués connus, et à la compréhension aussi bien générique que spécifique

des mécanismes de fonctionnement du système et des différentes interactions au sein de ce système (Ciais et al. 2010 dans Loustau 2010). L'existence un peu déroutante de toute une variété de tels modèles (Tableau 1.3) est le résultat d'une multitude de questions qui se posent et dont un modèle unique n'est capable à ce jour d'y répondre. Ces questions évoluent au cours du temps, si bien que les modèles eux mêmes évoluent continuellement et atteignent des niveaux de complexité croissant grâce à la progression des connaissances et à l'amélioration des moyens et de la puissance de calcul. Les formes de modélisation sont extrêmement variées, dépendant essentiellement du niveau d'organisation et des échelles spatiales et temporelles auxquels nous nous adressons. Par conséquent, pour un objectif et des contraintes données, la question de la pertinence du modèle à choisir et/ou construire pour répondre à la question posée, n'est pas triviale. Une typologie des modèles, plutôt simpliste, est proposée dans cette synthèse (Figure 1.4) afin de positionner notre travail dans ce contexte. Une quarantaine de modèles représentant des niveaux de complexité variables ont ainsi été recensés (Tableau 1.3). Nous avons choisi de présenter ces quelques modèles existants en les classant suivant la dynamique globale qu'il cherche à attribuer à la végétation qui se manifeste donc principalement à travers un changement d'échelles spatiale et temporelle plus que par une différentiation dans les processus biophysiques mis en jeu.

Les modèles MAESTRA (Wang et Jarvis 1990b, Medlyn 2004), CANOAK (Baldocchi et Harley 1995), PGEN (Friend et al. 1995) entrent par exemple dans la catégorie « static model ». Dans cette famille de modèle, la structure de canopée et du couvert est définie de manière fixe et n'évolue pas dans le temps. La deuxième catégorie citée « Forest growth models » présentent des modèles où la structure physique de la végétation n'est pas fixée et représentent les processus de croissance et mortalité en cohérence avec les autres processus du fonctionnement de l'écosystème (cycle du carbone et des éléments majeurs notamment). Dans cette deuxième catégorie, la structure physique du couvert est souvent représentée de façon plus simplifiée que dans les modèles statiques (e.g. analogie « grosse feuille » ou « big leaf » pour son équivalent anglais). Si ces modèles ont également une approche mécaniste des processus, celle-ci est souvent simplifiée ou dégradée. L'échelle temporelle d'intérêt permet des simulations à long terme de la productivité des forêts par exemple en réponse à différents scénarios climatiques. C'est le cas des modèles comme Biomass (Mc Murtrie et al. 1990), 3PG (Landsberg et Waring 1997), Graeco (Porté, 1999), ou encore Castanea (Dufrêne et al. 2005) ou Orchidee-FM (Bellassen et al. 2010, 2011). Certains de ces modèles se trouvent en réalité à l'interface entre les deux catégories (e.g. Musica, Ogée et al. 2003). Notre étude se limitera à ces deux catégories de modèles (« static models » et « growth models ») mais mentionnons qu'il existe aussi des approches vouées à simuler les dynamiques de population et peuplement des espèces composant le couvert et incluant les processus de compétition, de migration, de mortalité des espèces. Elle est représentée par les modèles dits « dynamic models » et « gap models » (Figure 1.4). Cette classification reste subjective et une vision différente pourrait être utilisée suivant le questionnement scientifique. Cette classification sous-entend bien la progression des échelles spatiale et temporelle fines vers des échelles plus larges et depuis des processus de fonctionnement biophysique et biogéochimique mécanistes vers des représentations plus empiriques.

Pour l'objectif de représenter le fonctionnement et la croissance de la végétation d'une structure de couvert hétérogène et sa croissance, il apparaissait nécessaire a priori de représenter les principaux processus de transfert (radiatif, turbulent, biogéochimique) dans un couvert en trois dimensions et d'expliciter au minimum trois composantes, le sol, les arbres et la végétation accompagnatrice. Le modèle Maestra initialement développé pour des plantations forestières en rang et déjà évalué sur un couvert adulte de pins maritimes (Medlyn et al. 2005) est maintenu et continuellement développé depuis sa création (http://bio.mq.edu.au/maestra/). Il se prête a priori bien à ces exigences. Incluant une description fine des processus biophysiques, il permet d'étudier les interactions inter- et intra-composantes du couvert à des pas de temps court. Nos objectifs imposent également de simuler le fonctionnement biophysique et biogéochimique et notamment la croissance et la production primaire pour une échelle temporelle couvrant une rotation ou une révolution complète (10 à 30 ans). Un modèle statique 3D de type Maestra doit donc être complémenté par un modèle de croissance pouvant être exécuté sur un cycle sylvicole complet et pour toute une variété de forçages stationnels et climatiques. Le modèle Graeco est un modèle développé à l'Inra de Bordeaux susceptible de répondre à ces objectifs (Loustau et al. 2005, Davi et al. 2010, Ciais et al. 2010, Brisson et al. 2010, Loustau et Bosc 2011). Nous avons donc conduit une approche de modélisation combinant modèle statique, Maestra, et modèle de croissance, Graeco, suivant une approche assez comparable à Baldwin et al. (2001) sur Pin *taeda* ou Bellassen et al. (2010, 2011). Dans notre cas cependant, le modèle de croissance envisagé, Graeco, n'est pas un modèle empirique à base dendrométrique comme, respectivement, PTAEDA2 ou FAGACEES, mais bien un modèle de fonctionnement à base de processus. La prise en compte des hétérogénéités potentielles de structure des jeunes peuplements peut ainsi être restituée par des variables globales estimées à partir du modèle MAESTRA et pouvant être ensuite implémentées dans des modèles dynamiques 1D décrivant des processus à plus long terme.

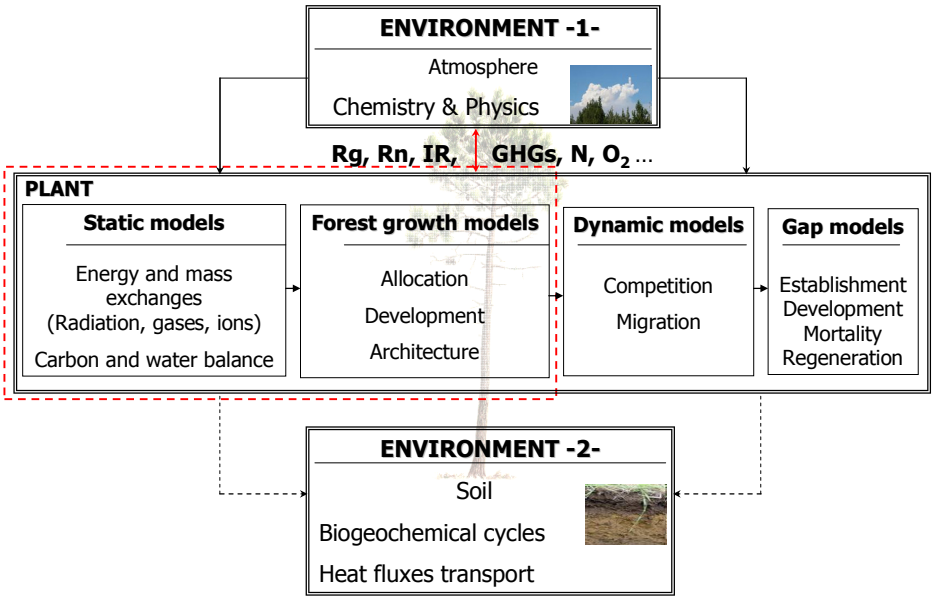


Figure 1.4. Classification des modèles suivant les processus à représenter.

Tableau 1.3. Liste (non exhaustive) des principaux modèles mécanistes de fonctionnement biophysique (static and growth models dans la Figure 1.3)

Models	References	Category
KAUSHA	Halldin et al., 1979	
LINKAGES	Pastor and Post, 1985; Wullschleger et al., 2003	
CENTURY	Parton et al., 1988	
MAESTRO/MAESTRA	Wang YP & Jarvis , 1990; Medlyn, 2004	
PnET	Aber & Federer, 1992	
CASA	Potter et al., 1993	
SECHIBA	Ducoudré et al., 1993	
PnET-II	Aber et al., 1995	
PGEN	Friend, 1995	
CANOAK	Baldocchi et al., 1995	Static models
SPA	Williams et al., 1996	
PnET-CN	Aber et al., 1996	
SWAP	Van Dam et al., 2000	
Canveg	Lai et al., 2000	
RATP	Sinoquet et al., 2001	
Ecosys	Grant 2001	
EALCO	Wang S., 2002	
MuSICA	Ogée et al., 2003	
INTRASTAND	Hanson, 2004	
BIOMASS	McMurtrie, 1985	
FOREST BGC	Running and Coughlan, 1988	
FORCYTE	Kimmins et al., 1979	
The Edinburgh Forest Model	Thornley, 1991	
TREEGROW/PINOGRAM	Leersnijder, 1992	
G'DAY	Comins et al., 1993	
FORGRO	Mohren et al., 1993	
TREEDYN-3	Bossel, 1996	
LoTEC	King, 1997	
ForSVA	Arp and Oja, 1997	
3-PG	Landsberg and Waring, 1997	Growth models
PGSM	Chen et al., 1998	
GROMIT	Randle and Ludlow, 1998	
GOTILWA +	Gracia et al., 1999	
GRAECO	Porté, 1999, Bosc	
CenW	Kirschbaum, 1999	
TRIPLEX	Peng et al., 2002	
CABALA	Battaglia et al., 2004	
Forest v5.1	Schwalm et al., 2004	
HYDRALL	Magnani, 2004	
Hi-SAFE	Dupraz et al., 2004	
ORCHIDEE	Krinner et al. 2005	
CASTANEA	Dufrene et al., 2005	
TREEDEV	Zhang et al, 2006	
ANAFORE	Deckmyn et al., 2008	

1.2 Problématique et objectifs de la thèse

Afin de rendre compte des échanges d'énergie, d'eau et de carbone de couverts forestiers dans un contexte climatique évolutif, la connaissance des processus de transferts et de leurs régulations environnementales sur un cycle sylvicole complet est nécessaire. **L'objectif central de ce travail de thèse a donc été de caractériser, quantifier et modéliser les échanges d'énergie, le bilan hydrique, et la productivité en termes de croissance et de biomasse produite de deux systèmes sylvicoles à croissance rapide du Sud-Ouest de la France**.

Le premier objectif fixé est d'explorer le fonctionnement de l'écosystème durant la phase post récolte allant de la préparation du sol à la régénération du peuplement et à toute la période de temps précédant la fermeture du couvert d'un peuplement d'arbres. Durant cette phase où la structure du couvert est a priori plus hétérogène que pour un couvert fermé, on observe un changement de dominance entre la végétation accompagnatrice et les arbres. Etablir le comportement hydrique d'une espèce candidate à une introduction à grande échelle dans le Sud-Ouest de la France, l'*Eucalyptus*, constitue notre deuxième objectif. Analyser les potentialités de production dans cette région de la France par une approche de modélisation reposant sur une représentation mécaniste du fonctionnement du couvert est l'objectif final de cette étude.

Ces trois objectifs amènent à répondre à plusieurs **questions sous-jacentes**:

- Comment la structure physique du couvert végétal, en termes de densité et de composition d'espèces, affecte-t-elle le fonctionnement d'écosystèmes forestiers fortement anthropisés?
- Comment ces écosystèmes répondent-ils aux contraintes climatiques de type sécheresse?
- Quel est l'impact des interventions sylvicoles courantes des itinéraires techniques analysés (travail du sol, débroussaillage, dépressage) sur le bilan de carbone et la productivité?
- Comment les différentes options de sylviculture envisagées se traduisent-elles en termes de bilans d'énergie, d'eau et de carbone ?
- Comment représenter le fonctionnement de ces écosystèmes dans un modèle dynamique simple ?
- Quel est l'impact potentiel d'un scénario climatique régionalisé sur le fonctionnement de ces écosystèmes ?

Pour répondre à ces questions, deux approches de recherche classiques et complémentaires, ont été mobilisées:

- Une **approche d'observation et d'expérimentation** que nous avons mise en œuvre sur trois jeunes peuplements du Sud-Ouest de la France : pins maritimes de 5 ans n'ayant encore subi aucune intervention sylvicole, pins maritimes de 5 ans ayant subi une double intervention débroussaillement-dépressage et enfin *Eucalyptus* de 5 ans.
- Une **approche de modélisation** basée sur la combinaison d'un modèle statique avec une structure de couvert tridimensionnelle et d'un modèle dynamique à structure de couvert monodimensionnelle. Cette approche s'est appuyée sur les données observées dans le cadre de notre thèse et sur les données disponibles par ailleurs sur les écosystèmes étudiés.

1.3 Structure générale de la thèse et plan des chapitres

La démarche suivie a consisté à combiner ces deux approches 'expérimentations-modèle' pour évaluer les échanges d'énergie, d'eau et de carbone d'écosystèmes contrastés du point de vue de leur structure et en simuler le fonctionnement sous un scénario climatique et pour différentes options sylvicoles (Figure 1.5). Ce mémoire de thèse est organisé autour des parties suivantes:

i. Dans un premier chapitre, les objets d'étude sont présentés dans leur contexte géographique, et le dispositif expérimental mis en œuvre est décrit (**Chapitre 2**). Les procédures de traitement de données communes à plusieurs parties de la thèse sont également présentées dans cette section.

ii. Le chapitre suivant (**Chapitre 3**) est consacré à la **détermination expérimentale des effets d'hétérogénéité structurale** de la phase du cycle de vie allant de 4 à 7 ans d'âge. Il s'agissait également d'acquérir un ensemble de données permettant de paramétrer, calibrer et valider les modèles utilisés dans les sections suivantes. Cette partie a fait l'objet d'un article publié dans la revue *Tree Physiology* (Moreaux et al. 2011). A cette fin nous avons suivi et comparé deux sites contrastés durant deux saisons de croissance :

- un semis de Pins maritimes à croissance rapide en forêt des Landes suivie par l'Inra de Bordeaux depuis la coupe rase du précédent peuplement intervenue en 1999. Le suivi mis en œuvre s'appuie sur un ensemble complet de mesures des flux végétation-atmosphère et de croissance des arbres à différentes échelles.

- un semis de Pins maritimes voisin de la précédente et de même superficie et que nous avons équipé depuis le 1er juin 2009 des mêmes systèmes de mesure que la précédente. La végétation accompagnatrice spontanée y est fortement développée.

iii. Nous avons également suivi expérimentalement le **bilan hydrique d'une nouvelle espèce, une variété hydride d'*Eucalyptus* introduite dans le Sud-Ouest de la France** (**Chapitre 4**) en peuplement âgé de 5 ans. Le site étudié est une plantation en première rotation. Son fonctionnement a été suivi avec un système de mesure simplifié du bilan hydrique et de croissance des arbres puis analysé et comparé aux deux parcelles de Pins maritimes précédentes. Cette partie fait l'objet d'un article sous presse dans la revue « *Plant Ecology and Diversity* ».

iv. Les **Chapitre 5** et **Chapitre 6** concernent l'approche de modélisation que nous avons conduite. Elle a consisté à **adapter et paramétrer un modèle de fonctionnement biophysique de l'écosystème et croissance**, pour des cultures à croissance rapide d'*Eucalyptus* et Pins maritimes. Ce travail s'est effectué en deux étapes. La première (**Chapitre 5**) consiste à paramétrer le modèle Maestra (Wang et Jarvis 1990b, Medlyn 2004) puis à en extraire des paramètres dégradés qui sont intégrés dans un modèle dynamique de croissance, Graeco, (Porté 1999). Deux modules sont également ajoutés : sol et dynamique de croissance de la végétation accompagnatrice. La deuxième

parte consiste en différents tests de calage-évaluation pour les configurations de sites présentés précédemment (**Chapitre 6**).

v. La dernière partie de nos recherches développée dans le chapitre 6 aborde de façon exploratoire la simulation du fonctionnement de plusieurs options de sylviculture sous un scénario climatique régionalisé. Cette partie constitue principalement un travail exploratoire de faisabilité pour la simulation des potentialités forestières à l'échelle régionale.

vi. Enfin, une conclusion générale est proposée, synthétisant les résultats obtenus au cours de cette étude ainsi que leurs limites. Elle se termine en ouvrant quelques perspectives proposées pour ces recherches (**Chapitre 7**).

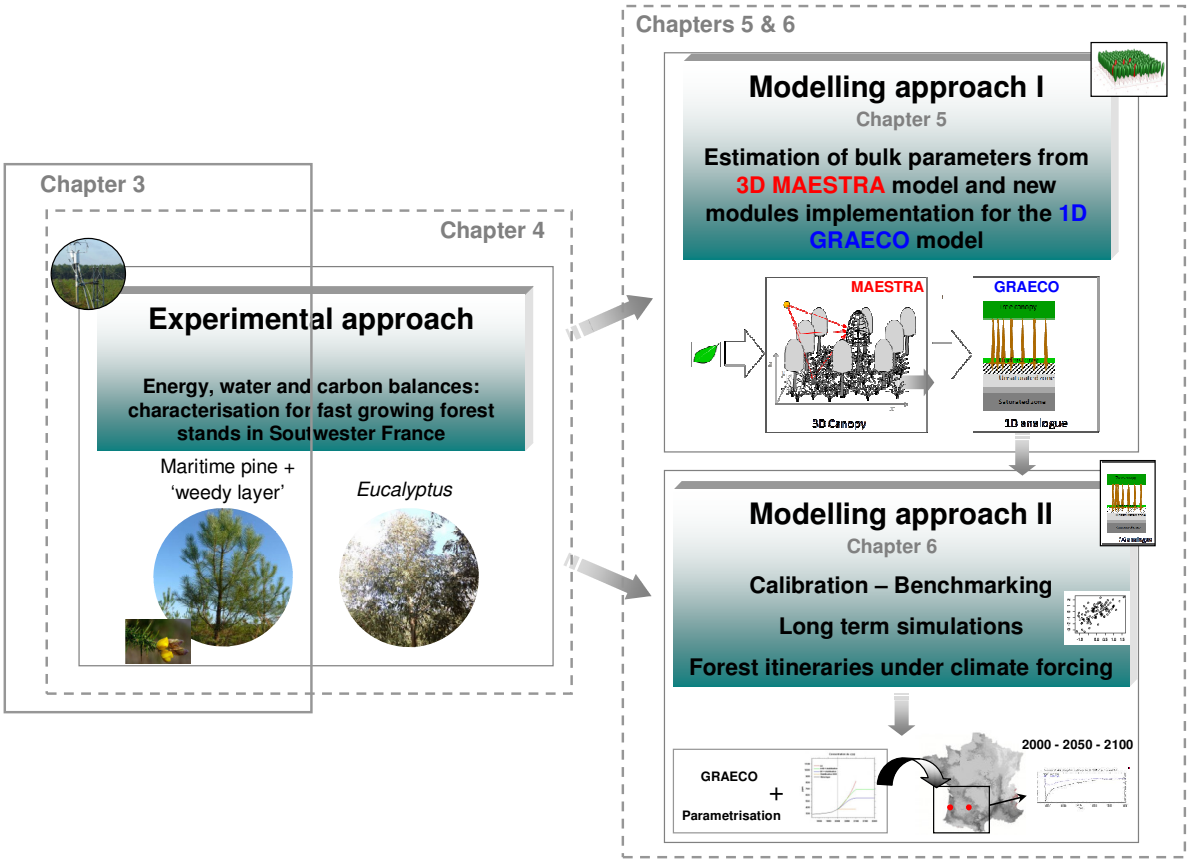


Figure 1.5. Schéma synthétique de la démarche entreprise au cours de ce travail de thèse.

Chapitre 2

Matériel et méthodes

Plan du chapitre

Chapitre 2. Matériel et méthodes 23

2.1 Sites expérimentaux dans leurs contextes géographique et sylvicole 23

2.1.1 Site expérimental de Pins maritimes: Bilos 23
2.1.2 Site expérimental d'*Eucalyptus*: Montbartier 27

2.2 Outils expérimentaux et traitement des données 30

2.2.1 Equipement des sites et campagnes de mesures 30
2.2.2 Traitement des données 33

2.3 Les outils de modélisation 47

2.3.1 MAESTRA 47
2.3.2 GRAECO 47

Chapitre 2. Matériel et méthodes

Des semis de Pins maritimes aux essais de plantations d'*Eucalyptus*, les objets d'étude dans le contexte du sud-ouest y sont présentés et les expériences menées sont décrites depuis l'installation sur site jusqu'aux traitements des données recueillies. Certaines des méthodes expérimentales sont utilisées à plusieurs reprises (Chapitres 3, 4, 5) et ne sont donc plus décrites aussi précisément par la suite. Les limites de certaines méthodes sont également développées afin d'appréhender la significativité des résultats présentés.

De l'expérience de terrain à la modélisation, les outils informatiques sont passés en revue.

2.1 Sites expérimentaux dans leurs contextes géographique et sylvicole

2.1.1 Site expérimental de Pins maritimes: Bilos

Le premier site expérimental se situe à Bilos (44°29'38.08″ N ; 0°57'22″ O, altitude : 40 m) dans la forêt des Landes de Gascogne à 50 km au sud-ouest de Bordeaux. La parcelle est gérée suivant le cycle présenté en introduction. La parcelle étudiée est un semis de Pin maritime dont la superficie totale représente environ 60 ha. La parcelle a été divisée en deux parties que nous désignons par la suite Bilos 1 et Bilos 2, présentant chacune une surface de 30 ha (Figure 2.1). Les deux sites sont constitués de Pins maritimes (*Pinus pinaster* Ait.) semés en juillet 2004 et juillet 2005 pour Bilos 1 et Bilos 2 respectivement.

S'intégrant dans le schéma sylvicole présenté en introduction, Bilos 1 a été débroussaillé et dépressé au mois de novembre 2008. Le débroussaillement permet de limiter la propagation d'incendie par rupture de la continuité du couvert végétal (point de vue légal) et de diminuer la compétition avec un sous-bois développé (point de vue optimisation de la productivité). Le dépressage quant à lui permet d'atteindre une densité de l'ordre de 1800 tiges à l'hectare. Dans le cadre de cette étude, il a été possible de procéder à un second débroussaillement un an plus tard, en novembre 2009, afin de conserver une structure sol nu/Pin maritime qui, comme nous le présentons ci-dessous contraste avec la structure de la parcelle de Bilos 2. La surface de la parcelle est occupée par de la litière, constituée d'aiguilles et de branches mortes, des pins coupés, des ajoncs arrachés lors du débroussaillement. À chaque saison de croissance, après chaque débroussaillement, la strate herbacée recolonise rapidement l'inter-rang. Les espèces considérées dans ces peuplements sont présentées sur la Figure 2.2

Sur aimable autorisation de la commune de Salles, le dépressage et le débroussaillement initialement prévus en novembre 2009 sur la seconde parcelle, Bilos 2, ont été décalés à octobre 2011. Le choix de cette demande a reposé sur la volonté de conserver une structure de couvert contrastée entre deux parcelles juxtaposées pendant la durée de l'étude (2009-2010). La végétation présente donc une physionomie et une composition spécifique très différentes de la précédente avec la présence

d'une strate herbacée abondante. Cette strate est occupée par un couvert développé constitué de différentes espèces : bruyères, fougères et majoritairement ajoncs nains (*Ulex minor* Roth.) pouvant atteindre jusqu'à 1 m de haut (Figure 2.2, Figure 2.4).

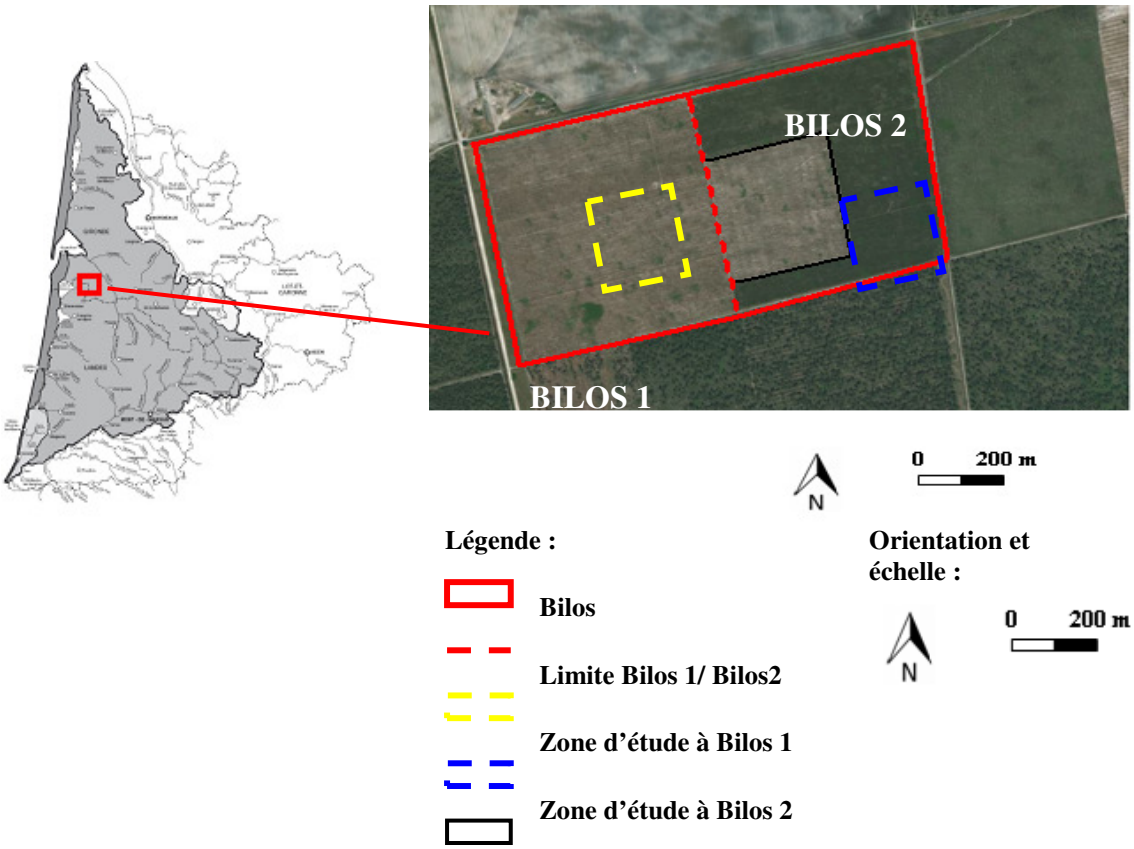


Figure 2. 1 Localisation de la parcelle d'étude et délimitation des zones expérimentales (Carte IFN 2008 et photo aérienne de Google Map).

Espèce majoritaire composant la strate herbacée de Bilos 2 et dans une moindre mesure celle de Bilos 1 après recolonisation de la zone débroussaillée, l'ajonc nain a fait l'objet de très peu d'études. Quelques éléments sont présentés ci-après afin de mieux appréhender la coexistence Pin maritime/ajonc nain dans les jeunes peuplements. L'ajonc nain est un arbrisseau de 5 à 150 cm de hauteur (Stokes et al. 2003), dont les rameaux sont très épineux et pérennes. Tout comme le pin, cet arbuste est caractéristique des sols acides et pauvres en nutriments ou mésophile (présente étude). Si l'existence d'ajonc n'apparait pas clairement dans la classification d'Augusto et al. (2006), les travaux de Gloaguen (1986) montrent que la présence d'*Ulex minor* est rare en lande sèche mais abondante en lande mésophile et humide. Quelques connaissances ont été apportées sur la phénologie de cette espèce dans cette même étude. La floraison commence en août, est maximale en octobre et s'achève en novembre où tous les rameaux sont en fruit. *Ulex minor* a une courte période de floraison de 4 mois contre environ 12 mois pour l'espèce *Ulex Europaeus,* autre espèce majoritaire constituant le sous-bois des peuplements de Pins maritimes dans les Landes de Gascogne. Quelques observations ont été faites sur une relation allométrique existant entre diamètre du tronc et hauteur de l'ajonc du type

$Y=Ax^b$ (Stokes 2002). Il n'existe aujourd'hui aucune étude similaire à celles réalisées sur la Molinie (Berbigier et al. 1991, Delzon 2000) ou sur de la Fougère (Roberts 1980, 1984) pour le cas de l'ajonc (en particulier l'ajonc nain) pour la compréhension de son fonctionnement hydrique et stomatique. Seulement quelques données sont disponibles sur les stomates qui sont présents sur les rameaux mais également sur une partie photosynthétique du tronc et qui enregistrent un diamètre de 17.47 µm ± 0.042 (Misset et Gourret 1996). L'ajonc nain est reconnu comme l'espèce fixatrice d'azote la plus répandue dans la forêt des Landes de Gascogne, après *Ulex Europaeus* (Augusto et al. 2005). Dans ce sens, elle fournit une fertilisation naturelle à l'écosystème via une fixation symbiotique approchant la valeur de 10 kg N ha^{-1} an^{-1}. Cependant, sa capacité à envahir l'espace inoccupé par les pins peut induire une compétition entre ces deux espèces avec en conséquence une baisse de la croissance chez les arbres (Watt et al. 2003).

Figure 2. 2 Espèces présentes à Bilos. De gauche à droite : Pin, ajonc nain, callune, fougère, molinie (Photos INRA-Ephyse)

Le sol de Bilos (1 et 2) est plutôt caractéristique de lande mésophile. Il est sableux, podzolique et hydromorphe d'après les hauteurs de nappes mesurées au cours des dernières années (Annexe 1) et les critères établis par Augusto et al. (2006) (Figure 2.3).

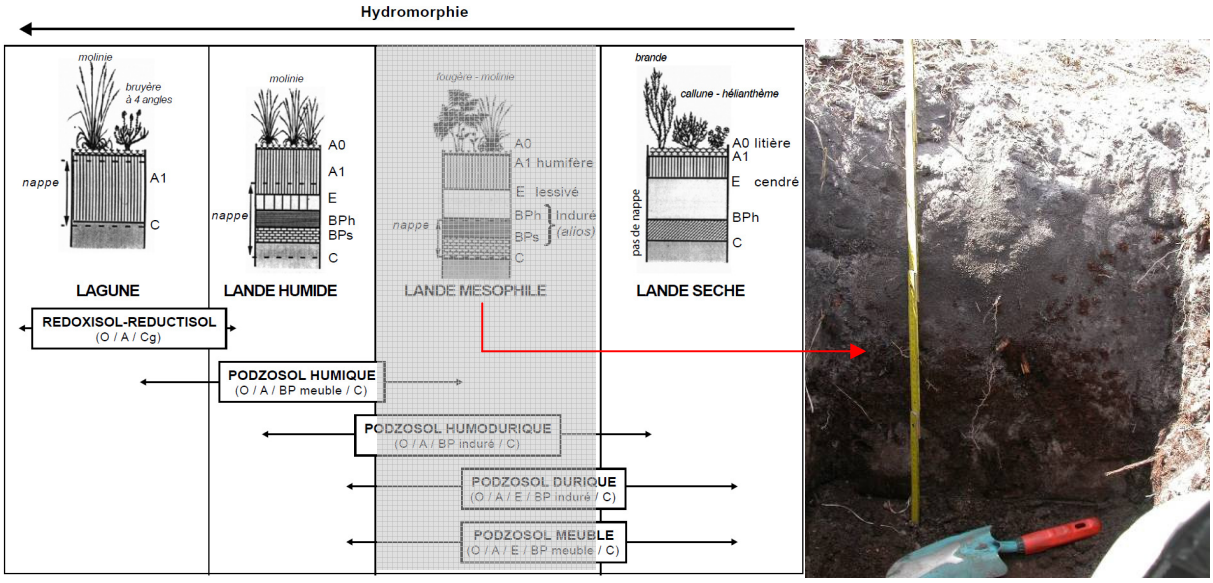


Figure 2. 3 Classification des types de sol rencontrés dans les Landes de Gascogne (Augusto et al. 2006) et profil de sol associé à Bilos sur 50cm de profondeur (Photo INRA-Ephyse).

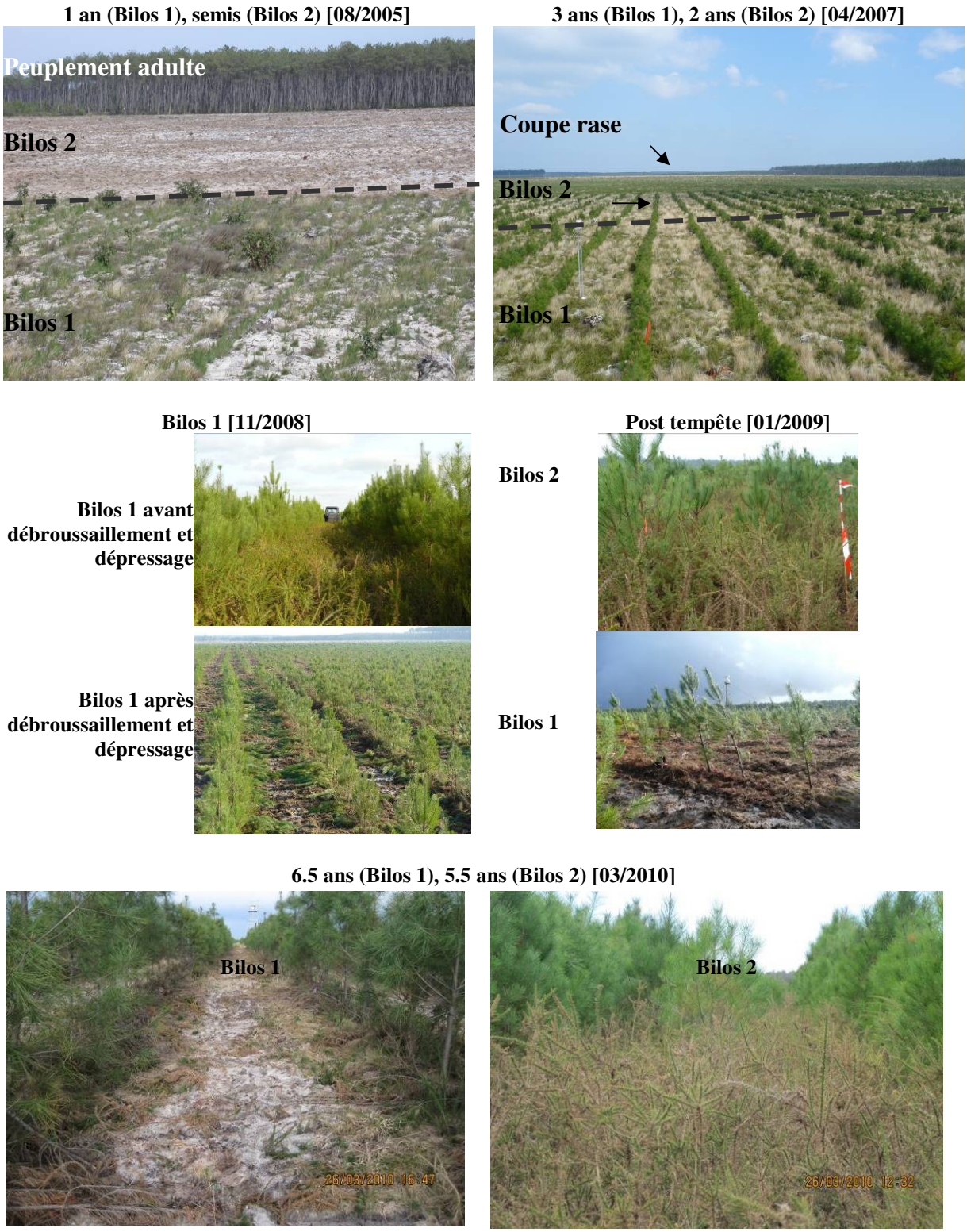


Figure 2. 4 Photos des parcelles expérimentales de 0 à 7 ans (Photos : INRA-Ephyse).

La parcelle sélectionnée pour l'installation des capteurs et le suivi dendrométrique présente une surface de 12 000 m^2 (soit 150 m sur 80 m) comprenant 13 lignes espacées de 4 m en moyenne et 20 arbres par ligne en moyenne, espacés de 2,5 m approximativement. Quelques arbres présentent un

dédoublement voir un triplement du tronc dans les 2 premiers mètres depuis la base. Le dispositif expérimental comprend un ensemble de mesures météorologiques, de flux de sève, de croissance radiale du tronc et d'humidité du sol. Trois campagnes de mesures ont été réalisées, en juillet 2010, janvier 2011 et juillet 2011, visant à déterminer les caractéristiques dimensionnelles des arbres : hauteur, circonférence à 1.30 m, hauteur de la première branche vivante, rayon de la couronne suivant les axes x et y. Le détail de ces mesures est présenté ci-après.

La rétrospective climatique de ce site est disponible en Annexe 1, ainsi que les espèces composant la végétation adventice.

2.1.2 Site expérimental d'*Eucalyptus*: Montbartier

Le second site expérimental se situe à **Montbartier** (43°54'03.22″ N ; 1°17'25.17″ E, altitude : 137m) à quelques kilomètres au sud de Montauban (Figure 2.5). Situé en région Midi Pyrénées et spécifiquement dans le département du Tarn-et-Garonne, le climat est de type océanique dégradé. La parcelle étudiée couvre une superficie de 15 ha et a été plantée d'*Eucalyptus gundal* clone 121 en octobre 2004, après 6 mois en pépinière. A vocation énergétique, cette parcelle suit un itinéraire type : taillis à courte rotation sur un cycle de 3 fois 10 ans. Un débroussaillement a lieu dans l'interligne pendant les trois premières années après la plantation (Tableau 1.2 de l'introduction).

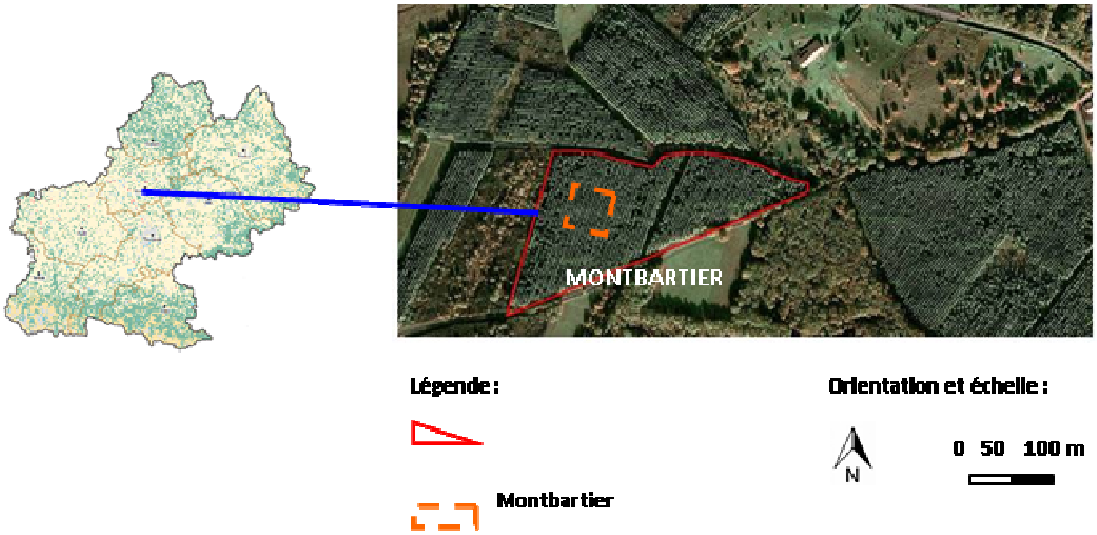


Figure 2. 5 Localisation de la parcelle d'étude et délimitation de la zone expérimentale (Carte IFN 2010 et photo aérienne de Google Map).

En 2010, la parcelle présente une structure homogène, dont le sous-bois est quasiment inexistant (Figure 2.6, excepté en lisière de parcelle avec quelques ajoncs (*Ulex Europaeus*). La compétition pour les ressources dans le sol, mais également pour la lumière, représente une raison probante quant à l'inexistence de sous-bois dans cette parcelle d'*Eucalyptus* dont le couvert est

quasiment fermé. Par ailleurs, des effets allélopathiques ont déjà été observés dans des peuplements d'*Eucalyptus*, notamment au Congo (Bernhardt-Reversat 1986), ayant pour conséquence d'empêcher le développement d'autres plantes telles que graminées. Cependant, il n'existe pas d'études sur des effets avérés en France. La litière de Montbartier est principalement constituée d'écorces mortes le long des troncs d'*Eucalyptus* et de feuilles mortes.

1 an **3 ans** **5 ans**

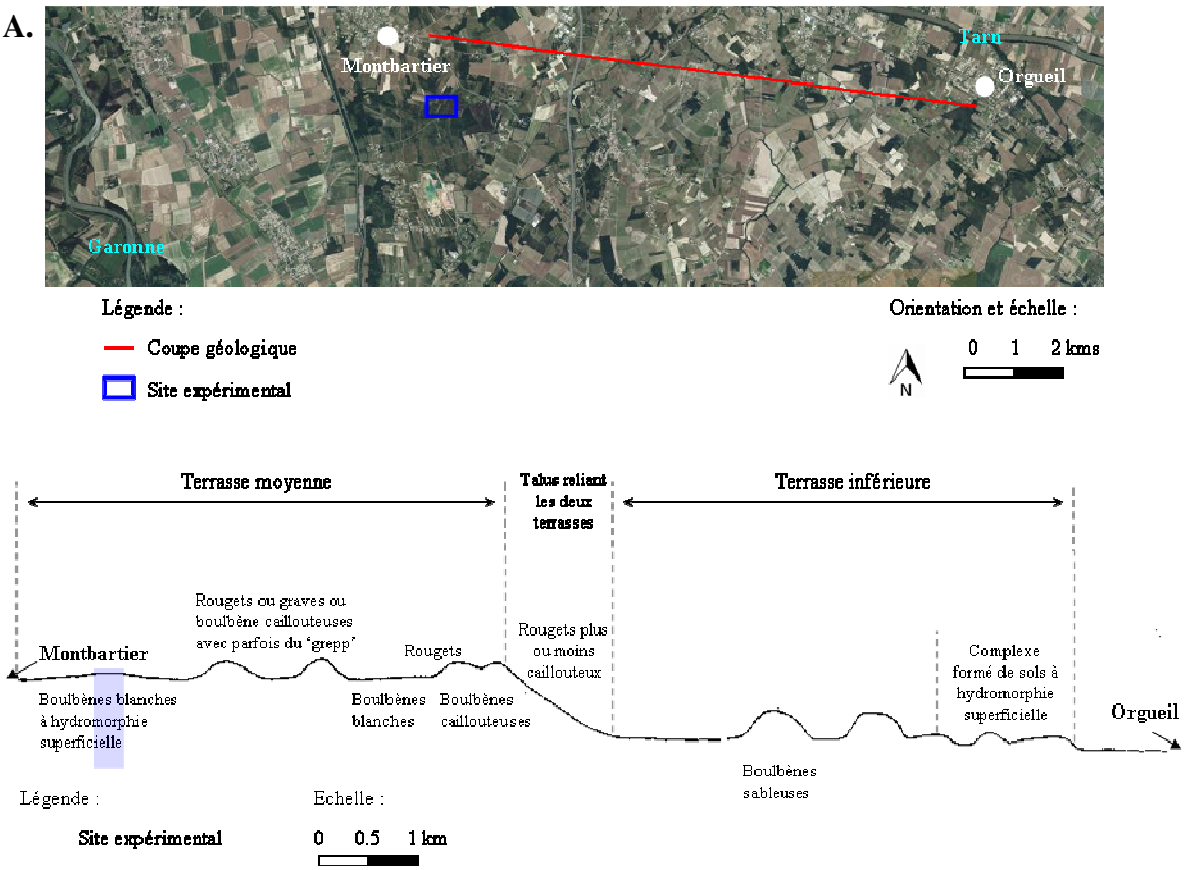
Figure 2. 6 Photos de la parcelle expérimentale (Photos FCBA et INRA-Ephyse)

Enfin, le sol de Montbartier est argilo-limoneux de type « boulbène » (Figure 2.7 A) dont le pH acide avoisine les 6. Selon le référentiel pédologique (AFES 1995), il s'agit d'un luvisol-reduxisol. Le profil textural des sols de boulbène se caractérise par son développement dans un matériau alluvial. Il comporte un horizon superficiel sablo-limoneux, reposant sur un horizon compact plus argileux, plus ou moins caillouteux et ferrugineux (Figure 2.7 B). Le sol est généralement hydromorphe, battant, à mauvaise stabilité structurale et éventuellement caillouteux (Favrot, 1970). Le limon est jaune à gris clair, très fin, parfois lessivé et réduit à ses éléments siliceux. La terre est plutôt pauvre en matière organique (Figure 2.7 C).

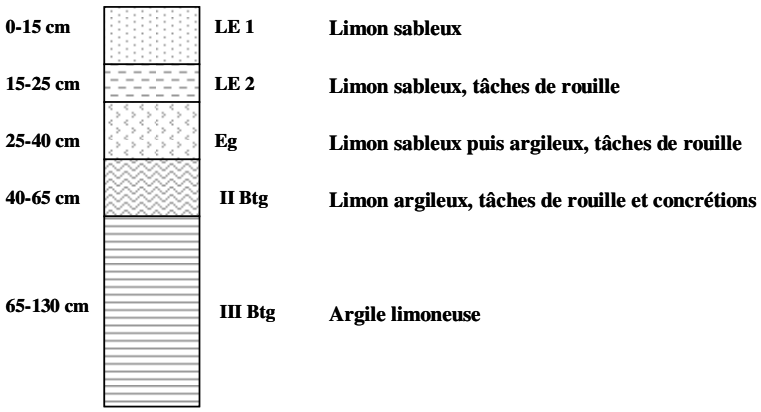
La parcelle sélectionnée pour l'installation des capteurs présente une surface de 2500 m^2 (soit 50 m sur 50 m) comprenant 13 lignes espacées de 4 m en moyenne et 20 arbres par ligne en moyenne, espacés de 2.5 m approximativement. Quelques arbres présentent un dédoublement voir un triplement du tronc dans les 2 premiers mètres depuis la base. Le dispositif expérimental comprend un ensemble de mesures météorologiques, de flux de sève, de croissance radiale du tronc et d'humidité du sol. Trois campagnes de mesures ont été réalisées, en juillet 2010, janvier 2011 et juillet 2011, visant à déterminer les caractéristiques dimensionnelles des arbres : hauteur, circonférence à 1.30 m, hauteur de la première branche vivante, rayon de la couronne suivant les axes x et y. Le détail de ces mesures est présenté ci-après.

La rétrospective climatique de ce site est disponible en Annexe 1.

A.



B.



C.

Profondeur (cm)	Granulométrie (%)					MO (%)	pH eau
	Argile	LF	LG	SF	SG		
0 - 15	10	23	43	16.5	6.5	1.3	7.0
15 - 25	10	23	43.5	16.5	6.5	1.0	7.0
25 - 40	13	22.8	43.5	15.3	5	0.5	7.2
40 - 65	23.5	33	29.5	11.5	2.5	0.5	5.4
65 - 130	29.3	34.5	26.0	7.8	2.5		5.5

Figure 2. 7 A- Coupe géologique entre Montbartier et Orgueil avec identification de la zone d'étude (Google Map).
B- Profil caractéristique des sols de boulbène sur alluvions anciennes des terrasses moyenne du Tarn.
C- Granulométrie associée. Adapté de Favrot (1970).

2.2 Outils expérimentaux et traitement des données

2.2.1 Equipement des sites et campagnes de mesures

i. Tableau général des mesures et choix des arbres 'cible'

Le Tableau général 2.1 présente l'ensemble des capteurs utilisés pour la présente étude sur les trois parcelles d'intérêt. Certaines de ces mesures seront détaillées au cours des chapitres suivants, partie matériel et méthode. Six échantillons 'arbres' ont été sélectionnés pour le suivi en croissance secondaire et en densité de flux de sève en admettant la représentativité de ces arbres par rapport à l'ensemble du peuplement. Ces 6 arbres servent également d'arbres 'cible' dans la partie modélisation comme nous le verrons par la suite. Un récapitulatif des caractéristiques de ces arbres est présenté dans le Tableau 2.2.

ii. Campagnes de mesure

Dans un objectif de caractériser au mieux les parcelles d'étude, d'un point de vue structural, plusieurs campagnes de mesures ont été réalisées pendant les 3 années d'étude (Tableau 2.3). Trois thématiques sont abordées lors de ces campagnes :

- Caractéristiques dimensionnelles des arbres individuels. Objectifs : Déterminer la position des arbres dans la parcelle définie par leurs coordonnées (x, y) depuis un point d'origine, leur hauteur, diamètre à 1.30 m, et extension maximale de la couronne suivant les directions x et y, leur hauteur d'insertion de la première branche vivante.
- Mesure de biomasse des pins et du 'sous-bois'. Objectif : détermination du poids de matière sèche de l'ajonc nain à Bilos 1 et Bilos 2 en distinguant partie verte et non verte, ainsi que du poids sec des aiguilles de pins.
- Prélèvement racinaire à Bilos 1 et Bilos 2. Objectif : Estimer la répartition verticale et horizontale de la biomasse de racines pour les arbres et le 'sous-bois'.

Tableau 2. 1 Synthèse des capteurs utilisés sur la période de mesure.

Mesures		Appareils			Sites équipés	Suivi
		Matériels	Marque	Modèle		C: continu P: ponctuel
Composantes bilan d'énergie						
Rayonnement net (W m^{-2})		Radiomètre	Kipp & Zonen	NR-Lite	Bilos 1 & 2, Montbartier	C
Rayonnement 4 composantes (SW et LW)*		Radiomètre	Kipp & Zonen	CNR4	Bilos 1 & 2	C
Rayonnement global (0.3-3µm) descendant (W m^{-2})		Pyranomètre	CIMEL	CE 180	Bilos 1 & 2	C
Rayonnement global (0.3-3µm) ascendant (W m^{-2})		Pyranomètre	CIMEL	CE 181	Bilos 1 & 2	C
Densité de flux de photons (µmol $_{photon}$ m^{-2} s^{-1}):						
1. PAR diffus		Capteur	Delta T	BF3H	Bilos 1	C
2. PAR incident (PPFD)		Capteur	Delta T	BF3H	Bilos 1	C
		Capteur	Skye Instruments Ltd	SKP 215	Montbartier	C
Densité de flux terrestre ascendant (W m^{-2})		Pyrgéomètre	Kipp & Zonen	CGR2	Bilos 1&2	C
Flux de chaleur dans le sol (W m^{-2})		Capteur	Hukeseflux	HFP01SC	Bilos 1&2	C
Vitesse et direction du vent	1.	Anémomètre sonique 3D	Gill Instruments	R3	Bilos 1 & 2	C
	2.	Anémomètre à coupelle	Vector Instruments	W200P	Bilos 1	C
	3.	Anémomètre à girouette	RM Young	05103	Bilos 2 et Montbartier	C
Température de l'air		Sonde	Campbell Scientific	CS215	Bilos 1 & 2, Montbartier	C
Pression atmosphérique		Baromètre	Vaisala	PTB101B	Bilos 1	C
Température du sol		Thermocouples	EPHYSE		Bilos 1 & 2	C
Composantes carbone						
Concentration en CO_2 atm		Analyseur IR	Li Cor	LiCor 7500	Bilos 1 & 2	C
Litières		20 paniers	EPHYSE		Bilos 1 & 2, Montbartier	P
Composantes eau						
Précipitations:						
Pluie incidente		Pluviomètres à auget basculant	Environmental Measurements	ARG100	Bilos 1	C
			Munro Instruments Ltd	R100	Bilos 2	
			Campbell Scientific	SBS500	Montbartier	
Interception de la pluie						
Sur le terrain		Système de gouttières	EPHYSE	Annexe 1 A	Bilos 1 & 2	P
		+ pluviomètres	Environmental Measurements	ARG100	Bilos 1 &2	P
Système de référence		Gouttières + pluviomètres	EPHYSE + Campbell Scientific	SBS500	INRA - site de la Ferrade	P
Profondeur de nappe		Sonde	Druck Ltd	PDCR 1830	Bilos 1	C
Humidité relative de l'air		Sonde	Campbell Scientific	CS215	Bilos 1 & 2, Montbartier	C
Evapotranspiration		Analyseur IR	Li Cor	LiCor 7500	Bilos 1 & 2	C
Contenu en eau du sol		Sonde	Campbell Scientific	CS615	Bilos 1 & 2	C
		Sonde	Campbell Scientific	CS616	Montbartier	
Flux de sève		Capteur type Granier (1985)	EPHYSE		Bilos 1 & 2, Montbartier	C
Aquisition des données						
Aquisition		Centrale	Campbell Scientific	CR1000 et CR23X	Bilos 1	C
				CR10X et CR23X	Bios 2	C
				CR1000	Montbartier	C
Logiciel d'aquisition (données flux)		Logiciel	EPHYSE	Tourbillon	Bilos 1 & 2	C
Transmission des données						
	1.	Satellite et manuel (USB)			Bilos 1 & 2	
	2.	Manuel puis modem GPRS	Campbell Scientific	NL115	Bilos 1, 2 & Montbartier	
Caractéristiques des arbres						
Hauteur totale		Mesures effectuées par l'unité expérimentale				P
Diamètre à 1m30		Mesures effectuées par l'unité expérimentale et par microdendromètre (fabrication EPHYSE, annexe 1 B)				P et C
Hauteur première branche vivante		Mesures effectuées par EPHYSE et l'unité expérimentale				P
Extension maximale de la couronne		Mesures effectuées par EPHYSE et l'unité expérimentale				P
Biomasse des arbres et du sous bois		Mesures effectuées par EPHYSE (pins maritimes et sous bois) et le FCBA (eucalyptus)				P

* SW: courtes longueurs d'onde, LW: grandes longueurs d'onde

Tableau 2. 2 Caractéristiques des arbres suivis pour les mesures de flux de sève et de la croissance radiale. DBH correspond au diamètre à 1.30 m, Hm et Hs aux hauteurs d'insertion des capteurs flux de sève et microdendromètres respectivement. Dm et Ds correspondent aux diamètres des troncs à ces hauteurs. Les valeurs sont données à la date citée entre parenthèses.

MONTBARTIER	(09/2009)	Microdendromètres (09/2009)		Sondes flux de sève (09/2009)	
	DBH	Hm	Dm	Hs	Ds
N° de l'arbre suivi	(cm)	(m)	(cm)	(m)	(cm)
1	11.0	-	-	1.29	11.2
2	13.8	0.590	14.9	1.24	14.2
3	10.4	0.658	11.7	1.22	10.7
4	11.5	0.705	12.9	1.19	11.9
5	14.9	0.900	14.8	1.21	15.4
6	12.0	1.185	11.8	1.76	11.4

BILOS 1	(05/2009)	Microdendromètres (04/2010)		Sondes flux de sève (05/2009)	
	DBH	Hm	Dm	Hs	Ds
N° de l'arbre suivi	(cm)	(m)	(cm)	(m)	(cm)
1	7.7	1.60	5.9	1.06	7.8
2	2.9	1.05	3.30	0.46	3.9
3	6.5	1.70	5.7	0.77	6.7
4	4.5	1.18	4.6	0.31	6.2
5	5.4	0.95	5.3	0.48	6.2
6	3.3	1.30	3.3	0.59	4.3

BILOS 2	(05/2009)	Microdendromètres (04/2010)		Sondes flux de sève (05/2009)	
	DBH	Hm	Dm	Hs	Ds
N° de l'arbre suivi	(cm)	(m)	(cm)	(m)	(cm)
1	2.8	1.00	3.2	0.39	4.1
2	3.1	0.65	4.4	0.41	4.7
3	3.1	0.85	3.2	0.35	3.8
4	2.9	1.02	3.3	0.39	3.9
5	2.9	0.85	3.2	0.34	3.7
6	3.1	0.70	3.8	0.30	4.0

Tableau 2. 3 Tableau récapitulatif des campagnes de mesures réalisées sur les trois sites. Les dimensions des parcelles échantillonnées sont précisées. Les références se rapportent aux protocoles de la base qualité du laboratoire EPHYSE.

Dates	BILOS 1	BILOS 2	MONTBARTIER	Références (Protocoles)
Février 2009	Caractéristiques dimensionnelles des arbres 150 m × 80 m	30 m × 30 m	-	**Moreaux et al. 2009a**
Juillet 2009	Mesure biomasse pins et sous-bois		-	**Moreaux et al. 2009b**
Février 2010	Caractéristiques dimensionnelles des arbres 150 m × 80 m	30 m × 30 m	-	**Moreaux et al. 2009a**
Juillet 2010	Mesures biomasse pins et sous-bois		Caractéristiques dimensionnelles des arbres 50 m ×50 m	**Moreaux et al. 2009b** **Moreaux et al. 2010**
Novembre 2010	Etude des profils racinaires		-	**Trichet et al. 2010**
Janvier 2011	Caractéristiques dimensionnelles des arbres 150 m × 80 m	30 m × 30 m	Caractéristiques dimensionnelles des arbres 50 m ×50 m	**Moreaux et al. 2009a** **Moreaux et al. 2010**

2.2.2 Traitement des données

i. Précisions sur la méthode des fluctuations turbulentes.

<u>Rappel sur la méthodologie</u>

Afin de quantifier et d'analyser les échanges de matière et d'énergie dans le continuum surface-végétation-atmosphère, la technique des fluctuations turbulentes (EC pour eddy-covariance en anglais) a été utilisée sur le site de Bilos. Les échanges de chaleur et de carbone étaient déjà mesurés en continu depuis 2001 à Bilos 1. Dans l'objectif de caractériser l'effet des pratiques sylvicoles sur ces flux, une deuxième tour à flux a été installée en mai 2009 à Bilos 2. Les instruments utilisés sont précisés dans le tableau précédent (Tableau 2.1).

Le principe de la méthode est largement décrit dans Aubinet et al. (2000) ou encore Baldocchi et al. (2001), Baldocchi (2003). Quelques notions sont ici rappelées pour rendre compte des conditions d'application de la méthode dans cette étude et du traitement des données.

La technique générale de la méthode repose sur l'équation de conservation de la masse. En l'absence de divergence de flux turbulent horizontal et en négligeant les gradients latéraux et le terme de diffusion moléculaire, l'équation de conservation intégrée sur la hauteur de mesure prend la forme suivante (Equation 2.1) :

$$F_{net} = F_t + F_{ac} + F_h + F_v$$ Equation 2. 1

Avec :

F_{net} : **Densité de flux net échangé du scalaire considéré (absorbé ou émis)** $= \int_0^{hm} S\,dz$

F_t : **Densité de flux turbulent à la hauteur de mesure**

F_{ac} : **Stockage du scalaire entre la surface et la hauteur de mesure** $= \int_0^{hm} \frac{\partial \overline{\rho}}{\partial t} dz$

F_h : **Flux d'advection horizontal** $= \int_0^{hm} \overline{u} \frac{\partial \overline{\rho}}{\partial x} dz + \int_0^{hm} \overline{v} \frac{\partial \overline{\rho}}{\partial y}$

F_v : **Flux d'advection vertical** $= \int_0^{hm} \overline{w} \frac{\partial \overline{\rho}}{\partial z} dz$

h_m : **Hauteur de mesure**

S : **Terme de puits ou de source du scalaire considéré**

x : **Axe horizontal de la direction moyenne du vent**

y : **Axe horizontale, perpendiculaire à la direction moyenne du vent**

z : **Axe normal à la surface**

ρ : **Scalaire considéré ([CO_2], [H_2O], T)**

u, v : **Composantes horizontales du vent moyen**

w : **Composante normale du vent moyen**

Le terme F_t correspond à la mesure obtenue par le système d'EC, en calculant la moyenne du produit des fluctuations du scalaire ρ et de la vitesse verticale w par rapport à leur moyenne respective pendant la période d'intégration ($\overline{\rho}$, $\overline{w}$), suivant l'équation (Equation 2.2) :

$$F_t = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} (\rho_i - \overline{\rho})(w_i - \overline{w}) = \overline{\rho' w'}$$ Equation 2. 2

L'équation 2.2 introduit la décomposition de Reynolds (Reynolds 1895) qui stipule qu'une variable y se décompose en une valeur moyenne : $\overline{y}$ et un terme de déviation par rapport à la moyenne associée à la turbulence : y' , soit : $y = \overline{y} + y'$.

Le processus de transfert turbulent est discontinu, ce qui nécessite de considérer une période d'intégration suffisamment grande pour obtenir un échantillonnage représentatif des phénomènes de turbulence. Ainsi, afin de prendre en compte à la fois les basses et hautes fréquences du signal, une durée d'intégration de n=30 min et une fréquence d'échantillonnage de f=10 Hz sont habituellement retenues (Vesala et al. 2008).

Conditions d'application (Aubinet et al. 2000, Moureaux 2004, Burba et al. 2010)

Plusieurs conditions/hypothèses sont nécessaires pour l'utilisation de cette méthode et pour assimiler exactement F_{net} à F_t. Dans la situation de Bilos 1 et Bilos 2 :

- Les mesures sont effectuées dans la couche limite de surface, à 6.4 (Bilos 1) et 6 m (Bilos 2) de hauteur,
- L'homogénéité spatiale horizontale est admise,
- La topographie est plane,
- La condition de stationnarité atmosphérique est respectée.

Cette dernière hypothèse justifiée en journée lorsque les conditions de turbulence sont bien développées, l'est moins en conditions nocturnes lorsque la couche limite atmosphérique est stratifiée. Un critère de sélection des données nocturnes a été établi à partir de la détermination d'un seuil de la vitesse de frottement $u*$, en dessous duquel la turbulence est trop faible. Ce seuil a été déterminé lorsque le bilan d'énergie est stabilisé (Aubinet et al. 2000, Chapitre 3) et a été défini à 0.2 m s^{-1}. Il correspond à des valeurs typiques rencontrées en forêt ($0.1 < u*_{seuil} < 0.5$ m s^{-1}). En utilisant cette méthode, le seuil $u*$ est aussi bien appliqué aux conditions diurnes que nocturnes.

- dans ces conditions : $F_{ac} = F_h = F_v = 0$

La notion de footprint, qui définit la surface de forme ellipsoïdale prépondérante de contribution au flux mesuré en amont de l'instrument de mesure par rapport à la direction du vent (Schmid et al. 2002), est importante étant données la configuration et la proximité des parcelles d'étude considérées : Bilos 1 et Bilos 2. Le modèle de Schuepp et al. (1990), reposant sur une solution analytique de l'équation de diffusion, a été utilisé pour déterminer la zone d'influence dans des conditions proches de la neutralité (Equation 2.3, Tableau 2.4, Figure 2.8)).

$$CNF(x_L) = e^{-\frac{U(z-d))}{u\square x_L k}}$$ Equation 2. 3

Avec :

CNF **:** Cumul normalisé de la contribution au flux mesuré (%)
x L **:** Distance depuis la station (m)
U **:** Vitesse moyenne du vent
z **:** Hauteur de mesure (m)
d **:** Hauteur de déplacement (m)
u* **:** Vitesse de cisaillement (m s^{-1})
k **:** Constante de Von Karman

Le Tableau 2.4 rassemble les paramètres utilisés dans le modèle. L'année 2003 a été ajoutée pour s'assurer de la bonne estimation du modèle de Schuepp et al. (1990). En 2003, Bilos est alors composé d'un sol nul, venant d'être labouré pour le semis de l'année suivante. Le calcul de la distance de contribution aux flux en 2003 s'est effectué à l'aide du modèle de Hseish et al. (2000) et a été confronté au modèle de Schuepp et al. (1990). Le modèle de Heish et al. (2000) est plus complexe

dans ce sens où il s'agit d'une approche hybride combinant solution analytique et modèle stochastique lagrangien. La Figure 2.8 atteste de la cohérence entre les deux approches avec un écart de 1% (régression linéaire). A hauteur de mesure égale en 2003 et 2010, mais pour des hauteurs de canopée plus élevées en 2010 qu'en 2003, et donc implicitement pour des longueurs de rugosité différentes, la distance contribuant aux flux dans la direction du vent est réduite en 2010, en accord avec les conclusions de Burba (2001). Ainsi, 90% du flux mesuré au niveau de la tour proviennent des 180 m depuis la tour dans la direction du vent. Cela suggère que l'étude s'effectue dans les conditions appropriées sachant que les deux mâts sont séparés d'une distance de 580m environ.

Tableau 2. 4 Paramètres utilisés dans le calcul du footprint en conditions de quasi neutralité.

Paramètres	Bilos 2003	Bilos 1	Bilos 2
U	1	1	1
z	6.4	6.4	6
d	0 [1]	2.5 [2]	1.8 [2]
u*	0.5 [3]	0.5 [3]	0.5 [3]

[1] **d'après Kowalski et al. 2003**

[2] **d'après Jarvis et al. 1976**

[3] **d'après Kljun et al. 2004**

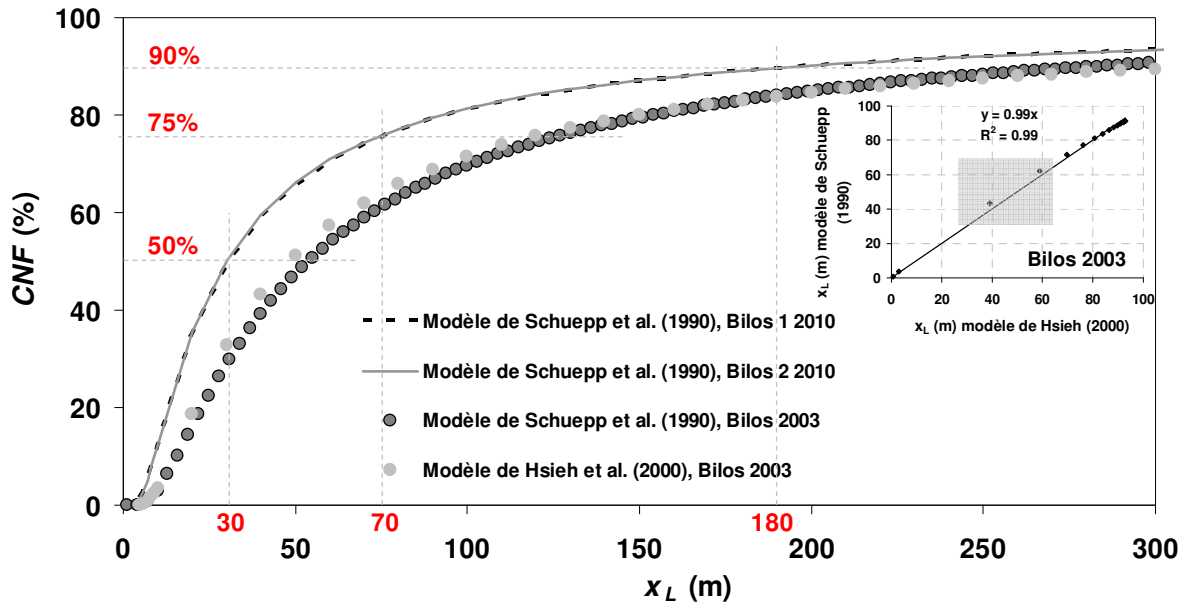


Figure 2. 8 Contribution aux flux turbulents en fonction de la distance au mât de mesure en conditions de quasi neutralité. Par exemple, en 2010, 90 % des flux proviennent d'une distance comprise entre 0 et 180m depuis le mât de mesure.

Traitement des données

En admettant la pertinence de cette méthode dans les conditions présentées ci-dessus, les données donnent accès aux flux de carbone échangés entre la végétation et l'atmosphère (***NEE***) ainsi qu'aux flux de chaleur latente (***LE***) et de chaleur sensible (***H***). Les données brutes nécessitent un traitement important comprenant une évaluation des erreurs susceptibles d'affecter la mesure de flux, des corrections de ces erreurs et des contrôles de qualité. Le logiciel EdiRe (Robert Clement, © 1999, Université d'Edimbourg, Royaume-Uni) a été utilisé pour procéder à ce traitement et aboutir à la donnée finale du flux moyenné sur 30 min.

Le traitement des données obtenues à Bilos 1 et 2 regroupe plusieurs étapes:

1ers ajustements

- Les pics sur les données brutes sont dans un premier temps détectés. Ces données peuvent correspondre à des bruits électroniques ou physiques, liés à un mauvais fonctionnement des instruments, de l'enregistrement des données ou à des conditions météorologiques défavorables. La démarche repose sur une analyse statistique avec une estimation de l'écart type des distributions des variables instantanées (DESPIKE). Cette analyse ne doit pas être trop stricte de manière à conserver les données qui correspondraient à une situation physique naturelle. Des valeurs interpolées linéairement remplacent ces pics.
- Une double rotation est appliquée au système de coordonnées des trois composantes de la vitesse du vent afin d'aligner la vitesse moyenne $\overline{u}$ avec l'axe x ($\overline{v}$ =0) et d'aligner la vitesse moyenne verticale $\overline{w}$ avec l'axe z ($\overline{w}$ = 0). Cette correction est effectuée dans la mesure où il est souvent difficile d'orienter l'anémomètre sonique de telle sorte que les conditions imposées ci-dessus soient vérifiées dès l'installation sur le site (ROTATION).
- La dérive des capteurs peut contribuer à ajouter des bruits indésirables au signal. Ces bruits sont supprimés en appliquant une détendance linéaire au signal (FILTER DETREND).
- La dérive de l'analyseur a également été prise en compte. Les données de masse volumique obtenues par le LiCor 7500 (Q7500) sont comparées aux données obtenues avec la sonde de référence Vaisala (Qv). Des faisceaux de droite apparaissent sur tout le jeu de données (exemple Figure 2.9, à gauche) dont les équations sont déterminées par période (Exemple Figure 2.9, à droite). Les coefficients de la droite de régression servent à corriger les données d'entrée dans EdiRe.

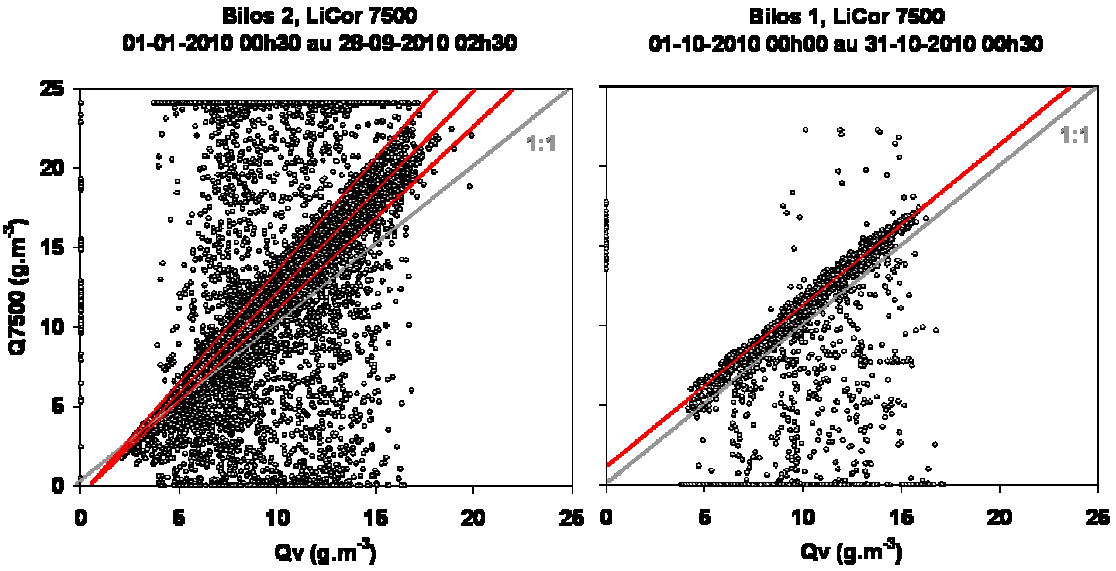


Figure 2. 9 Détermination des coefficients d'étalonnage pour la correction des données brutes

Suppression du décalage temporel

– Bien que nous travaillions avec un système ouvert (LiCor7500) ayant un faible décalage temporel par rapport à l'anémomètre sonique, des corrélations croisées sont appliquées entre la vitesse verticale du vent *w* et les variables d'intérêt (fractions molaires de CO_2 et de H_2O) pour déterminer ce décalage (CROSS CORRELATE). Il est ensuite supprimé pour synchroniser les données des deux instruments (REMOVE LAG).

Calcul des flux

– Les calculs des covariances des signaux, autrement dit des flux d'intérêt, sont effectués (2 CHN STATISTICS)

Application de corrections

– Des corrections en fréquence (Moore, 1986) sont appliquées aux flux sous forme de fonctions de transfert (FREQUENCY RESPONSE). Elles permettent de corriger la sous-estimation des flux due aux pertes dans les hautes fréquences souvent engendrées par le système de mesure (temps de réponse des capteurs, taille des capteurs et distance qui les sépare) ou encore par la fréquence d'échantillonnage.
– Aux flux corrigés NEE et LE sont ajoutées des corrections dites de Webb Pearman Leuning (Webb et al. 1980) qui permettent de corriger les variations de densité de l'air.
– Le flux de chaleur sensible H est également corrigé, en appliquant une correction à la température de l'anémomètre (Schotanus et al. 1993, Aubinet et al. 2000).

Tests de qualité des données

- Test de stabilité de Monin-Obukhov. Il permet de vérifier si la turbulence est suffisamment développée.
- Test de stationnarité suivant Foken et Wichura (1996). La valeur moyenne de la covariance $\overline{w'\rho'}$ calculée sur l'ensemble des données du pas de temps choisi, ici 30min, est comparée à une moyenne des $\overline{w'\rho'}$ calculés sur une période de 5 minutes.
- Tests statistiques. Ces tests de qualité sont réalisés pour repérer d'éventuelles valeurs aberrantes qui n'auraient pas été détectées par EdiRe. Ils consistent à appliquer d'autres tests statistiques sur les séries temporelles tels que les tests de Skewness et Kurtosis, pour caractériser la dissymétrie et la dispersion des distributions en fréquence des variables.

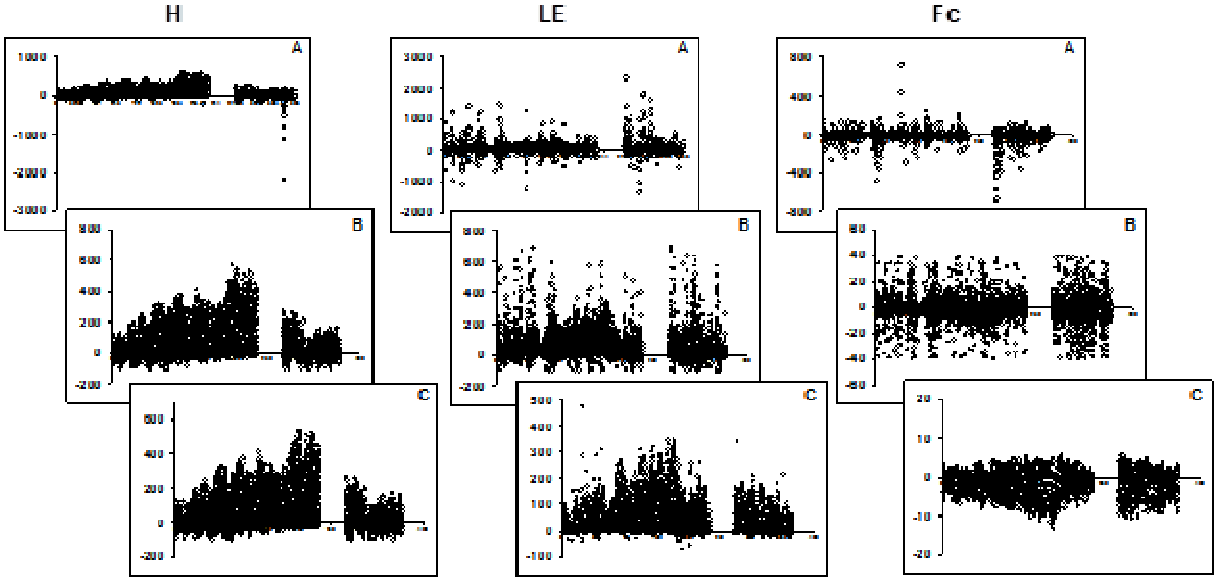


Figure 2. 10 Étapes d'obtention de la donnée finale non gap fillée pour les flux de chaleur sensible, latente et le flux de carbone. Pour chacun des graphes, l'axe des x représente l'année 2010 du 01/01/2010 au 31/12/2010. A- Données brutes : sorties EdiRe. B- Détection des données aberrantes, en dehors des gammes standards. C- Données obtenues après avoir effectué les tests de qualité.

En aval du programme EdiRe, les données sont contrôlées par différents tests :

- Des gammes réalistes de valeurs de ***NEE***, ***H*** et ***LE*** permettent de supprimer certaines données (Figure 2.10 A. B. C).

Après les différents tests de qualité, le jeu de données présente un grand nombre de trous qui viennent s'ajouter aux données manquantes suite à des interruptions de mesures ou encore des défaillances techniques. Le Tableau 2.5 indique le pourcentage de données recueillies en fin de traitements.

Tableau 2. 5 Pourcentage de données retenues en fin de traitement des données.

		BILOS 1			BILOS 2		
		H	***LE***	F_c	***H***	***LE***	F_c
2009							
	n		17519			11760*	
	%	78	64	72	78	47	59
2010							
	n		15966**			17519	
	%	88	63	41	81	60	51

* période du 01/06/2009 au 31/12/2009

** période sans mesure : du 23/08/2010 au 30/09/2010

Remplacement des données manquantes : 'gap-filling'

Dans le but de calculer des cumuls journaliers, saisonniers et annuels des différents flux, le remplacement des données manquantes est une étape indispensable. D'après le Tableau 2.5, la perte de données pour les deux sites confondus atteint 19 %, 41 % et 44 % respectivement pour ***H***, ***LE*** et F_c. Ces valeurs sont comparables à celles obtenues pour un ensemble de 18 sites du réseau EUROFLUX et AmeriFlux (Falge et al. 2001a, b) soient 33 %, 39 % et 35 %, mais les valeurs plus élevées pour *LE* et F_c résultent en partie d'une pluviométrie marquée lors des automnes 2009 et 2010 affectant le système de mesure.

Les données manquantes ont été gap fillées suivant la méthode décrite par Reichstein et al. (2005) dont Moffat et al. (2007) estime être la méthode la plus satisfaisante comparée à un ensemble d'autres méthodes. Un site de traitement est mis à disposition (http://www.bgc-jena.mpg.de/bgc-mdi/html/eddyproc/EddyInputForm.html). En résumé la méthode repose sur une combinaison d'interpolation, de tables de correspondance mobiles et des variations journalières moyennes sur des fenêtres glissantes qui tiennent compte des conditions environnementales.

Les données d'entrée nécessaires sont les suivantes :

- Le rayonnement global
- La température de l'air
- L'humidité relative
- La pression de vapeur saturante
- La température du sol
- La pluie incidente
- La vitesse de friction u^*.

Partitionnement du flux de carbone NEE :

La mesure par 'eddy-covariance' permet l'accès aux flux de carbone, d'une part fixé par la végétation lors de la photosynthèse (***GPP***) et d'autre part émis lors du processus de respiration (R_E).

La donnée obtenue par cette mesure (***NEE***) est en effet partitionnée en ces deux flux. En utilisant le programme statistique SAS (référence) et la procédure NLIN, la méthode adoptée est la suivante :

a. En l'absence de lumière, la respiration de l'écosystème $\boldsymbol{R_E}$ est égale au flux nocturne ***NEE***.
b. un modèle statistique reliant $\boldsymbol{R_E}$ aux conditions météorologiques de nuit est ensuite ajusté

$$R_E = R_{réf} \times Q_{10}^{\frac{T_a - 15}{10}}$$ Equation 2. 4

Où $R_{réf}$ et Q_{10} désignent respectivement la respiration à une température de référence de 10 °C et la sensibilité de la respiration à une augmentation de température de 10°C. Ces paramètres sont ajustés pour trois fenêtres glissantes de 15 jours avec un pas de temps de cinq jours.

c. La respiration totale diurne est obtenue en extrapolant à la journée les flux nocturnes précédemment calculés.

d. ***GPP*** est obtenue par différence entre ***NEE*** de jour et $\boldsymbol{R_E}$ extrapolée en journée.

e. Enfin, un modèle reliant ***GPP*** au rayonnement photosynthétiquement actif est utilisé pour combler les données manquantes sur ***GPP***.

$$GPP = \frac{a_1 \times PAR}{a_2 + PAR}$$ Equation 2. 5

Où a_1 et a_2 désignent respectivement le taux maximal de photosynthèse à saturation de la lumière et le rayonnement incident à la moitié de la photosynthèse maximale. a_1 et a_2 sont également ajustés pour des fenêtres glissantes de 15 jours avec un pas de temps de cinq jours.

ii. Précisions sur les mesures de densité de flux de sève : traitement des données

La transpiration sur les trois sites étudiés a été estimée à partir de la densité de flux de sève, mesurée par la méthode thermique développée par Granier (1985, 1987). Cette technique, largement répandue, repose sur la mesure de la différence de température entre une sonde chauffée par effet Joule à puissance constante et continue, et une deuxième sonde, non chauffée, donnant la température du bois d'aubier, température de référence (Figure 2.11).

Un ajustement de la taille des sondes a été apporté au moment de leur fabrication. Étant donnés les diamètres des troncs des arbres de Bilos 1 et de Bilos 2, les sondes contenant des thermocouples cuivre/constantan montés en opposition mesurent 1 cm de long et présentent un diamètre de 1.5 mm. À Montbartier, les dimensions standard sont utilisées, à savoir 2 cm de longueur et 2 mm de diamètre.

Sur les trois sites, les sondes ont été insérées radialement dans le bois d'aubier, conducteur de la sève brute. La sonde chauffée à une intensité constante de 140 mA (haute) est séparée de la sonde froide (basse) de 12 cm. Chaque système est protégé du rayonnement direct et de la pluie par une feuille isolante en aluminium.

A. **B.** **C.**

Figure 2. 11 Photos du système en place. A- Bilos 1, B- Bilos 2, C- Montbartier, vue du dessous. (Photos INRA-Ephyse)

Après calibration sur plusieurs espèces, la décroissance de l'écart de température entre les deux sondes, mesurée au cours de la journée, est reliée à la densité de flux de sève par la relation empirique (Granier 1987) (Equation 2.6) :

$$Js(t)_i = 118.99 \times 10^{-6} \times \left(\frac{dT_{max,i} - dT_{mes,i}(t)}{dT_{mes,i}(t)} \right)^{1.2} \qquad \text{Equation 2. 6}$$

Avec :

$Js(t)_i$	Densité de flux de sève à l'instant t de l'arbre i	m^3 (eau) m^{-2} (aubier) s^{-1}
$dT_{max,i}$	Ecart maximal de température entre les deux sondes de l'arbre i	mV
$dT_{mes,i}(t)$	Ecart de température mesuré à l'instant t de l'arbre i	mV

Au cours de cette étude, ces coefficients de calibrations ont été conservés, comme tel avait été le cas dans plusieurs études menées sur pins maritimes (Loustau et al. 1990, Granier et Loustau 1994, Loustau et al. 1996, Delzon et al. 2004, Delzon et Loustau, 2005). Pour l'*Eucalyptus gundal* de Montbartier, aucune étude n'existe portant sur la calibration des sondes, et les coefficients standards ont en conséquence été appliqués.

Le calcul de la transpiration journalière s'effectue d'après la relation (Equation 2.7) :

$$T = \sum_{j=0}^{j=48} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(Js(t)_i \times 1000 \right) \times Sa \right) \times 1800 \qquad \text{Equation 2. 7}$$

Avec :

T	Flux de sève à l'instant t	kg $_{(eau)}$ m^{-2} $_{(sol)}$ j^{-1} ou mm j^{-1}
j	Indice de temps	De 1 à 48 demi-heures
i	Indice de l'arbre	De 1 à n=6 arbres
$Js(t)_i$	Densité de flux de sève à la demi-heure t de l'arbre i	m^{3} $_{(eau)}$ m^{-2} $_{(aubier)}$ s^{-1}
Sa	Surface d'aubier au point de mesure (milieu entre les deux sondes du capteur)	m^{2} $_{(aubier)}$ m^{-2} $_{(sol)}$

Deux variables sont spécifiquement déterminées et peuvent être à l'origine d'erreurs sur l'estimation finale de *T* (Equation 2.7):

- dTmax journalier: la différence maximale de température entre les deux sondes correspond théoriquement à une densité de flux de sève nulle, obtenue en fin de nuit. La Figure 2.12 (A) montre la variabilité du dTmax journalier pour chacun des arbres et chacun des sites étudiés après avoir exclu les données aberrantes. Cette variabilité naturelle nécessite de considérer un dTmax non constant du fait de variations des conditions climatiques nocturnes (vent, VPD) mais également de l'évolution des propriétés thermiques du bois. Deux méthodes ont été testées pour la détermination du dTmax journalier :
    - La première méthode consiste en une double régression linéaire sur une période de 10 jours visant à conserver les maxima journaliers sur cette période (Lu et al. 2004). L'inconvénient de cette méthode appliquée aux jeunes pins et l'extrême variabilité de ces maximas sur de très courtes périodes, pouvant entrainer des gaps importants entre les points reliant deux périodes.
    - Un second ajustement a donc été testé pour assurer la continuité entre deux périodes. Le principe consiste à déterminer une courbe enveloppe des dTmax sur une période de 10 jours. Les valeurs de dTmax de chaque journée sont alors déduites de cette courbe. La courbe enveloppe est l'estimation d'une courbe de lissage (fonction 'lowess' sous R), ajustée sur une période de 10 jours et ensuite majorée par la moitié de l'écart-type des dTmax rencontrés sur cette période (Figure 2.12 B). En associant ces deux étapes, nous arrivons à une méthode standardisée de la détermination du dTmax journalier pour les trois sites.

- *Sa* : la surface d'aubier a été déterminée comme étant la moyenne des surfaces d'aubier calculées à la hauteur moyenne des capteurs flux de sève (milieu des deux sondes) ramenée à 1 m^2 de sol.

Suivant le site d'étude, la détermination des sections d'aubier varie et plusieurs hypothèses sont admises :

- A Bilos 1 et Bilos 2 : La section transversale d'un tronc de Pin maritime présente une forme plus ou moins elliptique avec un bois de cœur souvent excentré (Polge et Illy, 1967). Dans le cas des jeunes arbres de Bilos 1 et 2, il est admis que le bois de cœur est encore inexistant (Porté 1999, Pinto et al. 2004, observations terrain) et que l'écorce présente une épaisseur moyenne de 1 mm (observations terrain). Le calcul de la section d'aubier est ainsi simplifié en considérant par ailleurs une forme circulaire. La surface d'aubier à la hauteur moyenne de mesure a été calculée par période à partir des mesures ponctuelles des diamètres à 1.30 m réalisées au cours des deux dernières campagnes présentées dans le paragraphe suivant (février 2010, janvier 2011), soit sur 2164 arbres à Bilos 1 et de 50 à 80 arbres entre février 2010 et janvier 2011 à Bilos 2. Les mesures obtenues par les microdendromètres ont également permis de recalculer une surface terrière à la fin de l'été et de l'automne 2010 (Tableau 2.6).

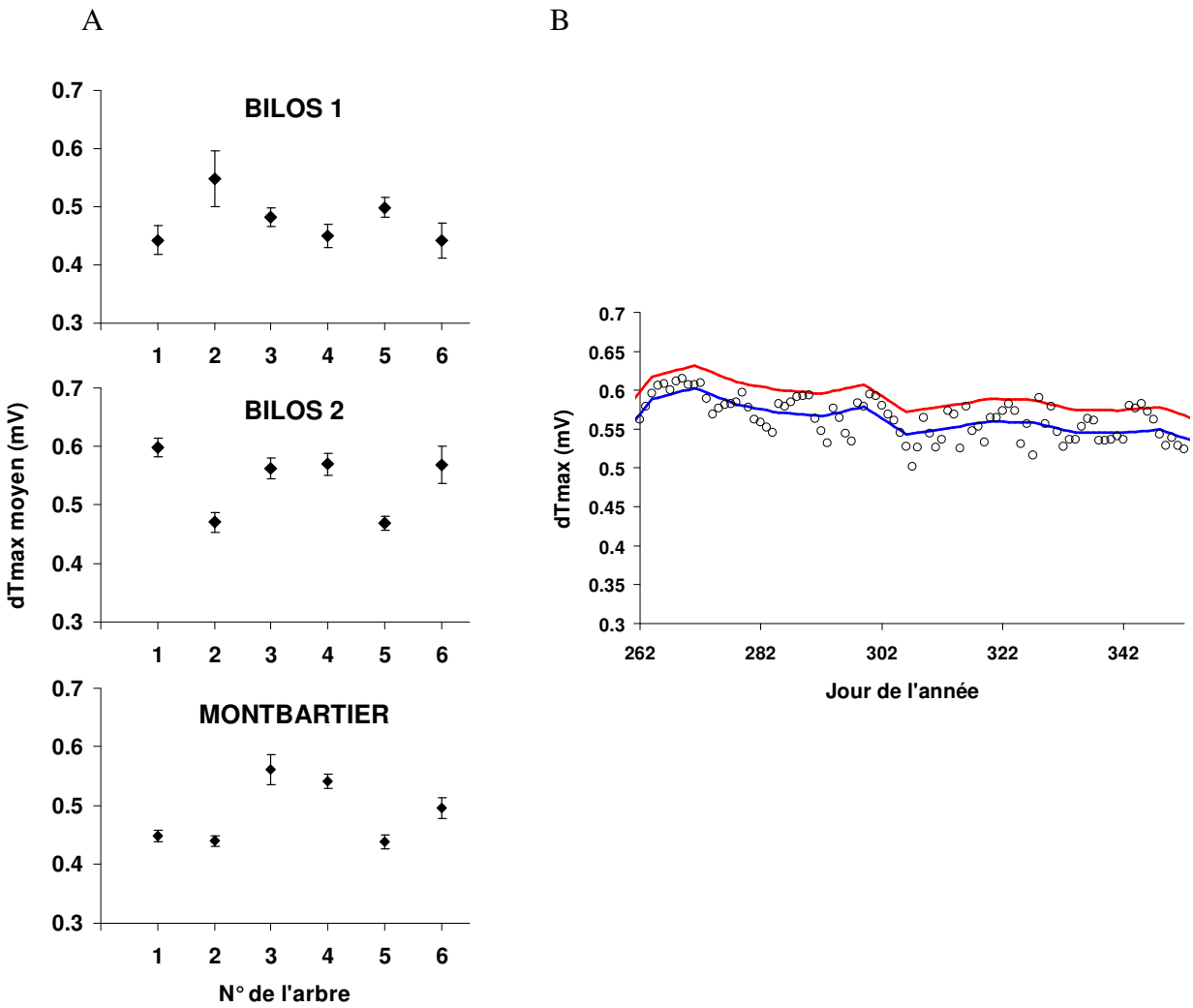


Figure 2. 12 A- Variations du dTmax moyen et écart type associé, pour la période 2009-2010. B- Exemple de détermination du dTmax journalier (Bilos 1, arbre n°2) entre les jours 162 et 366 (2010). dTmax journalier (○), lissage sur une période de 10 jours ( ), dTmax final ( ).

Tableau 2. 6 Détermination des surfaces d'aubier utilisées dans le calcul de la transpiration à Bilos 1 et Bilos 2 entre Mai 2009 et Avril 2011.

Périodes considérées	Mesures choisies pour l'estimation	*Sa* estimé $m^2_{(aubier)}$ $m^{-2}_{(sol)}$	
		Bilos 1	Bios 2
Mai 2009 - Avril 2010	Campagne de Février 2010	0.000244087	0.00058224
Mai 2010 - Aout 2010	Microdendromètre, mesure au 30/06/2010	0.000356449	0.000798192
Sept. 2010 - Oct. 2010	Microdendromètre, mesure au 30/11/2010	0.000375373	0.000811954
Nov. 2010 - Avril 2011	Campagne de Janvier 2011	0.000411336	0.00083983

- *À Montbartier* : Les observations terrain permettent d'approximer la surface d'aubier à un disque comme l'atteste la photo ci-contre prise sur le site de Montbartier. Cependant ces simples observations ne permettent pas d'estimer la surface de bois de cœur présente dans ces jeunes arbres et aucune étude n'avait encore été menée sur l'espèce considérée. La variabilité existante entre les différentes espèces d'*Eucalyptus* nous a incités à échantillonner 15 arbres pour déterminer la section de bois de cœur et d'aubier. Une dizaine de rondelles ont été prélevées à 1.30 m. Trois méthodologies ont été utilisées pour distinguer les deux parties : immersion totale dans l'eau (Figure 2.13 A), injection d'iode (Figure 2.13 B) et injection d'une solution de chlorure de fer ($FeCl_3$, Figure 2.13 C). Les deux méthodes chimiques n'ont pas apporté une meilleure estimation de la surface d'aubier. De cette expérimentation menée conjointement avec le FCBA, il ressort une surface d'aubier à 7 ans de 65% avec 3 années d'aubier. Sous l'hypothèse d'un nombre constant de cernes d'aubier, nous avons pu extrapoler la valeur à 5 ans (soit 2 années de bois de cœur), estimée entre 85 et 90%.

A. B. C.

Figure 2. 13 Détermination de la surface de bois de cœur et d'aubier sur rondelle de 7 ans. A. eau, B. iode, C. Chlorure de Fer III (Photos FCBA).

Une proportion de 15 % de la section du tronc à la hauteur du capteur de flux de sève a donc été attribuée au bois de cœur pour le peuplement de Montbartier dont l'âge évolue de 5 à 7 ans pendant la période d'étude. Ces résultats sont finalement proches de ceux obtenus sur *E. globulus* (Gominho et Peirera 2000, Morais et Peirera, 2007, 2011). La surface d'aubier à la hauteur moyenne de mesure a par ailleurs été calculée par période à partir des mesures ponctuelles des diamètres à 1.30 m réalisées au cours des deux dernières campagnes présentées dans le paragraphe suivant (juillet 2010, janvier 2011), soit sur 287 arbres (Tableau 2.7).
Nous tenons à préciser que cette expérimentation a été menée tard dans l'avancée de ce travail et que seulement 15 % a été utilisée pour la période d'étude. En toute rigueur, il aurait fallu tenir compte de la forte évolution associée à la duraminisation chez cette espèce d'*Eucalyptus*. Nous admettrons les résultats présentés en tenant compte de l'incertitude associée à cette mesure.

Tableau 2. 7 Détermination des surfaces d'aubier utilisées dans le calcul de la transpiration à Montbartier entre Mai 2009 et Avril 2011.

Périodes considérées	**Mesures choisies pour l'estimation**	***Sa* estimé** m^2 **(aubier)** m^{-2} **(sol)** **Montbartier**
Aout 2009 - Avril 2010	Mesure à l'installation du capteur 09/2009	0.000795342
Mai 2010 - Aout 2010	Campagne de Juillet 2010	0.00098262
Sept. 2010 – Nov. 2010	Microdendromètre, mesure au 30/11/2010	0.00100594
Déc. 2010 - Avril 2011	Campagne de Janvier 2011	0.00101064

2.3 Les outils de modélisation

2.3.1 MAESTRA

Le modèle MAESTRA (Medlyn 2004) est une version mise à jour et renommée du modèle initialement développé par Wang (1988) sous le nom de MAESTRO (puis validé par Wang and Jarvis (1990b). Il s'agit d'un modèle à base de processus biophysiques estimant le rayonnement absorbé par chaque couche de la structure du couvert, puis la transpiration et la photosynthèse pour des couronnes d'arbres individuels. Une description détaillée du modèle est disponible à l'adresse suivante : http://www.bio.mq.edu.au/maestra/. Par ailleurs l'évolution du code MAESTRO et des processus mis en jeu est décrite dans Medlyn, 2004. Quelques processus sont décrits ci-dessous afin de bien intégrer les mécanismes mis en jeu. Le pas de temps considéré dans ce modèle est l'heure ou la journée et l'échelle spatiale découle d'une représentation tridimensionnelle du couvert. La parcelle considérée est constituée d'un ensemble d'arbres. Chacun de ces arbres est décrit par sa position dans la parcelle (x,y) et par les dimensions de sa structure suivant les différents axes (x,y,z). La couronne est décomposée en plusieurs couches horizontales, chacune d'elle étant divisée en un nombre défini de points de grille de volume égal. Chaque couche est décrite par des propriétés optiques et physiologiques, tels que la transmittance et la réflectance des feuilles dans les 3 domaines spectraux (PAR, PIR et IRT), le nombre de classes d'âge considérées, la proportion de feuillage pour chaque classe, l'angle foliaire, puis des paramètres photosynthétiques associés aux différentes classes d'âge. Le modèle permet de calculer les flux pour un arbre cible ou pour tous les arbres de la parcelle si on le souhaite. Les arbres environnant l'arbre cible interviennent dans la transmission du rayonnement incident à travers des effets d'ombrage.

Le rayonnement intercepté dans le photosynthétiquement actif, le proche infrarouge et l'infrarouge thermique est calculé suivant le modèle de transfert radiatif développé par Norman and Welles (1983). Les rayonnements direct et diffus sont calculés séparément. Le rayonnement absorbé à chaque point de grille pilote le calcul de la photosynthèse et de la transpiration. La conductance stomatique est calculée suivant plusieurs approches possibles, soit type Jarvis (1976), soit type Ball-Berry. La photosynthèse est calculée suivant le modèle de Farquhar et al. (1980) et la transpiration en chaque point de grille est déterminée par l'équation de Penman Monteith puis sommée sur tous les points de grille.

2.3.2 GRAECO

Le modèle GRAECO (GRowth, Allocation and ECOphysiological process model) est un modèle en constante évolution depuis le début de son développement en 1991 au laboratoire EPHYSE (anciennement Laboratoire d'Ecophysiologie et de Nutrition, LEN). L'objectif premier était de

construire un modèle simulant les processus écophysiologiques dans le cas spécifique du massif des Landes de Gascogne caractérisé par ses peuplements monospécifiques de Pins maritimes.

Les transferts radiatifs au sein du couvert et les transferts hydriques dans le continuum sol-peuplement-atmosphère y sont décrits. Pour l'aspect carbone, l'immobilisation du carbone par les strates du couvert, les processus de respiration (autotrophes et hétérotrophes), la distribution du carbone entre les arbres du peuplement et l'allocation du carbone entre les différents compartiments de l'arbre (aérien et souterrain) sont considérés. Enfin, pour chaque arbre individuel, les croissances primaire et secondaire (hauteur et circonférence du tronc) sont estimées. Le modèle a été paramétré, au cours de son évolution, pour un peuplement de Pins maritimes évoluant en lande humide à partir d'un ensemble d'expérimentations (Loustau et al. 1992a, b, Granier et Loustau 1994, Porté et Loustau 1998, Bosc 1999, Berbigier et Bonnefond 1995, Porté 1999, Porté et Loustau 2001, Porté et al. 2002). La robustesse et la fiabilité du modèle ont déjà été évaluées et confrontées à d'autres modèles à partir de longues séries temporelles de flux de carbone et d'eau et des données de croissance (Berbigier et al. 2001, Medlyn et al. 2002a et 2002b, Loustau et al. 2005, Loustau 2010)

L'échelle spatiale est le peuplement où l'écosystème se décompose en trois strates : le sol, le sous-bois (spécifiquement associé à un peuplement pur de *Molinia coerulea Moench*) et l'arbre, lui-même décomposé en plusieurs compartiments (tronc, branches, écorce, aiguilles et bourgeons et racines). L'approche dite grosse feuille (« big leaf ») est utilisée pour décrire les transferts hydriques (évapotranspiration) et la conversion lumineuse. Ogée (2000) montre des gradients verticaux des différentes variables climatiques (température, humidité, concentration en CO_2) faibles dans un peuplement adulte de Pins maritimes, pouvant justifier cette approche. L'Annexe 2 présente le schéma général de GRAECO.

Chapitre 3

Caractérisation des échanges d'énergie, d'eau et de carbone de deux jeunes peuplements de Pins maritimes de structures contrastées

Plan du chapitre

Avant-propos 52

Chapitre 3. Caractérisation des échanges d'énergie, d'eau et de carbone de deux jeunes peuplements de Pins maritimes à structures contrastées 53

3.1 Introduction 53

3.2 Matériel et méthodes 55

3.2.1 Sites expérimentaux 55
3.2.2 Mesures météorologiques 56
3.2.3 Température, humidité et flux de chaleur dans le sol 57
3.2.4 Densité de flux de sève et croissance radiale 57
3.2.5 Flux turbulents de chaleur, vapeur d'eau et CO_2 et traitement des données 58
3.2.6 Fermeture du bilan d'énergie 58
3.2.7 Bilan hydrique 59
3.2.8 Échanges net de carbone de l'écosystème 59
3.2.9 Mesures de la biomasse du sous-bois 60

3.3 Résultats 62

3.3.1 Conditions météorologiques 62
3.3.2 Bilan d'énergie 62
3.3.3 Fermeture du bilan d'énergie 64
3.3.4 Répartition du flux net d'énergie entre *H* et *LE* 65
3.3.5 Bilans hydriques saisonnier et annuel 66
3.3.6 Flux et bilan de carbone 69

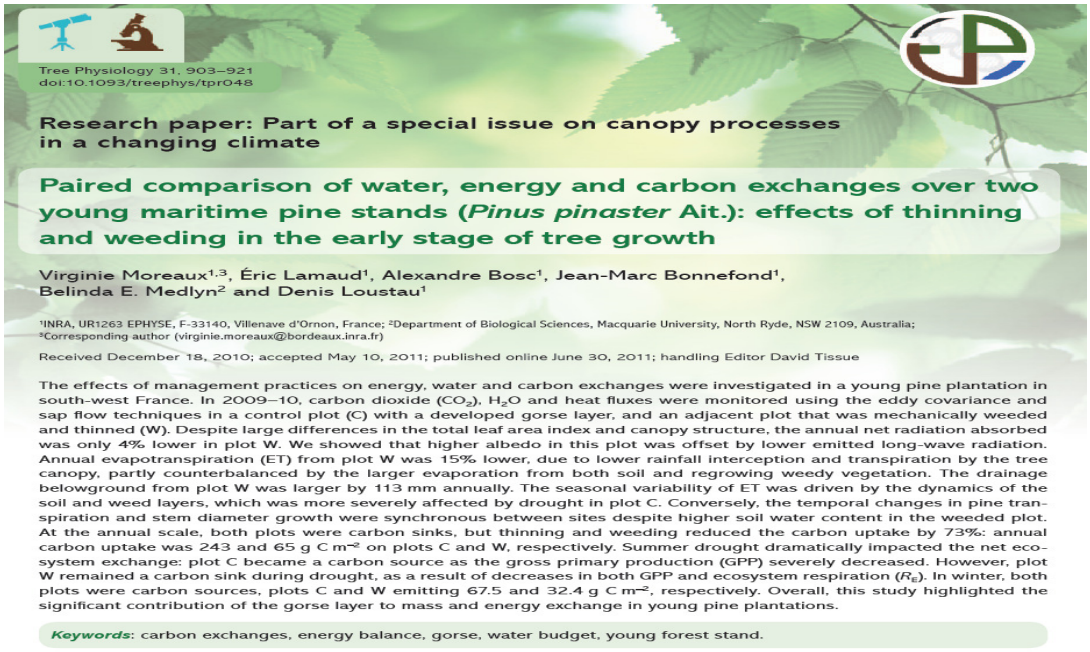
3.4 Discussion 72

3.4.1 Fermeture du bilan d'énergie 72
3.4.2 Modification dans le transfert radiatif 72
3.4.3 Bilan hydrique 74
3.4.4 Échanges de carbone 76

3.5 Conclusion 78

Avant-propos

Le présent Chapitre est une traduction d'un article paru dans la revue *Tree Physiology* et d'une communication orale effectuée à *Hobart,* Tasmanie, lors d'une conférence *Andrew Oliphant* du *Workshop « Canopy Processes »* de l'IUFRO.



Tree Physiology 31, 903–921
doi:10.1093/treephys/tpr048

Research paper: Part of a special issue on canopy processes in a changing climate

Paired comparison of water, energy and carbon exchanges over two young maritime pine stands (*Pinus pinaster* Ait.): effects of thinning and weeding in the early stage of tree growth

Virginie Moreaux[1,3], Éric Lamaud[1], Alexandre Bosc[1], Jean-Marc Bonnefond[1], Belinda E. Medlyn[2] and Denis Loustau[1]

[1]INRA, UR1263 EPHYSE, F-33140, Villenave d'Ornon, France; [2]Department of Biological Sciences, Macquarie University, North Ryde, NSW 2109, Australia; [3]Corresponding author (virginie.moreaux@bordeaux.inra.fr)

Received December 18, 2010; accepted May 10, 2011; published online June 30, 2011; handling Editor David Tissue

The effects of management practices on energy, water and carbon exchanges were investigated in a young pine plantation in south-west France. In 2009–10, carbon dioxide (CO_2), H_2O and heat fluxes were monitored using the eddy covariance and sap flow techniques in a control plot (C) with a developed gorse layer, and an adjacent plot that was mechanically weeded and thinned (W). Despite large differences in the total leaf area index and canopy structure, the annual net radiation absorbed was only 4% lower in plot W. We showed that higher albedo in this plot was offset by lower emitted long-wave radiation. Annual evapotranspiration (ET) from plot W was 15% lower, due to lower rainfall interception and transpiration by the tree canopy, partly counterbalanced by the larger evaporation from both soil and regrowing weedy vegetation. The drainage belowground from plot W was larger by 113 mm annually. The seasonal variability of ET was driven by the dynamics of the soil and weed layers, which was more severely affected by drought in plot C. Conversely, the temporal changes in pine transpiration and stem diameter growth were synchronous between sites despite higher soil water content in the weeded plot. At the annual scale, both plots were carbon sinks, but thinning and weeding reduced the carbon uptake by 73%: annual carbon uptake was 243 and 65 g C m^{-2} on plots C and W, respectively. Summer drought dramatically impacted the net ecosystem exchange: plot C became a carbon source as the gross primary production (GPP) severely decreased. However, plot W remained a carbon sink during drought, as a result of decreases in both GPP and ecosystem respiration (R_E). In winter, both plots were carbon sources, plots C and W emitting 67.5 and 32.4 g C m^{-2}, respectively. Overall, this study highlighted the significant contribution of the gorse layer to mass and energy exchange in young pine plantations.

Keywords: carbon exchanges, energy balance, gorse, water budget, young forest stand.

La synthèse (Chapitre 7) proposera une extension de cette étude en incluant les flux sur la période entière 01/01/2009-31/12/2010 et les données antérieurs disponibles sur ce site.

Chapitre 3. Caractérisation des échanges d'énergie, d'eau et de carbone de deux jeunes peuplements de Pins maritimes à structures contrastées

3.1 Introduction

En Europe, la gestion des forêts (coupe rase et éclaircie) représente la perturbation principale dans le cycle de vie d'une forêt (Janssens et al. 2001, Kowalski et al. 2003). En réponse à une demande croissante en bois énergie, les systèmes de cultures forestières se développent, et particulièrement dans la forêt des Landes de Gascogne, dans le Sud Ouest de la France, dont le climat et la structure foncière sont propices à un tel développement. Dans cette région, les futurs scénarios de gestion incluent des plantations forestières destinées à la production intensive de bois-énergie (Lesgourgues et Drouineau, 2009). Des plantations mixtes, comprenant des espèces natives ou invasives, fixatrices d'azote sont envisagées. Ainsi, la question de rendre optimale la gestion des forêts pour lesquelles la production de biomasse serait utilisée dans le secteur énergétique reste toujours d'actualité. Il est probable que ces systèmes ne soient pas gérés dans un but de séquestrer du carbone, cependant, ces forêts peuvent largement contribuer à l'effort entrepris sur l'atténuation des changements globaux en réduisant les émissions de carbone du secteur énergétique (Nabuurs et al. 2008). Par conséquent, la stratégie à adopter pour la gestion sylvicole des éclaircies ou encore du contrôle de la végétation accompagnatrice ou du sous-bois, prend une place importante lorsque l'on considère le stockage de carbone d'une révolution complète. Parallèlement, les espèces fixatrices d'azote peuvent jouer un rôle fertilisant significatif dans les jeunes peuplements forestiers où les sols présentent une forte déficience en azote (Chalk 1998). Cependant, ces espèces peuvent représenter de véritables compétiteurs pour les arbres envers les autres ressources telles que lumière et eau et impacter négativement la croissance des arbres (Chang et Preston 2000). En ce sens, la question reste ouverte de savoir si ces espèces fournissent un bénéfice net pour la croissance forestière.

Les écosystèmes forestiers à courte rotation sont caractérisés par l'importance relative dans la rotation de la période précédant la fermeture du couvert, pendant laquelle la structure spatiale du couvert est hétérogène. En France, et particulièrement dans les Landes de Gascogne, cette phase est caractérisée par la coexistence des arbres poussant avec une strate développée d'herbacées ou de ligneux couvrant jusqu'à 75% de la surface. La destruction mécanique de cette végétation adventice a généralement lieu cinq ans après la plantation ou le semis (Lesgourgues et al. 1997). Ce stade correspond donc à une phase où le bilan de carbone annuel est proche de la neutralité (Magnani et al. 2007) alors que les couches superficielles de l'humus et du sol se reconstituent quelques années après la préparation du site et la plantation ou le semis. Durant cette période, la contribution respective du sol et de la végétation aux échanges atmosphériques de masse et d'énergie changent rapidement de façon interdépendante. Ainsi, la contribution des arbres est d'abord négligeable au stade de la plantation ou du semis, mais devient progressivement dominante devant celle du sol et de la végétation adventice entre 6

et 10 ans. La nature de l'espèce ou des espèces considérées pour la végétation adventice est importante, tout particulièrement si elles présentent l'avantage d'être naturellement fixatrices d'azote. Cependant, la réponse environnementale de ces jeunes peuplements dont plusieurs espèces coexistent, avec ou sans espèces fixatrices d'azote, est encore mal connue, conduisant à une incertitude quant à leur gestion optimale.

Dans la forêt des Landes, et comme nous l'avons souligné dans l'introduction générale (Chapitre 1), de nombreuses études ont été menées pour déterminer les échanges d'énergie, d'eau et de carbone, mais relativement peu ont été conduites sur peuplements jeunes (Kowalski et al. 2004, Stella et al. 2009). La majorité de ces études ont été conduites en peuplements adultes (Berbigier et al. 1991, Lamaud et al. 2001, Ogée et al. 2001, Bosc et al. 2003, Medlyn et al. 2002a, Delzon et al. 2005, Jarosz et al. 2008, 2009). Dans d'autres pays, un certain nombre d'études a permis d'analyser la réponse des écosystèmes forestiers à des perturbations telles que feux (Dore et al. 2010) ou éclaircies et coupes rases (Misson et al. 2005, 2007, Dore et al. 2010, Sun et al. 2010). Cependant, peu se focalisent sur les peuplements jeunes et leur réponse aux pratiques culturales telles que suppression de la végétation adventice ou dépressage (éclaircies dans les très jeunes âges après semis). Ce changement de structure du couvert végétal entre 0 et 6-10 ans a un effet important sur les échanges de carbone et d'eau dans le sol et l'atmosphère (Simonin et al. 2007). Comparant des surfaces après coupe rase, des plantations juvéniles et adultes, Kowalski et al (2003, 2004) ont montré que cette phase post- perturbation (préparation du sol), est particulièrement importante dans le cycle du carbone, le bilan d'énergie et les échanges de gaz à effet de serre. Entre le stade plantation, et la phase de fermeture du couvert, le rayonnement était accru de 50% avec une réduction de l'albédo de moitié et l'évapotranspiration totale augmentait de 20% à 50%. La tendance sur les échanges nets de carbone s'inverse : le jeune peuplement de 1 - 2 ans agit comme une source de carbone, pour devenir rapidement un puits de carbone à la fermeture du couvert qui intervient entre 1-2 ans (taillis de chêne méditerranéen) à plus de 40 ans (pinède sylvestre en Finlande) (Magnani et al. 2007).

La répartition des échanges de masse et d'énergie entre la végétation du sous- bois et les Pins a également été étudiée en peuplement adulte (Berbigier et al. 1991, Lamaud et al. 2001, Ogée et al. 2001, Misson et al. 2007, Jarosz et al. 2008). Ces études ont montré que l'organisation de la structure du couvert entre le sous-bois et la canopée des arbres pins influence l'ensemble des composantes des flux d'énergie et de masse, tels que transferts de chaleur et fixation de carbone.

Ce chapitre a pour but d'étudier les effets du dépressage et de la suppression de la végétation adventice sur les bilans d'énergie, d'eau et de carbone de l'écosystème pendant la phase juvénile de la croissance des arbres. Afin de répondre à ces objectifs, les échanges de masse et d'énergie de deux jeunes peuplements forestiers limitrophes ont été étudiés pendant un an (juin 2009 - mai 2010). La première parcelle est couverte d'un tapis continu d'ajonc nain évoluant entre les rangs de Pin maritime. Dans la seconde, les adventices ont été mécaniquement supprimés et les pins maritimes dépressés. Nous avons analysé les variations des caractéristiques biophysiques et des échanges de carbone aux échelles saisonnière et annuelle en réponse aux conditions climatiques. L'effet de la présence d'un couvert d'ajoncs nains et autres espèces accompagnatrices herbacées ou ligneuses sur ces échanges est évalué.

Plusieurs hypothèses sont examinées :

i- Le changement dans la structure du couvert dû au débroussaillement et au dépressage diminue l'énergie disponible, autrement dit le rayonnement net à la surface ;

ii- **L**a plus faible surface foliaire après débroussaillement et dépressage augmente l'eau disponible pour les arbres, ce qui peut atténuer l'impact d'un éventuel déficit hydrique en été sur la croissance des arbres ;

iii- Enfin, étant donné qu'à cet âge les jeunes peuplements présentent un bilan de carbone annuel proche de la neutralité, le débroussaillement et le dépressage auraient pour effet de convertir le peuplement en source nette de carbone.

3.2 Matériel et méthodes

3.2.1 Sites expérimentaux

L'étude a été réalisée sur le site de Bilos, situé dans la forêt des Landes en commune de Salles (40) à environ 50 km au sud-ouest de Bordeaux, France (44 ° 29'37 .99 "N; 0 ° 57'21 .9" W) et présenté dans le Chapitre 2. Nous en rappelons les caractéristiques. Le climat est tempéré avec une influence maritime. La température moyenne annuelle relevée pour la période 1950-2000 et les précipitations sont respectivement de 13°C et 977 mm. Le site couvre une zone de 1 km x 0,6 qui est gérée selon les pratiques de gestion standard pour la région (Lesgourgues et al. 1997). Le sol est un podzol sableux avec un horizon B induré discontinu, localement appelé *alios*, autour de 70 cm de profondeur qui limite l'extension des racines. Les caractéristiques du site et du climat qui prévalent sont résumées dans le Tableau 3. 1.

Après la coupe rase en 1999, le site a été labouré sur une profondeur de 30 cm, puis fertilisé avec 60 kg P ha^{-1} en 2001. Les mesures de quantité de mouvement, de flux de chaleur sensible et de chaleur latente ainsi que les flux de dioxyde de carbone ont été opérées par la technique des flux turbulents depuis 2000. En juillet 2004, le site a été divisé en deux moitiés, puis semé de graines de pins maritimes (*Pinus pinaster* Ait.) sur des rangs espacés de 4 m, à un an d'intervalle en 2004 pour la première moitié et 2005 pour la moitié restante. En novembre 2008, la plus âgée des deux parcelles (parcelle W comme *weeded*) a été dépressée et la végétation envahissante supprimée alors que la plus jeune des deux (parcelle C comme *control*) n'a subi aucun traitement. Suite au dépressage et au débroussaillement, la surface de la parcelle W est recouverte par les débris ligneux. La végétation adventice, notamment les ajoncs et d'autres espèces herbacées comme les bruyères, ont spontanément recolonisé l'inter-rang. Une deuxième intervention mécanique a été effectuée en novembre 2009 afin de restaurer le contraste de structure entre les deux parcelles. Dans la seconde parcelle, dénommée C, une strate bien développée, couvrait la surface du sol essentiellement composée d'ajoncs (*Ulex minor*, Roth), bruyère (*Calluna vulgaris* L.) et autres plantes herbacées (*Molinia coeruela* M., *Phytolacca americana* L.). A la suite des deux interventions sylvicoles, la parcelle W présente une surface terrière G diminuée

de plus de la moitié par rapport à la parcelle C (2.34 contre 5.26 m^2 ha^{-1}). Les traitements ont amené aussi une réduction de LAI d'environ 1.9 m^2 m^{-2} en été et d'environ 2.4 m^2 m^{-2} à l'hiver 2009.

Au cours de l'année 2009, toutes les mesures effectuées sur la parcelle W ont été dupliquées sur la parcelle C. Spécialement dans le cadre de cette étude, les deux parcelles ont été équipées pour le suivi de la densité de flux de sève, l'interception de la pluie et la croissance secondaire des arbres par microdendromètres automatisés. Deux campagnes de mesures annuelles (février 2009 et janvier 2010) ont permis d'inventorier le diamètre de l'arbre à 1.30 m, la hauteur de l'arbre, la hauteur de la couronne et son extension radiale maximale.

3.2.2 Mesures météorologiques

Sur la parcelle W, le rayonnement incident de courte longueur d'onde ($SW\downarrow$) a été mesuré par un pyranomètre CE180 (Cimel Electronique, Paris, France). Un pyrgéomètre CGR2 (Kipp & Zonen) a également été utilisé pour mesurer le rayonnement incident et le rayonnement réfléchi dans le domaine des grandes longueurs d'onde ($LW\downarrow$ et $LW\uparrow$ respectivement). Le rayonnement photosynthétiquement actif incident (PAR) a été mesuré en utilisant un capteur de rayonnement BF3H (Delta-T Devices, Cambridge, Royaume-Uni), et le PAR réfléchi a été mesuré avec un capteur SKP PAR 215 (Skye Instruments, Royaume-Uni). La parcelle C a été équipée d'un pyranomètre pour mesurer le rayonnement de courte longueur d'onde ascendant ($SW\uparrow$) et d'un capteur SKP 215 pour le PAR réfléchi. Sur chaque parcelle, le rayonnement net (R_n) a été mesuré avec un pyrradiomètre NrLite (Kipp & Zonen, Delft, Pays-Bas). Un radiomètre CNR4 (Kipp & Zonen, Pays-Bas), a été utilisé a posteriori pour inter-comparer les deux NrLite. Les quatre composantes du bilan d'énergie ont été mesurées avec ce capteur.

La pression atmosphérique a été mesurée sur la parcelle W avec un capteur de pression barométrique CS105 (modèle PTB101B Vaisala, Helsinki, Finlande). La température de l'air et l'humidité ont été mesurées à 4 m et 6 m hauteur à l'aide d'une sonde CS215 non ventilée (Campbell Scientific, Logan Utah, Etats-Unis) sur les deux parcelles, respectivement autour de 1.50 m et 3.50 m au-dessus de la hauteur des arbres. Les précipitations au-dessus de la canopée (P_i) ont été mesurées avec des pluviomètres ARG100 (Campbell Scientific, Logan Utah, Etats-Unis) sur la parcelle W et Munro sur la parcelle C. La fraction atteignant le sol a été déterminée en utilisant des gouttières en zinc en forme de V conçues pour ce site (Moreaux et al. 2009c). L'angle V de réception de la gouttière approxime 60°. La longueur de chaque gouttière est de 2 m pour une largeur de 15 cm (parcelle W) ou 5 cm (parcelle C). Ces gouttières ont été mises en place en dessous de la canopée et sont collectées par des pluviomètres automatiques (ARG100). Sur la parcelle W, deux systèmes croisés et deux systèmes linéaires composés de quatre gouttières ont été installés dans l'inter-rang et le rang, respectivement. Sur la parcelle C, où le couvert est continu, nous avons installé deux systèmes composés de 6 gouttières (4 gouttières le long des rangs + 2 gouttières perpendiculaires aux rangs). Pour les deux parcelles, les gouttières ont été inclinées avec un angle de 5°. Ce système dispose d'une surface réceptrice importante si bien que le risque de perte d'eau par évaporation dans la gouttière doit être pris en compte. Cette perte a été estimée à l'aide d'un système de référence installé dans un espace ouvert à proximité de notre

laboratoire et des corrections ont été appliquées pour les mesures sur site à partir de cette référence. La différence entre P_i et la pluie atteignant le sol donne une estimation de l'interception des précipitations par le couvert, *I*. Toutes les données météorologiques ont été mesurées toutes les 10s et moyennées toutes les demi-heures puis enregistrées par différentes centrales d'acquisition (CR1000, CR23X et CR10X, Campbell Scientific, Logan Utah, Etats-Unis).

3.2.3 Température, humidité et flux de chaleur dans le sol

Sur la parcelle W, la teneur en eau du sol (*SWC* en mm) a été déterminée en utilisant des sondes CS615 (Campbell Scientific, Logan, Utah, Etats-Unis) disposées selon un profil vertical de 6 profondeurs dans 4 emplacements : deux profils à 0.15 (×2), 0.30, 0.45, 0.60 et 0.80 m de profondeur et deux profils à 0.15 (×2) 0.30 (×2) 0.45, et 0.60 m, limite imposée en raison de la présence d'une couche d'alios. Pour la parcelle C, la teneur en eau du sol a été déterminée en utilisant également des sondes CS615 (Campbell Scientific, Logan, Utah, Etats-Unis) selon un profil de 4 profondeurs : 0.10, 0.20, 0.45 et 0.80 m répété à deux emplacements. Les deux parcelles ont par ailleurs été équipées de quatre plaques HFP01SC (Hukseflux capteurs thermiques, Delft, Pays-Bas) afin de mesurer les flux de chaleur dans le sol à 0.05 m de profondeur.

3.2.4 Densité de flux de sève et croissance radiale

Nous avons utilisé la méthode de dissipation thermique de Granier (1985, 1987) pour mesurer la densité de flux de sève dans l'arbre, telle que décrite dans le Chapitre 2. Le système a été installé sur six arbres représentatifs de la distribution en fréquence du diamètre à 1.30 m et de la hauteur de 2164 arbres échantillonnés. L'équation originale concernant la différence de température entre les sondes à la sève de flux a été appliquée (Granier 1985). Les capteurs n'ont pas été chauffés pendant plusieurs périodes afin d'estimer l'influence potentielle des gradients thermiques naturels.

La densité de flux de sève moyenne a ensuite été convertie en transpiration (T_p en $kg_{(H2O)}\ m^{-2}_{(sol)}\ d^{-1}$) en utilisant la densité du peuplement (nombre d'arbres $m^{-2}_{(sol)}$) et la section d'aubier à 1.3 m de hauteur ($m^2_{(aubier)}\ arbre^{-1}$). Nous avons négligé le temps de transfert de l'eau entre le niveau de mesure et l'évaporation au niveau des feuilles, celui-ci devant être inférieur à 30 mn dans le cas d'arbres de cette dimension. L'hypothèse d'un profil radial du flux de sève non uniforme peut introduire un biais systématique dans ce calcul, en particulier pour des peuplements résineux adultes (Clearwater et al. 1999, Delzon et al. 2005). Toutefois, nous avons supposé que pour les tiges de Pins jeunes, tout l'aubier est actif sans gradient radial significatif de la densité de flux de sève. Par conséquent, aucune correction pour d'éventuels gradients radiaux n'a été appliquée.

Dans chaque parcelle, la croissance radiale des tiges d'arbres a été mesurée à l'aide de microdendromètres installés sur les six arbres échantillonnés pour les mesures de débit de sève. Ces microdendromètres utilisent un capteur résistif linéaire à haute résolution en position (RS317-780,

Radiospares, France), monté sur un cadre rigide attaché au tronc (Moreaux et al. 2010). Ces mesures ont commencé fin mars 2010. Les hauteurs de mesure sont données dans le Tableau 2.2 (Chapitre 2).

3.2.5 Flux turbulents de chaleur, vapeur d'eau et CO_2 et traitement des données

La vitesse du vent a été mesurée dans les trois directions sur les deux sites avec un anémomètre sonique (modèle 1210R3, Gill Instruments, Lymington, Royaume-Uni) et la concentration en vapeur d'eau et en CO_2 avec un analyseur de gaz CO_2/H_2O à infrarouge à circuit ouvert (IRGA; modèle Li7500, LiCor Inc Lincoln, NE, États-Unis) au sommet d'une tour de 6 m, à environ 3.5 m au-dessus de la canopée. Les deux tours sont séparées d'une distance de 580 m. Nous avons calculé le footprint de chaque système en suivant la méthode utilisée dans Kljun et al. (2004) en tenant compte de la direction moyenne du vent sur les deux sites (Tableau 3. 1) et les paramètres de turbulence (cf. Chapitre 2). Nous avons déterminé que 90% du flux mesuré au niveau de la tour proviennent des 180 m depuis la tour dans la direction du vent. Cela suggère que l'étude s'effectue dans les conditions appropriées pour lesquelles les zones d'influence ne se chevauchent pas. Le logiciel Tourbillon (INRA EPHYSE, Villenave d'Ornon, France) a été utilisé pour l'acquisition des données obtenues depuis l'anémomètre et l'analyseur avec une fréquence de 20 Hz. Le logiciel EdiRe (Robert Clement, © 1999, Université d'Edimbourg, Royaume-Uni) a été utilisé pour la détermination des flux turbulents des différents scalaires à chaque demi-heure calculée à partir de la covariance entre la composante verticale de la vitesse du vent et les concentrations en H_2O et CO_2 et la température de l'air (T_a). EdiRe a également été utilisé pour le traitement des données qui a été réalisée en plusieurs étapes suivant la méthode établie dans Aubinet et al. (2000) et décrite précisément dans le Chapitre 2. Dans ce qui suit, les valeurs négatives de *NEE* représentent une absorption du CO_2 atmosphérique par la végétation, tandis que des valeurs positives correspondent à une perte de carbone par la végétation.

3.2.6 Fermeture du bilan d'énergie

Nous avons évalué la fermeture du bilan énergétique afin de vérifier la validité des flux de chaleur sensible et latente, respectivement *H* et *LE* tels qu'estimés à partir des mesures turbulentes (Aubinet et al. 2000). Nous avons estimé la somme des flux de *H* et *LE* à l'échelle demi-horaire, et nous l'avons comparée à la somme de l'énergie disponible R_n, suivant l'équation simplifiée du bilan d'énergie :

$$H + LE = R_n - G \qquad \text{Equation 3. 1}$$

où R_n représente le rayonnement net (W m^{-2}) et *G* le flux de chaleur dans le sol (W m^{-2}). Nous avons également utilisé la méthode du rapport du bilan d'énergie, EBR pour 'energy balance ratio' (Wilson et al. 2002, Tanaka et al. 2008) en sommant les valeurs de (R_n-*G*) et (*H*+*LE*) du pas de temps demi-horaire :

$$\mathrm{EBR} = \frac{\sum_{i=1}^{j}(H + LE)}{\sum_{i=1}^{j}(R_n - G)} \qquad \text{Equation 3. 2}$$

où *j* indique le nombre de demi-heures. Soulignons que nous n'avons pas pris en compte d'autres sources ou puits d'énergie (*Q*) et notamment, le stockage d'énergie dans l'air et la biomasse (*S*) a été considéré comme négligeable et ces deux termes ont été omis dans l'Equation 3. 1 et l'Equation 3. 2 (McCaughey 1985). EBR a été tracé en fonction de la vitesse de frottement *u** au pas de temps demi-horaire afin de déterminer le seuil en dessous duquel les données sont considérées invalides en raison d'une turbulence trop faible (données nocturnes le plus souvent).

3.2.7 Bilan hydrique

A partir des équations 3.1 et 3.2, les valeurs des flux de chaleur latente et sensible, LE_u et H_u ont été ajustées par la méthode de Twine et al. (2000). Brièvement, LE_u et H_u sont multipliés par le facteur de correction $(R_n\text{-}G)/(LE_u+H_u)$. En moyenne, cette correction a augmenté LE_u et H_u d'un facteur 1.2 (voir la section sur la fermeture du bilan d'énergie dans les résultats). Les valeurs ajustées sont notées *LE* et *H* dans ce qui suit.

Enfin, les valeurs manquantes ont été gap-fillées suivant la méthode développée par Falge et al. (2001a, 2001b) et améliorée par Reichstein et al. (2005) et décrite dans le Chapitre 2. La méthode repose sur une combinaison d'interpolation, de tables de correspondance mobiles (MDS) et des variations journalières moyennes sur des fenêtres glissantes (MDV) qui tient compte des conditions environnementales. Les données corrigées et gap-fillées ont ensuite été utilisées pour calculer les bilans mensuels ou annuels. Pour l'analyse du bilan hydrique, *LE* a été convertie en évapotranspiration totale, *ET*, et sommée à une échelle mensuelle. La différence entre *ET* et $(I + T_p)$ fournit une estimation de l'évaporation du sol et la transpiration de la strate d'ajoncs et autres herbacés, E_h. La fermeture du bilan hydrique (WBC pour 'water balance closure') a été calculée comme la différence entre P_i et $(ET + \Delta SWC)$ où ΔSWC est la variation nette du stock en eau de la couche 0-80 cm du sol.

3.2.8 Échanges net de carbone de l'écosystème

L'échange net de carbone de l'écosystème obtenu par la technique des flux turbulents, *NEE*, a été réparti entre deux termes : la production primaire brute, *GPP* premier terme de l'Equation 3. 3 et la respiration de l'écosystème, R_E second terme de l'Equation 3. 3 selon la méthode décrite dans Kowalski et al (2003) en utilisant une réponse hyperbolique au rayonnement photosynthétiquement actif incident, PAR, comme suit :

$$NEE = -\frac{a_1 \times \mathrm{PAR}}{a_2 + \mathrm{PAR}} + Q_{10} \times R_{\mathrm{ref}}^{\left(\frac{T_S - 15}{10}\right)} \qquad \text{Equation 3. 3}$$

où R_{ref} se réfère à la respiration de l'écosystème pour une température de surface de référence de 15°C, Q_{10} décrit la sensibilité de la respiration à une augmentation de température de surface T_s. a_1 et a_2 sont des paramètres décrivant respectivement l'assimilation maximale et le PAR à la moitié du taux maximal de la photosynthèse. La température moyenne à la surface, T_s, est dérivée du flux de chaleur sensible et de la température de l'air. Les paramètres R_{ref}, Q_{10}, a_1 et a_2 ont été déterminés par une double régression non linéaire estimée sur trois périodes de 15 jours, chacune décalée d'un pas de temps de 5 jours. Comme il a été décrit dans le Chapitre 2, dans un premier temps, Q_{10} et R_{ref} ont été calculés à chaque pas de temps en utilisant uniquement les valeurs nocturnes du *NEE* directement assimilées à R_E ($SW\downarrow$<20 W m^{-2}) sous une turbulence suffisante (u*> 0.2 m s^{-1}) au cours des périodes sans pluie. Dans une seconde étape, les paramètres déterminés ont permis d'extrapoler le modèle à la journée et d'obtenir une valeur de *GPP* par différence entre *NEE* et les valeurs modélisées de R_E le jour. Les valeurs de a_1 et a_2 ont été calculées en utilisant les mêmes conditions de u* et précipitations et à partir des données de *GPP* calculés précédemment. D'autres approches ont été développées depuis, dans laquelle la dépendance de *GPP* sur le VPD est incluse (Reichstein et al. 2005, van Gorsel et al. 2009, Lasslop et al. 2010). Toutefois, nous avons continué à utiliser l'approche précédente en vue de maintenir la cohérence avec les données antérieures obtenues sur ce site d'étude. Notre calcul ne tient donc pas compte de la différence dans le métabolisme de la respiration entre la nuit et le jour indiqué par Kok (1949).

3.2.9 Mesures de la biomasse du sous-bois

La composition du sous-bois et la biomasse ont été mesurées de façon destructive sur 20 placettes de 1 m^2 réparties aléatoirement dans une zone de 30 m × 30 m de chacun des deux sites d'étude (Tableau 3. 1). Après la coupe, la biomasse récoltée a été séparée par espèce, séchée à température constante (65°C), et pesée. Les composantes vertes et non-vertes ont été séparées. La masse surfacique foliaire (ratio de la surface sur la masse) a été estimée à partir de sous-échantillons foliaires de chaque espèce. L'indice foliaire (LAI) a été calculé à partir de la surface massique et la densité de biomasse foliaire (kg ms. m^{-2}) de chaque espèce.

Tableau 3. 1 Description des parcelles sélectionnées.

	Parcelle C	**Parcelle W**
Caractéristiques des sites		
Coordonnées géographiques	44° 29' 36.79" N	44° 29' 37.99" N
	0° 56' 57.43" W	0° 57' 21.9" W
Altitude (m)	40	40
Surface (ha)	30	30
Caractéristiques de la végétation		
Arbres	*Pinus pinaster,* Ait	*Pinus pinaster,* Ait
Age (juillet 2009)	4 ans	5 ans
Biomasse sèche de la végétation adventice (g m^{-2})		
Ulex minor	682.8 ± 108.3	90.8 ± 15.3
Calluna vulgaris	171.2 ± 59.8	6.4 ± 4.0
Bruyères	107.3 ± 20.1	9.3 ± 8.1
Diverse herbaceous	39.9 ± 11.8	27.9 ± 8.1
Mousses diverses	30.2 ± 6.4	0.2 ± 0.2
Pteridium aquilinium	3.0 ± 2.9	1.8 ± 1.8
LAI moyen de la végétation (m^2 m^{-2})	1.87	0.49**
Densité (arbre ha^{-1})	14400	1803
LAI moyen des arbres (m^2 m^{-2})	1.05*	0.53*
Hauteur moyenne, Ht (m) (janvier 2010)	1.89	2.23
Min - Max Ht (m)	0.58 - 3.49	0.59 - 3.65
Diamètre à 1.30 m moyen, DBH (mm) (janvier 2010)	21.9	39.9
Min - Max DBH (mm)	8.8 - 50.4	12.1 - 92.7
Pratiques sylvicoles		
2008 :		
Contrôle de la végétation adventice	-	1er débroussaillement
Arbres	-	Dépressage
2009 :		
Contrôle de la végétation adventice	-	2ème débroussaillement
Arbres	-	-
Données météorologiques moyennes		
Précipitations annuelles (mm)	926.2	939.0
Température moyenne (°C)	12.46	12.37
Humidité relative (%)	77.95	78.14
Déficit de pression de vapeur (kPa)	0.39	0.39
Vitesse du vent (m s^{-1}) – Direction moyenne (°)	2.0 - 173.3	1.8 - 194.5

* A partir des données expérimentales et de Shaiek et al. 2011

** Cette valeur a été calculée en été au maximum de croissance de la végétation adventice, après avoir recolonisé l'inter-rang.

3.3 Résultats

3.3.1 Conditions météorologiques

La période qui s'étend de juin 2009 à mai 2010 présente une température moyenne de 12.41 ± 0,06 °C et des précipitations totales de 933±9 mm, proche de la moyenne 1950-2000 pour cette région (Tableau 3. 1). A la hauteur de mesure (6 m pour la parcelle C et 6.4 m pour la parcelle W), la température de l'air, T_a, la vitesse du vent u, et le déficit de pression de la vapeur, VPD, présentent des valeurs similaires pour les deux parcelles (Figure 3. 1). Plusieurs épisodes de conditions climatiques inhabituelles sont survenus au cours de l'expérimentation. De faibles températures, en dessous de 5 °C, ont été enregistrées sur plusieurs jours en décembre 2009 et janvier 2010. Aussi, la première moitié d'octobre 2009 a été inhabituellement froide avec des valeurs moyennes de température autour de 5 °C (Figure 3. 1). Une période estivale particulièrement chaude s'est produite avec des températures maximales quotidiennes atteignant plus de 30 °C fin juin et en juillet. En août, la température maximale quotidienne a dépassé 35 °C, ce qui coïncide avec une première période de sécheresse édaphique allant de la fin du mois d'août à septembre. Des précipitations exceptionnellement élevées ont eu lieu en novembre 2009 (223 mm par rapport à une moyenne de 78 mm pour la période 2002-2008). A partir de février 2010, les précipitations mensuelles étaient de 35% inférieures à la valeur moyenne de 2002 à 2008 (données de la station de Météo-France à Biscarosse, France), si bien que dès le début de mars 2010, les deux sites ont connu une seconde période de sécheresse et plutôt inhabituelle à cette période de l'année. Le mois d'avril 2010 a été particulièrement chaud.

3.3.2 Bilan d'énergie

Annuellement, la parcelle W présente un rayonnement net légèrement plus faible (4%) que la parcelle C (Figure 3. 2a) soit un rayonnement net de 2880 MJ m^{-2}, contre 2942 MJ m^{-2}. Cette différence (C-W) varie de façon saisonnière, prenant des valeurs positives en été et négatives en hiver. Etant donné que les deux parcelles juxtaposées reçoivent le même rayonnement incident de courte et de grande longueur d'onde, cette différence s'explique par une différence d'albédo et le rayonnement ascendant de grandes longueurs d'onde ($LW\uparrow$) (Figure 3. 3). L'albédo de la parcelle W varie entre 0.10 et 0.35 au cours de l'année étudiée alors qu'il varie entre 0.08 et 0.15 sur la parcelle C, avec des valeurs moyennes annuelles de 0.19 et 0.12 respectivement (Figure 3. 3a). La plus grande variation observée sur la parcelle W est due à la dynamique de la végétation accompagnatrice qui a presque totalement recolonisé le sol laissé nu après débroussaillement en une seule saison. Ce développement a induit des changements dans les propriétés de surface et notamment la réflectance du sol. Au contraire, sur la parcelle C, la canopée présente un albédo plus homogène temporellement et spatialement, et son évolution saisonnière peu marquée étant imputable au changement de pigmentation des ajoncs dont la couleur évolue de vert en été à jaune à l'automne et brun en hiver. Par ailleurs, l'humidité de la surface

du couvert pourrait également contribuer aux changements journaliers puisque la canopée de la parcelle C retient une plus grande quantité d'eau après un épisode pluvieux que celle de la parcelle W (cf. § sur le bilan hydrique ci-dessous).

La différence d'albédo entre les deux parcelles est largement compensée par la différence entre le rayonnement de grandes longueurs d'onde ascendant, $LW\uparrow$, qui présente également des variations saisonnières (Figure 3. 3b). La plus grande différence observée sur le R_n a lieu pendant l'été 2009 et le printemps 2010, atteignant une valeur de 6% et 8% respectivement (Figure 3. 2b, d). Cette différence est expliquée par le plus grand $LW\uparrow$ sur la parcelle W. La différence de R_n décroît en automne pour s'inverser en février 2010 (Figure 3. 2c). Pendant cette période, $LW\uparrow$ est plus élevé pour la parcelle C (Figure 3. 3b), ce qui est sans doute dû à une température de surface plus chaude et un changement d'émissivité de surface sur la parcelle C.

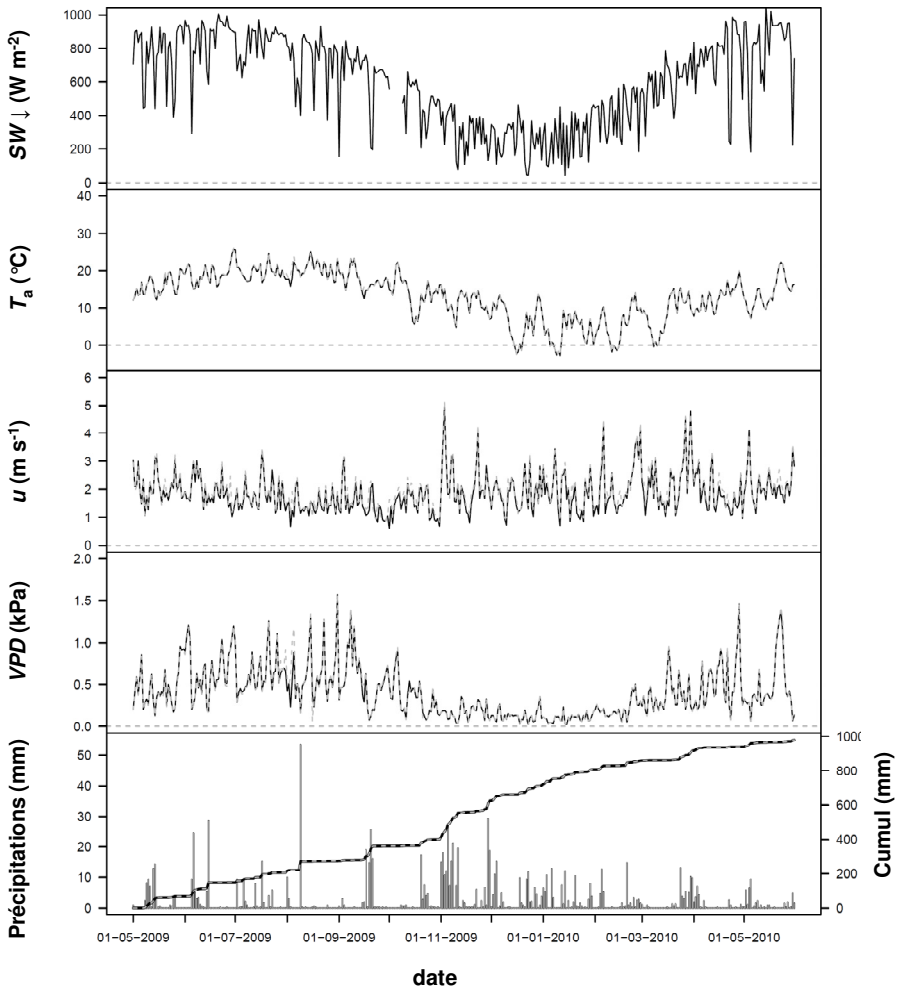


Figure 3. 1 Cinétiques journalières du rayonnement global maximum ($SW\downarrow$), de la température de l'air (T_a), de la vitesse du vent (u), de la pression de vapeur saturante (VPD) pour la parcelle C (traits gris) et la parcelle W (trait noir). Les précipitations journalières et le cumul journalier sont également représentés.

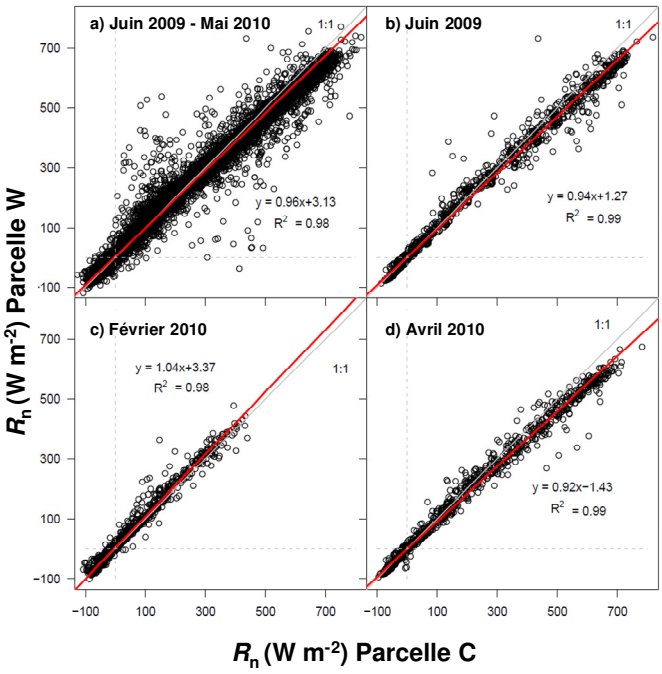


Figure 3. 2 Comparaison du rayonnement net R_n mesuré entre les deux parcelles pour une année complète (a) et par périodes mensuelles (b, c, d). La ligne rouge est la droite de régression.

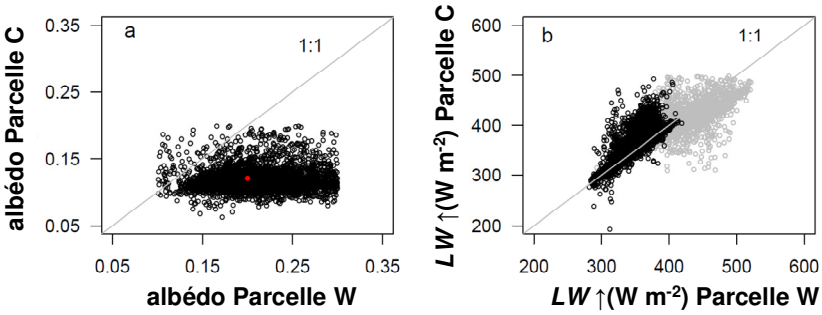


Figure 3. 3 Comparaison de l'albédo journalier (a) et de l'émission de rayonnement de grande longueur d'onde (b) entre les deux parcelles. Le flux terrestre est distingué pour deux périodes : printemps/été (points gris) et automne/hiver (points noirs).

3.3.3 Fermeture du bilan d'énergie

La somme des flux turbulents non corrigés, H_u et LE_u représente 78% et 85% de l'énergie disponible (R_n - G) sur les parcelles W et C respectivement (Figure 3. 4a, b). Les ordonnées à l'origine sont négligeables. Le ratio du bilan d'énergie, EBR, augmente avec la vitesse de frottement tel qu'habituellement observé (Wilson et al. 2002). Un seuil de u^* a pu être établi à 0.20 m s^{-1}, en dessous duquel les valeurs de EBR indiquent des valeurs inférieures à 0.60. Ainsi, les valeurs des flux turbulents pour u^*<0.20 m s^{-1} ont été rejetées puis le cas échéant, gap-fillées (Falge et al. 2001a, 2001b).

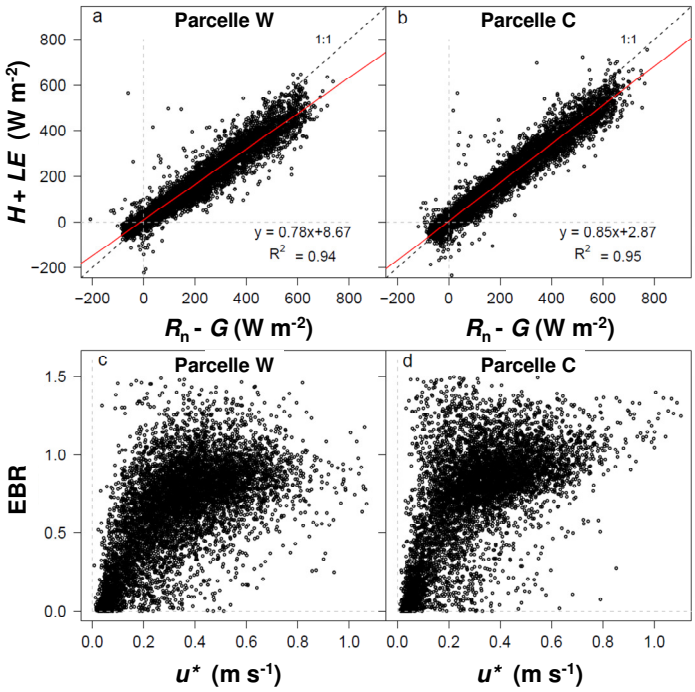


Figure 3. 4 Estimation de la fermeture du bilan d'énergie : Comparaison entre la chaleur (H + LE) et l'énergie disponible (R_n - G) : (a, b) et relation entre le ratio du bilan d'énergie, EBR en fonction de la vitesse de frottement u* : (c, d). La parcelle W est représentée en a et d, la parcelle C en b et d. La régression statistique est représentée par la droite rouge.

3.3.4 Répartition du flux net d'énergie entre *H* et *LE*

Au pic de la saison de croissance (juin 2009, Figure 3. 5a), l'énergie disponible est dissipée majoritairement en flux de chaleur latente *LE* sur la parcelle C, et en flux de chaleur sensible *H* sur la parcelle W. Ainsi, le rapport de Bowen βatteint une valeur de 0.50 sur C contre 1.55 en W. Le flux d'évaporation, *LE*, était deux fois plus élevé dans la parcelle 'contrôle'. A l'inverse, *H* était 50% plus élevé sur la parcelle W que sur la parcelle C. Malgré une couverture de sol différente, le flux de chaleur dans le sol présente des valeurs comparables entre les deux sites.

Pendant la période sèche (fin août, début septembre 2009, Figure 3. 5b), l'énergie disponible R_n et ses différentes composantes sont pratiquement égales entre W et C La valeur diurne de β a atteint 2.21 sur la parcelle C et 2.01 sur la parcelle W. Le flux de chaleur latente a été plus sévèrement réduit par la sécheresse édaphique en C où il a été divisé d'un facteur 4 contre 2 pour la parcelle W.

En hiver, aucune différence de R_n n'est observée (janvier 2010, Figure 3. 5c). La dissipation de l'énergie disponible a été effectuée en proportion similaire entre *H* et *LE*, avec une valeur de β proche de 1. Par temps froid, le flux de chaleur dans le sol a été négatif pour les deux parcelles, le sol étant une source de chaleur vers l'atmosphère.

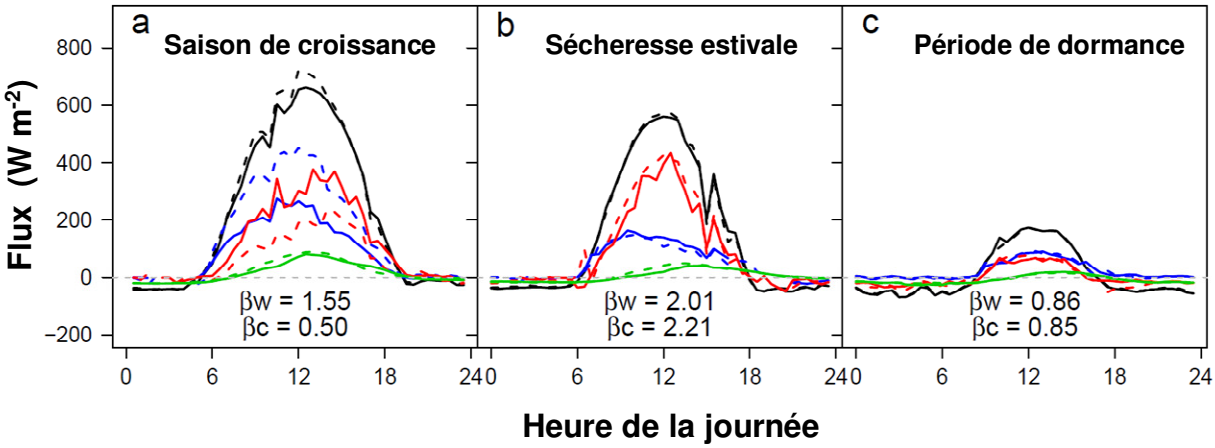


Figure 3. 5 Cinétiques journalières des flux de chaleurs (*H* trait rouge, *LE* trait bleu, *G* trait vert) et du rayonnement net (R_n trait noir) représentatifs de la période de croissance (a), de la période de sécheresse estivale (b) et de la période de dormance hivernale (c). Les flux sont représentés en traits plein pour la parcelle W et en pointillés pour la parcelle C. Le rapport de Bowen, β, est également estimé pour chaque parcelle.

3.3.5 Bilans hydriques saisonnier et annuel

Annuellement, la répartition de *ET* entre les différentes couches du peuplement a été modifiée par l'effet du débroussaillement et du dépressage (Tableau 3. 2). La pluie interceptée, *I*, la transpiration des pins, T_p, et l'évaporation du sol+transpiration de la strate adventice, E_h, ont représenté respectivement 14%, 24% et 62% de l'évapotranspiration totale *ET* sur la parcelle W, indiquant la contribution majoritaire de la végétation herbacée par rapport à celle des Pins. Sur la parcelle C, la répartition était plutôt équilibrée entre les pins (I+T_p=54%) et la strate herbacée (46%).

L'évapotranspiration totale annuelle, *ET*, était 15% plus élevée sur la parcelle C. Cette différence résulte principalement d'une plus grande évapotranspiration des pins. Elle est partiellement compensée par la différence d'évapotranspiration du sol et de la strate qui a recolonisé l'inter-rang après débroussaillement sur la parcelle W. En effet, *I* et T_p étaient respectivement 61% et 60% plus élevés sur la parcelle C. Cette différence correspond assez bien à la différence de LAI des pins entre les deux parcelles : le LAI de la parcelle W était 50% plus faible en janvier 2010. Inversement, E_h annuel était supérieur de 58.3 mm. Le terme résiduel dans l'équation de fermeture du bilan hydrique a été attribué au drainage profond, en faisant l'hypothèse que le ruissellement de surface est négligeable, dû à la forte perméabilité du sol et de sa topographie plane. Le drainage annuel souterrain ainsi calculé est 50.7% (+113.5 mm) plus élevé sur la parcelle débroussaillée (W).

Tableau 3. 2 Estimations des composantes du bilan hydrique sur la parcelle C (a) et sur la parcelle W (b). les valeurs saisonnières et annuelles sont données. Les valeurs grisées pour la parcelle C correspondent à des ajustements à partir des valeurs de la parcelle W puisque les mesures de SWC n'ont commencé qu'à partir de mi-juillet 2009 sur la parcelle C.

a		**PARCELLE C**						
		P_i	ET	I	T_p	E_h	ΔSWC	WBC
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Saison de croissance	Juin 2009	82.6	132.3	14.0	34.2	84.0	-61.8	12.1
	Juillet	55	113.4	9.4	30.9	73.1	-18.9	-39.5
	Août	75.8	78.8	12.9	23.4	42.5	-2.5	-0.5
Sécheresse estivale	Septembre	82.0	38.7	13.9	20.1	4.7	10.5	32.8
Hiver (saison de dormance)	Octobre	67.2	53.6	11.4	20.1	22.1	10.2	3.4
	Novembre	221.8	69.9	37.7	15.9	16.3	55.2	96.7
	Décembre	85.2	28.7	14.5	9.8	4.4	60.6	-4.1
	Janvier 2010	92.4	29.5	15.7	14.3	0.0	17.8	45.1
	Février	46.8	30.9	8.0	17.1	5.8	-34.6	50.5
Saison de croissance	Mars	54.5	47.8	9.3	20.5	18.0	-36.9	43.6
	Avril	23.3	65.6	4.0	25.4	36.2	-21.4	-20.9
	Mai	39.6	80.6	6.7	25.3	48.5	-45.4	4.4
	ANNUEL	**926.2**	**769.6**	**157.4**	**257.2**	**355.6**	**-67.2**	**223.7**

b		**PARCELLE W**						
		P_i	ET	I	T_p	E_h	ΔSWC	WBC
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Saison de croissance	Juin 2009	81.2	88.6	8.4	20.0	60.1	-65.7	58.3
	Juillet	58.1	101.9	6.0	21.1	74.8	-20.1	-23.7
	Août	69	72.9	7.2	17.3	48.5	-1.9	-2.0
Sécheresse estivale	Septembre	84	41.3	8.7	12.3	20.2	13.8	28.9
Hiver (saison de dormance)	Octobre	68.5	53.4	7.1	13.1	33.2	14.7	0.4
	Novembre	223.1	51.5	23.2	11.9	16.4	112.8	58.8
	Décembre	90.9	25.8	9.5	9.6	6.7	22	43.1
	Janvier 2010	91.4	24.0	9.5	8.8	5.8	17.5	49.9
	Février	53	33.5	5.5	8.5	19.5	-40	59.5
Saison de croissance	Mars	55.4	40.9	5.8	10.3	24.9	-33.7	48.2
	Avril	24	58.8	2.5	12.6	43.6	-65.1	30.3
	Mai	40.4	79.6	4.2	15.3	60.1	-24.8	-14.4
	ANNUEL	**939.0**	**672.3**	**97.7**	**160.8**	**413.9**	**-70.5**	**337.2**

La différence d'évapotranspiration entre les parcelles et sa répartition par strates ont changé suivant les saisons, en réponse à la sécheresse estivale et à la croissance de la strate herbacée :

(1) Au pic de la saison de croissance en 2009 (JJA), la différence importante de *ET* est attribuée à la plus forte contribution du couvert végétal dans la parcelle C.

(2) En septembre 2009, la sécheresse édaphique amène une réduction de 71% et 53% de *ET* dans C et W respectivement. Malgré une teneur en eau du sol (0-80 cm) plus élevée de 30 mm dans la parcelle W (Figure 3. 6), la transpiration des pins a été réduite de façon similaire et simultanée dans les deux parcelles. De la même manière, lors d'une deuxième période de grande sécheresse (juillet 2010),les fluctuations de diamètre des arbres ont été remarquablement synchrones entre les deux traitements, soutenant l'hypothèse que les arbres ont été exposés à un stress hydrique simultané quelque soit la parcelle. La croissance radiale sur les deux sites s'est par ailleurs arrêtée simultanément en juillet 2010 (Figure 3. 7).

La strate herbacée s'est comportée de façon inverse aux Pins. En septembre 2009, E_h a été pratiquement ramenée à zéro dans la parcelle témoin, mais maintenu à 20.2 mm mois^{-1} dans la parcelle débroussaillée. Ainsi, sur la parcelle C, E_h était 40% plus élevée que sur la parcelle W en juin, mais 77% plus faible en septembre, probablement en raison de la fermeture des stomates des ajoncs.

(3) L'évapotranspiration hivernale 2009-2010 (octobre à février) de la parcelle C excède celle de la parcelle W de 13% en raison de T_p et *I* plus élevés d'environ 55% par rapport à W, tandis qu'E_h a été réduite de moitié. La contribution de T_p et E_h à l'*ET* totale s'élève à 36% et 23% respectivement, contre 28% et 43% dans la parcelle W. La teneur en eau du sol dans la parcelle W est seulement 16% plus élevée que dans la parcelle C.

(4) Enfin, au cours du printemps 2010 (MAM), la différence de *ET* entre les parcelles a été réduite à 8%, mais la différence de transpiration des pins entre les sites a progressé et inversement, l'écart des E_h s'est réduit. Cette période a été caractérisée par une sécheresse précoce, le contenu en eau du sol de 0 à 80 cm diminuant à partir de mi-avril sur les deux sites (par rapport à la mi-mai en 2009, données non présentées), en réponse à un déficit de 77 mm (60) entre *ET* et P_i dans la parcelle C (W). Toutefois, par rapport à la tendance observée en septembre 2009, nous n'avons pas détecté de réduction de E_h sur chaque site. Le contenu en eau du sol a été réduit plus sévèrement dans la parcelle débroussaillée (Figure 3. 6) en raison d'une grande E_h et d'un drainage souterrain plus important sur la parcelle C.

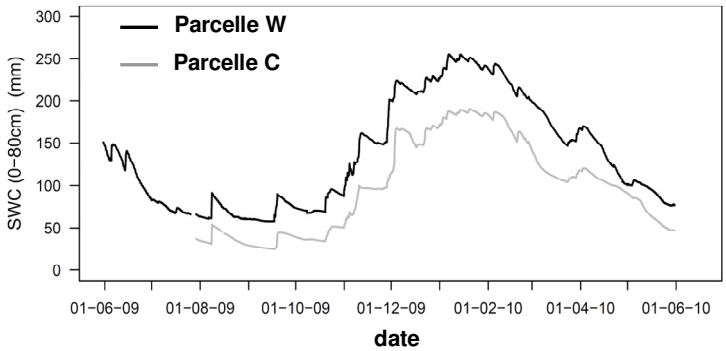


Figure 3. 6 Dynamique journalière du contenu en eau du sol (SWC sur 0-80 cm) sur la période étudiée.

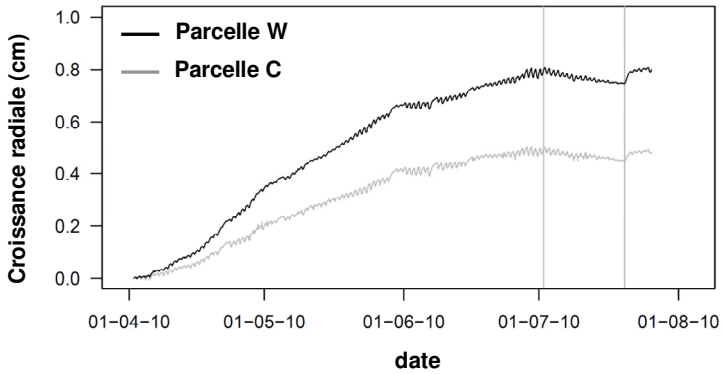


Figure 3. 7 Suivi microdendrométrique de la croissance secondaire (cm) sur les deux sites à partir du 01/04/2010. La période représentée a été prolongée pour mettre en évidence une période de sécheresse et la conséquence sur la croissance (entre les lignes verticales).

3.3.6 Flux et bilan de carbone

Annuellement, les deux parcelles ont représenté un puits de carbone net, mais la parcelle W a stocké 73% de carbone de moins que la parcelle C (*NEE* dans le Tableau 3. 3). Cette différence est principalement attribuable à la différence de production primaire brute *GPP* entre les deux parcelles. La respiration de l'écosystème R_E sur la parcelle C était 40% plus élevée que sur la parcelle W.

Sur les deux parcelles, *GPP* et R_E ont montré une variabilité saisonnière durant la période 2009-2010, avec une dynamique prononcée pour *GPP* (Figure 3. 8, Tableau 3. 3). L'assimilation de la canopée est maximale en juin. Alors que sur la parcelle C, *GPP* a commencé à diminuer début juillet, la diminution de *GPP* sur la parcelle W s'est produite plus tard (Figure 3. 8). *GPP* et R_E ont été réduites par la sécheresse de septembre, la parcelle C devenant une source nette de carbone en septembre. Pendant l'hiver, *GPP* et R_E ont également montré des réductions spectaculaires au cours des événements froids. Il est à noter que la dynamique de *GPP* est parallèle de celle de *ET* sur les deux parcelles (Tableau 3. 2, Tableau 3. 3) soutenant l'hypothèse que l'impact de la sécheresse sur les flux est essentiellement dû une fermeture stomatique à l'échelle de la canopée.

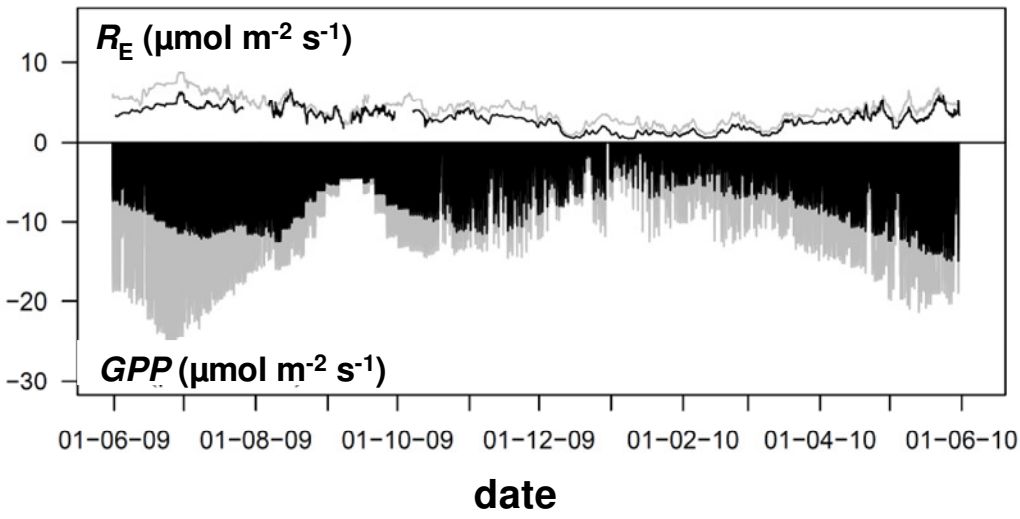


Figure 3. 8 Dynamique annuelle de la respiration de l'écosystème (R_E) et de la production primaire brute (*GPP*) estimés d'après les termes de l'Equation 3. **3**. *GPP* est exprimée négativement sur ce graphique pour rendre compte du prélèvement de carbone et contraster avec le rejet de CO_2 lors de la respiration, exprimée positivement. De la même manière que précédemment, les courbes et barres noires sont les valeurs de la parcelle W et les grises pour la parcelle C.

Tableau 3. 3 Estimations saisonnières et annuelles des échanges de carbone sur les deux parcelles.

		PARCELLE C			PARCELLE W		
		NEE (gC m^{-2})	***GPP*** (gC m^{-2})	R_E (gC m^{-2})	***NEE*** (gC m^{-2})	***GPP*** (gC m^{-2})	R_E (gC m^{-2})
Saison de croissance	Juin 2009	-74.6	283.3	208.6	-2.4	133.8	131.4
	Juillet	-64.8	277.8	213.0	-18.4	166.6	148.1
	Août	-37.8	175.4	137.6	-10.9	134.3	123.4
Sécheresse estivale	Septembre	13.1	75.9	89.0	-2.6	73.9	71.4
Hiver (saison de dormance)	Octobre	-0.5	130.4	129.9	-8.5	96.6	88.1
	Novembre	55.8	84.4	140.2	31.9	64.5	96.4
	Décembre	20.8	57.4	78.2	13.0	40.3	53.3
	Janvier 2010	-2.5	58.0	55.4	-1.6	34.4	32.8
	Février	-6.2	74.6	68.4	-2.4	40.1	37.7
Saison de croissance	Mars	-28.2	113.2	85.0	-10.2	71.9	61.7
	Avril	-45.4	169.6	124.2	-15.7	112.1	96.5
	Mai	-73.0	219.5	146.5	-37.4	152.4	115.0
	ANNUEL	**-243.3**	**1719.4**	**1476.1**	**-65.2**	**1121.0**	**1055.8**

La répartition de *NEE* entre *GPP* et R_E (Equation 3. 3) permet d'analyser les différences inter-site en termes de capacité maximum de production, a_1, efficience apparente d'utilisation de la lumière, a_1/a_2, et de la respiration nocturne, R_E. Ces différences sont illustrées pour deux périodes critiques : le pic de la saison de croissance et la période de sécheresse en septembre (Figure 3. 9). Comme attendu, la valeur de *NEE* à saturation de la lumière est trois fois plus élevée sur la parcelle C que sur la parcelle W, avec des valeurs respectives de 22 µmol m^{-2} s^{-1} et 7 µmol m^{-2} s^{-1} pour la saison de croissance. Cette différence est fortement atténuée lors de la période sèche où *NEE* à saturation de la lumière ont montré des valeurs proches de 8.4 µmol m^{-2} s^{-1} et 6.1 µmol m^{-2} s^{-1} sur les parcelles C et W respectivement. De façon parallèle, la respiration de l'écosystème R_E est plus élevée dans la parcelle C ($R_{E\ (PAR\ =\ 0)}$ = 5.7 µmol m^{-2} s^{-1}) que dans W ($R_{E\ (PAR\ =\ 0)}$ = 4.3 µmol m^{-2} s^{-1}) au cours la saison de croissance, mais a été similaire à la fin de la sécheresse ($R_{E\ (PAR\ =\ 0)}$ = 3.8 µmol m^{-2} s^{-1}).

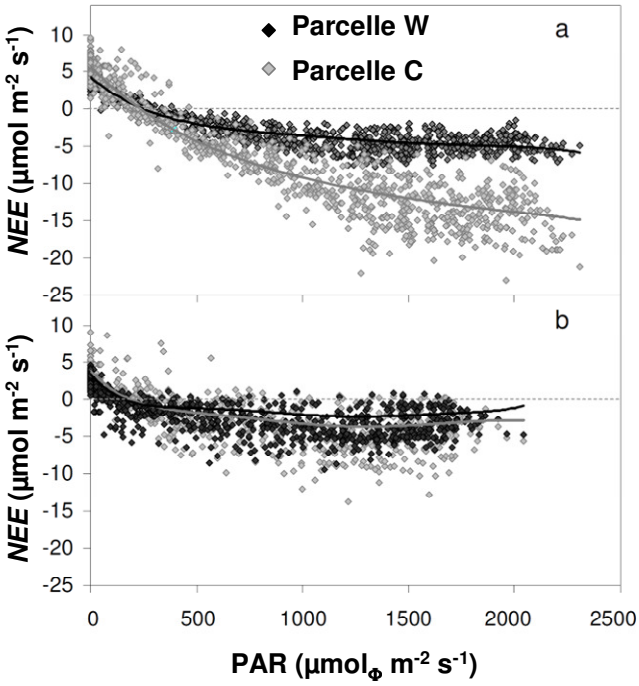


Figure 3. 9 Réponse de l'échange net de l'écosystème (*NEE*) au rayonnement photosynthétiquement actif incident (PAR) durant la saison de croissance en juin (a) et la sécheresse estivale en septembre (b). Les symboles représentent les données mesurées. Par souci de lecture, *NEE* modélisé (Equation 3. **3**) est représenté par un ajustement polynomial (R^2 >0.85 dans chaque cas). La couleur grise est utilisée pour la parcelle C, et noire pour la parcelle W.

La dérivée du premier terme de l'Equation 3. 3 à PAR = 0, ~ a_1/a_2, interprétée comme l'efficience apparente d'utilisation du rayonnement utile (µmol $_{(CO2)}$ µmol$^{-1}_{(PAR)}$), a été plus élevée sur la parcelle C pendant les saisons de croissance et de dormance (Figure 3. 10). Cette tendance semble inversée lors de la période sèche durant laquelle l'efficience de conversion de la parcelle W est plus élevée que la parcelle C, pour laquelle la strate d'ajoncs a probablement commencé sa sénescence.

Toutefois, étant donné les écarts-types au cours de ces deux mois, cette tendance doit être interprétée avec prudence.

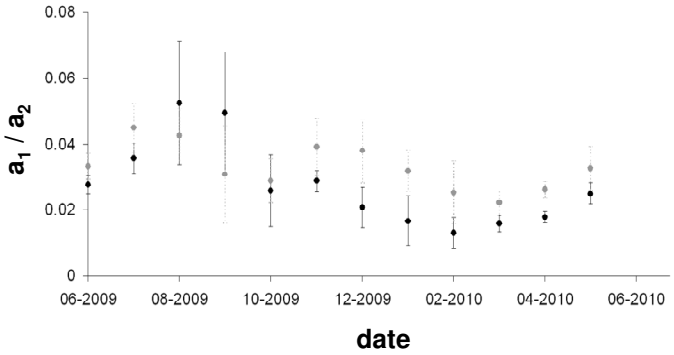


Figure 3. 10 Dynamique mensuelle de l'efficience d'utilisation de la lumière représentée par le rapport a_1/a_2 (mol $_{(CO2)}$ mol-1$_{(PAR)}$). La parcelle W est représentée en noir et la parcelle C en gris. Les barres verticales indiquent l'écart type.

3.4 Discussion

3.4.1 Fermeture du bilan d'énergie

L'écart de rayonnement net entre les deux parcelles est comparable à celui trouvé sur d'autres sites forestiers (Berbigier et al. 2001, Wilson et al. 2002, Jarosz et al. 2008, Foken 2008, Tanaka et al. 2008). La non fermeture du bilan d'énergie, elle aussi assez fréquemment observée par ailleurs, s'explique par plusieurs raisons (Massman and Lee 2002, Foken 2008, Kidston et al. 2010). Dans notre étude, deux d'entre elles sont possibles. Premièrement, le terme LE_u+H_u pourrait avoir été sous-estimé, en raison d'une perte possible des contributions de basses ou hautes fréquences aux flux turbulents, et/ou à des phénomènes d'advection. L'advection aurait été plus accentuée sur la parcelle W où le couvert était discontinu, avec un grand espace libre dans l'inter-rang qui peut également stimuler le développement de turbulences à basses ou à hautes fréquences. Deuxièmement, nous avons négligé le stockage de chaleur dans la couche supérieure du sol et dans la matière organique morte accumulée à la surface du sol après le dépressage et le débroussaillement (Ogée et al. 2001). Ce facteur négligé pourrait avoir également conduit à une sous-estimation de l'énergie disponible dans les deux parcelles.

3.4.2 Modification dans le transfert radiatif

L'énergie annuelle disponible présente des valeurs comparables entre les deux sites, mais avec des variations saisonnières. Ainsi, la première hypothèse que nous avons posée en introduction n'est pas vérifiée. Plusieurs études menées sur les peuplements d'âges et de structures différents (coupe rase

versus peuplement adulte) ou sur des peuplements perturbés (éclaircie, feu), ont montré des effets significatifs des perturbations sur R_n annuel (Gholz et al. 2002, Kowalski et al. 2003, Sun et al. 2010). Ces études ont également montré que R_n est réduit lorsque le LAI est plus faible (éclaircie, feu) et attribuent cette réduction à une augmentation de l'albédo. Le changement d'albédo seul ne peut expliquer la différence de R_n obtenue ici. La différence dans le rayonnement thermique terrestre a donc compensé en grande partie l'effet d'albédo. Nous supposons que la température de surface et très probablement l'émissivité de la surface sont sensibles à la structure du peuplement et l'humidité du couvert, qui différaient entre les parcelles. De même, Amiro et al. (1999b) ont réalisé une comparaison entre deux aires juxtaposées, un peuplement âgé et une surface brûlée un an auparavant et ont montré que l'albédo plus faible sur la zone brûlée a été compensée par la hausse de température de surface, ce qui donne des valeurs similaires de R_n sur les deux surfaces. Dans le Sud-Ouest de la France, Jarosz et al. (2009) ont montré une grande différence dans le R_n en mai et juin, avec principalement des valeurs plus faibles dans un peuplement éclairci par rapport à une culture d'hiver et dans un peuplement éclairci par rapport à un peuplement de Pins maritimes matures. Ces différences ont atteint 20% et 35% respectivement, et ont été attribuées principalement à une plus grande émission du rayonnement de grande longueur d'onde $LW\uparrow$ dans le peuplement éclairci. Durant la même période (mai et juin 2009), nos valeurs pour la différence de R_n étaient inférieures et variait de 6% à 15%. Contrairement aux conclusions de Sun et al. (2010), nous avons observé que la différence de R_n entre les parcelles était plus importante durant la saison de croissance que durant l'hiver. Ceci a pu être expliqué par un effet d'atténuation entre l'effet albédo et l'effet $LW\uparrow$ de la saison de dormance et un renforcement de ces deux termes au cours de la saison de croissance : au printemps et en été, i.e. à la fois l'albédo et le rayonnement de grandes longueurs d'onde ascendant étaient plus faibles dans la parcelle encore non débroussaillée.

La répartition de l'énergie disponible entre *H* et *LE* et son évolution saisonnière montre bien le rôle des variables environnementales et de la structure et de la composition du couvert (Wilson et Baldocchi, 2000). La canopée de la parcelle non traitée est constituée d'un couvert continu composé de de jeunes pins et d'ajoncs, avec un albédo faible et probablement une grande sensibilité des stomates au déficit hydrique du sol. En revanche, la parcelle débroussaillée est caractérisée par une large fraction de sol nu qui a progressivement été colonisée et par l'expansion des couronnes de pins, ce qui explique sa plus faible sensibilité des flux convectifs, *H* et *LE,* à la disponibilité en eau du sol. Durant la sécheresse estivale (fin août, début septembre), le rayonnement net a été préférentiellement dissipé en chaleur sensible sur les deux sites, et la transpiration de la canopée et du sous-bois a diminué, en raison de la fermeture stomatique induite par le stress hydrique de la végétation et des pins (Granier et Loustau 1994) (voir la section sur le bilan hydrique ci-dessous). Baldocchi et al. (2000) ou Jarosz et al. (2008, 2009) ont observé une évolution similaire du rapport de Bowen d'un peuplement de pins matures pendant une sécheresse. Cette tendance a également été trouvée dans une prairie et une forêt de Pins sylvestres (Rost et Mayer 2006).

Même si dans notre étude, les mesures effectuées ne permettent pas de différencier les flux de la végétation adventice de ceux provenant de la surface du sol, il est très probable que la présence de la strate d'ajoncs joue un rôle majeur dans la répartition des flux d'énergie dans la parcelle C. Des études antérieures ont montré que la contribution du sous-étage est contrôlée par le LAI de l'étage dominant dans les peuplements matures dont la canopée est fermée. Par exemple, Baldocchi et al. (1997) ont constaté que le sous-étage contribuait entre 20 et 40% de l'échange d'énergie totale dans une forêt de Pins gris. Jarosz et al. (2008) ont évalué cette contribution à 32% et 38% pour les flux de chaleur sensible et latente respectivement, dans un peuplement de Pins maritimes matures. Dans le cas de jeunes peuplements où la canopée est ouverte et une strate de végétation accompagnatrice est largement développée, il faut s'attendre à ce que cette dernière joue un rôle majeur dans la répartition de l'énergie.

Placés dans la perspective du cycle de vie de forêt, ces résultats montrent que la distribution entre la chaleur sensible et de flux de chaleur latente semble être contrôlée pendant le stade juvénile d'abord par le LAI de la strate de l'inter-rang et celui des pins, puis par la disponibilité en eau du sol (voir prochaine section). Suite à la fermeture du couvert de l'étage supérieur, l'énergie disponible est ensuite principalement contrôlée par le seul LAI des arbres (Berbigier et al. 1991).

3.4.3 Bilan hydrique

L'évapotranspiration totale *ET* de la parcelle débroussaillée n'a été réduite que de 15% par rapport à la parcelle témoin. Dans le contexte de la forêt des Landes, peu de documentation est disponible sur les échanges d'eau comparant des peuplements adjacents sous climat identique et se différenciant par la structure de leur canopée suite à une intervention sylvicole. Cependant d'autres études ont été menées dans des parcelles adjacentes comparant différents types d'écosystèmes. Dans le sud-ouest de l'Allemagne, Wicke et al (1996) ont montré que *ET* était de 50% à 80% plus élevée dans une forêt de Pins sylvestres que dans à une prairie adjacente lors d'un printemps ensoleillé. Sun et al. (2010) ont également constaté une valeur de 16 à 40% plus élevée de *ET* dans une plantation de *Pinus taeda* de 16 ans par rapport à une plantation juxtaposée de 4 ans.

Intuitivement, les valeurs inférieures de *ET* sur la parcelle W sont associées à la plus faible transpiration des pins T_p due à une réduction de la surface terrière et de l'indice foliaire. Toutefois, la réduction de la surface foliaire a accru les apports d'énergie et d'eau à la surface du sol (Figure 3. 6), ce qui en retour a favorisé l'évaporation de la surface du sol après débroussaillement et celle de la végétation recolonisant l'inter-rang. En effet, un LAI des pins plus faible augmente le rayonnement atteignant le sol, induisant une température de surface plus élevée et donc une évaporation de la surface plus forte, particulièrement en été. Cette réponse est en accord avec Simonin et al. (2007), qui ont constaté que l'évaporation du sol était supérieure dans un peuplement éclairci de *Pinus ponderosa*. La réduction de la surface foliaire sur la parcelle W a également conduit à une perte annuelle supplémentaire de l'eau par drainage profond (Tableau 3. 2). En novembre 2009, l'effet de la suppression de la strate herbacée s'accompagne d'une E_h non négligeable similaire à celle de la parcelle C, malgré l'absence de sous-bois. La présence d'une épaisse couche de litière à grande capacité de

rétention en eau explique probablement ces valeurs non négligeables. Ainsi, notre seconde hypothèse, à savoir un LAI total plus faible permettrait d'accroître la disponibilité des ressources (eau du sol par exemple) pour les arbres de la placette débroussaillée, et donc d'atténuer les effets d'un déficit hydrique en été, n'a pas été confirmée.

Pour insister sur ce résultat, malgré le débroussaillement et le dépressage, les pins des deux parcelles semblent avoir réagi simultanément aux conditions de sécheresse, contrairement à ce que nous aurions pu attendre. La diminution parallèle de la transpiration des pins au mois d'août et septembre 2009 est surprenante lorsque l'on considère son contenu en eau plus élevé. Cette observation est cohérente avec la diminution parallèle de la croissance en diamètre de la tige des arbres des deux parcelles durant la sécheresse 2010. Nous en concluons que le débroussaillement et le dépressage n'ont pas permis d'accroître, à ce stade, la disponibilité en eau des arbres. Nous expliquons ce résultat par le fait que le volume du sol rendu disponible suite à ces interventions ne serait pas pleinement exploré par les racines de pins Les modifications de structure du couvert apportées par débroussaillage et dépressage n'ont pas non plus entraîné de modifications significatives de transpiration par unité de surface foliaire. L'augmentation supposée du rayonnement reçu et du transfert turbulent dans le couvert n'a donc pas eu d'effet mesurable dans notre expérimentation.

Les résultats montrent clairement que les pins et la strate accompagnatrice ont une sensibilité différente aux conditions du sol et particulièrement à la sécheresse édaphique, ce qui explique le partitionnement annuel de l'évapotranspiration totale des peuplements entre le sol, les adventices et les arbres. Ce partitionnement de l'évapotranspiration a déjà fait l'objet d'études en peuplement adultes. Law et al. (2000) ont montré que l'évaporation du sol sous un peuplement mature de *Pinus ponderosa* représentait 44% de *ET* en début de saison de croissance pour diminuer à une valeur de 33% pendant l'été. Wilson et al. (2000) ont également reporté des valeurs d'évaporation du sol allant de 30 à 50% de l'*ET* dans une forêt tempérée de Pins, tout particulièrement au printemps et en été. Nos valeurs étaient plus élevées en raison d'une plus faible interception dans le couvert jeune et ouvert comparé à un couvert adulte et fermé. La contribution du sol atteignait 68% et 66% de *ET* de la parcelle W en juin et en août respectivement pour des valeurs de 64% et 54% dans la parcelle C. Ces valeurs confondent les deux composantes que sont l'évaporation du sol et la transpiration de la strate accompagnatrice. Herbst et al. (2008) ont reporté des valeurs de transpiration du sous-bois de 9% et 18% de *ET* dans deux peuplements de feuillus juxtaposés, le premier avec un sous-bois peu abondant et le second avec un sous-bois fortement développé. Iida et al. (2009) ont également noté l'importance du sous-bois dans une forêt de mélèzes dont la contribution à *ET* représentaient 51%. Dans la même région que la présente étude, Loustau et Cochard (1991) ont estimé une part non négligeable du sous-bois qui représente annuellement 20% de *ET* dans un couvert de Pins maritimes de 19 ans. Finalement, dans ce même peuplement, Berbigier et al. (1991) ont souligné le fait que le sous-bois n'était pas affecté par la sécheresse contrairement aux Pins adultes. En effet, la contribution du sous-bois représentait 45% de *ET* pendant la saison de croissance et 54% pendant la période de sécheresse, alors que pour ces mêmes périodes, la contribution des pins représentaient 45% puis 12% de *ET* en réponse à une fermeture des stomates des pins. De plus, Simonin et al. (2007) ont montré que la couche herbacée contribuait à 92%

et 75% de *ET* après une sécheresse extrême dans une parcelle éclaircie et non traitée respectivement. Durant l'épisode sec, la transpiration de la strate d'ajoncs et l'évaporation du sol étaient clairement réduites et ont contribué à 12 % de *ET* sur la parcelle non traitée. Ces résultats contrastés avec les précédentes études montrent, au-delà de l'intensité de la sécheresse, l'importance de considérer la nature de la strate accompagnatrice et la structure globale du couvert. Dans les études citées, cette strate était composée d'un sous-bois peu abondant évoluant sous les arbres matures et constituée de plantes telles que *Molinia coerulea* M. poussant sous un couvert de *Pinus pinaster* (Berbigier et al. 1991), ou *Festuca arizonica* et *Elymus alymoides* poussant sous un couvert mature de *Pinus ponderosa* (Simonin et al. 2007).

Dans la configuration de peuplement que nous avons étudiée, la végétation accompagnatrice dominée par de l'ajonc semble plus sensible à la sécheresse que les pins. Cette sensibilité à la sécheresse peut probablement s'expliquer par une fermeture stomatique et par la mortalité des parties aériennes de l'ajonc nain.

3.4.4 Échanges de carbone

Le débroussaillement et le dépressage dans la parcelle W ont diminué l'assimilation de carbone annuelle de l'écosystème de près de 73% par rapport à la parcelle non débroussaillée. Malgré la réduction de 65% du LAI total, la parcelle W est restée annuellement un puits de carbone. Nous avons supposé que la croissance rapide de la strate herbacée dans cette parcelle, notamment au mois d'avril 2010, explique cette tendance. Ce développement rapide explique le décalage dans le temps de la diminution estivale de *ET* et de *GPP* entre les deux parcelles, de sorte que la rapide croissance de la strate de l'inter-rang compenserait la possible diminution de *GPP* des pins et expliquerait ainsi le maintien des valeurs constantes de *GPP* en juillet. L'analyse de la biomasse de la strate herbacée confirme que sa croissance a bien été plus rapide dans la parcelle W que dans la parcelle C, passant de 136 ± 46 gC m^{-2} à 282 ± 99 gC m^{-2} dans la parcelle W, un gain net annuel de 146 gC m^{-2}, alors qu'elle ne varie pas significativement dans la parcelle C, soit de 1034 ± 232 gC m^{-2} à 906 ± 214 gC m^{-2}, probablement en raison d'une hausse de l'ombrage par les couronnes des arbres et de la mortalité des ajoncs après la sécheresse de 2009. Comme davantage de précipitations et de lumière atteignent le sol de la surface ouverte, la disponibilité en eau et donc son utilisation par la végétation recolonisant l'inter-rang de la parcelle W a pu augmenter. Cette observation est cohérente avec les résultats de Moore et al. (2006) dans des forêts de *Pinus ponderosa*, où l'éclaircie des arbres stimulait un retour rapide de la strate inférieure.

D'après les études successives sur ce site par Kowalski et al. (2003, 2004), puis Stella et al. (2009) et les données mesurées sur site mature (Berbigier et al. 2001, Jarosz et al. 2009), nous pouvons conclure que la croissance de la végétation (toute strate considérée) a transformé la coupe rase en un puits de carbone après seulement trois ans et que l'effet du débroussaillement et du dépressage à 6 ans n'apporte qu'un point d'inflexion à cette tendance.

Les valeurs annuelles de *NEE* et ses différentes composantes sur la parcelle C sont comparables aux résultats de Stella et al. (2009) obtenus sur la parcelle W en 2007 avant qu'elle ne soit débroussaillée et dépressée, et date à laquelle elle avait une structure et une composition similaires à celles de la parcelle C, y compris une couche d'ajoncs bien développée. En 2007, *NEE* était de -335 gC m^{-2} et R_E atteint 1650 gC m^{-2}. Ces valeurs sont légèrement supérieures à nos observations, mais sont la conséquence d'une année plus humide, avec des conditions édaphiques plus favorables, surtout pendant le printemps et l'été 2007 par rapport à l'été 2009 et au printemps 2010. Le bilan annuel de carbone de la parcelle W a également été étudié à un stade précoce, immédiatement après la coupe rase en 2001, par Kowalski et al. (2003). A cette période, le site était une source nette de carbone d'une valeur annuelle de *NEE* de +276 gC m^{-2} avec une *GPP* de 602 gC m^{-2} et R_E de 878 gC m^{-2}. Misson et al. (2005) ont également étudié l'effet de l'éclaircie sur le bilan du carbone dans une plantation jeune de *Pinus ponderosa*. Dans leur étude, la respiration de l'écosystème n'est pas été affectée significativement par l'éclaircie, avec une hausse de seulement 1%, contrairement à la photosynthèse de la canopée qui a diminué de 14%, si bien que leur site est devenu une source nette de carbone l'année suivant l'éclaircie. Récemment, Doré et al. (2010) ont constaté que l'éclaircie d'un peuplement adulte de *Pinus ponderosa* réduisait l'assimilation du carbone de l'écosystème de 30%. Le changement dans le LAI est la principale explication de cette diminution de l'assimilation du carbone. En comparaison, dans notre étude, le LAI total a été réduit de 65% contre 35% dans Doré et al. (2010), ce qui explique la plus forte diminution de *GPP* que nous avons observée. Notons que le débroussaillement et le dépressage sont réalisés à la fin de l'automne, au moment de flux très faibles. Ainsi, l'impact sur les flux de carbone n'est pas visible immédiatement, mais plutôt sur le long terme. Une des limites de notre étude est le fait que *GPP* ne pouvait pas être discrétisée entre les pins et la strate de l'inter-rang. La contribution de la strate d'ajoncs sur la parcelle C et la contribution de la végétation recolonisant l'inter rang et/ou de la litière en terme de décomposition sur la parcelle W n'ont donc pas pu être déterminés pendant la saison de croissance. Toutefois, étant donné le parallèle fort dans la dynamique de *LE* et *GPP* durant la période de croissance et la période sèche dans les deux parcelles, nous pouvons supposer que la dynamique de *GPP* a également été influencée par la dynamique de la strate d'ajoncs. Par conséquent, il semble que la sécheresse estivale ait fortement impactée cette strate. Cette conclusion est conforme aux observations sur le même site directement après la coupe rase (Jarosz et al. 2009), qui ont montré que la végétation accompagnatrice a été aussi sensible que les pins à la sécheresse estivale.

L'efficience apparente de l'utilisation de la lumière obtenue en été avait une valeur moyenne de 0.041 et 0.038 µmol $_{(CO2)}$ $\mu mol^{-1}_{(PAR)}$ pour les parcelles W et C respectivement. Ces valeurs sont inférieures à la valeur moyenne de 0,064 trouvée pour des peuplements de pins matures de Finlande (*Pinus sylvestris* et graminées/arbustes nains), de Grande Bretagne (*Picea sitchensis* et graminées) et de France (*Pinus pinaster* et graminées/ajoncs), mais dans la gamme des valeurs trouvées pour des coupes rases dans ces mêmes pays : de 0,028 à 0,057 (Kowalski et al 2004). Nous avons vu que la strate accompagnatrice a été plus sensible aux conditions sèches. Par conséquent, une hypothèse pour expliquer l'inversion observée du rapport a_1/a_2 pendant la sécheresse estivale est que la couche d'ajoncs

deviendrait moins efficiente dans l'utilisation de la lumière (fermeture stomatique, photoinihibition). Etant l'espèce dominante sur la parcelle C par rapport à la parcelle W, cette strate aurait tendance à faire diminuer le ratio a_1/a_2 sur la parcelle C.

Globalement, le débroussaillement de la strate d'ajoncs associé au dépressage des pins semble avoir eu un effet bénéfique sur la **croissance des arbres** (Figure 3. 7), conformément à Juodvalkis et al. (2005). Ces derniers ont montré que, dans plusieurs peuplements jeunes, comprenant également des espèces de pins, l'éclaircie a entraîné une croissance radiale accrue. La différence d'âge d'un an entre nos deux parcelles n'a pas été considérée pour expliquer les différences observées dans la croissance en diamètre. En effet, les propriétés physiques du bois et la structure de l'arbre sont supposées ne pas varier pendant cette phase de croissance. Par ailleurs, les paramètres photosynthétiques n'ont pas montré de variations dans une chronoséquence de Pin maritime de la forêt des Landes (Delzon et al. 2005). Par conséquent, dans notre étude, la différence d'âge est implicitement prise en compte dans les différences de LAI et de la surface terrière, plus que dans les propriétés biophysiques internes de l'arbre.

3.5 Conclusion

Dans le contexte du changement climatique, les rôles importants des forêts se trouvent à la fois dans la séquestration du carbone en surplus dans l'atmosphère et dans la production intensive de bois-énergie susceptible de se substituer à l'émission de carbone fossile équivalente. Les options de gestion de peuplements d'arbres dédiés à la production de biomasse et d'énergie incluent les pratiques de débroussaillage et dépressage dont nous avons analysé l'impact à court terme sur les flux d'énergie d'eau et de carbone. Nous avons examiné les conséquences de ces pratiques sur les échanges d'énergie, d'eau et de carbone sur deux jeunes peuplements juxtaposés de pins maritimes, représentatifs des deux statuts sylvicoles (avant et après le dépressage et le débroussaillement) en utilisant un système de mesure apparié, comprenant des mesures au sol, des mesures à l'échelle de l'arbre, et du peuplement.

A l'échelle annuelle, le faible écart de rayonnement net induit par débroussaillage+dépressage a été expliqué par des effets compensatoires de l'augmentation de l'albédo et de la diminution de rayonnement de grandes longueurs d'onde émis par la surface. Pour une énergie disponible comparable, la destruction mécanique de la végétation adventice a modifié les composantes du bilan d'énergie avec d'importantes variations saisonnières. Ainsi, le flux de chaleur latente et de la production primaire brute étaient plus importants durant la saison de croissance sur la parcelle non traitée que sur la parcelle traitée, ce qui peut être attribué à un plus fort LAI sur cette parcelle. Cette différence a été sévèrement réduite au moment de la sécheresse estivale, au cours de laquelle les valeurs de flux de la parcelle témoin sont réduites au point de rejoindre celles observées sur la parcelle débroussaillée. Cette dernière a également subi une diminution de *LE* et *GPP*. Cet effet de la sécheresse est probablement lié à la fermeture stomatiques des pins et des ajoncs. La diminution drastique de *LE* et *GPP* sur la parcelle C est due aux effets de la sécheresse sur l'ajonc, plutôt que sur les pins. Les pins des deux parcelles ont eu des réponses simultanées à la sécheresse, même si les densités différaient. Ce comportement a également été

observé dans la croissance des arbres : la croissance relative du diamètre du tronc a stoppé simultanément sur les deux parcelles au cours de l'épisode de sécheresse. Les arbres dépressés et dégagés de la végétation accompagnatrice n'ont donc pas bénéficié immédiatement de l'élévation de la disponibilité en eau du sol car leurs racines n'ont probablement pas entièrement recolonisé le volume de sol libéré.

La réduction du LAI total suite au débroussaillement et au dépressage n'a pas eu pour conséquence de transformer la parcelle W en source de carbone ce à quoi nous aurions pu nous attendre. Les deux parcelles ont agi en puits de carbone à l'échelle annuelle et pendant l'été mais constituent une source de carbone en hiver. Malgré une faible différence dans l'évapotranspiration annuelle totale, la séquestration nette de carbone était inférieure de 73% sur la parcelle W. L'ensemble des observations peut contribuer à une compréhension de l'avantage opérationnel du contrôle de la végétation adventice et du dépressage au premier stade de la croissance des peuplements de pins maritimes, notamment par l'effet bénéfique sur la croissance. Cependant, l'approche expérimentale entreprise dans cette étude n'a pas permis de considérer les bénéfices liés à la présence d'une espèce fixatrice d'azote. Watt et al. (2003) ont montré que pour des peuplements de jeunes *Pinus radiata* accompagnés de genêts à balai, l'azote libéré après le débroussaillement pourrait améliorer la croissance des arbres évoluant sur des sols pauvres en éléments nutritifs et donc en azote. Cependant, il est connu qu'en conditions sèches, le stress hydrique peut limiter l'absorption des nutriments par les arbres (Kreuswieser et Gessler 2010). Augusto et al. (2009), et Kreuswieser et Gessler (2010) ont déterminé la fixation significative d'azote par les ajoncs (*Ulex europeaus* L.) et les genêts, respectivement, ce qui pourrait augmenter la croissance des arbres sur le long terme, mais de telles augmentations de la croissance du pin dépendront également de la disponibilité en eau pour le système racinaire du pin. Les futures études sur les avantages de ces options de gestion sylvicole sur la croissance des jeunes peuplements pour le bois-énergie doivent tenir compte de ces aspects.

Chapitre 4

Bilan hydrique et croissance d'une plantation d'*Eucalyptus* dans le Sud-Ouest de la France :

Analyse comparée avec deux jeunes peuplements de Pins maritimes

---

Plan du chapitre

Avant-propos 84

Chapitre 4. Bilan hydrique et croissance d'une jeune plantation d'*Eucalyptus* dans le Sud-Ouest de la France 85

4.1 Introduction 85

4.2 Matériels et méthodes 88

4.2.1 Sites expérimentaux 88
4.2.2 Dispositif expérimental 89
4.2.3 Détermination de la conductance de couvert 93
4.2.4 Bilan hydrique 94
4.2.5 Analyses statistiques 95

4.3 Résultats 95

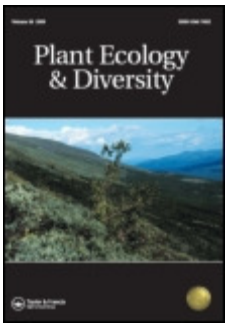
4.3.1 Conditions météorologiques 95
4.3.2 Conditions édaphiques 97
4.3.3 Bilan hydrique des peuplements 99
4.3.4 Contrôles environnemental et physiologique de la consommation en eau 102
4.3.5 Croissance des arbres et efficience d'utilisation de l'eau 106

4.4 Discussion 109

4.4.1 Utilisation en eau totale 109
4.4.2 Composantes de l'évapotranspiration 111
4.4.3 Contrôles physiologiques et édaphiques 113
4.4.4 Utilisation de l'eau et réponse de la croissance 114

4.5 Conclusion 115

Avant-propos



Le présent Chapitre a fait l'objet d'une publication acceptée pour le journal 'Plant Ecology and Diversity'

Water use of young maritime Pine and *Eucalyptus* stands in response to climatic drying in south-western France.

Virginie Moreaux[1] (*), Anthony P. O'Grady[2], Nicolas Nguyen-The[3] and Denis Loustau[1].

1. INRA, UR1263 EPHYSE, F-33140, Villenave d'Ornon, France.
   * Corresponding author virginie.moreaux@bordeaux.inra.fr (+33 5 57 12 23 74)
2. CSIRO, CSIRO Ecosystem Sciences, Private Bag 12, Hobart Tas 7001,Australia
3. FCBA, Station Sud-Est, Domaine universitaire - BP 251, 38 044 Grenoble cedex 9; France.

Abstract

There is increasing interest in developing eucalypt stands in France for biomass energy but the water requirements of eucalypt coppice are largely unknown. We assessed the water use and growth of two 5 year-old managed forest stands: an indigenous maritime pine stand and an introduced *Eucalyptus* stand, using a combination of meteorological, sap flow, soil and biomass measurements, between January 2010 and July 2011. The stand structure was the main driver of both water use and its partitioning between water balance components in each site. The evapotranspiration was high in the *Eucalyptus* stand with a significant contribution of tree transpiration due to high LAI of the tree canopy. Under well-watered conditions, both species exhibited a similar stomatal behaviour in relation to vapour pressure deficit, and, with high biomass production, the two stands presented a maximal water use efficiency in respect to their local environments and constraints. However, they experienced significant sensitivity to successive early-spring and summer droughts. The unexpected prolonged soil water deficit in the eucalypt stand, induced by high water consumption and insufficient water supply, directly impacted leaf shedding and stem secondary growth. In contrast, the pines appeared conservative with respect to soil water deficits and maintained secondary growth.

Keywords: *Pinus pinaster* Aït., water use, *Eucalyptus*, drought, water deficit, transpiration, biomass production.

Chapitre 4. Bilan hydrique et croissance d'une jeune plantation d'*Eucalyptus* dans le Sud-Ouest de la France

Dans le Chapitre précédent, nous avons traité principalement de l'impact d'une pratique sylvicole sur les échanges d'énergie, d'eau et de carbone de deux jeunes peuplements de pins maritimes. Nous avons pu mettre en évidence les effets des modifications de structure du couvert sur ces échanges dans le cas du Pin maritime. Ce Chapitre a pour objet de déterminer et analyser le comportement hydrique et ses variations en réponse aux conditions climatiques d'une variété d'*Eucalyptus* hybride de *gunnii* et *dalrympleana* déjà utilisée dans le Sud-Ouest de la France pour la production intensive de bois-fibres et biomasse.
Nous comparons le comportement hydrique de l'*Eucalyptus* aux deux jeunes peuplements de pins étudiés précédemment.

4.1 Introduction

Pour répondre à la demande croissante en bois-énergie (IPCC 2011), le développement de systèmes de sylviculture dédiée (taillis à courte/très courte rotation ou futaie résineuse à courte rotation) permet de produire rapidement de la biomasse et représente une option potentiellement intéressante dans les régions comme le Sud-Ouest de la France. Cependant, les derniers résultats en accord avec la synthèse du GIEC (2007) montrent que les régions du sud de la France seraient très probablement plus affectées par le changement climatique. Les modèles climatiques pronostiquent des épisodes de sécheresse accrue en période estivale avec des déficits pluviométriques importants (Planton et al. 2008, Giannakopoulos et al. 2009, Déqué et Cloppet 2010). Dans le cas particulier du massif des Landes de Gascogne, une des priorités suite aux tempêtes Martin (1999) et Klaus (2009) consiste à reconstituer les peuplements dégradés, mais la pauvreté des sols landais limite les choix de reboisement. Dans ce double contexte énergie-climat, l'impact de ces nouveaux agro-systèmes, destinés à la production intensive de biomasse, sur la ressource hydrique constitue un questionnement majeur.

Le genre *Eucalyptus* compte près de 700 sous-espèces dont les plus aptes à une exploitation forestière font l'objet de nombreuses études à travers le monde. La croissance rapide des *Eucalyptus* s'accompagne a priori d'un fort besoin en eau (Cabral et al. 2010), soupçonné d'amener à la raréfaction de la ressource. La littérature existante concerne l'Australie, le Brésil, le Congo, l'Afrique du Sud, puis l'Espagne, le Portugal ou encore l'Inde et la Chine. Les recherches menées sur les peuplements d'*Eucalyptus* en Australie ont montré que la consommation en eau varie suivant les régions, les espèces considérées, les conditions environnementales et les pratiques culturales (O'Loughlin et al. 2001), ce qui est finalement généralisable aux autres régions du monde. Dans

certaines régions du monde, la consommation en eau des cultures d'*Eucalyptus* peut aller jusqu'à provoquer l'assèchement de la nappe phréatique, entraînant une baisse du niveau des rivières de leur débit à l'étiage. Comparé aux peuplements de Pins, cet effet pourrait être important en raison de la forte croissance juvénile de l'*Eucalyptus* (Dye 1996, Jackson et al. 2005, van Dijk et Keenan 2007, Scott et Prinsloo 2008). Une conséquence négative dans le contexte d'augmentation de la ressource en biomasse serait par conséquent la diminution de la disponibilité en eau régionale. A l'inverse, Almeida et al. (2007) montrent que l'eau n'est pas un facteur limitant dans un peuplement d'*Eucalyptus grandis* hybride au Brésil. Sur six années d'études, l'évapotranspiration totale est inférieure aux précipitations et les conséquences sur la profondeur des nappes phréatiques ne sont pas significatives, la zone racinaire n'atteignant pas la nappe. En conditions climatiques plus comparables à celles du Sud-Ouest de la France, l'*Eucalyptus* peut s'adapter à des situations de sécheresse importante. Il possède une capacité de régulation stomatique de la transpiration ainsi qu'une capacité à mobiliser l'eau à des niveaux de potentiel hydrique bas (Poore et Fries 1986, David et al. 1997, Mielke et al. 1999, Soares et Almeida 2001, O'Grady et al. 2008). Mais dans ces conditions climatiques, typique des zones méditerranéennes, le facteur important permettant de maintenir une croissance juvénile forte est très probablement la capacité de recharge en eau du sol pendant la période hivernale (Pereira De Almeida et Riekerk 1990, Silberstein et al. 2001). Parallèlement, on attribue à l'*Eucalyptus* une bonne efficience d'utilisation de l'eau (Stape et al. 2004), d'autant plus s'il est conduit en peuplement mixte (Forrester et al. 2010). Si le peuplement est soumis à un apport d'eau par irrigation, certains auteurs montrent que l'efficience d'utilisation de l'eau augmente (Stape et al. 2004, 2008) ou se maintient (Olbrich et al. 1993, Le Roux, et al. 1996, Hubbard et al. 2010).

Peu d'études ont été menées sur le bilan hydrique de peuplements d'*Eucalyptus* en France. La plupart concernaient l'adaptation de différentes espèces aux contraintes climatiques comme le gel (Lacaze 1962). Grieu et Maury (2004) - la seule étude française - rapportent une capacité d'ajustement osmotique importante chez *E. gundal* mais inexistante chez E. *gunnii*. Dans la présente étude, l'espèce étudiée, *Eucalyptus gundal* est un hybride naturel d'*Eucalyptus gunnii* et *Eucalyptus dalrympleana*, de provenance australienne. Plusieurs centaines d'hectares sont aujourd'hui boisés de ces hybrides d'abord sélectionnés dans les années 1980 puis clonés et plantés avec succès dans le sud de la France. Les clones 121 sont parmi les plus performants en terme de capacité de croissance et présentent une bonne résistance au gel, bien qu'ils n'aient pas résisté à l'extrême climatique de 1985 dans la région de Toulouse. Ils sont aujourd'hui mis en avant auprès des sylviculteurs pour cette capacité de croissance (Melun et Nguyen The, 2006) Ils constituent un rendement important pour la filière papier, et un potentiel certain pour la filière bois-énergie.

Tenant compte de ces observations, il s'agit donc d'analyser dans le contexte du Sud-Ouest de la France les contraintes environnementales et notamment climatiques sur la production de biomasse.

En France, le fonctionnement hydrique des peuplements de pins maritimes adultes a déjà été largement étudié (Berbigier et al. 1991, 2001, Granier et Loustau 1994, Delzon et Loustau 2005, Jarosz et al. 2008) et récemment dans les jeunes peuplements (Stella et al. 2009, Moreaux et al. 2011). Ainsi, annuellement dans le massif des Landes de Gascogne, la demande évaporative représentée par

l'évapotranspiration réelle (*ETR*), est inférieure aux précipitations annuelles. Mais la variabilité saisonnière des précipitations et leur déficit estival amènent des conditions de stress hydrique, notamment sur sol à faible réserve utile, e.g. en landes dites sèches où la nappe phréatique est à une profondeur inférieure à la zone de prospection racinaire. En réponse au stress hydrique, le Pin maritime adopte une stratégie d'évitement en développant une régulation stomatique de la transpiration et la réduction de sa surface foliaire (Delzon et Loustau, 2005).

En raison de son indice foliaire non négligeable, le sous-bois joue un rôle important dans le fonctionnement des peuplements de Pins maritimes adultes à la fois sur la répartition des composantes du bilan hydrique et le bilan en lui-même. Au stade jeune, ce rôle demeure important : malgré les interventions visant à en réduire le développement (débroussaillage, disquage), le sous-bois recolonise l'inter-rang rapidement, (cf. Chapitre 2). Cette recolonisation est modeste dans les peuplements d'*Eucalyptus* dont le couvert ferme beaucoup plus tôt. Toutefois la coexistence entre des Pins à très forte densité et un tapis d'ajoncs par exemple ne semble affecter que très peu l'évapotranspiration totale relativement à un jeune semis dépressé et débroussaillé et le stress hydrique subi par les Pins est pratiquement inchangé (Moreaux et al. 2011). En terme d'efficience d'utilisation de l'eau, Stella et al. (2009) montrent que les peuplements, indépendamment de l'âge voient leur efficience augmentée lors des années plus humides comparée à une année plus sèche (Jarosz et al. 2008). Tout comme pour les peuplements d'*Eucalyptus*, la productivité des peuplements de Pins maritimes augmente en conditions de pluviométrie plus importante, en condition irriguée (Trichet et al. 2009), et dans les sites où les racines des pins accèdent à la nappe phréatique (landes humides, Guillot 2011). Afin d'orienter les options techniques de préparation du sol et de gestion du sous-étage dans les itinéraires de sylviculture intensifs évaluer l'impact des conditions environnementales et édaphiques sur les ressources hydriques et la croissance est une priorité. Pour cet objectif, nous avons comparé le fonctionnement hydrique de trois jeunes peuplements :

- un peuplement de Pins maritimes à forte densité comportant un sous-bois d'ajoncs développé (5 ans), cette végétation accompagnatrice pourrait être utilisée comme engrais vert azoté ;
- un peuplement de Pins maritimes débroussaillé et dépressé (6 ans) sans sous-étage, qui représente une autre option culturale (fertilisation minérale) ;
- un peuplement d'*Eucalyptus* (6 ans).

L'expérimentation a été menée en parallèle sur les trois sites entre 2010 et 2011. La présente étude vise à répondre plus spécifiquement aux questions suivantes:

i. Quelle est la consommation en eau annuelle et saisonnière d'un peuplement d'*Eucalyptus* dans le Sud-Ouest de la France et comment l'évapotranspiration totale est-elle répartie entre les différentes composantes du bilan hydrique ?

ii. Dans quelle mesure, ce comportement hydrique est-il différent de l'espèce indigène?

iii. Quels facteurs contrôlent l'utilisation en eau en réponse aux fluctuations climatiques ?

iv. Quelles sont les performances en terme de croissance de *E. gundal* au regard des conditions pédoclimatiques ?

4.2 Matériels et méthodes

4.2.1 Sites expérimentaux

Le premier site expérimental se situe sur la commune de Montbartier (43°54'03.22″ N ; 1°17'25.17″ E, altitude : 137 m, en région Midi-Pyrénées de climat océanique dégradé (Chapitre 2). La parcelle étudiée couvre une superficie de 15 ha et a été plantée d'*Eucalyptus gundal* clone 121 en octobre 2004, les plants installés ayant passé 6 mois en pépinière. Les caractéristiques générales de la parcelle sont données dans le tableau suivant (Tableau 4.1). A vocation énergétique, cette parcelle suit un itinéraire type : taillis à courte rotation sur un cycle de 3 fois 10 ans. En 2010, la parcelle présente une structure homogène dont le sous-bois est quasiment inexistant, excepté en lisière de parcelle avec quelques ajoncs (*Ulex Europaeus*). Le sol est argilo-limoneux, de type boulbène, dont le pH acide avoisine les 5.5. La litière est principalement constituée d'écorces mortes des troncs d'*Eucalyptus* et de feuilles mortes. La parcelle échantillonnée pour l'installation des capteurs présente une surface de 2 500 m^2 (soit 50 m sur 50 m) comprenant 13 lignes espacées de 4 m en moyenne et 20 arbres par ligne en moyenne, espacés de 2.5 m sur la ligne. Le dispositif expérimental comprend un ensemble de mesures météorologiques, de flux de sève, de croissance radiale du tronc et d'humidité du sol. Trois inventaires y ont été réalisés, en juillet 2010, janvier 2011 et juillet 2011, pour déterminer la hauteur, circonférence à 1.30 m, hauteur de la première branche vivante, rayon de la couronne suivant les axes x et y dont le détail est présenté ci-après.

Les deuxième et troisième sites se situent à Bilos (44°29'38.08″ N ; 0°57'22″ W, altitude : 40 m) (Tableau 4.1), en région Aquitaine, de climat océanique tempéré. le peuplement est issu d'un semis de Pin maritime dont la superficie totale représente environ 60 ha. La parcelle a été divisée en deux parties appelées Bilos 1 et Bilos 2 présentant chacune une surface de 30 ha. Les deux sites ont été semés de pins maritimes (*Pinus pinaster* Ait.) en juillet 2004 et juillet 2005 pour Bilos 1 et Bilos 2 respectivement. Le sol de Bilos est caractéristique de lande humide, sableux, podzolique et hydromorphe.

Bilos 1 a été conduit en réduisant la végétation accompagnatrice au minimum de façon mécanique. Il a été débroussaillé et dépressé au mois de novembre 2008, puis en novembre 2009. En 2010, la surface du sol est occupée par de la litière, constituée d'aiguilles et de branches mortes et de végétaux en décomposition suite au débroussaillement de 2009. La végétation accompagnatrice a recolonisé dès le mois de mars l'inter-rang.

Bilos 2 est conduit comme une option de fertilisation par l'ajonc et la parcelle n'a encore subi aucune intervention sylvicole, à savoir ni dépressage ni débroussaillement. La végétation présente une strate herbacée abondante, dominée par l'ajonc nain, et atteignant près d'1 m de haut, couvrant entièrement l'inter-rang des pins. D'autres espèces composent cette strate dont bruyères et fougères (cf. Chapitre 2).

Tableau 4. 1 Caractéristiques générales des trois sites étudiés.

	BILOS 1	BILOS 2	MONTBARTIER
Coordonnées	44° 29' 38.08'' N	44° 29' 38.08'' N	43° 54' 03.22'' N
	0° 57' 21'' O	0° 57' 21.9'' O	1° 17' 25.17'' E
Altitude (m)	40	40	137
Espèces en présence	*Pinus pinaster Aït*	*Pinus pinaster Aït*	*Eucalyptus gundal*
Age *	5.5	4.5	5.5
Sous-bois	*Ulex minor Roth.*	*Ulex minor Roth.*	Herbes éparses
	Diverses herbacées	Diverses herbacées	*Ulex Europeaus* en lisière
Densité (arbres ha^{-1})	1800	14400	1040**
LAI moyen (m^2 m^{-2}) (arbres)	0.85	1.44	4.5
Caractéristiques des arbres :			
DBH (mm)**	51.2 ± 15.7	25.9 ± 11.4	133 ± 24
H (m)**	3.19 ± 0.65	2.38 ± 0.76	15.0 ± 1.5
Surface terrière (m^2 ha^{-1})**	3.7	7.58	14.5
Pratiques sylvicoles	Débroussaillements répétés		
(2008-2009)	(11/09)	-	-

* en janvier 2010

* * en janvier 2011

4.2.2 Dispositif expérimental

i. Mesures à Montbartier

- Mesures météorologiques à 16 m et mesures dans le sol

Parmi le dispositif décrit dans le Chapitre 2, nous décrivons ici les mesures ayant servi spécifiquement pour cette étude. Pour les mesures de rayonnement, la station comprend un capteur de densité de flux de photons (cellule de silicium amorphe), *PPFD* en µmol m^{-2} s^{-1} (SKY 215 : Skye Instruments Limited, Powys, UK), un radiomètre, R_n en W m^{-2}, (NR-Lite, Kipp et Zonen, Bohemia, NY, USA). La température de l'air, T_a en °C, et l'humidité relative, *RH* en %, sont également mesurées sous abri non ventilé (CS215, Campbell Scientific, Logan Utha, USA). La pluie incidente est mesurée par un pluviomètre à auget basculant (SBS500, Campbell Scientific, Logan Utha, USA). Enfin la vitesse et la direction du vent sont données par un anémomètre-girouette à hélice (RM Young, Campbell Scientific, Logan Utha, USA). La teneur en eau du sol, SWC en m^3 m^{-3}, a été suivie par un réseau de 14 sondes TDR (Time Domain Reflectometry, CS616, Campbell Scientific, Logan Utha, USA) réparties dans 4 profils :

- Deux profils de 5 sondes chacun à -20 cm, -40 cm, -65 cm, -95 cm et -130 cm.
- Un profil de 3 sondes à -20 cm,-40 cm et -65 cm.
- Une sonde à -20 cm.

Le contenu en eau du sol total a été par la suite estimé sur l'horizon 0-150 cm.

▪ Flux de sève et transpiration

La densité de flux de sève a été mesurée pour 6 arbres également suivis pour leur croissance radiale. La méthode de dissipation thermique (Granier 1985, 1987) a été utilisée et la transpiration a été calculée à partir de ces mesures selon l'approche décrite dans le Chapitre 2.

▪ Biomasses de différents compartiments

Des mesures de biomasse par compartiment ont été effectuées sur 15 arbres-échantillons représentatifs de la parcelle en décembre 2009 (N. N'Guyen The et Francis Melun, *comm. pers.*). Hauteur, diamètre à 1.30 m et poids de matière sèche ont été déterminés. Les compartiments de biomasse mesurés sont le bois du tronc, l'écorce du tronc, les branches et les feuilles. L'analyse de ces données a permis d'en déduire des relations allométriques pour les biomasses de chaque compartiment et pour la biomasse aérienne totale, W_i en kg arbre^{-1}. Nous ne considérons dans ce Chapitre que la relation associée à la biomasse foliaire et la biomasse aérienne totale.

$$W_i = a_i \times \mathrm{DBH}^{b_i} \qquad \text{Equation 4. 1}$$

où DBH est exprimé en m et *i* représente soit le feuillage, soit la partie aérienne. Nous faisons l'hypothèse que cette relation est valable pour la période d'étude 2010-2011. Les modèles sont décrits dans le Tableau 4.2.

Tableau 4. 2 Synthèse des relations allométriques établies sur le site d'*Eucalyptus* en décembre 2009.

Modèle allométrique	a_i	b_i	***Somme des carrées***		***P-value***
			Total	Résidus	
Biomasse foliaire	260.6	1.7521	605.1	6.5611	<0.0001
Biomasse du tronc	1926.3	2.1646	6355.0	24.3061	<0.0001
Biomasse de l'écorce	153.9	1.7745	192.9	0.8406	<0.0001
Biomasse des branches	1276.6	2.4178	1026.0	24.3849	<0.0001
Biomasse aérienne totale W_a	3281.7	2.1143	22527.3	44.3645	<0.0001

▪ Croissance des arbres et chute de litière

L'étude de la croissance radiale a été menée suivant deux protocoles. Les 6 arbres suivis pour les mesures de densité de flux de sève ont également été suivis en continu pour la croissance du rayon à

l'aide de microdendromètres fabriqués au laboratoire. Par ailleurs, en juillet 2010, janvier 2011 et juillet 2011, la circonférence du tronc à 1.30 m du sol, dont le diamètre DBH en cm a été déduit sous l'hypothèse d'une section horizontale circulaire, a été mesurée sur un échantillon de 287 arbres contenu dans la placette de 50×50 m. Ces mesures ont par ailleurs permis de calculer les biomasses pour chacune de ces périodes. Un sous-échantillon de 32 tiges (1 arbre sur 10 + 6 arbres suivis pour le flux de sève et la croissance radiale) a été sélectionné pour la mesure de hauteur totale, Ht (méthode de triangulation au Vertex).

La chute de litière a été suivie par relevés mensuels de 20 pièges circulaires de 0.716 m^2 de superficie, placés approximativement à 20 cm au-dessus de la surface. Ils ont été répartis aléatoirement le long des arbres et dans l'inter-rang. La masse sèche des feuilles et autres fractions a été déterminée séparément, après passage à l'étuve à 65°C.

- Efficience d'utilisation de l'eau

L'efficience d'utilisation de l'eau, WUE, a été définie ici comme le rapport entre l'incrément annuel en biomasse aérienne et la transpiration annuelle, soit :

$$\mathrm{WUE} = \frac{\Delta W_a}{E} \qquad \text{Equation 4. 2}$$

Les périodes sélectionnées pour ce calcul sont 2010 et 2010-2011 (du 05/2010 au 04/2011).

ii. Mesures à Bilos 1 et Bilos 2

- Mesures météorologiques à 6.7 m et mesures dans le sol

Ces mesures ont déjà été décrites au cours des Chapitres 2 et 3. Nous rappelons ici les mesures nécessaires à cette étude. Sur les deux sites, le capteur CNR4 (Kipp et Zonen, Delft, The Netherlands) a été installé pour mesurer les 4 composantes du bilan d'énergie en W m^{-2}, le rayonnement global incident R_g, le rayonnement global réfléchi aR_g, le rayonnement atmosphérique incident $LW\downarrow$, et le rayonnement de grande longueur d'onde émis par la surface, $LW\uparrow$. Le rayonnement net, R_n en W m^{-2} est déduit de l'équation bilan :

$$R_n = R_g - aR_g + LW\downarrow - LW\uparrow \qquad \text{Equation 4. 3}$$

La température de l'air, T_a, et l'humidité relative, *RH*, ont été également mesurées (CS215, Campbell Scientific, Logan Utha, USA) à z = 6 m sur les deux sites. La pluie incidente est mesurée par un pluviomètre à auget basculant (Bilos 1 : ARG100, Campbell Scientific, Bilos 2 : R100, Munro Instruments Ltd, Essex, UK). Enfin la vitesse et la direction du vent ont été données par un anémomètre à coupelle à Bilos 1 (Vector Instruments, North Wales, UK) et par un moniteur de vent à Bilos 2 (05103 RM Young, Campbell Scientific, Logan Utah, USA). La teneur en eau du sol, SWC en

m^3 m^{-3}, a été suivie par un réseau de 24 sondes TDR réparties dans 4 profils à Bilos 1 et 8 sondes TDR sur 2 profils à Bilos 2 (Time Domain Reflectometry, CS615, Campbell Scientific, Logan Utah, USA) :
Bilos1 :

- Deux profils à 0.15 (×2), 0.30, 0.45, 0.60 et 0.80 m
- Deux profils à 0.15 (×2), 0.30 (×2), 0.45 et 0.60 m

Bilos 2 :

- Deux profils à 0.10, 0.20, 0.45 et 0.80 m

Le contenu en eau du sol total, résultant d'un profil moyen, a été par la suite estimé sur l'horizon 0-80 cm sur les deux sites.

- Flux de sève et transpiration

La méthode est la même que celle utilisée à Montbartier avec un calcul de la surface d'aubier dans chacun des deux sites.

- Estimation de la biomasse aérienne totale.

Pour l'évaluation de la biomasse aérienne totale W_a à partir des caractéristiques dimensionnelles des arbres, la relation de Porté et al. (2000) ajustée sur jeune peuplement a été utilisée.

$$W_a = 5.395 \times 10^{-2} \times \mathrm{DBH}^{1.885} \times \mathrm{age}^{0.621}$$ Equation 4. 4

- Croissance radiale et chute de litière

L'étude de la croissance radiale a été menée suivant deux protocoles :

- mesure en continu du diamètre sur 6 arbres de Bilos 1 et 6 arbres de Bilos 2, à l'aide de microdendromètres, fabriqués au laboratoire ;
- mesure annuelle de la circonférence à 1.30 (mètre ruban) en février 2009, février 2010 et décembre 2010.

La chute de litière a été suivie uniquement à Bilos 1, par la mise en place de 20 pièges circulaires de 0.716 m^2 de superficie, placés approximativement à 20 cm au-dessus de la surface. Ils ont été répartis aléatoirement le long des arbres et dans l'inter-rang. Le contenu des pièges a été collecté une fois par mois en période hivernale et 2 fois par mois en période estivale. Les biomasses des {feuilles} et {autres fractions} ont été déterminées séparément, après séchage en étuve ventilée à 65°C.

- Efficience d'utilisation de l'eau.

L'Equation 4.2 est utilisée pour calculer l'efficience d'utilisation de l'eau. Les périodes utilisées pour ce calcul sont 2009 et 2010 à Bilos 1 et 2.

4.2.3 Détermination de la conductance de couvert

L'inversion de l'équation de Penman-Monteith (Equation 4.5) a permis de remonter à une conductance de couvert pour chaque peuplement en utilisant les variables météorologiques mesurées, les caractéristiques du couvert et la transpiration obtenue à partir des flux de sève.

$$\frac{1}{g_c} = \frac{1}{g_a} \cdot \left(\frac{\varepsilon(Rn) + \rho . c_P . g_a \frac{VPD}{\gamma}}{Tr} - \varepsilon - 1 \right) \qquad \text{Equation 4. 5}$$

La conductance aérodynamique g_a a été calculée suivant Launiainen et al. (2010) :

$$g_a = \frac{1}{r_a} \quad et \quad r_a = r_{a,m} + r_b = \frac{\bar{u}}{u*^2} + \frac{kB^{-1}}{ku*} \qquad \text{Equation 4. 6}$$

Avec :

Tr	W m^{-2}	Transpiration (conversion de la transpiration mesurée E)
Rn	W m^{-2}	Rayonnement net
g_a	m s^{-1}	Conductance aérodynamique
r_a	s m^{-1}	Résistance aérodynamique
$r_{a,m}$	s m^{-1}	Résistance aérodynamique pour le transfert de moment
r_b	s m^{-1}	Résistance quasi laminaire de la couche limite
$\bar{u}$	m s^{-1}	Vitesse moyenne du vent à la hauteur de mesure
u*	m s^{-1}	Vitesse de friction
k	-	= 0.4, constante de Von Karman
kB^{-1}	-	= 2 pour les forêts (Verma, 1989)
s	Pa K^{-1}	Pente de la courbe de pression de vapeur saturante
γ	Pa K^{-1}	constante psychrométrique
ε	-	= s/γ
ρ	kg m^{-3}	Densité de l'air
VPD	Pa	Déficit de pression de vapeur
c_p	J kg^{-1} K^{-1}	Chaleur massique de l'air à pression constante

Sous l'hypothèse d'un couvert homogène, cette méthode est bien appropriée pour confronter la conductance ainsi calculée aux paramètres climatiques et édaphiques (e.g. Granier et Loustau 1994, Mielke et al. 1999). Un modèle de conductance de couvert en réponse à ces paramètres a été établi sur un pas de temps journalier. Ce modèle a été établi suivant l'approche de Jarvis (1976) en considérant un couvert sec (P < 0.2 mm), de jour (R_g > 20 W m^{-2}) et pour des VPD > 0.1 kPa.

$$g_c = g_{c,max} \times f(\text{VPD}) \times f(T_a) \times f(\text{SMD}) \times f(\text{PAR}) \qquad \text{Equation 4. 7}$$

Le modèle a été paramétré en utilisant les données collectées et par régression non linéaire (procédure NLIN, Logiciel SAS Version 9.2 pour Windows) (§ 4.2.5).

4.2.4 Bilan hydrique

L'équation du bilan hydrique a été établie ainsi pour les trois peuplements :

$$\Delta \mathrm{SWC} = P - E - I - E_{\mathrm{s}} - R - D \qquad \text{Equation 4. 8}$$

- *P* représente la pluie incidente mesurée au-dessus du couvert.
- *E* correspond à la transpiration des arbres calculée à partir des mesures de densité de flux de sève.
- L'interception des précipitations par le houppier, *I*, n'est pas mesurée. Elle est très dépendante de la surface foliaire (Nizinski et Saugier 1989), mais aussi du régime pluviométrique (Dye, 1996). D'un ensemble de publications, il ressort que l'interception annuelle par un couvert d'*Eucalyptus* varie de 10% à 34% des précipitations incidentes (Whitehead et al. 2004). Les valeurs les plus faibles recensées correspondent à des zones climatiques plus sèches comparées aux valeurs les plus fortes observées en climat tropical humide. La valeur de 12% retenue dans cette étude est basée sur les résultats obtenus au Portugal pour des peuplements d'*E. globulus* âgés de 7 à 9 ans et pour des précipitations annuelles similaires entre 700 et 900 mm (Valente et al. 1997). Cette valeur est légèrement plus faible que celles observées dans cinq forêts naturelles d'*Eucalyptus* en Australie dont l'interception par la canopée représente de 13 à 17% de la pluviométrie (Adams et Attiwill, 1991).
- L'équation de Penman-Monteith a été utilisée pour calculer l'évaporation du sol, E_s, en déterminant l'énergie disponible au niveau du sol, R_{nsol}, et la conductance du sol, g_{sol}.
- Dans notre cas, en considérant la topographie plane du site, le ruissellement, *R,* a été négligé. Dans un grand nombre d'études, il n'excède pas 3% de la pluie qui arrive au sol. Par exemple au Portugal, cette valeur n'excède pas 1% (Pereira De Almeida and Riekerk, 1990).
- Le terme D correspond aux transferts hydriques à la base du profil de sol. Il a été déduit comme étant le résidu de l'Equation 4.8. Les valeurs positives correspondent à un mouvement vertical de l'eau vers la nappe, i.e le drainage. Un résidu négatif est attribué à des remontées capillaires ou des différences de potentiels hydriques (redistribution hydraulique).
- L'évapotranspiration totale *ET*, a été calculée comme la somme de *E*, *I* et E_{s} pour la parcelle d'*Eucalyptus* et mesurée directement par la méthode des flux turbulents à Bilos (Chapitres 2 et 3).

L'évapotranspiration de référence, ET_{o}, a été estimée à partir de l'équation FAO-PM (Allen et al. 1998) et des mesures météorologiques. Elle définit l'utilisation en eau potentielle en l'absence de limitation de l'eau du sol.

4.2.5 Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées grâce au logiciel statistique SAS 9.2 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA, 2002-2008) via la procédure NLIN. Le meilleur ajustement est retenu en considérant la somme des carrés résiduels, l'analyse des résidus et le coefficient de corrélation et également en admettant une cohérence physique/biologique. Le logiciel R a également été utilisé pour des ajustements polynomiaux lors du traitement des données de flux de sève (fonction lowess).

Dans l'analyse qui suit, les dénominations suivantes ont été choisies pour chacun des sites :

- Bilos 1 : site de Pins (Parcelle W du Chapitre précédent)
- Bilos 2 : site de Pins+ajoncs (Parcelle C du Chapitre précédent)
- Montbartier : site d'*Eucalyptus*.

4.3 Résultats

4.3.1 Conditions météorologiques

Les sites de Bilos et de Montbartier présentent des températures moyennes annuelles (du 01/01/2010 au 31/12/2010) de 12.1°C et 12.2 °C et des précipitations de 818 mm et 655 mm respectivement (Figure 4.1 A). Nous n'avons pas distingué sur ce graphe les deux sites de Pins étant donnée leur similitude météorologique (Chapitre 3). Bilos et Montbartier enregistrent annuellement des *VPD*, *RH* et R_g du même ordre de grandeur, soit : 0.47 kPa, 76% et 4600 MJ m^{-2} respectivement. Par rapport à la moyenne 1993-2007, les deux sites présentent une température moyenne annuelle plus faible que la normale, qui s'explique par un hiver anormalement froid (mois de janvier, février et décembre 2010). A l'inverse, les deux sites connaissent une température en avril 2010 plus élevée de +1.1°C par rapport à la normale trentenaire. Un déficit de précipitations est observé sur les deux sites (-75 mm à Bilos et -70 mm à Montbartier). De plus, la période étudiée est marquée par l'augmentation de la saisonnalité dans les épisodes pluvieux, comparé au régime moyen saisonnier (Figure 4.1 B). Les sites de Pins maritimes ont connu un printemps et un été 2010 plus secs, avec un déficit des précipitations de -74 mm et -178 mm respectivement, mais équilibré partiellement à l'échelle annuelle par un excès de précipitations à l'automne 2010 de +161 mm. Un déficit de précipitation a également eu lieu début 2010 à Montbartier (février – mai) avec une valeur de -70 mm comparée à sa valeur moyenne à long terme, là aussi partiellement équilibré à l'échelle annuelle par l'épisode exceptionnel sur quelques jours de juin 2010 (+83 mm). Une tendance plus prononcée a été observée au printemps 2011 avec une anomalie de température de 3°C sur les deux sites en avril et un déficit pluviométrique entre février et mai 2011 de -155 mm et -125 mm à Bilos et Montbartier respectivement.

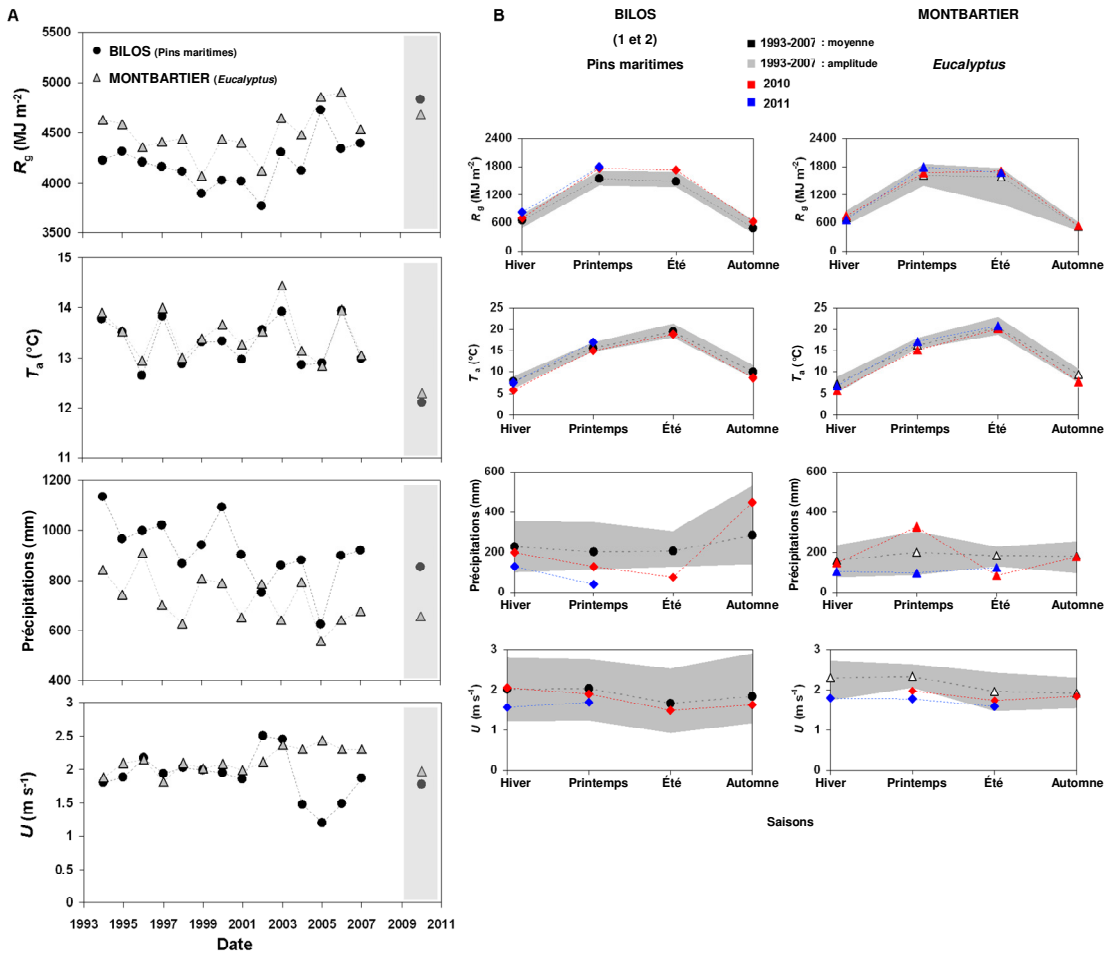


Figure 4. 1 Suivi annuel des variables climatiques entre 1993 et 2007 (A) et tendances saisonnières pour 2010 et 2011 en comparaison à 1993-2000 (B) pour les deux sites Montbartier et Bilos.

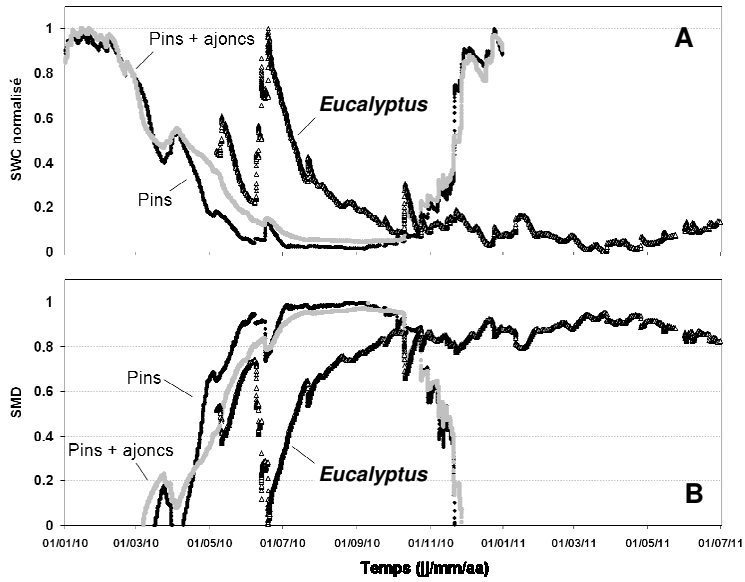


Figure 4. 2 Séries chronologiques A- du stockage d'eau dans le sol normalisé (SWC) et B- du déficit hydrique du sol pour les trois sites (SMD). La tranche de sol considérée correspond à la zone de prospection racinaire évaluée à 0-80 cm pour les sites de Pin maritime et 0-150 cm pour le site d'*Eucalyptus*.

4.3.2 Conditions édaphiques

Les sites de Pins et Pins+ajoncs présentent une évolution annuelle assez standard de la teneur en eau du sol (Figure 4.2 A), avec une diminution du contenu en eau du sol au cours de la saison de croissance, pour atteindre des valeurs minimales en août et une recharge à la fin de l'été. Le site d'*Eucalyptus* présente une évolution plus contrastée et inattendue avec comme observations majeures, une grande sensibilité aux épisodes pluvieux et un assèchement progressif du sol qui ne se recharge pas en hiver et pour les saisons suivantes (Figure 4.2 A).

Partant de teneurs en eau du sol élevées sur les deux sites de Pins au début de l'année, le sol s'assèche dès le début du mois de février pour atteindre des valeurs proches du point de flétrissement dès fin juin sur le site de Pins. Il est surprenant de noter que la parcelle débroussaillée atteint un déficit hydrique plus rapidement que la parcelle Pins+ajoncs, dont le minimum, proche du point de flétrissement est atteint mi-juillet. Ce comportement est sans doute attribué au développement du sous-bois qui bénéficie de conditions optimales entre février et mai pour recoloniser l'inter-rang. De surcroît, la couverture faible du site de Bilos 1 réduit l'interception des précipitations et la transpiration et permet une réalimentation en eau précoce. Il faut attendre l'évènement pluvieux du 4 octobre pour que le sol de Bilos 2 se réalimente et sorte de son état déficitaire. A ce stade, il semble que la végétation ne soit plus en mesure d'extraire l'eau du sol.

Caractérisé par des structures de sols différentes, le site de Montbartier retient plus d'eau que celui de Bilos avec des teneurs en eau nettement plus élevées de mars à octobre (Figure 4.2 A). Par ailleurs, le site d'*Eucalyptus* montre une dynamique plus sensible aux épisodes pluvieux (début mai, mi-juin et octobre). Cependant, il semble que les précipitations ne suffisent pas à réalimenter le sol en hiver, et une diminution de son contenu en eau est à noter à la fin de l'année conduisant à un déficit hydrique supérieur à 0.8 contre des valeurs proches de la capacité au champ sur les sites de Pins où la nappe phréatique occupe de nouveau la zone de mesure (Figure 4.3, encart).

Les teneurs en eau plus élevées sont également observables sur le site de Montbartier au regard des profils établis sur la Figure 4.3, qui s'expliquent principalement par une capacité de rétention en eau plus importante dans la zone 50-150 cm que sur les autres sites. Il semble cependant que le prélèvement racinaire s'effectue principalement en surface (0-50 cm) pour les trois sites.
Concernant le profil vertical du site d'*Eucalyptus*, une très nette discontinuité est visible autour de 50 cm avec des teneurs en eau divisées par 4 dans l'horizon de surface. Un second profil (résultat non montré) présente la même discontinuité bien que moins prononcée. Ces différences apparaissent suivant le positionnement des sondes dans la parcelle (proches des *Eucalyptus* ou dans l'inter-rang). Deux horizons à comportement hydrique contrasté sont donc présents (Figure 4.3) :

- dans la partie superficielle, le profil s'assèche (entre mai 2010 et août 2010) avec une réalimentation en surface après les épisodes pluvieux (décembre 2010) et la teneur en eau atteint des valeurs faibles à mettre en relation avec un prélèvement racinaire sans doute important en surface.

- en dessous de 50 cm, il semble que les épisodes pluvieux de juin (environ 65 mm de précipitation entre le 7 et le 16 juin) apportent de l'eau à des niveaux plus élevés que le reste de l'année, à relier avec la forte capacité de rétention en eau de ce type de structure (cf. § discussion). Par la suite, le profil s'assèche dans cette zone (entre juillet 2010 et décembre 2010) probablement à relier avec un prélèvement racinaire, même minime à l'automne, jusqu'à 1 m de profondeur environ.

Pour les 2 profils de Bilos, leur évolution au cours des 3 périodes mai 2010, juillet 2010 et août 2010 est similaire avec un assèchement du profil jusqu' à l'automne. La remontée de la nappe jusqu'à 50 cm de profondeur et les fortes précipitations de novembre augmentent les teneurs en eau le long des profils (décembre 2010). Moins d'interception sur le site de Pins augmente la teneur en eau dans les 20 premiers centimètres par rapport au site Pins+ajoncs. Entre juillet 2010 et août 2010, correspondant aux deux périodes sèches de l'été, le profil du site de Pins n'évolue plus et atteint quasiment le point de flétrissement. Les processus de transfert d'eau rencontrés dans cette zone correspondent à l'évaporation du sol associée au prélèvement racinaire par le sous-bois d'une part et les pins d'autre part. Ainsi, sur les deux sites de Pins, la zone en dessous de 60 cm semble correspondre à une zone où la biomasse racinaire est très probablement moins développée, où les teneurs en eau atteignent des valeurs plus élevées qu'en surface au cours des 4 périodes (Annexe 3).

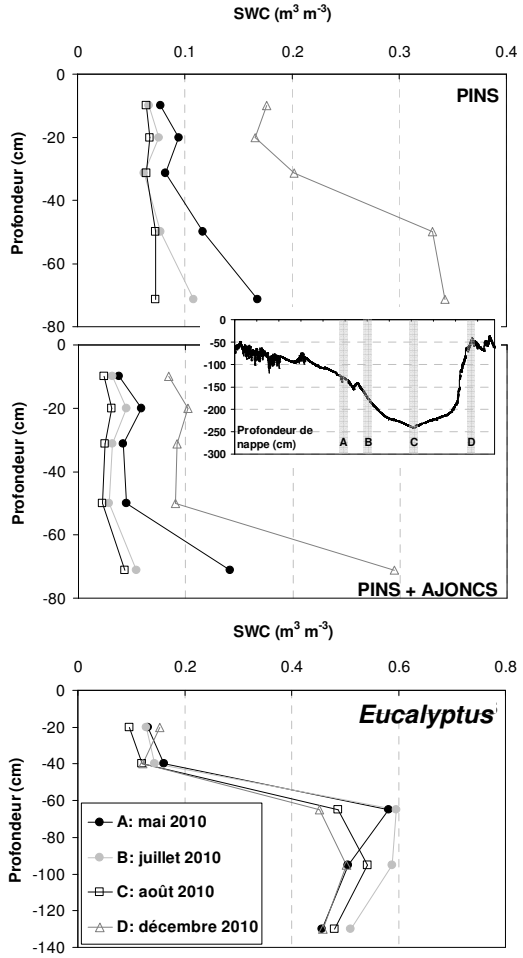


Figure 4. 3 Profil d'humidité du sol sur la zone de prospection racinaire : 0-150 cm à Montbartier et 0-80 cm pour les sites de Pins, pour 4 périodes d'intérêt. L'évolution de la profondeur de nappe est également présentée pour Bilos. *(Les échelles diffèrent entre les sites de Pins et celui d'Eucalyptus pour une meilleure lecture).*

4.3.3 Bilan hydrique des peuplements

i. Utilisation en eau des peuplements

Les cumuls saisonniers de différentes composantes du bilan hydrique sont présentés dans le Tableau 4.3. En 2010, l'utilisation en eau par le peuplement d'*Eucalyptus* a atteint 675.8 mm soit un excès de 3% par rapport aux précipitations. Le compartiment arbre (*E+I*) représente la contribution majeure de l'évapotranspiration annuelle totale, et compte pour 75% de ce terme. Le terme résiduel du bilan hydrique est supposé correspondre au drainage souterrain (le ruissellement étant négligé) et atteint une valeur de 24 mm. Pour les peuplements de Pins maritimes, l'évapotranspiration totale a représenté 64% et 78% des précipitations annuelles pour les Pins et les Pins+ajoncs respectivement. Pour le site débroussaillé, l'évaporation du sol associée à la transpiration du sous-bois représente le terme dominant de l'évapotranspiration totale, soit 60% contre 40% pour l'évapotranspiration de l'arbre (*E+I*). Cette tendance est inversée pour le peuplement de Pins+ajoncs où les valeurs atteignent 39% et 61% respectivement. Le drainage annuel représente des valeurs plus élevées avec 311.9 mm et 177.8 mm pour les sites de Pins et de Pins+ajoncs respectivement.

Tableau 4. 3 Synthèse des valeurs saisonnières et annuelles des différentes composantes du bilan hydrique et de l'efficience d'utilisation de l'eau estimées pour les trois peuplements.

Composantes du bilan hydrique	*P* (mm)	ET_o (mm)	*ET* (mm)	*E* (mm)	*D* (mm)
Pins					
Printemps (A M J) 2010	129.2	327.5	216.8	36.2	6
Saison de croissance (M J J A S) 2010	180.8	548.6	301.2	64.8	-93.8
Annuel (01/2010 -12/2010)	853.1	854.6	542.2	128.4	311.9
Pins + ajoncs					
Printemps (A M J) 2010	129.2	331.8	245.6	81.5	-30.8
Saison de croissance (M J J A S) 2010	180.8	565.4	328.5	119.3	-80.4
Annuel (01/2010 -12/2010)	853.1	879.7	663.9	255.9	177.8
Eucalyptus					
Printemps (A M J) 2010	243	338.4	236.3	154.7	-
Saison de croissance (M J J A S) 2010	289.8	585.7	362.2	226.4	-10.3
Cumul (05/2010 - 12/2010)	467.9	671.5	464.2	289.8	68.3
Annuel (01/2010 -12/2010)	**654.8**	-	**675.8**	**425.5**	-
Printemps (A M J) 2011	80.4	354.7	156.4	109.1	-105
Annuel (05/2010 - 04/2011)	**591.3**	883.8	**638.4**	**410.9**	23.9

WUE (kg_{DM} m^{-3})	2009	2010	2010-2011*
Pins	1.57	**2.42**	-
Pins + ajoncs	1.76	**2.22**	
Eucalyptus	-	**3.78**	1.64

* du 07/2010 au 07/2011

ii. Analyses journalières : flux de sève et transpiration

Si l'*Eucalyptus* présente des densités de flux de sève plus élevées pour les périodes de croissance de la végétation (Mai 2010, juillet 2010 et août 2010), l'évolution saisonnière de la densité de flux de sève moyenne de chaque site est assez similaire (Figure 4.4). L'*Eucalyptus* présente en effet un maximum en mai avec des valeurs atteignant 5×10^{-5} m^3 m^{-2} s^{-1} à midi, contre un maximum journalier de 3.2×10^{-5} m^3 m^{-2} s^{-1} atteint vers 9h TU pour les Pins et les Pins+ajoncs. Le minimum de flux est atteint en hiver avec 1×10^{-5} m^3 m^{-2} s^{-1} pour les 3 sites. Après un printemps plutôt sec, les densités de flux de sève de mai 2010 à juillet 2010 montrent des valeurs réduites de 32% pour la parcelle de Pins, 37.5 % pour la parcelle de Pins+ajoncs et 35% pour la parcelle d'*Eucalyptus*. De juillet 2010 à août 2010, une diminution de 9% est observée sur les parcelles d'*Eucalyptus* et de Pins, contre 5% pour la parcelle de Pins+ajoncs.

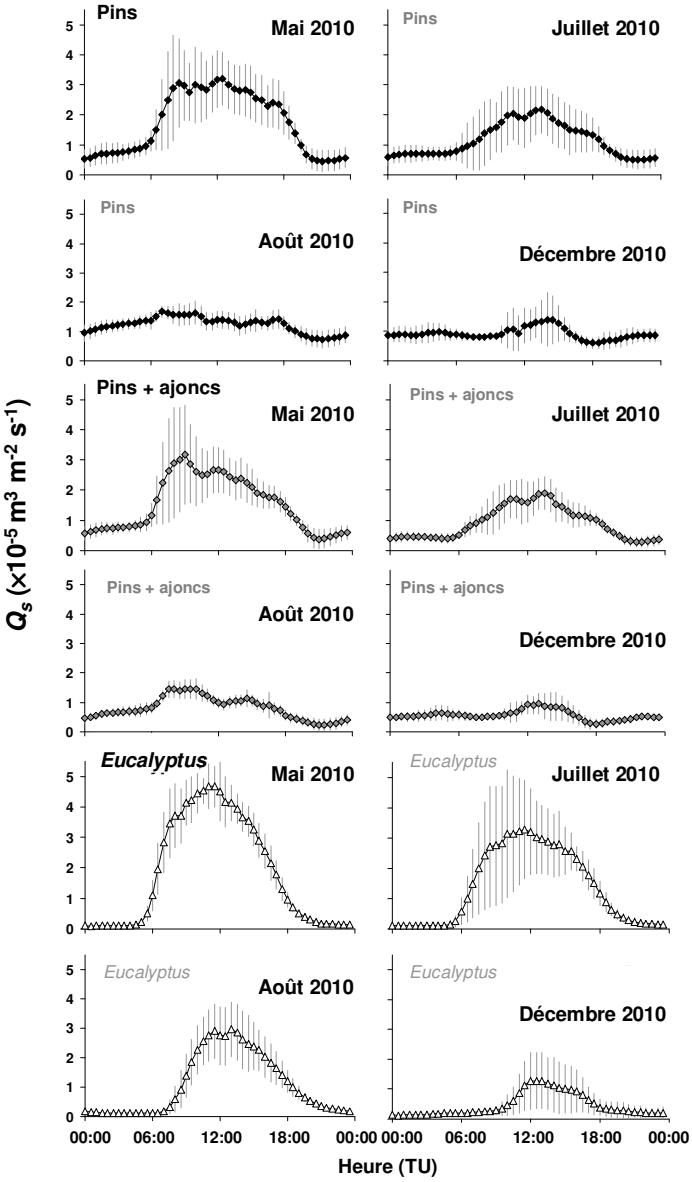


Figure 4. 4 Evolution journalière de la densité de flux de sève moyennes de chaque site, pour 4 périodes d'intérêt. Les barres verticales indiquent l'écart-type des densités sur la période considérée.

Afin de comprendre les facteurs qui contrôlent la diminution des flux observée simultanément sur les sites, la transpiration a été calculée et représentée sur la période de croissance de mai à septembre 2010 (Figure 4.5). La transpiration, exprimée par unité de surface au sol (Figure 4.5 A) varie en moyenne mensuelle de 0.85 mm j^{-1} à 1.38 mm j^{-1} pour le peuplement d'*Eucalyptus* en septembre et juillet respectivement, les extrema étant de 0.1 mm j^{-1} en conditions sèches et 2 mm j^{-1} par ailleurs Les valeurs sont bien moindres sur le peuplement de Pins, avec une moyenne mensuelle de 0.38 à 0.47 mm j^{-1} pour mai et août respectivement. Pour le peuplement Pins+ajoncs, le maximum mensuel moyen est également atteint en mai (1.05 mm j^{-1}) et le minimum est observé en août (0.57 mm j^{-1}). Les valeurs extrêmes journalières sont de 0.24 et 0.64 mm j^{-1} et de 0.22 et 1.30 mm j^{-1} respectivement pour le site de Pins et le site de Pins+ajoncs. Malgré la distance qui les sépare et les conditions édaphiques différentes observées, les 3 sites amorcent une chute de la transpiration simultanée dès le 20 mai 2010. Par ailleurs, les 3 sites répondent également simultanément à un apport d'eau. Après un fort épisode pluvieux, la transpiration tend à diminuer rapidement sur les deux sites de Pins mais plus progressivement sur le site d'*Eucalyptus* extrêmement sensible aux épisodes pluvieux.

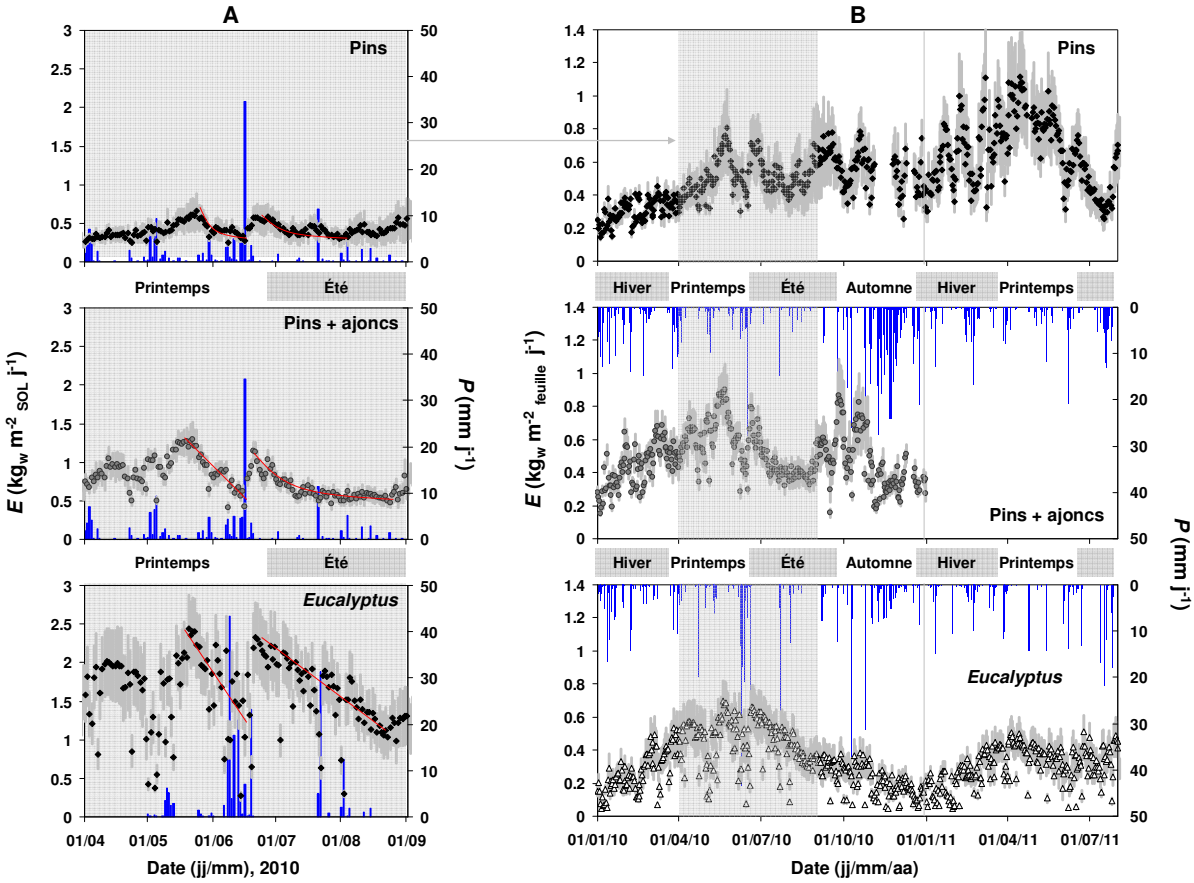


Figure 4. 5 (A) Evolution journalière de la transpiration des trois peuplements pour la période de croissance 2010. L'amplitude des précipitations est également représentée. Les lignes pleines en rouge soulignent la tendance de décroissance. (B) Dynamique de la transpiration sur toute la période, exprimée par unité de surface foliaire. Les précipitations journalières sont également représentées (barres verticales bleues).

L'évolution parallèle de la transpiration des *Eucalyptus* et des Pins entre janvier 2010 et mi-septembre 2010 est frappante. Les Pins du site débroussaillé (Figure 4.5 B, en haut) et la transpiration des *Eucalyptus* présentent de surcroît des valeurs du même ordre de grandeur. A partir de l'automne 2010, les tendances divergent entre les sites. Les précipitations incidentes du site d'*Eucalyptus* sont inférieures au site de Pins qui profite largement des précipitations au début de l'automne (184 mm contre 415 mm de précipitations de mi-septembre à novembre). Bien que la valeur des précipitations d'automne sur le site d'*Eucalyptus* soit dans la normale régionale, elles sont insuffisantes pour restaurer la transpiration à son niveau précédent. A partir de janvier 2011, les deux sites suivent de nouveau une évolution similaire, bien qu'un écart soit observé entre les deux sites au détriment de la transpiration des *Eucalyptus*. Cet écart augmente d'ailleurs au début du printemps 2011 alors que la transpiration des Pins atteint sa valeur maximale (1.1 kg $m^{-2}{}_{leaf}\ j^{-1}$). En revanche, celle des *Eucalyptus* plafonne à 0.4 kg $m^{-2}{}_{leaf}\ j^{-1}$. Il semble que les conditions exceptionnelles du printemps 2011 produisent des effets similaires à 2010 avec une chute brutale de la transpiration dès le mois de juin ou juillet 2011 en particulier sur le site de pins. L'effet est d'autant plus marqué que la réduction de *E* sur le site de Pins a chuté en juillet 2011 à 52% de sa valeur de mai 2011 contre 22% en 2010 entre ces deux mêmes mois.

4.3.4 Contrôles environnemental et physiologique de la consommation en eau

Les tendances journalières observées sur une moyenne de 10 jours de mai 2010 pour les peuplements de Pins maritimes et d'*Eucalyptus* des variables climatiques et physiologiques étudiées sont présentées sur la Figure 4.6. Comme indiquée sur la Figure 4.1, cette période succède à des conditions météorologiques printanières favorables à la croissance et à des taux de transpiration maximums pour les trois sites, mais également à un assèchement du sol pour atteindre un déficit hydrique du sol autour à 0.6 dans les 3 cas. La tendance pour la même période de 10 jours en mai 2011 est également présentée pour l'*Eucalyptus* dont toutes les variables étaient disponibles. Il est alors intéressant de voir la réponse de la transpiration aux conditions environnementales (Figure 4.6). Ainsi dans le cas des peuplements de Pins maritimes, l'ouverture stomatique maximale est observée en début de matinée (06h30). La transpiration augmente alors fortement simultanément avec l'énergie disponible. Lorsque la conductance diminue, la transpiration tend à s'équilibrer puis diminuer (Pins) ou diminue continuellement (association Pins+ajoncs), au fur et à mesure que VPD augmente. En ce qui concerne le site d'*Eucalyptus*, les tendances observées sont différentes. En mai 2010, la transpiration semble en phase avec le rayonnement net et la diminution de la conductance engagée simultanément avec l'augmentation du VPD ne semble pas l'affecter. Le maximum de transpiration est ainsi atteint vers 12h, au maximum de l'énergie disponible. Les données disponibles pour l'*Eucalyptus* indiquent un comportement différent entre les deux années étudiées qui traduit l'effet prolongé du déficit hydrique du sol observé en 2011. En effet, l'ouverture stomatique a lieu 2h plus tard en 2011 et le maximum de la conductance observé à 07h30 en mai 2010 a lieu vers 10h30 en mai

2011. Ce décalage temporel a également pour conséquence un décalage dans la cinétique de la transpiration. Dès lors que la conductance diminue, la transpiration décroît simultanément. En 2011, le VPD atteint des valeurs plus élevées avec un maximum de 2.25 kPa vers 16h contre 1.5 kPa vers 15h en 2010. Les valeurs de conductance sont également plus faibles en 2011 qu'en 2010, d'où une réduction forte de la transpiration en 2011, comparée à 2010 pour la même période. La dynamique journalière observée de E, g_c et VPD, et leurs valeurs associées sont typiques de conditions de stress.

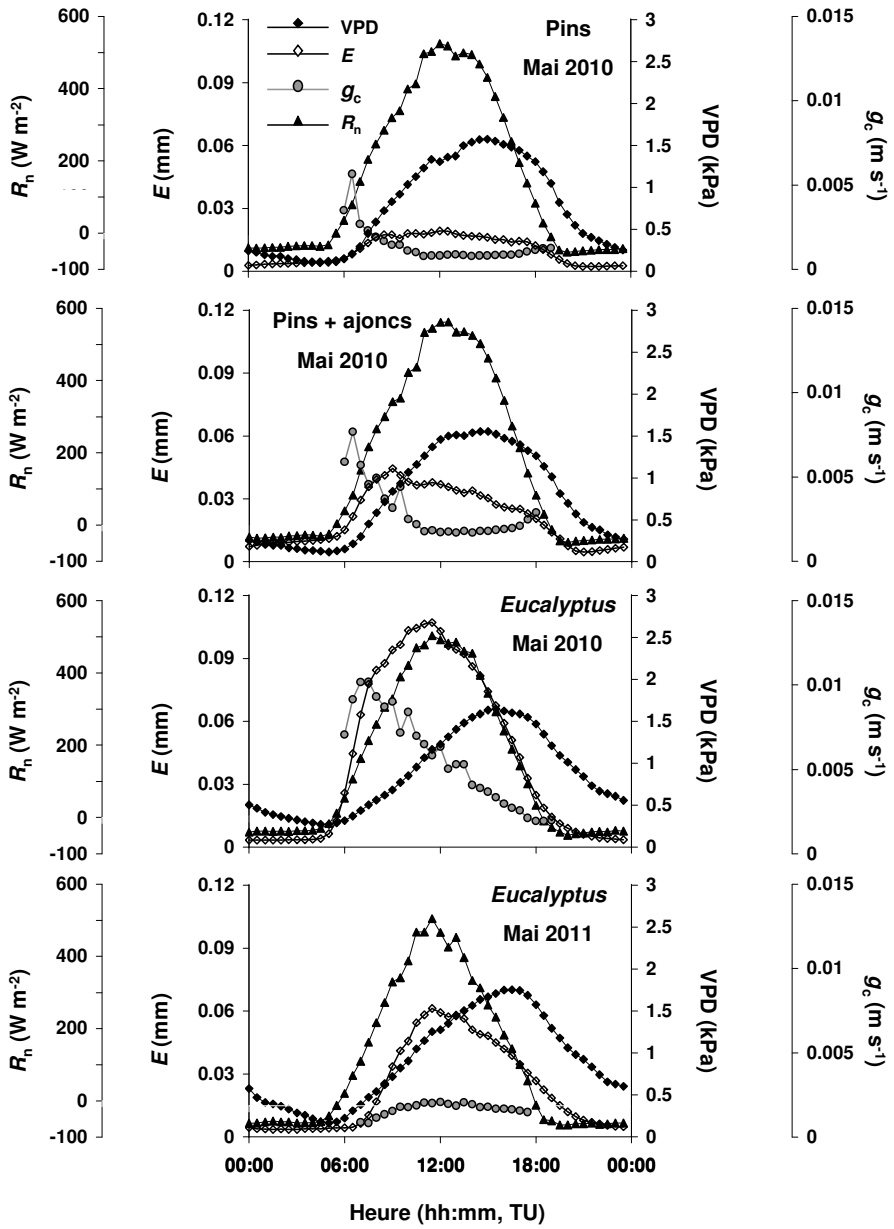


Figure 4. 6 Evolution horaire moyennée sur 10 jours des variables VPD, E, R_n, et g_c en mai 2010 (Pins, Pins + ajoncs et *Eucalyptus*) et en mai 2011 (*Eucalyptus*).

Le déficit de pression de vapeur explique une part importante de la variation de la conductance de couvert calculée, les effets potentiels d'autres variables environnementales, telles que rayonnement incident, déficit hydrique du sol ou la température de l'air, ne s'étant pas révélés statistiquement

significatifs lors de l'ajustement du modèle. Ainsi, les variations temporelles de g_c sont décrites simplement par une relation non linéaire avec le VPD, telle que représentée par l'Equation 4.7, k_o et k_1 étant explicités sur la Figure 4.7 :

$$g_c = f(\mathrm{VPD}) = \frac{k_0}{1 + \frac{\mathrm{VPD}}{k_1}} \qquad \text{Equation 4. 9}$$

Sur les trois sites, g_c diminue en réponse à une augmentation du VPD. Les valeurs maximales en moyenne journalière atteignent 2.5 cm s^{-1} sur le site d'*Eucalyptus* et 2 cm s^{-1} sur les deux sites de Pins.

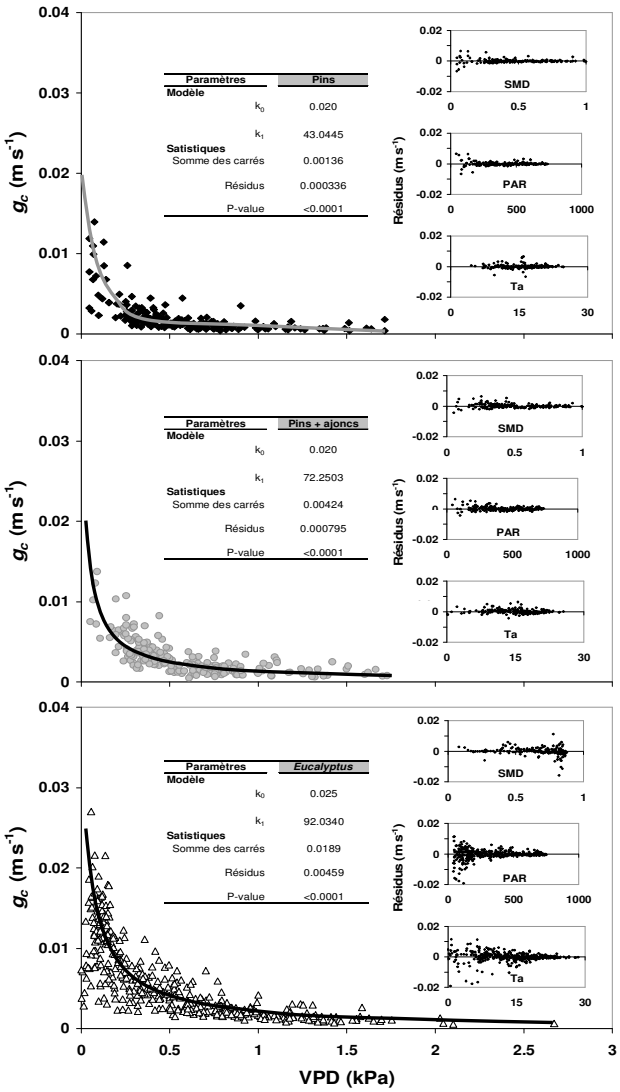


Figure 4. 7 Réponse de la conductance de couvert aux variations du déficit de pression de vapeur (symboles). g_c modélisé est également représenté (lignes) avec l'analyse statistique associée.

Les conditions de stress hydrique provoquées par le déficit en eau du sol sont confirmées sur la Figure 4.8. Cette dernière montre l'évolution temporelle de la transpiration relativement à l'évapotranspiration potentielle et celle du déficit hydrique du sol au cours des deux périodes critiques. Le rapport E/ET_o du peuplement de Pins reste faible autour de 0.18 dès le mois de mai 2010 et ce jusqu'à ce que la réserve en eau du sol augmente à partir de mi-septembre. La dynamique sur le site de Pins+ajoncs est plus marquée avec une diminution du rapport de 0.35 à 0.2 entre début mai et mi-août 2010 où il atteint sa valeur minimale. Une diminution du rapport E/ET_o est nettement visible à partir de mars 2011 sur le site d'*Eucalyptus* à lier à une augmentation de la demande évaporative, malgré un déficit hydrique du sol important. Par conséquent, entre mai 2010 et mai 2011, le rapport E/ET_o du site d'*Eucalyptus* est divisé par 2, pour atteindre une valeur de 0.2 en moyenne en mai 2011 contre 0.4 en moyenne en mai 2010.

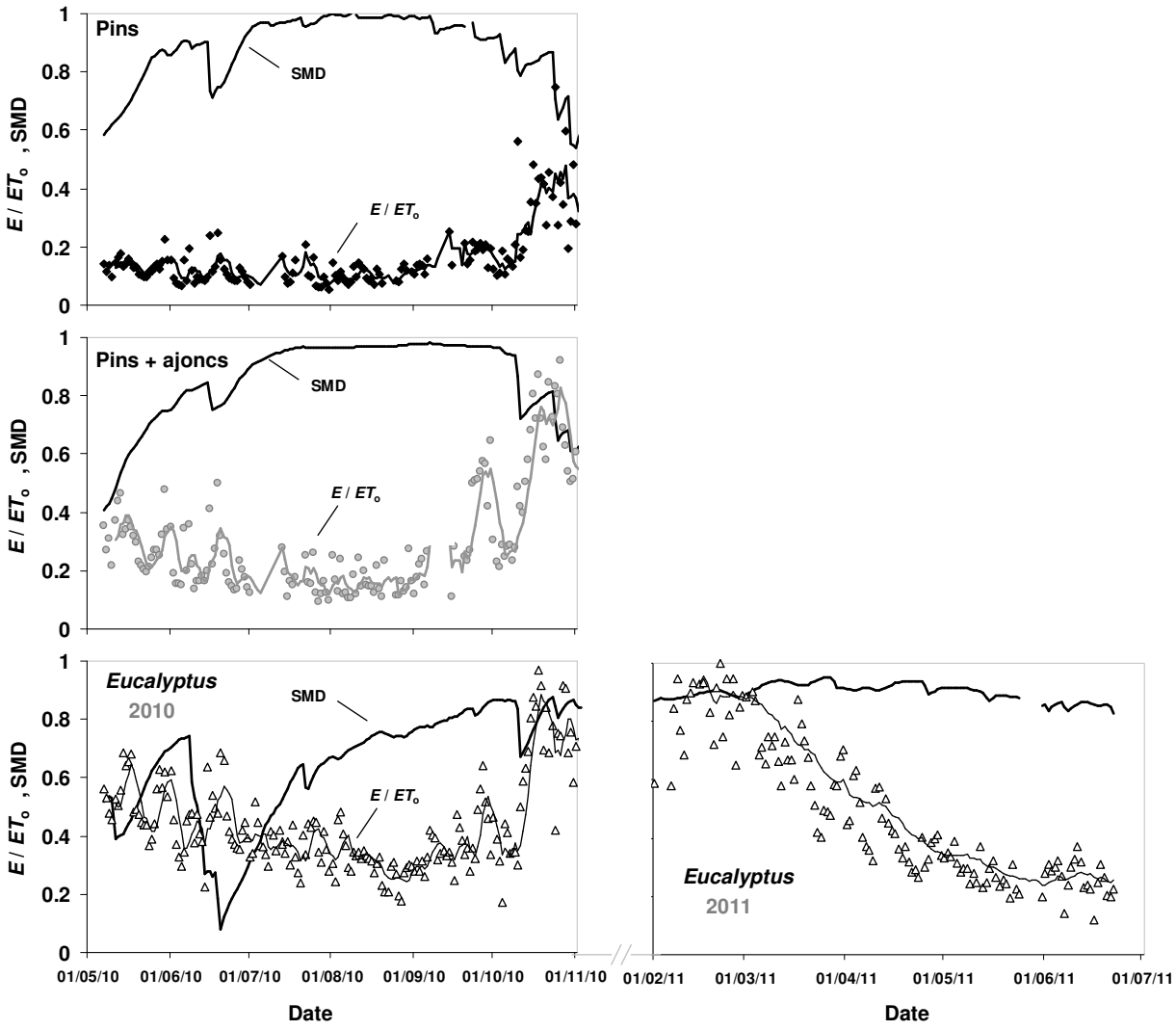


Figure 4. 8 Evolution journalière du rapport E/ET_o (symboles) et sa moyenne mobile sur une fenêtre de 5 jours. La dynamique du déficit en eau du sol, SMD (trait plein noir) entre juin et octobre 2010 (Pins, Pins + ajoncs et *Eucalyptus*) et entre février et juin 2011 (*Eucalyptus*) est également représentée.

4.3.5 Croissance des arbres et efficience d'utilisation de l'eau

En 2010, la croissance secondaire présente deux phases distinctes (Figure 4.9). La première commence le 20 février 2010 (non montrée sur la figure) et perdure jusqu'à fin juin. La croissance est ensuite ralentie jusqu'en octobre pour amorcer une deuxième phase de croissance après avec les pluies automnales. Ce n'est qu'autour du 15 novembre que l'*Eucalyptus* stoppe sa croissance secondaire pendant une période relativement courte de 3 mois. En 2011, la croissance secondaire débute au 16 février. Finalement sur la période considérée, le diamètre a augmenté de 1.59 cm. La dynamique de croissance radiale chez l'*Eucalyptus* est clairement reliée à la dynamique des précipitations tout comme l'était la transpiration en conditions hydriques du sol non limitantes (Figure 4.5 A). Nous pouvons citer les exemples des épisodes pluvieux de début mai 2010, juin 2010, 26 juillet 2010, début septembre et début octobre 2010 qui précédent tous une augmentation du diamètre de l'arbre. La variabilité entre les arbres est importante et augmente au cours du temps (graphes non montrés), ce qui explique l'écart-type important sur la Figure 4.9. Il est remarquable de noter la simultanéité de la croissance des arbres en réponse à ces épisodes pluvieux. L'accroissement en diamètre annuel de l'*Eucalyptus* est comparable à celle du site de Pins (+1.59 cm) en tenant compte de l'incertitude sur la mesure, ce qui est plutôt surprenant au vu de la croissance observée fin 2010 chez l'*Eucalyptus*. Ceci suggère que la sécheresse précoce en 2011 a affecté de façon plus drastique les *Eucalyptus* (exemple avec l'encart 1 du 25/06 au 27/06, Figure 4.9). En période estivale, l'activité cambiale est réduite simultanément sur les trois sites, ce qui pourrait être lié à un déstockage d'eau par le tronc en conditions de stress et indique que le prélèvement d'eau du sol n'est plus suffisant pour recharger les tissus. Le site de Pins+ajoncs suit la même dynamique que celle pour le site de Pins malgré un faible accroissement en diamètre de 0.59 cm entre avril 2010 et fin janvier 2011.

Au pas de temps journalier (encart 1 du 25/06 au 27/06, Figure 4.9), les trois sites présentent une phase d'accroissement dont le maximum est atteint entre 06h30 et 08h30 TU attribué à une recharge en eau du tronc, puis une phase de déshydratation dont le minimum est atteint également pour les trois sites à 15h00 TU. Pour l'encart 2 (11/10 au 13/10), ces deux phases ne sont plus visibles chez l'*Eucalyptus* les deux premiers jours, et seulement le premier jour pour les deux autres sites. Ce comportement correspond à une demande en eau réduite pour la transpiration et donc une recharge en eau des tissus xylémiens.

Les données de chute de litières apportent une information importante sur le comportement de l'*Eucalyptus* vis-à-vis des conditions environnementales (Figure 4.10). Alors que sur le site de Pins, les chutes de biomasse foliaire ont lieu entre juillet et septembre, sur le site d'*Eucalyptus*, ces chutes ont lieu dès le mois de mai (2010) voire avril (2011) et jusqu'à octobre. La chute sans doute exceptionnelle en avril 2011 est une réponse au stress hydrique rencontré à cette période. En bilan annuel, cela correspond entre mai 2010 et avril 2011 à une chute de LAI de 2.31 m^2 m^{-2} dont la moitié a lieu au mois d'avril 2010, contre une chute de LAI de 0.43 m^2 m^{-2}.

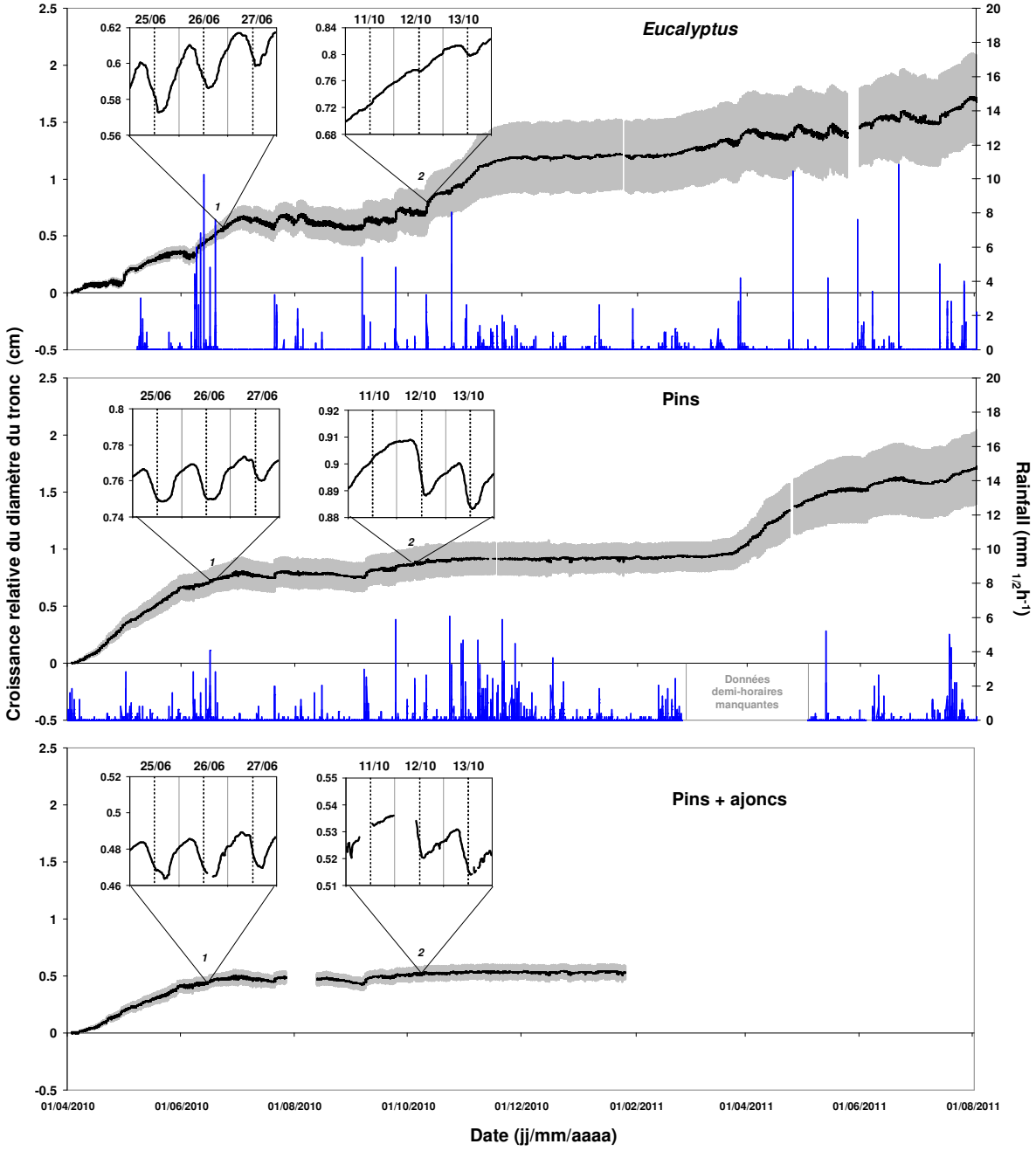


Figure 4. 9 Suivi de l'accroissement relatif du diamètre mesuré sous la première branche vivante, entre le 01/04/2010 et le 31/07/2011. Les mesures s'arrêtent au 26 janvier 2011 sur le site de Pins + ajoncs. La moyenne des 6 arbres est représentée pour les trois sites avec l'écart type associé (zone grisée). Les encarts présentent la dynamique journalière de trois jours consécutifs (du 25/06 au 27/06 et du 11/10 au 13/10). Pour ces encarts, les traits verticaux en pointillés gris indiquent 12h00 (TU) et le trait plein 00h00 (TU).

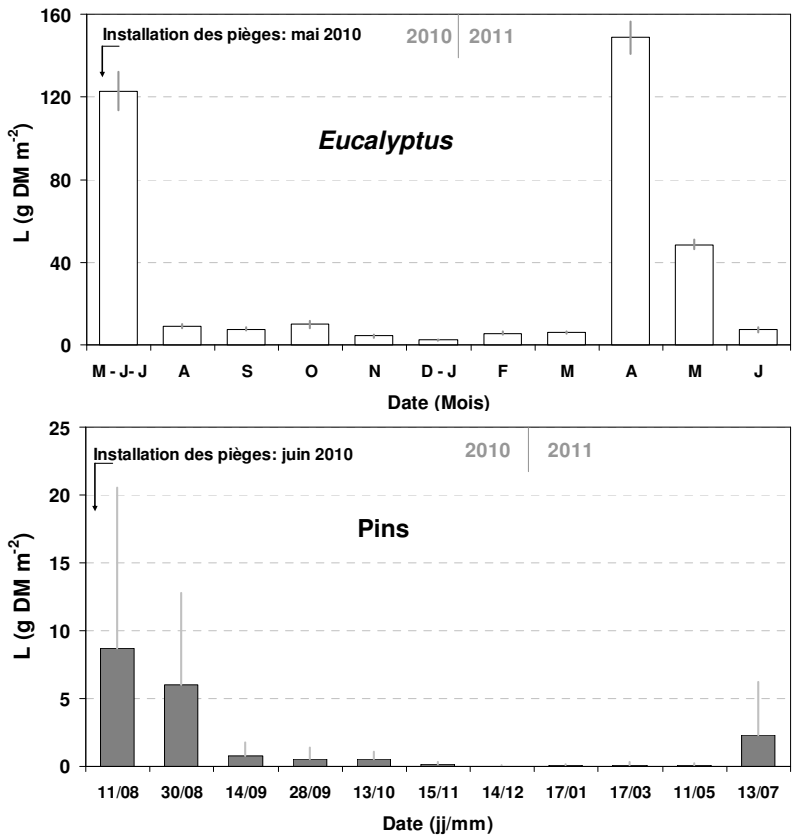


Figure 4. 10 Evolution des chutes de litières, mesurées sur le site d'*Eucalyptus* et de Pins maritimes. Les barres verticales indiquent les écarts types des 20 échantillons par site.

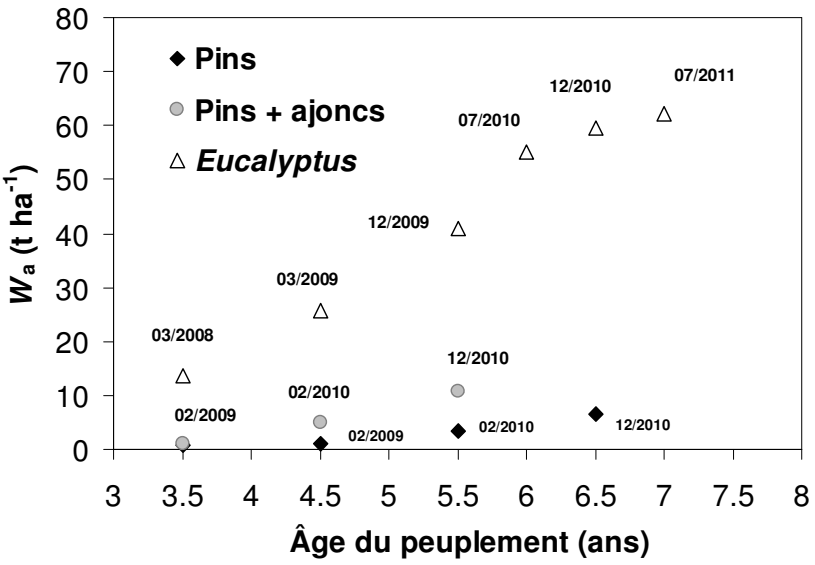


Figure 4. 11 Biomasse totale accumulée estimée pour différentes périodes. Entre 2008 et 2009, les estimations sur le site d'*Eucalyptus* ont été calculées à partir des données dendrométriques déterminées par les campagnes de mesures du FCBA (F. Melun et N. Nguyen The, *comm. pers*) et du modèle établi précédemment (Equation 4.1, Tableau 4.2).

Enfin, l'efficience d'utilisation de l'eau par le site de Pins (Tableau 4.1) augmente entre 2009 (1.57 kg $_{DM}$ m^{-3}) et 2010 (2.42 kg $_{DM}$ m^{-3}) en raison d'une consommation en eau plus faible et une production de biomasse plus importante en 2010. La tendance est similaire sur le site de Pins+ajoncs mais la production de biomasse est ralentie relativement à la consommation en eau du site élevée, diminuant l'efficience d'utilisation en eau par rapport au site de Pins.

Quant au site d'*Eucalyptus*, la valeur atteinte en 2010 est plus forte que sur les pins (3.78 kg $_{DM}$ m^{-3}), mais lorsque l'on considère la période début 2011 dans le calcul de l'efficience, celle-ci est sévèrement réduite, en raison d'un ralentissement plus important de la croissance en biomasse (Figure 4.11) relativement à la baisse de la consommation en eau.

4.4 Discussion

Les deux espèces que nous comparons évoluent sur deux environnements différents sur certains aspects liés à leur bilan hydrique respectif. Les deux sites de Pins sont caractérisés par un sol podzol sableux, dont la nappe phréatique est de faible profondeur notamment en hiver. Ce type de sol possède une faible capacité de rétention en eau. Le site d'*Eucalyptus*, quant à lui, est caractérisé par un sol limono-argileux à grande capacité de rétention en eau et défini très probablement par l'absence de nappe permanente dans les premiers mètres. Nous avons également noté que l'intensité des précipitations a nettement varié entre les deux sites au cours des printemps 2010 et 2011 et à l'automne 2010. Il n'est donc pas surprenant d'observer une évapotranspiration totale contrastée entre les deux types de sites pendant la période d'étude. Néanmoins, plusieurs similitudes dans le comportement hydrique des deux espèces doivent être remarquées, notamment leur sensibilité à la sécheresse atmosphérique ou édaphique durant l'expérience. Ce résultat est particulièrement pertinent compte tenu du fait que les conditions climatiques de la période d'étude 2010-2011 peuvent être considérées comme assez représentatives de futurs scénarios climatiques régionalisés de Météo-France (Déqué et Cloppet 2010, Loustau et al. 2005). Par ailleurs, il est important de souligner que notre étude est la première concernant le bilan hydrique d'*Eucalyptus* à cette latitude en Europe.

4.4.1 Utilisation en eau totale

L'indice foliaire est le pilote principal de l'utilisation en eau sur les trois sites. Avec un LAI supérieur à 4 sur le site d'*Eucalyptus*, la fermeture de la canopée est quasiment atteinte. En revanche, la canopée sur les deux sites de Pins est encore loin de son expansion maximale, les couronnes individuelles des arbres d'un rang à l'autre étant toujours séparées. Pour une demande évaporative comparable avec les sites de Pins, mais pour des précipitations annuelles plus faibles, l'évapotranspiration totale du peuplement d'*Eucalyptus* (675.8 mm) n'est que de 25% plus élevée que sur la parcelle de Pins et de 2% sur la parcelle Pins+ajoncs. Compte tenu des différences de structures, ce résultat était plutôt inattendu. Toutefois, pour des peuplements de même âge évoluant dans des

conditions climatiques similaires, il a été suggéré que l'évapotranspiration des forêts devrait être relativement conservée. Roberts (1983) en a montré une gamme d'estimations similaires pour différents types de couverts forestiers en Angleterre. Ce comportement conservatif a souvent été attribué à la sensibilité de la conductance stomatique vis-à-vis du déficit de pression de vapeur (Roberts 2007) et pour des conductances initiales plus élevées la sensibilité à une augmentation du déficit est plus forte, réponse qui permet de moduler le taux de transpiration et d'en réduire la différence entre les espèces. Si nous avons constaté que les espèces avec des taux de transpiration similaire exprimée par unité de surface foliaire en conditions pédoclimatiques non limitantes, la transpiration des *Eucalyptus* par unité de surface au sol reste bien plus élevée par rapport à celle des Pins des deux parcelles de Bilos. En terme d'utilisation d'eau totale par le peuplement, cela met en évidence que les différences d'évapotranspiration entre les peuplements sont principalement imputables au fort LAI des *Eucalyptus*. Les différences possibles entre les espèces dans leurs caractéristiques écophysiologiques joueraient donc un rôle secondaire dans la régulation de l'évapotranspiration au profit du LAI. Nous retenons que les conclusions de Roberts (1983) sont valides entre le site de Pins+ajoncs et le site d'*Eucalyptus*, qui présentent un LAI comparable, résultats qui convergent également vers les conclusions de Berbigier et al. (2001) ou encore Delzon et Loustau (2005) pour des peuplements à un stade de développement plus avancé.

Sur le site d'*Eucalyptus*, la consommation en eau annuelle (*ET*) a excédé l'apport d'eau par les précipitations, ce qui a amené la teneur en eau du sol proche du point de flétrissement à partir de l'été 2010 et ce jusqu'à la fin de la période étudiée. Il a très souvent été attribué aux *Eucalyptus* une grande consommation en eau couplée à leur forte productivité (Whitehead et Beadle 2004). En conditions non limitantes Almeida et al. (2007) ont montré que l'*ET* d'un peuplement d'*Eucalyptus grandis* représente en moyenne 95% des précipitations sur une période totale de sept ans et que trois années sur sept ont une évapotranspiration supérieure aux précipitations. Dans la même région et sur les mêmes peuplements, Soares et Almeida (2001) ont estimé *ET* annuelle à 1 345 mm par rapport aux 1 396 mm de précipitations. En outre, Cabral et al. (2010) ont estimé que *ET* a représenté 82% et 96% des précipitations annuelles totales en 2006 et 2007. Au sein d'un peuplement d'*E. globulus* de huit ans d'âge au Portugal, Pereira et al. (2007) ont constaté que le taux d'*ET* est égal à celui des précipitations annuelles. Compte tenu de la similitude des conditions climatiques (précipitations annuelles de 709 mm dans leur cas), ces résultats confirment le fort besoin en eau des plantations d'*Eucalyptus*. Soulignons que les précipitations annuelles sont dans les deux cas proches de la moyenne à long terme.

La consommation annuelle en eau a représenté 64% et 78% des précipitations annuelles pour les sites de Pins et Pins+ajoncs respectivement. Moreaux et al. (2011) avaient estimé ces pourcentages à 72% et 83 % respectivement pour la période juin 2009 - mai 2010. Pour des précipitations annuelles réduites de 80 mm dans notre étude, la différence observée s'explique principalement par la saison de croissance 2010 pendant laquelle *ET* a été réduite de 40% par rapport à 2009 (juillet août), et ce probablement en raison des conséquences d'un printemps plus sec en 2010. Replacée dans un contexte sylvicole plus large, *ET* mesurée en 2010 sur les deux sites était dans la même plage de valeurs que

celles rapportées antérieurement sur peuplements adultes de Pin maritime (Berbigier et al. 2001, Kowalski et al. 2003, Delzon et Loustau 2005).

4.4.2 Composantes de l'évapotranspiration

Nos résultats mettent en évidence le rôle dominant du LAI du couvert sur la répartition de l'évapotranspiration entre les différentes composantes du couvert : arbres, végétation accompagnatrice et sol. Ce constat rejoint Granier et al. (2000) qui ont montré que le LAI est le paramètre essentiel de la régulation des échanges d'énergie et d'eau des peuplements forestiers. Pour le peuplement d'*Eucalyptus*, la plupart de l'eau perdue par évapotranspiration résulte de la transpiration des arbres et de son évaporation en condition humide soit un pourcentage de *ET* de 75%. La transpiration des *Eucalyptus* contribue à elle seule à une fraction importante de l'*ET* (63%). L'évaporation du sol représente une contribution à *ET* de 25%, pourcentage comparable à d'autres peuplements d'*Eucalyptus*. Lane et al. (2004) ont reporté une évaporation du sol variant entre 16 et 26% pour des plantations d'*E. urophylla* âgées de 3 à 4 ans en Chine. Ils ont souligné l'importance de cette contribution relativement à l'évapotranspiration totale, en particulier dans les plantations où la végétation adventice est contrôlée, laissant une fraction de sol nu importante. De même, Silberstein et al. (2001) estiment que E_s contribue pour 9% (au printemps) et 16% (en été) de *ET* dans un peuplement d'*Eucalyptus* d'une hauteur moyenne de 25 m, avec un sous-bois développé d'une hauteur de 8 m, dans le sud-ouest de l'Australie (1 100 mm de précipitations annuelles). Nous avons supposé une interception des précipitations par la canopée de 12%, sur la base des études de Pereira et al. (2007) au Portugal. Cette valeur se situe à l'extrémité inférieure des valeurs rapportées par d'autres auteurs (Whitehead et Beadle 2004) et ne tient pas en compte de la variabilité saisonnière. Toutefois, nous avons estimé cette hypothèse raisonnable : une valeur plus forte tendrait à diminuer l'eau disponible pour les arbres ou l'évaporation du sol tout en augmentant l'évaporation par le couvert, ce qui maintiendrait un équilibre des valeurs de *ET* totale. Enfin, le drainage profond dans le peuplement d'*Eucalyptus* reste relativement limité mais non négligeable. De manière générale, les sols de boulbènes, sur lesquels évolue le peuplement d'*Eucalyptus*, présentent une hétérogénéité de composition et de morphologie (Michel et al. 2003) complexe. Cette structure hétérogène conditionne le comportement hydrique de ces sols. D'une structure de boulbène à l'autre, les horizons révèlent des fonctionnements hydriques très différents (Michel et al. 2003), notamment par le mode de réponse au drainage (Bouzigues et Vinas 1989), mais ces sols à hydromorphie marquée ont un drainage interne généralement déficient (Favrot 1970) en accord avec nos observations. La discontinuité observée autour de 50 cm est caractéristique de ces sols (Bouzigues et Vinas, 1989) et les transferts de l'eau sous cette discontinuité sont déterminés par plusieurs paramètres tels que profondeur d'apparition des argiles, teneur en argile, organisation structurale (pseudo-vertique ou prismatique), ou encore la teneur en hydroxyde de fer (Zimmer et al. 1991). D'après les descriptions établies dans l'étude de Bouzigues et Vinas (1989) et les profils établis par Favrot (1970), il est probable que la structure rencontrée à Montbartier soit de type prismatique dont les parois en continuité verticale favorisent l'écoulement

vertical de l'eau (Zimmer et al. 1991), ce qui concorde avec les échanges verticaux ascendants et descendants mis en avant lors du calcul du résidu du bilan hydrique mensuel. Cette discontinuité pourrait expliquer l'augmentation du contenu en eau du sol avec une très forte amplitude après les épisodes pluvieux intenses à corréler avec la possible formation d'une nappe perchée temporaire causée par la discontinuité structurale (Bouzigues et Vinas 1989, Calvet et al. 2000).

Pour le peuplement de Pins maritimes débroussaillé, l'évaporation du sol associée à la transpiration du sous-bois représente le terme dominant de l'évapotranspiration totale, soit 60% contre 40% pour l'évapotranspiration de l'arbre (*E+I*). Cette tendance est inversée pour le peuplement de Pins+ajoncs où les valeurs atteignent 39% et 61% respectivement. Toujours par rapport à l'étude précédemment menée sur ces deux peuplements, ces pourcentages approchent les estimations précédentes (Moreaux et al. 2011). Toutefois, la contribution des arbres au total de *ET* fut inférieure à celle observée précédemment pour un peuplement de pins plus âgé au sein duquel les arbres avaient atteint une expansion maximale des couronnes (Delzon et Loustau 2005), soulignant à nouveau l'importance du LAI dans la régulation des transferts entre la canopée et l'atmosphère.

En dynamique journalière, les valeurs de transpiration calculées sur le site d'*Eucalyptus* semblent faibles comparées à d'autres peuplements. Pour des conditions climatiques proches, au Portugal, David et al. (1997) trouvent des valeurs de transpiration entre 0.5 et 3.64 mm j^{-1} à comparer avec notre maximum de 2.45 mm j^{-1} obtenu au printemps 2010. Sous un climat comparable mais dans l'état de Victoria en Australie, Forrester et al. (2010) ont estimé la transpiration d'une chronoséquence d'une plantation d'*E. globulus*. Pour un LAI de 3.7, ils mesurent une transpiration moyenne journalière de 1.36 mm j^{-1} incluant automne, hiver et printemps, contre une valeur de 1.1 mm j^{-1} dans notre cas pour les mêmes saisons. En région tropicale, les valeurs recensées sont également plus élevées. Au Brésil pour des peuplements de 9 ans d'*E. grandis*, Mielke et al. (1999) estiment une transpiration de 1.62 à 4.86 mm j^{-1}. Ces valeurs sont des moyennes estimées seulement en journée (entre 07:30 et 16 :30) ce qui peut expliquer la différence notable observée alors que leur LAI de 2.3 est inférieur à celui estimé à Montbartier. Utilisant la relation de Penman-Monteith pour estimer la transpiration journalière d'un peuplement d'*E. grandis* de 9 ans proche du précédent, Soares et Almeida (2001) ont également trouvé des valeurs plus élevées, notamment en été et sous des conditions hydriques non limitantes, avec des valeurs pouvant atteindre 5.8 mm j^{-1} pour un LAI de 2.5 en été et 1.1 mm j^{-1} en hiver pour un LAI de 1.35. Dans la plupart des études menées sur des rotations du même ordre de grandeur, il a été montré l'importance du LAI, dont la réduction avec l'âge des arbres a pour conséquence de réduire l'évapotranspiration (Watson et al. 1999), dont le maximum est observé vers l'âge de 4 ans. Sachant qu'avec l'âge, la surface d'aubier diminue au profit du bois de cœur (Gominho et Peirera 2000, Morais et Peirera, 2007, 2011), cet âge, au maximum de transpiration est variable suivant les chronoséquences étudiées et donc l'espèce étudiée (Forrester et al. 2010).

4.4.3 Contrôles physiologiques et édaphiques

En période de sécheresse édaphique, la transpiration de l'arbre est contrôlée efficacement par régulation stomatique chez les deux espèces Pins et *Eucalyptus*. Cette régulation a été bien documentée pour l'*Eucalyptus* (e.g. Whitehead et Beadle 2004) et pour le Pin maritime (e.g. Berbigier et al. 1991, Granier et Loustau 1994, Loustau et al. 1996). Ces études soulignent la capacité des arbres à maintenir un potentiel hydrique au-dessus des seuils critiques, évitant ainsi des phénomènes d'embolie sévère en réponse à la sécheresse. La réduction de la transpiration des Pins s'est manifestée particulièrement tôt dans la saison 2010 par rapport aux observations antérieures (Loustau et al. 1990). La chute de transpiration du couvert a eu lieu encore plus tôt au printemps 2011 (Avril) et a été accentuée sur les sites de Pins débroussaillés et d'*Eucalyptus* (non mesurée sur le site Pins+ajoncs). L'analyse d'un coefficient type coefficient cultural, soit E/ET_o, n' a pas permis de mettre en évidence une réponse au déficit hydrique du sol pourtant très prononcé (non montré). Cela suggère que les plantes ont potentiellement pu prélever de l'eau ailleurs que dans la zone du sol prospectée par nos mesures. L'eau du sol disponible sur le site d'*Eucalyptus* a été estimée à 180 mm pour une profondeur de sol de 0-150 cm, valeur utilisée pour le calcul du déficit hydrique du sol. Cette valeur est cohérente avec les valeurs estimées par Calvet et al. (1998, 2000) et Favrot (1970) sur ces sols. Si la majorité du prélèvement a lieu en surface (<0-50cm), le comportement de l'*Eucalyptus* à partir de septembre 2010 suggère un prélèvement en dehors de la zone mesurée par nos profils. De février à mai 2011, par exemple, la quantité d'eau utilisée par la végétation excède les apports par précipitations et le sol 0-50 cm. Une première hypothèse est que les épisodes pluvieux légers non détectés par nos profils ont suffi à satisfaire la demande en eau pendant l'hiver. Il a déjà été observé une extension racinaire latérale, dans la couche superficielle 0-20 cm chez des *E. globulus* au Portugal (Fabiao et al. 1995) et cette hypothèse a aussi été proposée pour la reprise de transpiration succédant à des épisodes de précipitations en période de sécheresse estivale. Alternativement, une seconde hypothèse serait que l'eau soit extraite en dessous de la zone mesurée (0-130 cm). Plusieurs études ont mis en avant la capacité des *Eucalyptus* à développer un système racinaire en profondeur dans une grande variété de régions climatiques, de types de sol, des espèces d'*Eucalyptus* considérées et de l'âge des arbres (Dye 1996). Ainsi, pour trois répétitions de jeunes *E. saligna* évoluant dans des chambres fermées en conditions ambiantes, Duursma et al. (2011) ont souligné l'existence de profondes racines sous 1.50 m de profondeur. La présence d'une zone indurée à partir de 70 cm de profondeur n'a pas eu pour effet de limiter l'extension des racines. Dans un climat méditerranéen avec des précipitations annuelles (465 mm) inférieures à celles que nous observons, Feikema et al. (2010) ont montré que leurs *E. grandis* pouvaient prélever de l'eau de la nappe phréatique en dessous de 2 m de profondeur et que la texture argilo-limoneuse du sol (limon et argile lourde) n'a pas constitué un obstacle à la croissance des racines. En conditions de stress hydrique et particulièrement pendant les périodes de croissance des arbres, l'allocation des ressources à la croissance des racines serait favorisée. Silva et al. (2004) ont ainsi observé une extension du système racinaire de l'espèce *E. globulus* au Portugal en conditions de stress hydrique. Une troisième hypothèse est que la strate argileuse, mal prospectée par les sondes

de mesure pourrait constituer une réserve d'eau constante qui, en réponse à des gradients de potentiels hydriques générés naturellement au sein des horizons supérieurs du sol, pourrait aider et soutenir les faibles taux de transpiration de cette période (Macinnis-Ng et al. 2010). Même si l'étude ne permet pas de conclure sur les profondeurs d'enracinement, il est important de considérer la capacité de l'*Eucalyptus* à développer un système racinaire profond et d'en évaluer ses conséquences environnementales.

Le système racinaire des pins est moins développé comme le suggère les données relevées sur les deux sites de Bilos à l'hiver 2010 (Annexe 3). Ainsi, 90% des racines fines (diamètre < 2 mm) ont été trouvés dans la partie supérieure du sol (0-50 cm). Dans les peuplements de Pins maritimes, la zone de prospection racinaire du sous-bois et des pins est limitée par la présence de la nappe phréatique permanente oscillant entre une profondeur moyenne de 1.8 m en été à et 0.2 m en hiver (Achat et al. 2008). De plus, la présence d'un horizon induré d'alios à 50-80 cm de profondeur limite l'extension des racines vers des couches plus profondes du sol (Bakker et al. 2006). Dans le cas du peuplement pour lequel l'inter-rang a été débroussaillé, il est probable que le système racinaire du pin tende à explorer davantage de volume de sol latéralement, la présence de la nappe phréatique à une profondeur de 60 cm en hiver limitant l'expansion verticale. Dans une moindre mesure que celle observée sur le peuplement d'*Eucalyptus*, de l'eau pourrait également être prélevée dans la zone superficielle du sol non prise en compte par les mesures. Par conséquent, la transpiration des arbres pourrait être maintenue, par exemple en septembre 2010, sans modification significative perceptible dans les mesures d'humidité du sol.

4.4.4 Utilisation de l'eau et réponse de la croissance

Dans la présente étude, l'*E. gunnii* × *dalrympleana* a montré un comportement écophysiologique similaire à celui rapporté par d'autres auteurs et examiné dans la synthèse de Whitehead et Beadle (2004), mettant en évidence la convergence fonctionnelle qui se manifeste chez le genre *Eucalyptus*. La conductance de la canopée a été fortement réduite pour de forts déficits de pression de vapeur, suggérant un contrôle homéostatique. Cette espèce présente une capacité à développer des systèmes racinaires profonds comme nous l'avons déjà suggéré ci-dessus, ce qui contribue à une part cruciale de leur stratégie d'évitement de la sécheresse, et explique le maintien d'une productivité élevée (environ 15 t_{DM} ha^{-1} an^{-1}). Dans cette stratégie d'évitement, la réduction de la surface transpirante et évaporative à travers la chute de litière, équivalente à une réduction du LAI atteignant 40% en avril 2011, peut également être considérée comme un trait adaptatif. Beaucoup d'espèces d'*Eucalyptus* démontrent d'ailleurs une forte saisonnalité de leur LAI en liaison avec le stress hydrique (Battaglia et al. 1998, O'Grady et al 1999, Nouvellon et al. 2010). Cette forte perte en biomasse foliaire et probablement sa variabilité au cours des saisons n'est pas observée chez les pins, pour lesquels le contrôle principal de la transpiration se fait à travers une réduction de la conductance du couvert.

L'efficience d'utilisation de l'eau des *Eucalyptu*s, 1.56 et 1.70 fois plus élevée que celle du peuplement de Pins et de Pins+ajoncs respectivement, se situe dans la fourchette (1-5 g_{DM} kg^{-1}) rapportée dans la synthèse de Whitehead et Beadle (2004) pour différentes espèces d'*Eucalyptus*. Lorsque l'eau du sol n'est pas limitante, l'efficience d'utilisation de l'eau est élevée sur le site d'*Eucalyptus*, mais la consommation en eau élevée soulève des questions quant à la viabilité à long terme de l'*Eucalyptus* compte tenu des scénarios climatiques futurs projetés dans cette région, puisque l'approvisionnement en eau limite fortement la productivité des peuplements d'*Eucalyptus* (Stape et al. 2010). A cet égard, le fait que les précipitations entre octobre 2010 et janvier 2011, qui étaient dans la fourchette normale pour cette zone, n'ont pas été pas suffisantes pour rétablir la réserve en eau du sol est particulièrement remarquable. Ce déficit a conduit à un ralentissement significatif de la croissance des arbres et une diminution de la productivité lors du printemps suivant. Cependant, il est intéressant de noter que, malgré une utilisation en eau élevée, la forte efficience d'utilisation de l'eau permet de produire plus de bois par unité de volume d'eau consommée que pour le cas des pins, ce qui suggère qu'un même volume de bois pourrait être produit en moins de temps, sur des surfaces moins étendues, limitant l'impact potentiellement négatif sur le bilan hydrique à une échelle régionale.

4.5 Conclusion

Cette étude met en évidence le rôle important joué par le LAI dans les différences observées sur la consommation en eau des trois sites, *Eucalyptus*, Pins maritimes et Pins + ajoncs. L'occurrence et l'étendue du stress environnemental a également joué un rôle majeur dans le contrôle de cette consommation en eau et de la croissance des arbres. Ainsi, lorsque la disponibilité en eau n'est pas un facteur limitant, la transpiration et sa dynamique sont principalement contrôlées par l'énergie disponible. Notre étude est cohérente avec l'hypothèse d'une convergence de stratégie d'utilisation en eau des peuplements d'*Eucalyptus* et de leur contrôle environnemental. L'utilisation de l'eau par la canopée des *Eucalyptus* représente indubitablement la principale contribution à l'évapotranspiration totale de ce peuplement. Le site d'*Eucalyptu*s a subi une sécheresse édaphique prolongée qui a impactée directement la croissance des arbres en 2011. Malgré les pluies d'automne et d'hiver dans la moyenne pour cette région, la recharge en eau du sol ne fut pas suffisante pour que le sol puisse être réapprovisionné, alors que nous avons montré que la disponibilité eau du sol constitue un déterminant critique de la productivité des arbres. En 2011, l'ensemble des régions ouest, suivant une trajectoire nord-sud, a été touché de façon spectaculaire par la sécheresse précoce du printemps, comme l'atteste l'anomalie sur l'indice de végétation amélioré (IVA) estimé d'après les données issues du capteur MODIS (anomalie calculée en 2011 par rapport à la moyenne de la période 2000-2010 (Samalens, *comm. pers.*). Les deux sites de pins ont donc également connu des sécheresses successives, mais nous avons montré que les processus impliqués dans la régulation de l'utilisation de l'eau et leurs impacts sur la croissance étaient différents du site d'*Eucalyptus*. Le réapprovisionnement en eau du sol et la montée des eaux souterraines à l'automne et en hiver ont fourni suffisamment d'eau au début de la saison de croissance 2011. La croissance du pin a été moins affectée à cette période que celle de l'*Eucalyptus*.

Au cours de la période d'étude, le déficit en eau du sol était la principale limitation de la transpiration des arbres et de leur croissance, comme en témoigne la fermeture des stomates (sur les trois sites) et la chute des feuilles (sur le site d'*Eucalyptus*). Entre 1993 et 2007, la demande évaporative annuelle (ET_o) a excédé les précipitations de 85 mm en moyenne. Cependant, la dynamique de ce déficit entre ET_o et la pluviométrie n'a fait que s'accroître cours cette période (données non présentées). Sur la période 2010-2011, ce déficit culmine à 292 mm (Tableau 4.3). Selon les scénarios climatiques régionalisés disponibles, la région Sud-Ouest est exposée à une augmentation de la durée et de l'intensité des sécheresses estivales au cours des prochaines décennies (Loustau et al. 2005, Déqué et Cloppet 2010). Le potentiel de productivité et finalement de rentabilité d'*E. gunnii* × *dalrympleana* pourrait donc y être réduit de manière significative. Les données que nous avons collectées et synthétisées dans ce Chapitre permettent de renseigner des modèles de croissance à base fonctionnelle pour analyser les impacts de ces scénarios climatiques sur la production potentielle des espèces à croissance rapide dans le Sud Ouest. Le Chapitre suivant a pour objectif de montrer comment un de ces modèles développés dans l'unité EPHYSE a été modifié et adapté afin de prendre compte ces résultats.

Chapitre 5

Modélisation : Partie I

Modélisation des échanges de masse et d'énergie et de la production de jeunes plantations forestières à croissance rapide

Plan du chapitre

Chapitre 5. Modélisation des échanges de masse et d'énergie et de la production de jeunes plantations forestières à croissance rapide 119

5.1 Introduction générale 119

5.2 Transferts atmosphériques de masse et d'énergie des jeunes peuplements forestiers 124

5.2.1 Introduction 124
5.2.2 Paramétrisation du modèle Maestra 125
5.2.3 Simulations au niveau peuplement (étape 2) 131
5.2.4 Tests de sensibilité additionnels 143
5.2.5 Dégradation de Maestra dans Graeco (étape 3) 145
5.2.6 Discussion : PARTIE Maestra 150

5.3 Développement et adaptation du modèle de carbone du sol sous forêt 152

5.3.1 Introduction 152
5.3.2 Adaptation de Roth-C au cas des forêts gérées 154
5.3.3 Evaluation avec les données disponibles 158
5.3.4 Conclusion 162

5.4 Développement du module 'croissance du sous-bois' 163

5.4.1 Introduction 163
5.4.2 Modélisation de la croissance du sous bois : concept 163
5.4.3 Tests de validité du modèle implémenté dans GRAECO 168

5.5 Conclusion 169

Chapitre 5. Modélisation des échanges de masse et d'énergie et de la production de jeunes plantations forestières à croissance rapide

5.1 Introduction générale

La productivité des écosystèmes forestiers est influencée de façon continue par des effets directs du climat sur le fonctionnement, la croissance des arbres et du sous-étage, la phénologie des espèces, les perturbations anthropiques, et par des évènements rares ou extrêmes tels que les tempêtes, incendies et attaques d'insectes ou épidémies parasitaires. Que ce soit sur une fenêtre de gestion forestière courte (10-40 ans) ou plus longue (150 ans), le climat continue et continuera de modifier les contraintes environnementales. La forêt, dans son ensemble, est déjà impactée par les changements climatiques de façon positive (allongement de la saison de croissance) ou négative (tempêtes, sécheresses) (Myneni et al. 1997, Ciais et al. 2005, Granier et al. 2007, Guillot 2011).

Sans tenir compte des évènements récents incluant les tempêtes de 1999 et 2009, et l'épisode de sécheresse de 2003 (dont les effets se répercutent sur plusieurs années), la production moyenne de la forêt française a augmenté de près de 40% depuis les 40 dernières années, phénomène expliqué à la fois par une augmentation de sa surface de près de 70 000 ha an^{-1}, et par une productivité à l'hectare plus élevée dû à l'effet de l'augmentation des dépôts atmosphériques d'azote au réchauffement et à l'accroissement de la teneur en CO_2 atmosphérique. D'après les projections du projet CARBOFOR (Loustau et al. 2004, 2005), cette tendance devrait se poursuivre dans le cadre des scénarios B2 du GIEC, avec un maximum de production nette atteint entre 2015 et 2045, accompagné d'une modification de l'aire de répartition des espèces forestières. Cependant, dès 2050, et toujours pour ce scénario qui comporte une élévation de température de plus de 2°C en 2100, la productivité forestière tendrait à diminuer avec une réponse variable entre les essences (Figure 5.1). Avec la disponibilité en éléments nutritifs, la disponibilité de l'eau dans le sol sont les principaux facteurs qui influenceront ces réponses localement. Ainsi, les forêts sur les sols à forte RU devraient mieux faire face à l'évolution climatique (Loustau et al. 2005, Ciais et al. 2010).

Si les peuplements du nord de la France semblent avantagés par les scénarios climatiques suggérés, les peuplements du sud quant à eux sont plus menacés, avec une vulnérabilité accrue aux épisodes de sécheresse. Ces épisodes peuvent notamment engendrer une diminution des stocks de carbone dans la biomasse et les sols des écosystèmes forestiers, tel qu'observé en 2003 en Europe, où la productivité nette avait été réduite de 30% pour un déficit du bilan de carbone de 0.5 GtC (Granier et al. 2007). La gestion sylvicole où les évènements extrêmes confèrent une variabilité spatio-temporelle de la structure du couvert en termes de distribution de classes d'âge (Guillot 2011). Tenant compte des changements d'aire de répartition des espèces et des différents scénarios sylvicoles envisagés, la structure globale de la forêt pourrait donc être bien différente et une connaissance du

cycle sylvicole complet quel que soit la structure semble importante pour envisager les potentialités futures de la productivité de la filière sylvicole.

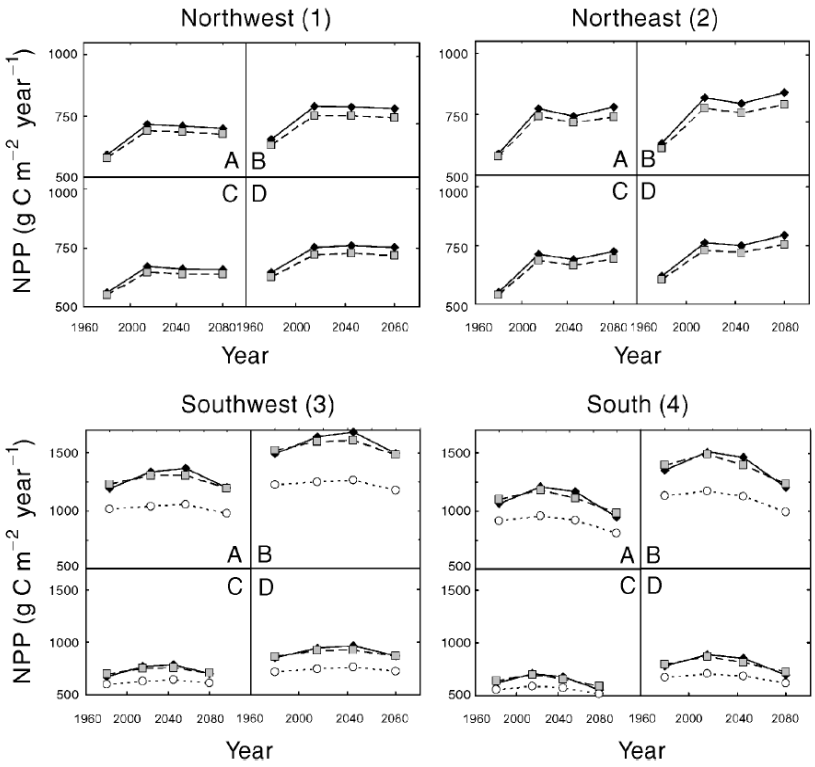


Figure 5. 1 (Loustau et al. 2005). Modification de la productivité nette (NPP) annuelle pour le hêtre (Nord, graphes du haut) et pour le pin (Sud, graphes du bas), en 1980, 2015, 2045 et 2080, pour différentes gestions sylvicoles et différentes conditions du sol : A et B= concentration foliaire azotée élevée ; C et D= concentration foliaire azotée faible ; A et C= réserve utile en eau du sol faible ; B et D= réserve utile en eau du sol élevée. Symboles : ♦ = scénario courte rotation, ■ scénario rotation intermédiaire, ○= scénario rotation longue. Dans le cas du hêtre, les simulations sont réalisées avec le modèle CASTANEA et dans le cas du pin, avec le modèle GRAECO.

L'approche mécaniste de modélisation est un moyen privilégié pour rendre compte à la fois des effets de changements de gestion sylvicole et des impacts climatiques et environnementaux dans l'estimation de la productivité potentielle des forêts. Cependant, les modèles à base de processus existants tels que 3PG (Landsberg et Waring 1997), ORCHIDEE-FM (Bellassen et al. 2010), CASTANEA (Dufrêne et al. 2005) ne rendent pas ou mal compte des opérations culturales les plus courantes en forêts de plantations : préparation du sol, plantation ou semis, dépressage, destruction du sous-étage, éclaircies… Cette lacune est un frein pour établir les performances de productivité et les impacts environnementaux des systèmes de production forestière intensifs et leur comportement sous différents scénarios de sylviculture ou de climat et environnement. Or la foresterie intensive est vraisemblablement appelée à jouer un rôle croissant pour la production de biomasse, énergie et fibre. Dans ce contexte évolutif mais incertain, le besoin d'identifier les zones et biotopes les plus aptes à supporter cette production à long terme et d'optimiser la conduite sylvicole de façon dynamique (essence, structure de couvert, fertilisation et drainage, travail du sol, gestion des adventices…)

devient pressant. Le modèle de croissance GRAECO, créé au sein du laboratoire EPHYSE (Porté 1999, GICC 2004, Loustau et al. 2005) et inspiré de 3PG (Landsberg et Waring 1997) a été développé initialement pour un peuplement adulte et son module de SVAT repose sur l'hypothèse d'un couvert homogène sur le principe de l'approche « *big leaf* ». Ainsi, lors de son utilisation pour les simulations dans le projet CARBOFOR, le cycle sylvicole et l'estimation de sa productivité dans un contexte climatique changeant n'ont-ils pu être envisagés que pour la phase adulte des peuplements de Pin maritime où cette approximation est valide. Considérant l'introduction de nouvelles espèces ligneuses dans le sud-ouest de la France et leurs interactions avec le sous-bois, ou bien même la sylviculture de peuplements mélangés, ce modèle reste redevable d'adaptation et de compléments que nous proposons de présenter dans ce chapitre. Par ailleurs, prendre en compte le cycle sylvicole complet nécessite de considérer les pratiques culturales depuis la préparation du sol jusqu'aux différentes actions telles que le débroussaillement et les éclaircies. Ces dernières impactent notamment le carbone du sol, mais à ce jour, le modèle GRAECO ne permet pas d'envisager un cycle du carbone complet, ainsi que l'impact de telles pratiques sur les flux de surface e.g. de gaz à effet de serre.

L'objectif principal du travail de modélisation présenté dans ce chapitre est d'adapter un modèle simple à base biophysique et biogéochimique pour représenter les échanges de masse et d'énergie ainsi que la production et la croissance des arbres au cours de la phase juvénile du cycle sylvicole, c'est-à-dire, pour l'essentiel, en considérant l'évolution de la structure des jeunes peuplements. Il s'agissait d'introduire deux compléments principaux aux modèles existants :

1. Rendre compte des effets de changements de structure physique du couvert végétal au stade jeune où cette structure évolue d'un sol pratiquement nu à une friche recolonisée par la végétation accompagnatrice, à une jeune plantation (ou semis) à couvert discontinu et à son terme, à un couvert fermé.
2. Introduire les effets des interventions culturales (préparation du sol, dépressages, destruction du sous-étage, éclaircies) intervenant durant cette phase à la fois sur les échanges atmosphériques du couvert, la croissance et la production des strates végétales et sur la dynamique du carbone du sol.

Dans notre approche, nous nous sommes efforcés de donner une généricité aux différents sous-modèles de processus afin de rendre possible l'application du modèle à de nouvelles espèces. Dans le chapitre suivant, nous appliquerons le modèle développé ici pour simuler la productivité potentielle de peuplements forestiers évoluant sous différents scénarios climatiques et sylvicoles.

L'approche conduite et illustrée dans la Figure 5.2 comprend les étapes suivantes:

1. Modélisation des processus clés d'échange pris en compte au niveau foliaire ; transferts radiatifs, conductance diffusive, transpiration, flux de chaleur et bilan d'énergie, photosynthèse, respiration. Les paramètres nécessaires sont obtenus de la littérature, e.g. les paramètres des cinétiques de carboxylation-oxydation de la RuBisCO, du transfert d'électrons, de l'efficience quantique maximale du photosystème II et leur dépendance à la température et au CO_2 du modèle biochimique de photosynthèse de Farquhar et al. (1980).

2. Calibration de modèles de processus à partir de données et expérimentations de terrain (cf. les précédents chapitres) ou en conditions contrôlées. Nous avons utilisé ici les sous-modèles suivants :
    - Maestra (Wang et Jarvis 1990a, Medlyn 2004) pour le transfert radiatif (visible, proche, et lointain infra-rouge), la photosynthèse et la transpiration. Maestra intègre des sous-modèles de transfert radiatif (loi de Beer-Lambert), de photosynthèse (Farquhar et al. 1980) et d'évaporation et fonctionnement stomatique (Jarvis 1976). Le modèle représente le couvert, les couronnes individuelles des arbres et la strate accompagnatrice en trois dimensions et permet de simuler les transferts radiatifs dans les domaines visible, proche infrarouge et infrarouge lointain ainsi que les échanges de CO_2 et vapeur d'eau.
    - L'approche du modèle ROTH-C 26.3 (Jenkinson et Rayner 1977, Coleman et Jenkinson 1999) pour le cycle du carbone dans le sol. Il représente la minéralisation et l'humification de la matière organique du sol ;
    - Un modèle de croissance du sous-étage est mis au point.
3. Dégradation des sorties des modèles de processus (ex : production primaire brute, *GPP*, et rayonnement absorbé par les arbres) et leur dépendance aux facteurs de l'environnement en fonctions simples et intégration dans un modèle analogue de type grosse feuille homogène (ex : LUE = *GPP* / *aPAR*). Le modèle analogue retenu est le modèle Graeco développé à EPHYSE. Les fonctions de réponses de la photosynthèse, du transfert radiatif, de la conductance du couvert sont donc évaluées à partir du modèle Maestra. Ces fonctions dépendent du rayonnement visible absorbé, du déficit de pression de vapeur, de la teneur en CO_2 atmosphérique, de la réserve en eau du sol et de la teneur en azote foliaire.
4. Vérification des sorties du modèle analogue Graeco au niveau écosystème avec les données de flux (*aPAR, GPP*, R_{Eco}, *NEE*, *LE*, *H*, R_n) et d'inventaires de biomasse et carbone du sol obtenus sur les sites de calibration et d'autres sites indépendants. Nous utilisons à dessein le terme de vérification car dans le cadre de ce travail nous avons restreint cet exercice à un petit nombre de jeux de données, le plus souvent obtenus sur les mêmes sites et pour des séries temporelles voisines des données de calibration (cette étape fait l'objet du chapitre 6).

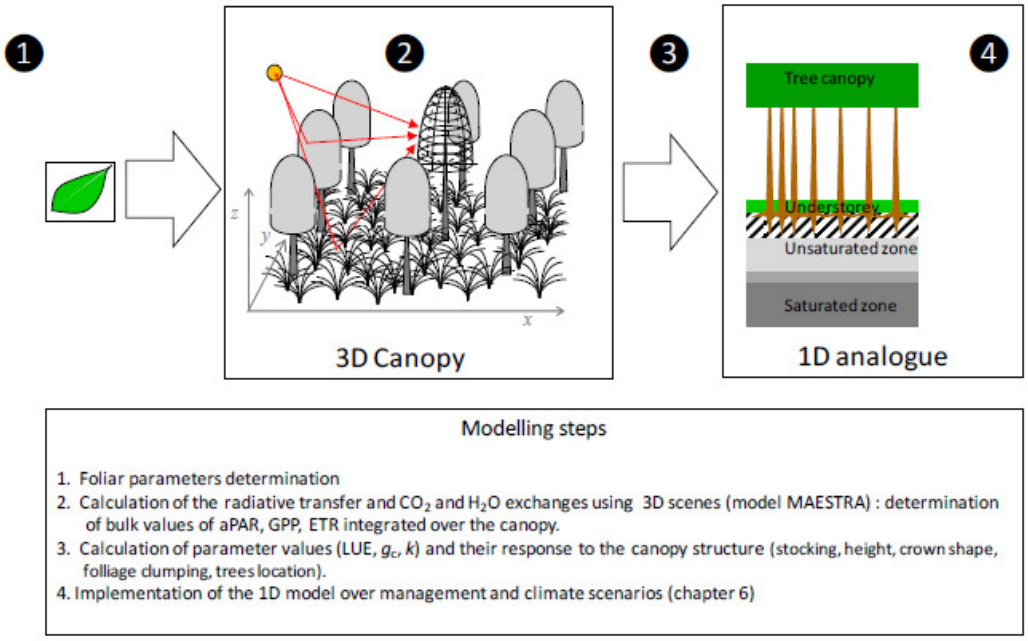


Figure 5. 2 Approche de modélisation conduite pour décrire et simuler le fonctionnement des peuplements forestiers en phase juvénile. Les étapes 1-3 sont détaillées dans la partie 5.2.

Une approche de ce type a déjà été utilisée à titre exploratoire dans le cas d'un peuplement de 30 ans pour obtenir un ensemble de paramètres équivalents 'grosse feuille' des deux strates du couvert, arbres, et sous-bois qui rendent compte de l'hétérogénéité du couvert et qui ont été intégrés dans le modèle GRAECO (Delzon 2000).

Ce chapitre reprend cette démarche incluant tout ou partie de ces étapes pour les trois types de processus modélisés, les transferts radiatifs, la photosynthèse et l'évapotranspiration (§ 5.2), le cycle du carbone du sol et les interventions culturales (§5.3), ainsi que la croissance de la végétation accompagnatrice (§5.4). Un travail exploratoire concernant une modélisation simple des transferts turbulents adaptée au cas de jeunes peuplements est présenté en dernière partie. Dans le chapitre suivant, le modèle Graeco ainsi ajusté est utilisé pour simuler la productivité de peuplements forestiers dans le sud-ouest de la France prenant en compte différents scénarios sylvicoles et climatiques.

5.2 Transferts atmosphériques de masse et d'énergie des jeunes peuplements forestiers

5.2.1 Introduction

Le modèle Maestra simule les transferts radiatifs, le bilan d'énergie et les échanges de CO_2 et vapeur d'une parcelle forestière composée de couronnes individuelles. Maestra suit une approche hybride décrivant la structure du couvert comme une collection de couronnes singulières où la surface foliaire est distribuée de façon statistique. Il peut aussi intégrer un sous-étage. Son niveau de complexité exige une déclaration des propriétés géométriques individuelles de chacune des couronnes composant une scène. Ceci interdit son utilisation pour des applications à large échelle spatiale et pour des séries temporelles dépassant quelques années (Medlyn, 2004). Pour de telles applications, le recours à un modèle monocouche paraît suffisant et permet de limiter au minimum le nombre de paramètres à renseigner (de Pury et Farquhar, 1997, Porté 1999, Loustau et al. 2005). La structure du couvert, l'orientation des feuilles, la distribution spatiale de la surface foliaire ainsi que celle des arbres dans la parcelle jouent un rôle majeur (Wang and Jarvis 1990a, 1990b). La faculté du modèle Maestra de pouvoir isoler un arbre et de calculer ses échanges énergétique, hydrique et carboné permet un changement d'échelle de la feuille au peuplement qui prend en compte l'hétérogénéité physique du couvert.

Afin de concilier la versatilité et la simplicité indispensables à des applications de scénarios à large échelle et la nécessité de considérer à priori l'hétérogénéité des jeunes plantations forestières, nous avons repris l'approche de modélisation couplant les modèles Maestra et Graeco, déjà implémentée de façon exploratoire pour la modélisation du sous-étage d'une peuplement adulte (Delzon, 2000). Nous avons paramétré le modèle Maestra et utilisé ensuite ses sorties pour construire le jeu de paramètres et de fonctions de transfert nécessaires à la paramétrisation du modèle 1D Graeco. Les peuplements choisis pour paramétrer et calibrer le modèle Maestra sont les peuplements de Pins maritimes (Chapitre 3) et d'*Eucalyptus* (Chapitre 4) étudiés dans la première partie de cette thèse. Les informations recueillies des simulations Maestra concernent principalement les paramètres liés au transfert radiatif, à la conductance de couvert et sa réponse aux facteurs de l'environnement, et à la production primaire brute. Les données utilisées ont été obtenues à partir des mesures météorologiques sur sites. Celles-ci incluent le rayonnement global, le rayonnement photosynthétiquement actif, la température de l'air, l'humidité relative, le déficit de pression de vapeur, la vitesse du vent, le contenu en eau du sol. Ces données ont déjà été présentées au cours des Chapitres 2, 3 et 4.

5.2.2 Paramétrisation du modèle Maestra

Dans la plupart des cas, les valeurs des paramètres ont été tirées des études menées sur des peuplements de Pins maritimes et d'*Eucalyptus* où, lorsque les données sont disponibles, se réfèrent à la présente étude. Les paragraphes suivants détaillent la détermination de certain de ces paramètres spécifiques aux cas étudiés. L'Annexe 3 synthétise l'ensemble des valeurs utilisées pour les paramètres d'entrée du modèle.

i. Maquettes de couvert

La première partie de ce travail a été de caractériser la structure du couvert et de mettre en place les maquettes requises. Une placette de 30 x 30 m a été choisie dans chaque parcelle étudiée. Lors des campagnes de mesures, la position des arbres (x, y) et leurs dimensions (hauteur totale, hauteur du tronc, diamètre à 1.30m, rayon de la couronne suivant les directions x et y et surface foliaire) ont été mesurées (Figure 5.3). Les caractéristiques des échantillons sélectionnés pour la modélisation ainsi que les arbres suivis pour les mesures de flux de sève sont présentés sur la Figure 5.4. La densité de la parcelle Pins + ajoncs (14 400 arbres ha^{-1} et 25 tiges d'ajoncs m^{-2}) a rendu difficile l'obtention des mesures sachant qu'une telle opération peut altérer fortement la structure des ajoncs par piétinement. Afin de ne pas transformer la zone de mesure (eddy-flux + flux de sève + humidité du sol + interception de la pluie), la placette échantillonnée se situe à 150 m de la zone de mesure, dans la zone d'influence des flux turbulents.

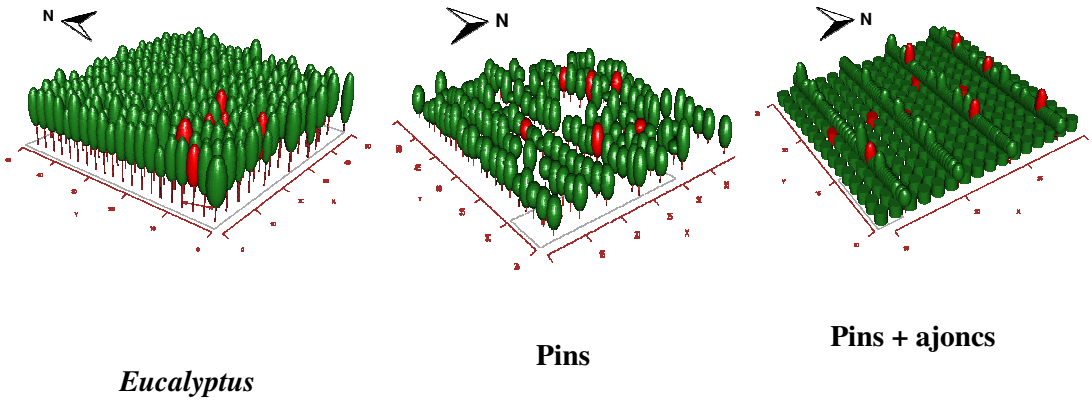


Figure 5. 3 Maquettes des parcelles étudiées implémentées dans le modèle Maestra. Les arbres en rouge ont été suivis pour la densité de flux de sève (cas de la maquette Pins et de la maquette *Eucalyptus.* Ces arbres représentent des arbres 'cibles' pour les simulations Maestra.

A.

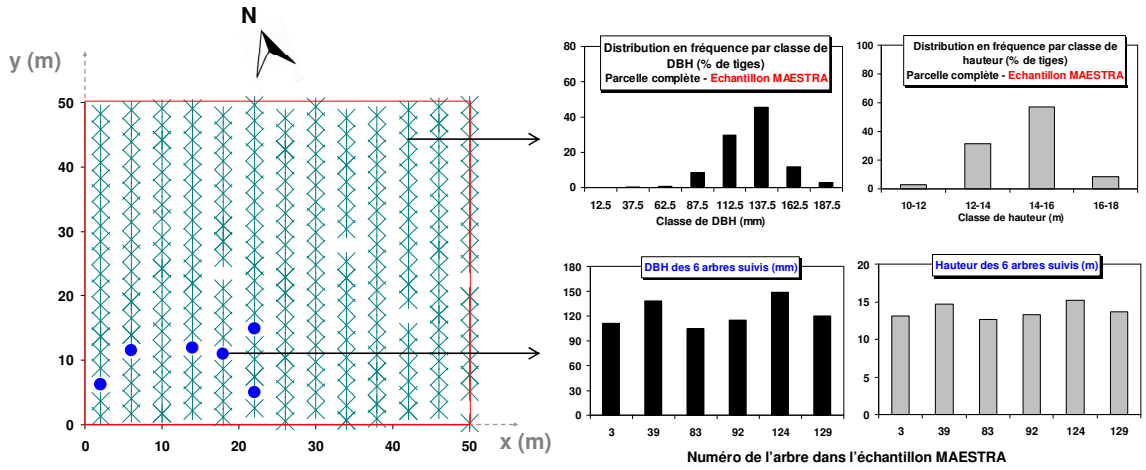


Figure 5. 4 Plan de la placette échantillonnée pour paramétrer la scène du modèle Maestra, distribution de fréquence des DBH et hauteur des échantillons par rapport aux populations échantillonnées, aux arbres du peuplement et à ceux de la placette respectivement. A. *Eucalyptus*. La suite de la figure (parties B. Pins maritimes et C. Pins maritimes et ajoncs) est donnée en Annexe 3.

ii. Distribution spatiale du feuillage.

- *Eucalyptus*

Chaque couronne d'*Eucalyptus* est assimilée à un ellipsoïde, en cohérence avec les observations disponibles sur *E. saligna* et *E. grandis* (Binkley et al. 2010). Aucune information sur la distribution spatiale de la densité de surface foliaire n'a pu être obtenue, ni sur l'espèce en question *E. gundal*, ni sur ses parents *E. dalrympleana* et *E. gunnii*. Sur l'espèce *E. nitens*, Medhurst et Beadle (2001) ont établi un profil de LAI suivant la hauteur du couvert, mais sur des peuplements bien plus âgés ou ayant subi une éclaircie. Dans le cadre de notre étude, nous avons posé l'hypothèse d'une distribution uniforme de la densité de surface foliaire dans la couronne et d'une distribution érectophile de l'angle foliaire, telle qu'observée dans un ensemble de couvert d'*Eucalyptus* par King (1997). Par souci de simplification et faute de données disponibles, une seule classe d'âge de feuille a été considérée. La surface foliaire a été estimée à partir de la biomasse foliaire (kg $_{DM}$ m^{-2} $_{sol}$) mesurée en décembre 2009 et de la surface foliaire spécifique (SLA en m^{2} $_{feuille}$ kg^{-1} $_{DM}$) mesurée en janvier 2011 (Nguyen The, *comm. pers.*). Par la suite, les campagnes d'inventaires successives de juillet 2010, décembre 2010, juillet 2011, et décembre 2011 ont permis d'obtenir la biomasse foliaire à partir du diamètre à 1.30 m et des relations allométriques liant ce diamètre et la biomasse foliaire (cf. Chapitre 4).

- Pins maritimes

La forme de couronne sélectionnée pour les jeunes pins est également un ellipsoïde. Porté et al. (2000) ayant déjà établi les profils des distributions verticale et radiale de la surface foliaire dans des couronnes de *Pinus pinaster* à plusieurs âges, nous avons repris ces observations pour paramétrer la distribution de la surface foliaire en fonction de la hauteur relative dans le couvert (*H*) et du rayon relatif de la couronne (*R*) suivant β-distribution (Equation 5.1, Tableau 5.1).

$$f(R,H) = a \times (R+b)^c (d-R)^e \times f \times H^g (i-H)^j \qquad \text{Equation 5.1}$$

où *a, b, c, d, e, f, g, i* et *j* sont des paramètres à déterminer.

La distribution initiale définie par Porté et al. (2000) a été ajustée afin de répondre aux conditions imposées par le modèle Maestra (Wang et al. 1990) d'après les équations suivantes (Figure 5.5):

- b=0, d=1et i=1.
- $\frac{1}{n}\int_{R=0}^{R=1} a * R^{c+1}(1-R)^e = \frac{1}{2\pi}$
- $\frac{1}{n}\int_{H=0}^{H=1} f * H^g (1-H)^j = 1$

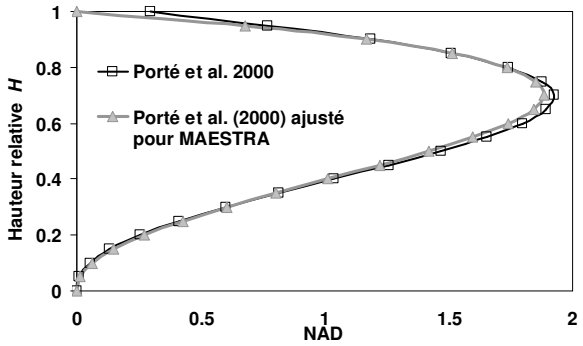


Figure 5. 5 Exemple de distribution de la densité de surface foliaire (NAD) suite à la hauteur relative dans la couronne. Arbre de 5 ans, aiguilles de 1 an.

Tableau 5. 1 Ajustement des paramètres pour la description de la distribution de la surface foliaire déterminée par l'Equation 5.1.

Paramètres	Aiguille de 1 an		Statistiques	Aiguille de 2 ans		Statistiques
R :	*	**		*	**	
a	255.8627	55.6272		2.8305	63.5298	
b	0	0	Somme des carrés :	0.8804	0	Somme des carrés :
c	4.3913	3.3216	Total : 8.1988	16.7218	2.1796	Total : 34.8092
d	1.3153	1	Erreur : 0.01107	1	1	Erreur : 0.3599
e	6.9782	3.0249	Valeur P : <0.0001	8.4652	4.3102	Valeur P : <0.0001
H :						
f	17.9760	13.5830	Somme des carrés :	383.5004	568.2613	Somme des carrés :
g	2.5075	2.2983	Total : 30.1987	2.4626	2.8130	Total : 28.4725
i	1.0349	1	Erreur : 0.0114	0.85	1	Erreur : 0.0194
j	1.2252	0.96	Valeur P : <0.0001	3.6859	5.6136	Valeur P : <0.0001

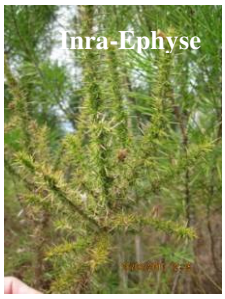
* Paramètres de Porté et al. (2000).

** Paramètres de Porté et al. (2000) ajustés.

Etant donnée la faible proportion (0,92%) de cette classe d'âge (Porté et al. 2000), nous avons choisi d'appliquer arbitrairement la même distribution que pour les aiguilles de 2 ans. Enfin, suivant Medlyn et al. (2005), nous avons considéré que la distribution de l'angle foliaire est sphérique. La surface foliaire a également été calculée à partir des relations allométriques liant le diamètre à 1.30 m à la biomasse foliaire (Porté et al. 2000) et au SLA (m^2 kg^{-1}) déterminé sur jeune peuplement dans les travaux de Porté (1999).

- Sous-étage (Ajoncs nains)

Aucune référence ne permet de caractériser cette espèce. Nous avons donc considéré que la couronne d'un pied d'ajonc est contenue dans un cylindre, avec une distribution uniforme de la densité de surface foliaire, une distribution sphérique de l'angle foliaire et une seule classe d'âge. Quant à la surface foliaire de cette espèce, celle-ci a pu être déterminée à partir des mesures de biomasse foliaire à plusieurs périodes : juillet 2008 (Trichet, *comm. pers*), puis en juillet 2009, 2010 et 2011 pour les deux sites de Pins et des mesures de surface foliaire spécifique sur cette espèce en juillet 2008 (Yauschew-Raguenes 2012). Les autres paramètres de structure requis sont détaillés dans l'Annexe 3.



*iii. Paramètres foliaires (***étape 1***)*

- *Eucalyptus*

Les propriétés optiques (réflectance et transmittance) des feuilles d'*Eucalyptus* ont fait l'objet de nombreuses études, mais aucune n'est dédiée à l'*E. gundal*. Nous avons sélectionné un jeu de paramètres compatible avec la forme des feuilles rencontrées pour *E. gundal* et leur contenu en eau, relié directement avec leurs propriétés optiques. Les mesures en poids frais et en poids sec foliaire de 15 échantillons composites prélevés sur les 15 arbres abattus pour des mesures de biomasse à Montbartier en décembre 2009 ont permis d'estimer la valeur de coefficient de siccité de 0.44 ± 0.02 et de calculer la teneur en eau des feuilles relativement au poids frais des feuilles (GWC_F en kg $_{H2O}$ kg $_{FM}$, pour '*gravimetric water content*') ou relativement au poids sec des feuilles (GWC_D en kg $_{H2O}$ kg $_{DM}$).

Les valeurs moyennes obtenues (GWC_F= 0.56 ± 0.2 kg $_{H2O}$ kg $_{DM}$ et GWC_D= 1.26 ± 0.12 kg $_{H2O}$ kg $_{DM}$) sont cohérentes avec les estimations sur un grand nombre d'espèces d'*Eucalyptus* en Australie (Datt 1999) et permettent de déterminer les réflectances/transmittances associées suivant Datt (1999), Barry et al. (2009) et Le Maire et al. (2011) dans les trois gammes de longueurs d'onde PAR, NIR, TIR (Annexe 3).

Pour les paramètres photosynthétiques du modèle biochimique utilisé dans Maestra, nous avons utilisé les valeurs fournies pour des espèces évoluant en montagne du sud de l'Australie (site de Bago, NSW, Australie) : *E. delegatensis*, *E. dalrympleana* et *E. radiata* (Duursma, *comm. pers.*). N'ayant pas de mesures comparatives directes pour estimer la photosynthèse sur notre site d'étude, et afin de tester la sensibilité de l'estimation de *GPP* à ces paramètres, nous avons testé le jeu de paramètres proposé dans la synthèse de Whitehead et Beadle (2004) pour différentes espèces d'*Eucalyptus*.

- Pins maritimes

Nous avons retenu une valeur commune pour les paramètres optiques des aiguilles quelles que soient leur classe d'âge (Berbigier et Bonnefond 1995). Pour les paramètres photosynthétiques α, V_{cmax} et J_{max}, nous avons étendu aux peuplements âgés de 1 à 12 ans les estimations établies par Porté et Loustau (1998) à 26 ans et confirmées par Delzon et al. (2005) sur une chronoséquence s'étendant de 12 à 92 ans en tenant compte de leur variation avec l'âge de l'aiguille. Cette paramétrisation est cohérente avec Medlyn et al. (2002a, 2002b) qui ont également renseigné les autres paramètres du modèles de Farquhar, notamment l'effet de la température sur les paramètres V_{cmax} et J_{max} (Annexe 3).

- Ajoncs nains

Aucune référence n'a été trouvée quant à une estimation des propriétés optiques des aiguilles d'ajoncs nains (*Ulex minor* Roth.) ou sur ses paramètres photosynthétiques. Sur des espèces voisines telle que l'ajonc d'Europe, nous n'avons pas non plus trouvé de données pertinentes. A défaut, nous avons utilisé les données obtenues pour un sous-bois de Molinie sous Pins maritimes (Delzon 2000) et testé la sensibilité du modèle à ces paramètres sachant que l'écophysiologie de ces deux espèces diffère fortement.

*i. Conductance stomatique (***étape 1***)*

Le modèle de conductance stomatique introduit dans Maestra a été dérivé à partir de valeurs calculées des mesures de flux de sève. La conductance stomatique foliaire, g_s, a été déterminée à partir des mesures de transpiration (flux de sève) en inversant la relation de Penman-Monteith au pas de temps demi-horaire (Equation 4.5, Granier et Loustau 1994) que nous rappelons ici :

$$g_s = \frac{g_c}{L}$$

$$\frac{1}{g_c} = \frac{1}{g_a} \cdot \left(\frac{\varepsilon(Rn) + \rho . c_P . g_a \frac{VPD}{\gamma}}{Tr} - \varepsilon - 1 \right)$$

Les données utilisées sont les valeurs semi horaires de flux de sève et de variables climatiques. Nous avons ensuite modélisé la réponse de la conductance ainsi calculée aux variables climatiques et

édaphiques (*VPD*, *PAR*, SMD, et T_a). Un modèle de type Jarvis (1976) a ainsi été ajusté pour un sous-ensemble de données mesurées sur couvert sec (P < 0.2 mm), de jour (Rg > 20 W m^{-2}) et pour des *VPD* > 0.2 kPa, conditions en dehors desquelles les incertitudes de mesure deviennent très importantes. La forme finale du modèle ajusté par régression multiple non-linéaire prend la même forme pour l'ensemble des trois sites et suit l'équation suivante (valeurs présentées dans le Tableau 5.2):

$$g_c = k_0 \times \frac{1}{1 + \frac{VPD}{k_1}} \qquad \text{Equation 5.2}$$

Notre jeu de données ne faisant pas ressortir l'effet classique du rayonnement sur l'ouverture stomatique, nous avons complété l'Equation 5.2 de cet effet sous la forme suivante (Equation 5.3):

$$g_s = k_0 \times \frac{1}{1 + \frac{VPD}{k_1}} \times \frac{PAR}{PAR + PAR0} \qquad \text{où } PAR0 = 25\ \mu\text{mol m}^{-2}\ \text{s}^{-1} \qquad \text{Equation 5.3}$$

L'analyse visuelle des résidus pour chacun des sites suggère qu'une amélioration de ce paramétrage en fonction d'autres variables environnementales reste possible (Exemple Figure 5.6). Cependant, l'analyse statistique n'a pas permis d'améliorer la qualité de l'estimation et nous nous sommes dans un premier temps arrêtés sur les valeurs obtenues pour la paramétrisation de Maestra (Tableau 5.2). La paramétrisation de la conductance de couvert devra donc par la suite être basée sur des jeux de données plus étendus afin de mieux capturer les effets de variables comme le rayonnement incident, l'humidité du sol ou la température. Notons ici que l'effet du SMD observé par Granier et Loustau (1994) a été testé mais n'a statistiquement pas abouti à une amélioration de la transpiration modélisée et n'est donc pas représenté ici.

Tableau 5. 2 Paramètre du modèle type Jarvis et ajustement associé des paramètres pour Maestra.

Modèle :	**Pins maritimes**	**Pins maritimes + ajoncs**	***Eucalyptus***
k_0 (m s^{-1})	0.05	0.05	0.05
k_1 (Pa)	13.8291	28.8384	79.6963
Statistiques :			
Somme des carrés :			
Total	0.0192	0.00252	0.00532
Erreur	0.00532	0.00104	0.0192
Paramètres Maestra :			
Gsref (mol $_{CO2}$ m^{-2} s^{-1})	1.58	0.89	0.285
D0 (Pa)	13.8291	28.8384	79.6963

5.2.3 Simulations au niveau peuplement (étape 2)

Avec le modèle Maestra, nous avons intégré les fonctions de réponse de la conductance stomatique (Equation 5.3) ainsi que le transfert radiatif et la photosynthèse depuis le niveau de la feuille jusqu'au niveau du couvert. L'approche tridimensionnelle de Maestra discrétise le feuillage de chaque couronne en 10 couches horizontales et 15 points distribués dans chaque couche. Maestra calcule la conductance de chaque élément de feuillage et intègre ces valeurs pour calculer une conductance de couvert au niveau du peuplement. Nous avons simulé la conductance de couvert et la photosynthèse en condition pré-estivale, où les flux sont les plus importants sans contraintes environnementales prononcées. Un jeu de données représentatif de ces conditions, suffisamment complet (90% des données demi horaires disponibles pour les variables météorologiques d'entrée et les grandeurs simulées) a été construit. Il est constitué de 5 journées de mai 2010 pour le site de Pins et le site d'*Eucalyptus* et 3 journées de juin 2009 pour le site de Pins+ajoncs (Tableau 5.3). Les sorties du modèle sont par la suite confrontées aux mesures effectuées sur site lorsque celles-ci sont disponibles pour vérifier la validité du modèle.

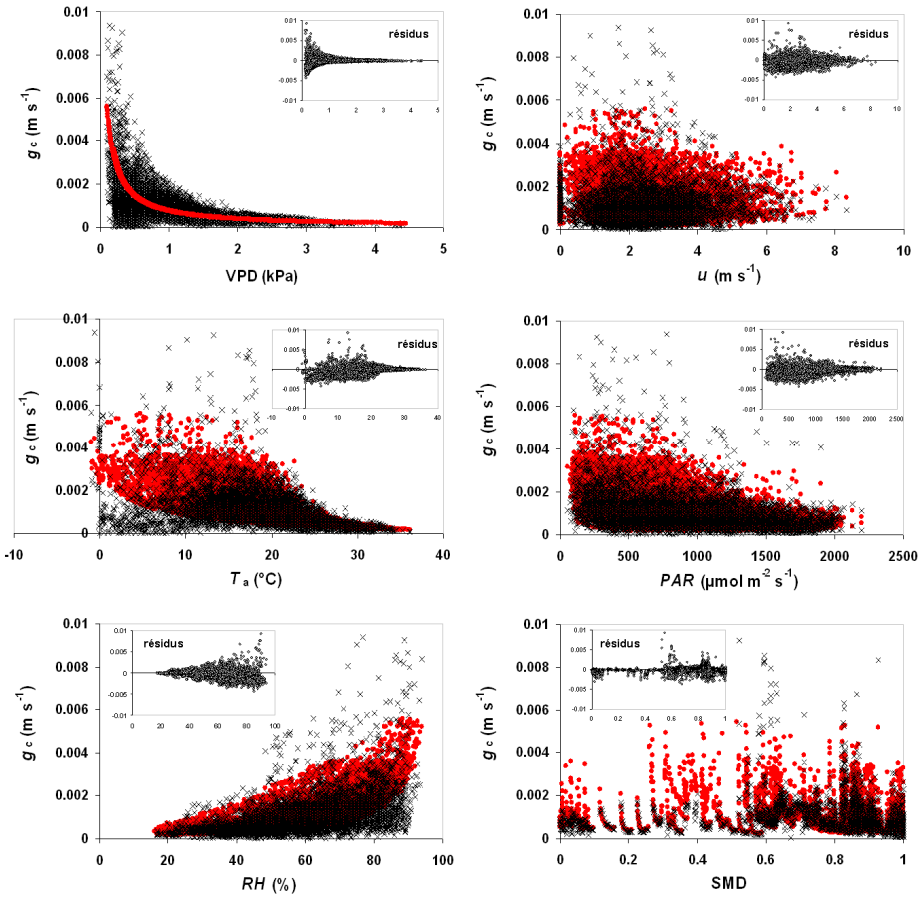


Figure 5. 6 Variation de la conductance stomatique foliaire en fonction de différentes variables de forçage et analyse résiduelle du modèle (encarts), dans le cas du Pin maritime**.**

Tableau 5. 3 Valeurs moyennes des données météorologiques pour les périodes sélectionnées. Pour les précipitations (P), il s'agit de la valeur cumulée sur la période.

Données	**Pins**	***Eucalyptus***	**Pins + ajoncs**
	Mai 2010	Mai 2010	Mai 2010
R_g (W m^{-2})	338.3	313.25	338.3
PAR (µmol m^{-2} s^{-1})	734.53	687.14	734.53
T_a (°C)	20.16	19.53	20.16
RH (%)	51.76	50.82	51.76
VPD (kPa)	1.43	1.26	1.43
P (mm)	0	0	0
u (m s-1)	1.89	1.80	1.89
SMD	0.6	0.56	0.65

i. Pins maritimes

- Conductance de surface du couvert :

Nous avons vérifié les prédictions du modèle en les comparant avec l'estimation de la conductance de couvert également obtenue par inversion de l'équation de Penman-Monteith sur les données de flux de sève , ce qui revient à analyser l'effet de la prise en compte de la structure 3D du couvert sur l'intégration de la conductance stomatique comparativement à une approche « *grosse feuille* ». Maestra décrit 86% de la variance des variations du modèle grosse feuille ($R^2 = 0.8614$) pour des valeurs de $g_s < 0.04$ mol $_{H2O}$ m^{-2} s^{-1} (Figure 5.7). Au-delà, il présente un écart systématique et non systématique non négligeables attribuables aux valeurs matinales (zone grisée entre 5h et 9h). Le modèle simule une valeur de conductance plus forte à l'ouverture des stomates puis sous-estime les valeurs observées. A partir de 9h, le modèle réussit à simuler la dynamique journalière. Ce modèle de g_s ne tient compte que d'une réponse au VPD et au rayonnement photosynthétiquement actif. En réponse aux différentes variables environnementales, le bon ajustement de g_s implique une réponse similaire aux différentes variables environnementales et l'erreur la plus importante a bien lieu pour des valeurs à faible PAR, faible VPD et pour des plus faibles températures (Figure 5.8).

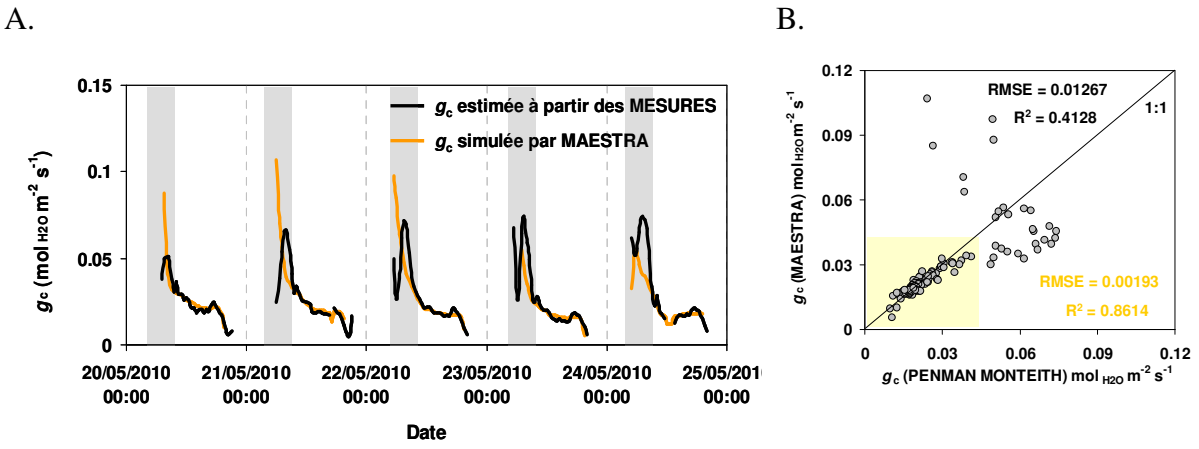


Figure 5. 7 Pins maritimes : Estimation de la conductance de couvert et comparaison aux données à partir de l'inversion de l'équation de Penman-Monteith. A. Cinétiques journalières. B. Inter-comparaison modèle-mesures.

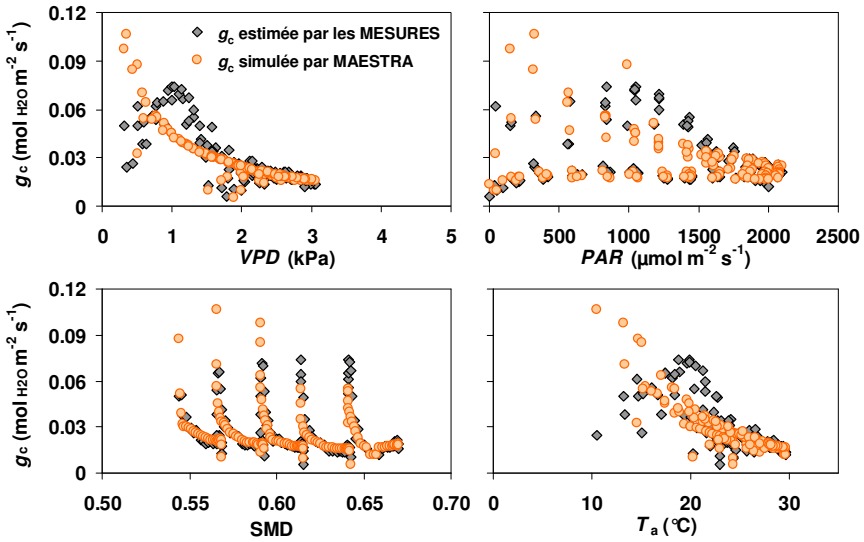


Figure 5. 8 Réponse de la conductance de couvert g_c du Pin maritime aux variables environnementales (déficit de saturation de l'air en vapeur, VPD ; rayonnement visible, PAR ; déficit en eau du sol, SMD ; température de l'air, T_a). Les données de g_c caculées à partir des mesures de flux de sève et modélisées par Maestra sont comparées.

- Transpiration

Nous avons évalué la capacité de Maestra à simuler la transpiration individuelle autrement dit sa capacité à reproduire les différences inter-arbres (Figure 5.9). L'arbre n° 127, supposé présenter la plus forte perte en eau d'après nos mesures, est comparé aux autres arbres. Maestra réussit partiellement à reclasser correctement les arbres à partir de la transpiration. Ainsi, l'arbre n° 127 est bien l'arbre qui transpire le plus, suivi de l'arbre n° 111. Le minimum est également bien représenté pour l'arbre n°106. Pour les valeurs intermédiaires, alors que nos mesures permettent difficilement de distinguer un arbre dominant, le modèle Maestra simule distinctement une différence inter-arbre. La deuxième observation est l'incapacité de Maestra à simuler des flux au-delà d'un seuil de 6 mmol arbre^{-1} s^{-1}. Les cinétiques journalières de transpiration pour l'arbre n° 127 et n° 111, dont l'ordre est pourtant respecté, sont représentées sur la Figure 5.10 A. Nous avons également représenté la transpiration moyenne des 6 arbres modélisée en fonction de la transpiration moyenne des 6 arbres mesurée (Figure 5.10 B).

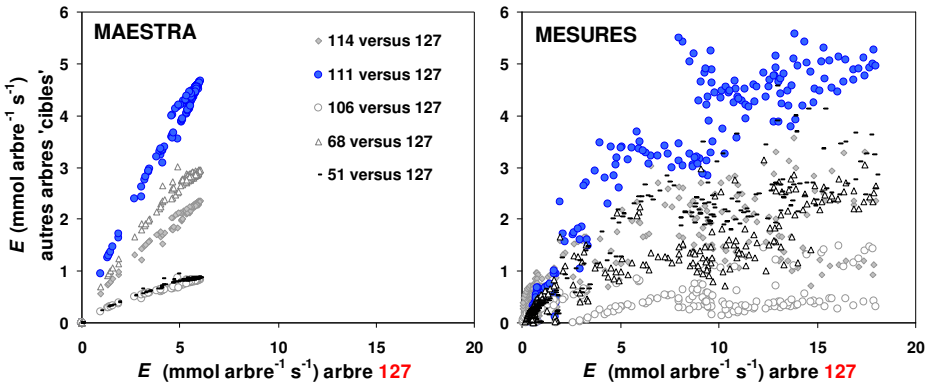


Figure 5. 9 Pins maritimes : Représentation de la transpiration de chaque arbre en fonction de l'arbre dominant en terme de transpiration.

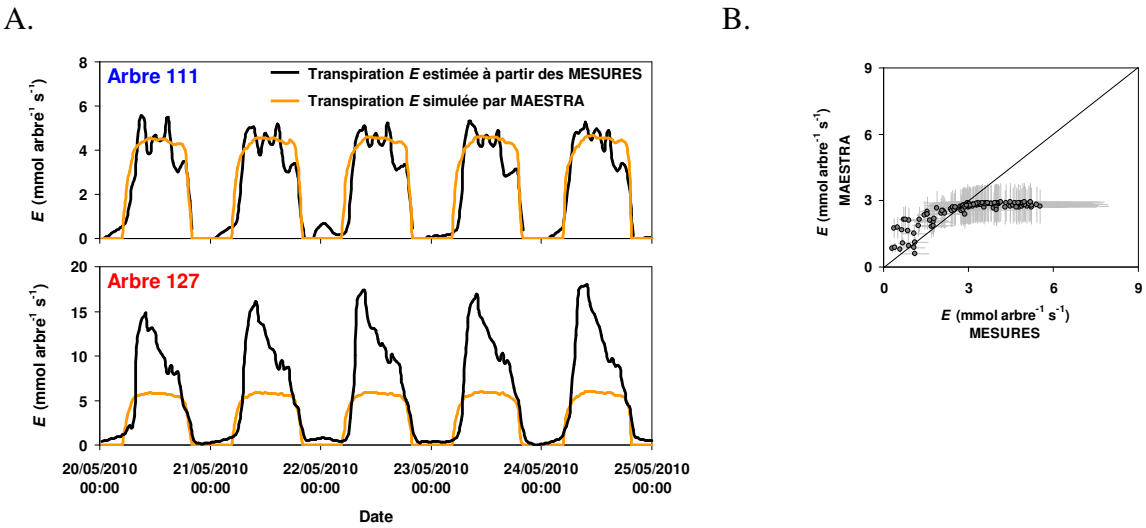


Figure 5. 10 Pins maritimes : A. Cinétiques journalières de ces deux flux sur la période considérée, pour 2 arbres à structures contrastées. B. Comparaison entre la transpiration mesurée et la transpiration modélisée par Maestra.

Deux points ressortent de cette comparaison :

a. La mauvaise estimation de la transpiration moyenne des arbres du modèle Maestra, du moins pour des valeurs supérieures à 3 mmol arbre^{-1} s^{-1}. Tout en tenant compte de l'erreur standard associée au modèle et aux mesures, il apparait clairement un effet de saturation que nous n'avons pas pu expliquer sur des valeurs maximales demi-horaires simulées (Figure 5.10 B).
b. Deuxièmement, la dynamique journalière est très mal représentée par le modèle. Tout se passe comme si le modèle était incapable de diminuer la transpiration au cours de l'après-midi (Figure 5.10 A).

Cet effet de saturation anormal, observé à partir de 3 mmol arbre^{-1} s^{-1}, conduit à une forte sous-estimation de la transpiration des arbres dominants. L'amplitude du signal est mieux représentée pour les arbres situés dans la classe moyenne (arbre n° 111) et inférieure du DBH, où cette fois, la transpiration semble surestimée. Plusieurs points dans l'équation de Penman-Monteith utilisée dans Maestra pourraient expliquer l'origine de la saturation, notamment le rayonnement disponible. D'autres paramètres comme la conductance aérodynamique peuvent également expliquer le résultat obtenu. Nous nous sommes, dans un premier temps, penchés sur l'estimation du rayonnement net disponible pour chaque arbre.

- Rayonnement net et ces composantes.

Maestra simule le rayonnement absorbé dans les trois domaines PAR, NIR et IRT. La somme de ces trois rayonnements donne le rayonnement net disponible que nous avons comparé aux mesures effectuées au-dessus du couvert (Figure 5.11). En début de matinée et en fin de journée, le modèle surestime le rayonnement net mesuré, alors qu'entre 8h30 et 17h, il le sous-estime. Maestra prédit de façon assez fidèle le rayonnement visible absorbé tel que nous l'avons calculé par la loi de Beer (R^2= 0.94) avec cependant une surestimation en début de matinée (7h-9h) et en fin de journée (17h-19h). Un biais apparaît donc aux faibles élévations solaires. Pour le reste de la journée, le modèle simule un rayonnement en accord avec les données observées.

Il semble donc que Maestra soit incapable de décrire l'accroissement de R_n au-delà de 130 W m^{-2} ce qui explique en partie le plafonnement observé sur la transpiration. Bien que nous n'ayons pu tester la performance du modèle dans les autres gammes de longueurs d'ondes, il semble que la mauvaise prédiction de R_n ne vienne pas du rayonnement absorbé dans le domaine visible. La conductance aérodynamique est aussi susceptible d'expliquer une part de la différence entre modèle et données. Nous en concluons que:

a. Maestra donne une représentation vraisemblable de la conductance de couvert tant dans sa cinétique que dans son amplitude journalière.
b. Maestra simule un rayonnement photosynthétiquement actif absorbé cohérent avec les valeurs estimées à partir des mesures.
c. Il sous-estime fortement la transpiration et le rayonnement net disponible.

À partir de là, nous pouvons dresser deux nouvelles hypothèses pour les prochaines simulations :

a. Le bilan hydrique ne sera pas analysé à partir de Maestra.
b. Nous admettons d'après les deux conclusions précédentes que la photosynthèse, estimée à partir du modèle de Farquhar, et couplant l'assimilation foliaire à la conductance stomatique, est bien simulée.

- Production primaire brute

La production primaire brute (*GPP*) a été estimée à partir de l'assimilation foliaire simulée par Maestra et confrontée aux valeurs obtenues après partitionnement des valeurs mesurées du flux net de carbone mesuré (*NEE*) (Chapitres 2 et 3). La Figure 5.12 retrace la dynamique journalière au cours de la période suivie. Le modèle Maestra reproduit bien la dynamique de *GPP* (début et fin de journée, pic matinal). La différence observée en milieu de journée est attribuable à la contribution du sous-étage. Au moment des mesures, celui-ci était en effet bien recolonisé par repousse spontanée (Moreaux et al. 2011). La contribution de chaque strate à *GPP* est dans le même rapport que le LAI des deux composantes du couvert, le sous-étage représentant jusqu'à plus de 50% des flux échangés à cette période de l'année.

Afin d'évaluer la capacité de Maestra à simuler la saisonnalité de ces flux de carbone, nous avons confronté les prédictions de Maestra (Figure 5.13) aux mesures (*GPP* dérivée des mesures de *NEE*) sur une année entière, en données journalières.

Cette comparaison montre que :

- La dynamique saisonnière est bien simulée par le modèle. Avant le 20/04/2010, la contribution du sous-bois est négligeable. Elle devient ensuite importante mais semble s'annuler en fin de saison.
- La différence observée en milieu d'année (du 1/05 au 10/09) est expliquée par la croissance de la végétation accompagnatrice (Moreaux et al. 2011), en accord avec les résultats présentés au cours du chapitre 4.
- Dans la deuxième moitié de la saison de croissance (partie grisée), la forte diminution de *GPP* mesurée n'est pas simulée par Maestra qui n'intègre pas l'effet de la sécheresse du sol.
- En fin de saison, Maestra surestime légèrement *GPP* (10%), ce qui peut s'expliquer par le fait qu'il surestime le rayonnement absorbé (*aPAR*) aux faibles élévations solaires. D'autres points relatifs à l'incertitude sur les mesures mêmes de *GPP* sont discutés par la suite.

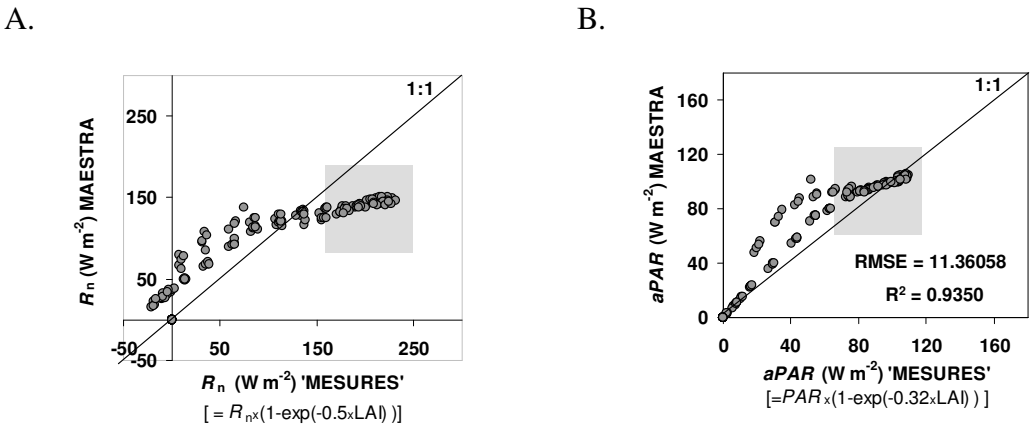


Figure 5. 11 Pins maritimes : Comparaison modèle-mesures, parti rayonnement absorbé : A. Rayonnement absorbé par les arbres dans les trois domaines spectraux considérés (PAR+NIR+TIR). B. Rayonnement absorbé dans le domaine du PAR (encadré grisé représente valeurs pour 9h-17h).

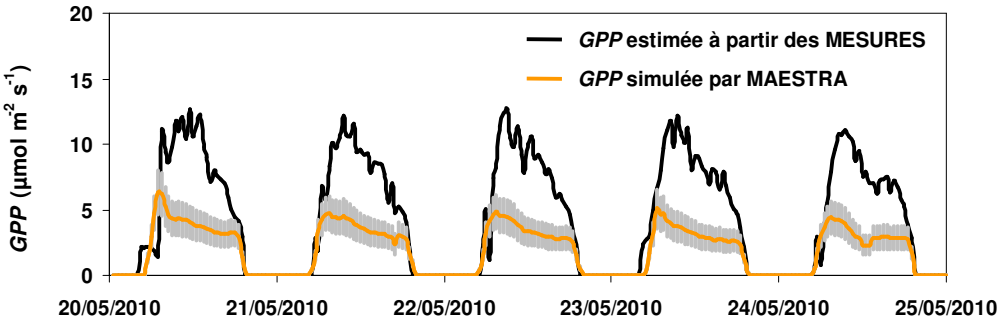


Figure 5. 12 Cinétiques journalières de la production primaire brute *GPP* sur le site de Pin maritime sans ajonc. Sont représentées les données estimées à partir des mesures de flux net (NEE) par covariances turbulentes et simulées par Maestra (arbres seulement).

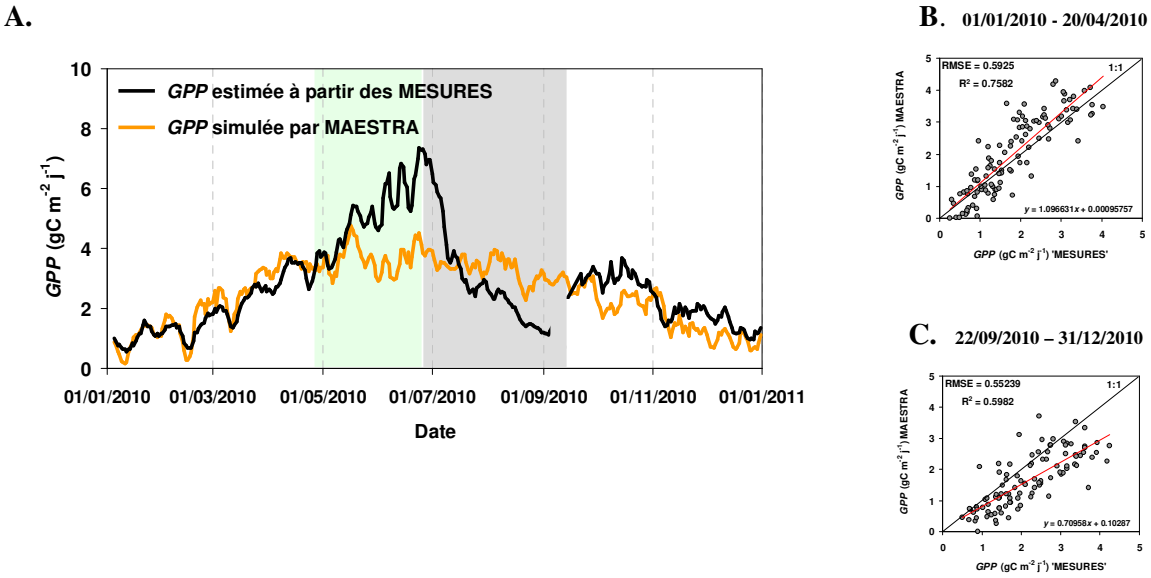


Figure 5. 13 A. Evolution annuelle de la production primaire brute, GPP, (gC m^{-2} j^{-1}) sur la placette de Pins maritimes sans ajonc (Bilos-1) en 2011, telle qu'estimée à partir des mesures de flux net, NEE (pins et sous-étage), et simulée par le modèle Maestra (pins seuls). B. Comparaison modèle-mesures en début de période. C. en fin de période.

ii. Eucalyptus

Les simulations traitant la placette d'*Eucalyptus* conduisent à des conclusions assez similaires aux précédentes sur le comportement de Maestra pour simuler la conductance du couvert, la transpiration et la production primaire brute. L'ensemble des Figures 5.14 à 5.19 montre les points suivants :

a. Ré-estimation pratiquement sans biais de g_c avec une dynamique journalière simulée (Figure 5.14 et 5.15) malgré une légère divergence Maestra – « mesures » en début de journée. Maestra explique 88% de la variance observée.

b. On observe le même phénomène de « saturation » de la transpiration totale du couvert prédite par Maestra par rapport aux données mesurées (Figure 5.16 B). La transpiration moyenne prédite ne dépasse pas 19 mmol arbre^{-1} s^{-1} contre 37 mmol arbre^{-1} s^{-1} mesurée, soit un rapport 2 entre modèle et mesures. En revanche, l'analyse du rayonnement net et de sa composante *aPAR* montre que Maestra surestime le rayonnement net disponible mais est bien cohérent avec l'estimation d'*aPAR* par la loi de Beer (Figure 5.17). Un biais apparait pour les fortes valeurs d'*aPAR*, avec une sous-estimation du modèle pouvant atteindre 20%.

c. Maestra reproduit correctement la contribution relative individuelle des arbres à la transpiration (Figure 5.18).

d. Nous avons également estimé la production primaire brute *GPP* qui présente un ordre de grandeur et une cinétique horaire cohérents. Nous ne disposons pas de mesures pour confronter les valeurs modélisées et évaluer la pertinence de l'estimation mais l'allure des cinétiques simulées semble vraisemblable (Figure 5.19).

A. B.

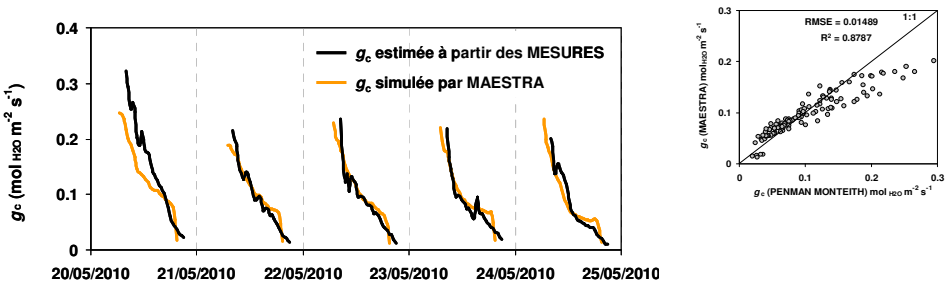


Figure 5. 14 *Eucalyptus* : Estimation de la conductance stomatique de couvert par Maestra et comparaison aux données à partir de l'inversion de l'équation de Penman-Monteith. A. Cinétiques journalières. B. Inter-comparaison modèle-mesures.

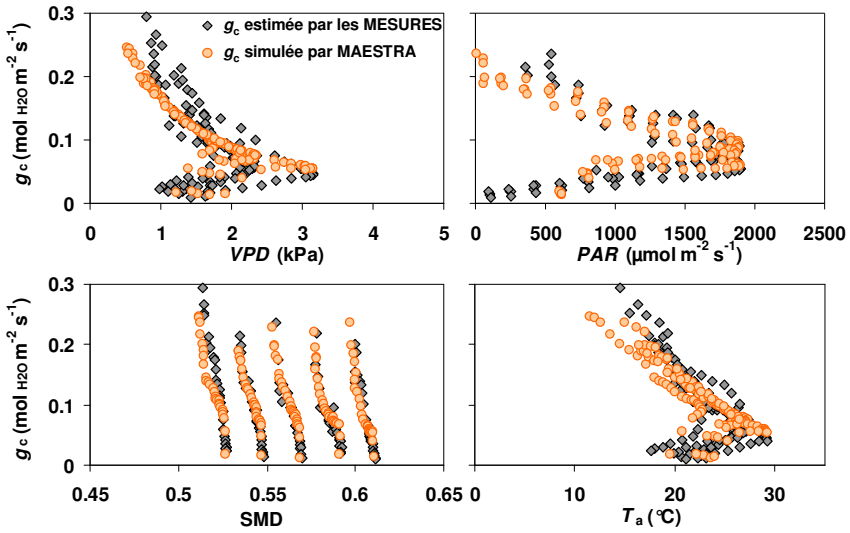


Figure 5. 15 Réponse de la conductance de couvert du peuplement d'*Eucalyptus*, g_c, aux variables environnementales (déficit de saturation de l'air en vapeur, VPD ; rayonnement visible, PAR ; déficit en eau du sol, SMD ; température de l'air, T_a). Les données de g_c calculées à partir des mesures de flux de sève et modélisées par Maestra sont représentées.

A. B.

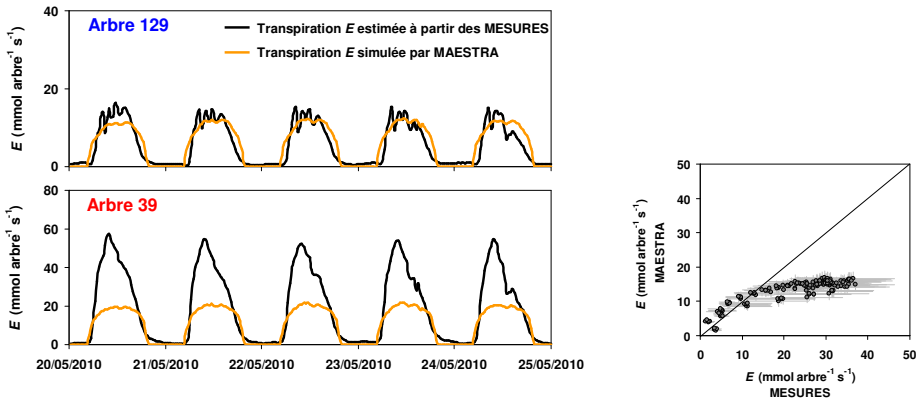


Figure 5. 16 *Eucalyptus* : A. Cinétiques journalières de ces deux flux sur la période considérée, pour 2 arbres à structures contrastés. B. Comparaison entre la transpiration mesurée et modélisée.

A. B.

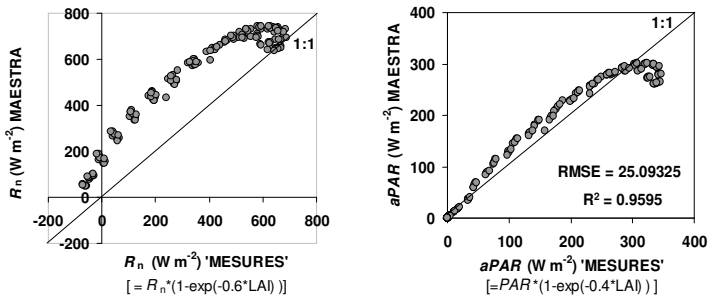


Figure 5. 17 *Eucalyptus* : A. Rayonnement net absorbé par les arbres. B. Rayonnement visible absorbé.

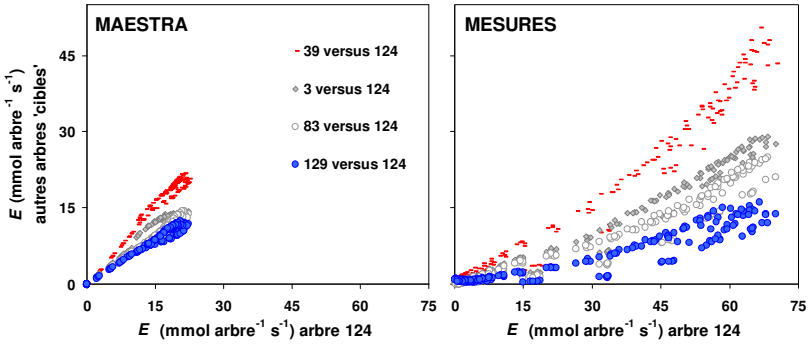


Figure 5. 18 *Eucalyptus* : Classement de la transpiration de chaque arbre en fonction de l'arbre dominant.

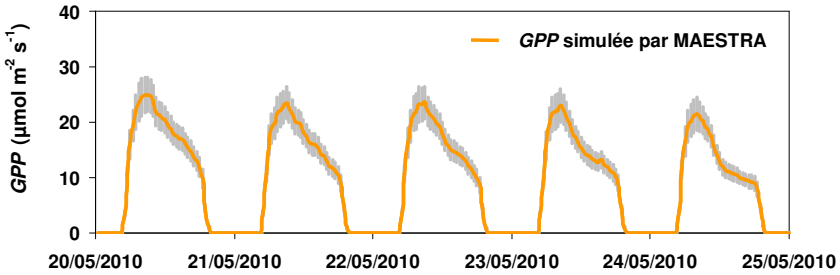


Figure 5. 19 Cinétique journalière de la production primaire brute modélisée sur le site d'*Eucalyptus*.

iii. Pins maritimes + ajoncs

Relativement aux simulations précédentes, nous présentons pour cette parcelle les résultats concernant plus spécifiquement l'effet d'un tapis d'ajonc dans l'inter-rang. La parcelle présente une forte densité de pins et d'ajoncs et pour réduire à la fois le temps de calcul et simplifier la structure de la parcelle, la placette modélisée a été réduite à une surface de 225 m^2, soit 15 m × 15 m. La scène ainsi constituée contient 4 rangs de pins intercalés d'un tapis d'ajonc dont le LAI atteint 1.39 m^2 m^{-2}, valeur déterminée à partir des biomasses mesurées sur la placette en juillet 2010 et de la surface spécifique mesurée sur ajonc nain (Yauschew-Raguenes 2012). Etant donné l'incertitude liée à la paramétrisation de l'espèce ajonc, nous avons testé la sensibilité du modèle à reproduire la *GPP* totale mesurée par covariance turbulente (chapitre 3) pour différentes structures de couvert. Le Tableau 5.4 et la Figure 5.20 présentent quelques-uns des différents tests réalisés. Ceux-ci concernent principalement la forme de couronne attribuée à un pied d'ajonc et sa répartition dans l'espace (variation de densité).

Tableau 5. 4 Tests de sensibilité de GPP à la structure définie pour le sous-étage sur la maquette Pins + ajoncs.

Variables		**Mesures**	**Prédictions Maestra**		
			Test 1 Forme	**Test 2 Forme + densité**	**Test 3 densité**
Forme de la couronne			Box	Cylindre	Cylindre
Dimension de la couronne (c = côté, r = rayon)	m	-	c = 7.5 ×7.5	r = 0.5	r = 0.25
Densité	m^{-2}	-	1	1.03	4.12
Surface foliaire totale projetée	$m^2.m^{-2}$	323	323	323	323
	m^2 ajonc^{-1}	-	323	1.39	0.34
LAI	$m^2.m^{-2}$	1.39	1.39	1.39	1.39
GPP cumulé (3 jours)	gC m^{-2}	16.4	15.9	15.4	16.5

La valeur la plus proche des mesures est obtenue avec une forme de couronne cylindrique et une densité de 4.12 pieds m^{-2} pour l'ajonc (Figure 5.20). La densité, plus que la forme de couronne, semble jouer un rôle non négligeable dans l'estimation du flux. Il est probable que, notamment aux faibles élévations solaires, l'atténuation globale du rayonnement au niveau peuplement soit plus faible pour un couvert composé de couronnes de forme large et étalée, ce qui conduit à une valeur d'*aPAR* inférieure pour le cas de plus faible densité (Figure 5.21 B.).

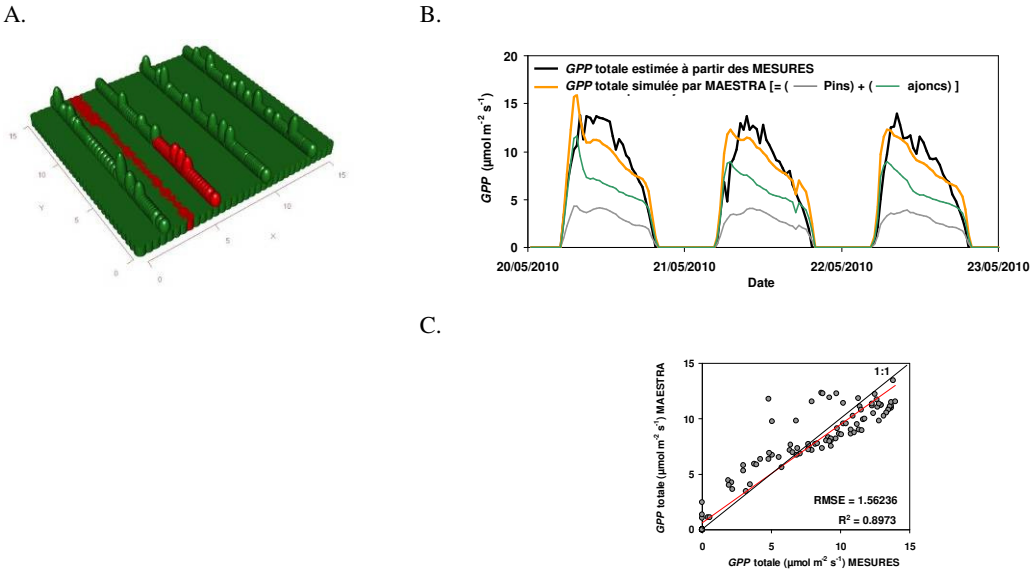


Figure 5. 20 Bilan du test n° 3. A. Configuration de la parcelle. Les arbres indiqués en rouge représentent les arbres cibles pour lesquels les flux sont simulés. B. Cinétiques journalières de la production primaire brute totale et de chaque strate prédite par Maestra et estimée à partir des mesures de flux turbulents. C. Comparaison modèle-mesures de *GPP* totale.

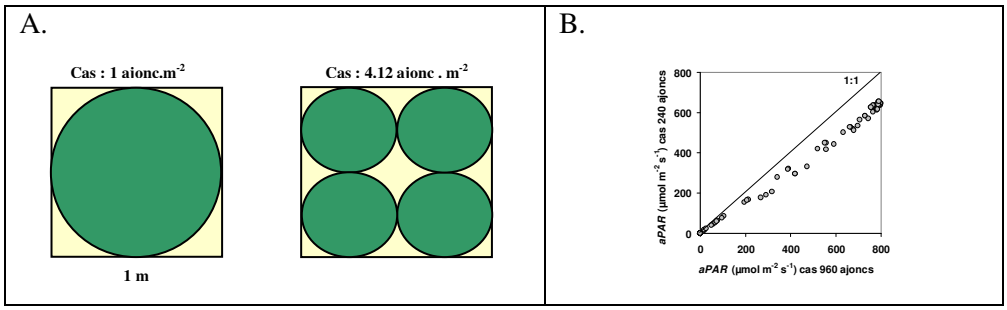


Figure 5. 21 Représentation de la fraction de trouée (en jaune) entre une configuration de 1 pied par m^2 (240 ajoncs dans la maquette) et 4.12 pieds par m^2 (960 ajoncs dans la maquette).

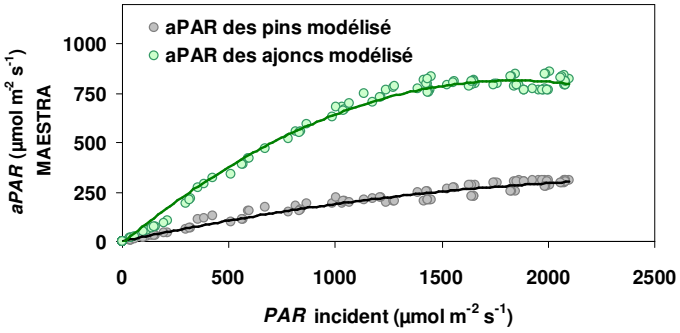


Figure 5. 22 Absorption du rayonnement photosynthétiquement actif en fonction du *PAR* incident pour les deux strates.

Maestra surestime *GPP* en début et fin de journée et la sous-estime pour les fortes valeurs d'*aPAR* en milieu de journée mais capture globalement la cinétique journalière mesurée, avec un maximum de *GPP* des pins de 4 µmol m^{-2} s^{-1} atteint entre 9h et 11h30. L'ajonc atteint un maximum plus tôt dans la matinée (en moyenne de 10 µmol m^{-2} s^{-1}) et une diminution plus accentuée au cours de la journée. L'absorption du rayonnement des ajoncs atteint trois fois celle des pins (Figure 5.22). Le point de saturation à la lumière de *GPP* est atteint pour des valeurs comparables entre les deux strates (autour de 400 µmol m^{-2} s^{-1}, non montré). Cela pourrait expliquer le fait que la *GPP* des ajoncs atteint des valeurs maximales plus rapidement que pour le pin, mais dès que le maximum est également atteint pour le pin, la décroissance de *GPP* est simultanée entre les deux espèces (après 11h30). Maestra permet d'estimer la contribution de la strate d'ajoncs à la production primaire brute de l'écosystème, soit 63%. Cette valeur est proche de la contribution de cette strate aux échanges d'eau mesurée en mai 2010 et s'élevant à 60% (Moreaux et al. 2011). Cette estimation est donc cohérente.

5.2.4 Tests de sensibilité additionnels

i. Pins maritimes

Calé comme nous l'avons présenté précédemment, le modèle réussit partiellement à reproduire la dynamique annuelle des flux de carbone sur le site de Pins. Il ne restitue pas la dynamique en période de sécheresse édaphique prolongée dont la principale raison est l'absence d'un compartiment sol (cf. discussion § 5.2.7). Nous avons donc testé la sensibilité du modèle à certains paramètres pouvant influencer la dynamique pendant cette période (Tableau 5.5). Granier et Loustau (1994) et d'autres auteurs depuis ayant mis en évidence un effet SMD sur la conductance de couvert des pins, nous avons d'abord utilisé leur réponse de g_c au SMD dans Maestra. Cependant, cette introduction de l'effet du SMD n'apporte aucune amélioration, ni sur le flux estimé, ni sur la dynamique. Suivant Misson et al. (2006), nous avons aussi introduit une saisonnalité de J_{max} et V_{cmax} avec une réduction de 30% entre juillet et septembre. Une diminution de 30% des paramètres photosynthétiques pendant la période de sécheresse édaphique tend à diminuer la *GPP* de seulement 3%, sa dynamique restant également inchangée (résultats non montrés).

ii. Eucalyptus

Le même exercice est réalisé pour l'*Eucalyptus* concernant les paramètres photosynthétiques. Deux cas limites de valeurs des paramètres photosynthétiques sont envisagés (Tableau 5.6.). Dans le cas d'une réduction de près de 50% des paramètres photosynthétiques, la *GPP* est diminuée de l'ordre de 5 gC m^{-2}, soit 9%. Si cette valeur semble non négligeable, elle reste proche de l'écart type calculé et ne peut donc être considérée comme significative.

Tableau 5. 5 Présentation des tests réalisés sur la maquette Pins.

Paramètres Maestra	**Mesures**	**Référence**	**Test 1 SMD**	**Test 2 variations saisonnières**
$g_c = f$(SMD) : SMD1	-	-	0.0156	-
SMD2			4.269	
J_{max}	-	180	180	126
(µmol $_{e-}$ m^{-2} s^{-1})		120	120	84
		120	120	84
V_{cmax}	-	120	120	84
(µmol CO_2 m^{-2} s^{-1})		80	80	56
		80	80	56
AJQ	-	0.2	0.2	0.2
(mol $_{e-}$ mol$_{\Phi}$ $^{-1}$)		0.15	0.15	0.15
		0.15	0.15	0.15
GPP cumulé (gC m^{-2}) : 15/07/2010- 31/08/2010	104.3	158.7	158.7	154.8

Tableau 5. 6 Tests de sensibilité aux paramètres photosynthétiques réalisés à partir des valeurs minimales et maximales de J_{max} et V_{cmax}, obtenus de Whitehead and Beadle (2004) pour *E. grandis* et *E. pauciflora*.

Paramètres	**Référence**	**Test 1 MIN**	**Test 2 MAX**
V_{cmax} (µmol m^{-2} s^{-1})	82	49	87
J_{max} (µmol m^{-2} s^{-1})	191	80	222
GPP cumulé (5 jours) (gC m^{-2})	55.25	50.06	55.74
σ (gC m^{-2})	7.08	6.29	7.16

Tableau 5. 7 Valeurs de LAI en fonction de l'âge du peuplement, observées pour le site de Bilos-1. Un dépressage a eu lieu entre 4 et 5 ans.

Age	**LAI$_p$**	**Sources**
4 ans	1.9	Stella et al. 2009
5 ans	0.32	Cette étude
6 ans	0.85	Cette étude
7 ans	1.27	Cette étude
10 ans	2.9	Delzon et Loustau 2005

5.2.5 Dégradation de Maestra dans Graeco (étape 3)

i. Transfert radiatif

En peuplement à structure hétérogène, représentée dans notre cas par une forte variabilité horizontale, les variabilités spatiale et temporelle du rayonnement de courte longueur d'onde transmis au niveau du sous-bois et du sol augmentent et affectent l'évapotranspiration et la production primaire du sous-bois et de l'évaporation du sol. Pour en rendre compte, nous avons utilisé les sorties de *PAR* incident et *aPAR* de Maestra pour calculer un analogue 1D du coefficient d'atténuation du rayonnement de courte longueur d'onde, ***K***, suivant *:*

$$\boldsymbol{K} = \ln\left(\frac{aPAR - PAR}{PAR}\right) / LAI_p$$

Equation 5.4

où *aPAR* représente le rayonnement photosynthétiquement actif absorbé modélisé par Maestra, *PAR* le rayonnement photosynthétique actif incident mesuré et LAI_p l'indice foliaire des pins. Les LAI_p utilisés pour le calcul sont définis dans le Tableau 5.7.
Pour cela, nous avons analysé la réponse de ***K*** à la structure du peuplement (qui rend également compte de l'âge (Delzon et al. 2005)). L'approche est donc de construire une fonction de réponse de ***K*** à la structure du couvert en modifiant divers paramètres d'entrée du modèle Maestra.

Un certain nombre de postulats a été au préalable établi:

- Tous les tests sont réalisés à la maquette du peuplement de Bilos-1, déjà décrite.
- Les arbres de chaque simulation sont décrits par une couronne ellipsoïdale, dont les dimensions sont spécifiées pour chaque simulation. La distribution de l'angle d'inclinaison des aiguilles de pins est sphérique.
- La distribution de la densité de surface foliaire suit une β-distribution telle que définie précédemment pour les jeunes peuplements (Porté et al. 2000), sauf spécification contraire.
- Les simulations sont réalisées pour une journée typique d'un début d'été où la température fluctue de 15 à 32°C et le PAR culmine à plus de 2000 µmol m^{-2} s^{-1}.

Les tests de sensibilité réalisés sont les suivants :

- Orientation des rangs : angle azimutal.

Telle que nous l'avons défini dans la maquette, l'orientation des rangs est décrite par l'axe *y* (Figure 5.23). Afin d'estimer la sensibilité du paramètre ***K*** à l'orientation de ces rangs, nous avons opéré une simulation pour 6 valeurs de l'angle formé par l'axe sud (S) et l'axe *x* de la parcelle considérée, entre 0 et 180° (Tableau 5.8).

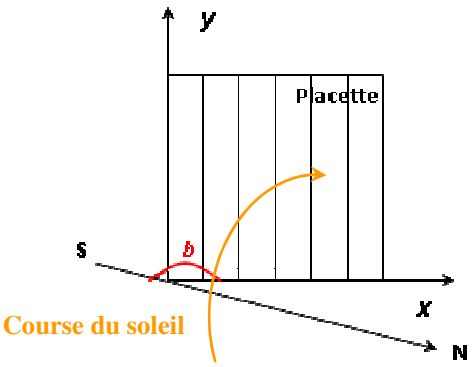


Figure 5. 23 Schématisation de l'angle azimutal, *b*, par rapport à l'orientation des rangs (*y*) (en haut), et valeurs de k associés à une variation de *b* (en bas).

Tableau 5. 8 Valeurs de *K* pour différents angles d'alignement des rangs de Pin

Simulations	Angle *b* (°)	*K*
1	0	0.2954
2	30	0.3019
3	60	0.3043
4	90	0.3036
5	120	0.3043
6	150	0.3027
7	180	0.2955
Moyenne	-	**0.3011**

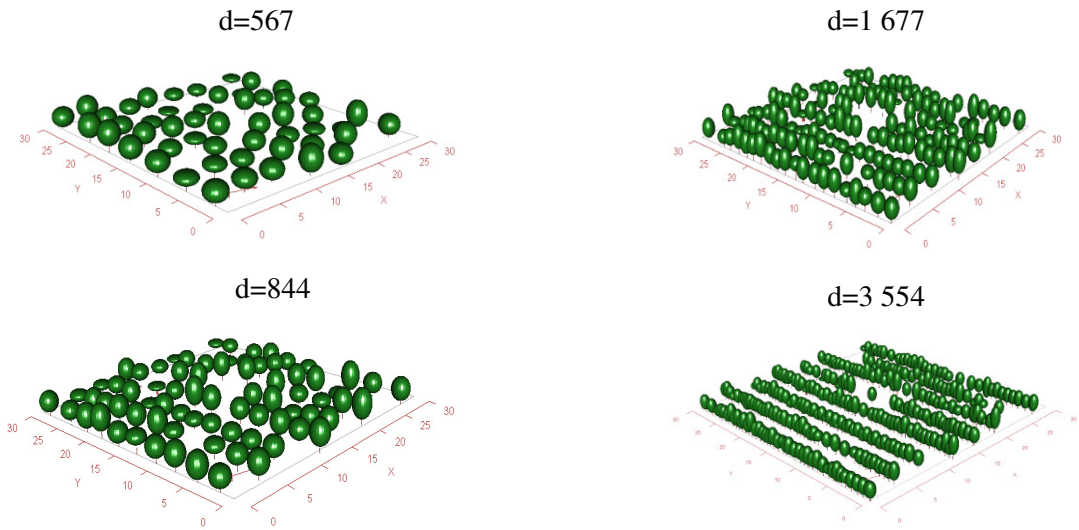


Figure 5. 24 Scène représentant les scènes testées pour l'analyse de l'effet de la densité sur l'atténuation du rayonnement visible par la canopée des arbres.

d (arbres ha^{-1})	*K*
567	0.2333
844	0.3081
1677	0.2981
3554	0.4058

Tableau 5. 9
Valeurs de l'analogue 1D du coefficient d'atténuation, ***K***, pour différentes densités des pins, à LAI égal.

L'absorption du rayonnement est maximale pour des rangs orientés suivant l'axe nord-sud (b=90°). Cependant, l'amplitude des variations est très faible, avec un écart maximal de 2.5% entre le minimum d'absorption et le maximum d'absorption.

- Densité du peuplement

L'effet densité est testé sur 4 peuplements présentant une surface foliaire totale identique (Figure 5.24). Partant de la simulation de référence à 1 677 arbres ha^{-1}, pour une surface foliaire totale de 289.232 m^2, une réduction de la densité d'un facteur 2, puis 4, nécessite d'ajuster les paramètres Rc_x et Rc_y pour maintenir constant le ratio $\boldsymbol{r}$ défini comme le rapport surface foliaire totale (SF_T, m^2) / volume total des couronnes (V_{crown}, m^3), sachant que :

$$SF_T = \sum_{i=1}^{151} SF_i$$

$$V_T = \sum_{i=1}^{151} V_{crown,i} = \sum_{i=1}^{151} (\frac{4}{3} \times \pi \times \frac{h_{crown,i}}{2} \times Rcx_i \times Rcy_i)$$

$$r = \frac{SF_T}{V_T}$$

Nous observons que Maestra prédit que la valeur de ***K*** augmente avec la densité de façon non linéaire (Tableau 5.9), mais nous n'en tirons pas de conséquence particulière pour adapter une fonction de réponse propre de ***K*** à la densité. Il sera nécessaire pour cela d'accroître le nombre de cas testés et de différencier l'atténuation du rayonnement direct et diffus, ce qui dépassait le cadre temporel de ce travail.

ii. Production primaire brute et efficience de d'utilisation du rayonnement utile absorbé

Le modèle GRAECO est basé sur une approche « ***LUE*** » pour le calcul de l'assimilation foliaire, aussi bien pour les arbres que pour la végétation accompagnatrice. Maestra a permis de calculer *GPP* et *aPAR*, variables intervenant dans le calcul de ***LUE***. La fonction ***LUE*** elle-même varie en fonction de facteur climatique similairement à la conductance de couvert. Un modèle de réponse de ***LUE*** est donc établi en considérant une efficience d'utilisation de la lumière maximale ($\boldsymbol{LUE}_{max}$) pondérée par des fonctions de réponse aux différentes variables climatiques comme suit :

$$\boldsymbol{LUE} = \boldsymbol{LUE}_{max} \times f(VPD) \times f(SMD) \times f(PAR) \times f(T_a) \qquad \text{Modèle 1}$$

$$\boldsymbol{LUE} = \boldsymbol{LUE}_{max} \times f(g_c) \times f(PAR) \qquad \text{Modèle 2}$$

Pour chacun des peuplements, i.e. Pins, Pins + ajoncs, *Eucalyptus*, nous avons calculé une valeur de ***LUE*** comme le rapport de *GPP* / *aPAR* au pas de temps demi-horaire, et étudié la réponse de ce

paramètre aux différentes conditions environnementales. Utilisant les simulations précédentes, nous avons sélectionné les jours où le modèle s'ajustait au mieux à nos données tout en considérant un climat représentatif des différentes conditions (journées ensoleillées et journées nuageuses). Cela représente donc un échantillon de 24 journées, à raison de 1 journée ensoleillée et 1 journée nuageuse pour les mois de janvier à mars, d'une part, et d'octobre à décembre, d'autre part. Ces chiffres sont doublés pour les mois de mai, juin et septembre. Afin de ne pas biaiser l'ajustement du modèle ***LUE***, la période de juillet-aout a été laissée de côté pour l'instant, dans la mesure où le modèle ne parvenait pas à s'ajuster pendant les périodes de sécheresse édaphique.

A partir de ce jeu de données, nous avons pu ajuster le modèle 2 et ce pour chaque espèce dans leur peuplement respectif, sous la forme (Equation 5.5) :

$$\boldsymbol{LUE} = LUE_{\max} \times g_s^{\,k_1} \times \frac{1}{PAR^{k_2}}$$

Equation 5.5

Et de la même manière nous avons redéfini une conductance stomatique d'après l'équation suivante (Equation 5.6).

$$g_s = g_{s\max} \times \frac{1}{1+\frac{VPD}{k_3}}$$

Equation 5.6

Toute la démarche entreprise au cours de cette partie nous a permis d'établir des expressions de *LUE* et g_s modélisées par Maestra en réponse aux conditions environnementales, en prenant en compte les différentes structures de peuplement (Tableau 5.10 A). L'objectif poursuivi, rappelons-le, étant de renseigner le modèle Graeco sur ces aspects écophysiologiques, nous devrions à ce stade procéder à une analyse d'incertitude liée l'estimation de ces paramètres du fait du grand nombre de paramètres incertains que nous avons renseignés en entrée du modèle Maestra. L'estimation des variables de sortie d'intérêt dans le modèle Graeco, telles que la production primaire brute et la transpiration, repose sur ce formalisme dégradé de Maestra (*Assimilatioin=LUE* $\times$ *aPAR* et transpiration à partir de Penman-Monteith). Ce travail d'analyse de propagation d'erreurs n'a pas été, à ce stade, réalisé. Cependant, complété à l'analyse de sensibilité du modèle Graeco proposé par Pluviaud (2000), notre analyse statistique permet déjà d'évaluer l'erreur attendue sur les sorties de Graeco en suivant ce formalisme puisque, par exemple, une augmentation de 20% de $LUE_{\max}$ dans Graeco par rapport à une valeur de référence provoquerait une augmentation de 20% de l'assimilation des arbres ou encore de 10% sur l'estimation de la biomasse aérienne (Pluviaud 2000). Notre $LUE_{\max}$ a lui été évalué dans Maestra avec une erreur de 10% (RMSE / $LUE_{maestra}$) en moyenne dans chacun des cas, qui finalement, d'après l'analyse de Pluviaud (2000), se répercuterait directement sur l'assimilation. Pour la conductance stomatique, notre erreur est beaucoup plus faible dans les trois cas. D'après ces observations, nous proposons de conserver le formalisme et le paramétrage existant dans le modèle Graeco (Chapitre 6).

Tableau 5. 10 A Récapitulatif des paramètres obtenus pour trois configurations de peuplements
B. statistiques associées.

A. Modèles :	**LUE (gC m^{-2})**			**g_s (m s^{-1})**		***k***
		Modèle 2				
Paramètres :	**LUE_{max}**	**k_1 (g_s)**	**k_2 (PAR)**	**g_{smax}**	**k_3 (VPD)**	
Pins						
5-6 ans	1.1085	0.5401	-0.3580	0.0167	36.1376	0.3809
Phase 10 ans et +	Modèle établi pour le Bray (Bosc 1999)					
Pins + Ajoncs nains						
Pins	1.2672	0.5028	-0.3063	0.00552	65.8598	0.3552
Ajoncs	1.2924	0.6029	-0.3189	0.00417	277.8	0.2817
Eucalyptus	0.5901	0.4193	-0.4846	0.00497	133.7	0.3767

B. Statistiques :	**LUE**	**g_s**
Pins : 5-6 ans	Somme des carrés : Modèle : 16.7987 Erreur : 0.6454 R^2 = 0.8459 RMSE = 0.04685	Somme des carrés : Modèle : 0.000310 Erreur : 0.000015 R^2 = 0.8749 RMSE = 0.00017085
Pins + Ajoncs nains		
Pins	Somme des carrés : Modèle : 20.4494 Erreur : 0.4706 R^2 = 0.8471 RMSE = 0.04594	Somme des carrés : Modèle : 0.000098 Erreur : 5.911E-6 R^2 = 0.8385 RMSE = 0.00010532
Ajoncs	Somme des carrés : Modèle : 18.2116 Erreur : 0.6280 R^2 = 0.8436 RMSE = 0.04767	Somme des carrés : Modèle : 0.000360 Erreur : 0.000011 R^2 = 0.8710 RMSE = 0.00014126
Eucalyptus	Somme des carrés : Modèle : 59.2030 Erreur : 1.5323 R^2 = 0.8494 RMSE = 0.07931	Somme des carrés : Modèle : 0.000384 Erreur : 0.000012 R^2 = 0.8811 RMSE = 0.00015875

5.2.6 Discussion : PARTIE Maestra

La paramétrisation de Maestra requiert un grand nombre de paramètres dont nous ne disposons pas toujours, ce qui impose le recours à la littérature comme une étape indispensable. La connaissance sur le Pin maritime permet d'acquérir ce jeu de paramètres et l'étude réalisée sur le site de Bilos (Chapitre 3, 4) complètent certains de ces paramètres. La méthodologie utilisée pour l'évaluation du modèle repose une analyse statistique simple par comparaison modèle-données. Mais la première question à se poser serait : quelle est le degré de confiance en nos données pour justifier de cette comparaison ? En effet, la paramétrisation du modèle sur les aspects conductance stomatique par exemple est issue indirectement des mesures de densité de flux de sève qui présente une grande incertitude, en particulier dans cette étude sur jeunes peuplements. La transpiration peut être sous-estimée par la méthode employée (Köstner et al. 1998). Nous avons pris en compte le gradient thermique naturel pour corriger nos densités de flux de sève, ce qui, à priori, permet de réduire l'incertitude sur la mesure. Il est également important de considérer l'erreur associée à nos mesures par la méthode des flux turbulents au moment de la comparaison qu'une analyse statistique simple comme réalisée ici ne permet pas toujours de mettre en évidence (Medlyn et al. 2005). Nos mesures illustrent directement le flux provenant d'une zone dite « footprint » qui peut varier suivant la direction du vent, alors que notre placette échantillonnée est fixe. Il se peut qu'à un instant donné, notre zone échantillonnée ne soit pas représentative du flux mesuré par le système d'eddy covariance. Dans ce cas, le modèle surestime ou au contraire sous-estime le flux. Cependant, nous avons sélectionné une zone supposée limiter cet impact de par son emplacement par rapport au mât de mesure, et pour être suffisamment représentative de la parcelle complète. En terme de bilan annuel, cet effet doit donc être minime. Finalement, le jeu de paramètres ne nous permet en aucun cas de valider le modèle pour une utilisation plus générique, mais il nous permet de montrer sa capacité ou non à reproduire les effets d'une structure de couvert donnée et un climat donné. Certaines des variables d'intérêt : g_c, *aPAR*, et *GPP* montrent une cohérence fondée et donc leur possible utilisation pour la suite du travail.

La deuxième question à se poser serait : dans quelle mesure une modification des paramètres d'entrée modifient et améliorent ou non l'estimation de *GPP* ou de *aPAR* ? Nous avons admis que le comportement photosynthétique de ces jeunes peuplements étaient similaires à celui des peuplements adultes (Porté et Loustau 1998, Medlyn et al. 2002a, 2002b). La chrono-séquence suivie par Delzon et Loustau (2005) n'ayant pas mis en évidence de tendance dans l'évolution de ces paramètres avec l'âge du peuplement, cette hypothèse parait acceptable. Nous avons montré que le modèle pouvait reproduire de façon satisfaisante les flux de carbone observés, mais avec une grande divergence en période de sécheresse édaphique prononcée, comme ce fut le cas en 2010. A ce stade, nous n'avons pu améliorer l'estimation de *GPP* pendant cette période. Même un test de sensibilité de ce flux à l'ajout d'un effet SMD (Granier et Loustau 1994) sur la conductance du couvert n'a permis d'aboutir à une meilleure estimation de la dynamique pendant cette période particulière. Nous avons introduit un effet âge des aiguilles dans ces jeunes peuplements tel que proposé par Porté et Loustau (1998) pour estimer

la photosynthèse mais omis d'éventuelles variations saisonnières des paramètres photosynthétiques. Op de Beeck et al. (2010) ont également proposé d'introduire un effet âge sur les paramètres J_{max} et V_{cmax} ainsi qu'un effet saisonnier pour des Pins sylvestres. En supprimant cet effet âge mais surtout l'effet saisonnier mis en évidence, ils n'observaient cependant pas de différence significative sur la production annuelle brute de l'écosystème. A l'inverse, Misson et al. (2006) considère les paramètres photosynthétiques comme critiques dans la détermination de la saisonnalité et l'amplitude des flux de carbone et plus particulièrement une grande sensibilité de V_{cmax} lors de conditions sèches. Les travaux de Wilson et al. (2001) montrent également un bon ajustement de leur modèle et des mesures par eddy-covariance seulement lorsqu'ils prennent en compte les variations saisonnières de ces paramètres. Dans le cas contraire, ils obtiennent une surestimation de *NEE* annuel de -300 gC m^{-2}. Certes, il s'agissait de forêts décidues, mais Tanaka et al. (2002) ont également montré cette tendance sur des Pins avec d'ailleurs un effet plus important sur les espèces sempervirentes que décidues. Une simulation a donc été réalisée afin de prendre en compte la variation de J_{max} et V_{cmax}, avec une réduction de 40% (Misson et al. 2006) au cours de la sécheresse édaphique et ce test de sensibilité a logiquement permis de réduire la production primaire brute estimée pendant la période grisée (Figure 5.13), mais pas de façon significative, n'atteignant pas la chute drastique attendue. L'étude réalisée par Luo et al. (2001), ne met pas non plus en évidence de différence significative d'une modification de J_{max} et V_{cmax} dans l'estimation de *GPP* de Pins loblolly avec de surcroit le modèle Maestra.

Hanson et al. (2004) en comparant un grand nombre de modèle de fonctionnement et leur capacité à simuler les échanges nets de carbone d'un peuplement de chênes ont montré que pour des conditions hydriques optimales, Maestra avait une bonne estimation du flux de carbone journalier malgré une légère surestimation. En période de sécheresse édaphique, Maestra surestime très largement le *NEE* journalier tout en maintenant une bonne dynamique temporelle par rapport aux flux mesurés. Cette surestimation de *NEE* s'explique de façon triviale, elle est due au fait que Maestra ne dispose pas de module de sol pouvant affecter les transferts sol-végétation-atmosphère. Nous n'avons pas cherché à confronter directement le *NEE* pour cette raison, mais ce manque d'un compartiment sol participant d'une part aux échanges de carbone pour la partie respiration hétérotrophe, et d'autre part aux échanges d'eau, représente une limite du modèle pour l'estimation de la transpiration en conditions de sécheresse édaphique. L'année 2010 est assez limitante pour la comparaison modèle-données puisque l'impact de la sécheresse précoce à la fois sur *GPP*, mais surtout sur *E* est difficilement représentable avec Maestra. Luo et al. (2001), précédemment cité, ont d'ailleurs insisté sur le fort contrôle de l'humidité du sol, ajouté à celui du VPD pendant les périodes sèches, sur l'estimation des flux de carbone. De manière général, et comme nous avons pu le voir dans le Chapitre 2, Maestra a été l'outil de nombreuses études. Ce modèle a démontré sa capacité à bien simuler *GPP*, objectif initial de sa conception, plutôt que les flux d'eau dans le système (Medlyn et al. 1999). Un couplage de Maestra et du modèle de sol SPA est en cours de traitement, ce qui permettrait d'avoir une meilleure estimation des flux d'eau à court terme (Duursma, *comm pers*.).

Pour la dégradation de Maestra en un analogue 1D au stade jeune peuplement tel que nous l'avons étudié dans cette partie, nous tirons les conclusions suivantes. Maestra se prête bien à la détermination des paramètres 1D ***K*** et ***LUE*** et à l'établissement de fonctions de réponses de ces deux paramètres clés à la structure et à la composition du couvert. Nos tests de sensibilité donnent des résultats plausibles. Nous n'avons pu faute de temps opérer une simulation numérique des fonctions de réponse à l'ensemble des combinaisons possibles et créer une table de valeurs (*look up table*) ou générer des fonctions de réponse numériques susceptibles d'être implémentées dans un modèle ID. Nos résultats justifieraient cependant de réaliser ce travail dans un deuxième temps. En revanche, les flux hydriques prédits par Maestra s'ajustent assez mal aux observations auxquelles nous les avons comparées, point déjà souligné par Medlyn (2004), et ce en dépit de l'effort important de paramétrisation consenti. Ce défaut plaide en faveur d'un retour au modèle lui-même, et interdit dans la suite de ce travail d'appliquer à l'analogue 1D les résultats et simulations peu réalistes de Maestra pour les transferts hydriques (transpiration, conductance aérodynamique et bilan d'énergie).

5.3 Développement et adaptation du modèle de carbone du sol sous forêt

5.3.1 Introduction

L'analyse de données de séries appariées de peuplements naturels et de forêts de plantation comme celles de chronoséquences de conversion de forêts naturelles en forêts plantées montre que la conversion en forêt de plantation provoque une diminution de 15 % en moyenne du stock de matières organiques (MO) des premiers cm de sol (Turner et Kelly 1977, Turner et Lambert 2000), cette diminution ayant lieu pour l'essentiel dès les premières années après conversion et se maintenant au-delà de 25 à 30 ans. La sylviculture pratiquée dans ces forêts est proche de celle opérée en forêt de Pin maritime, incluant notamment la préparation du sol, la destruction des adventices, les éclaircies.
Cette sylviculture qui peut être qualifiée d'intensive affecte le carbone du sol en modifiant les retours de matière organique (MO) au sol et par ses impacts sur la structure et les propriétés physiques du sol et donc son microclimat. Les opérations de destruction mécanique ou chimique de la strate herbacée et des adventices, les dépressages, éclaircies et récolte finale, voire l'application de boues résiduaires sont à l'origine d'autant d'apports de MO au sol. Chacun de ces apports se caractérise par une quantité, décomposabilité et cinétique temporelle de retour au sol spécifique. Inversement, les changements apportés à la végétation naturelle modifient aussi la dynamique de retour au sol de nécromasse sous forme de litière ou par rhizodéposition (Smethurst et Nambiar 1995). L'impact net sur la dynamique du carbone du sol minéral résulte de la combinaison entre ces soustractions et les additions de MO au sol (Johnson et Curtis 2001). Ces auteurs montrent que la fertilisation et le gain de productivité des arbres et de la végétation accompagnatrice qu'elle induit provoquent une augmentation du stock de MO du sol minéral. Ces études ne tiennent cependant pas compte des

horizons organiques de l'humus qui constituent cependant un compartiment majeur de carbone organique de la plupart des sols forestiers, e.g. les sols de la forêt landaise (Jolivet 2000, Guillet et al 2010).

Les opérations de préparation du sol, labour en plein, en ligne, disquage superficiel et le passage d'engins lourds affectent sur une profondeur donnée la structure du sol (densité, porosité), l'albédo de la surface, l'interception de la pluie et donc le microclimat du sol, i.e. sa température et son humidité (Moreaux et al. 2011). Elles sont typiques des itinéraires techniques intensifs pratiqués en plantations forestières dédiées à la production de biomasse ou fibre. Ces pratiques modifient plus ou moins drastiquement les conditions de décomposition d'une fraction de la MO du sol. Dans le cas du Pin maritime, ces impacts sont bien illustrés par Jolivet (2000), qui a réalisé un suivi de 5 années de la teneur en carbone organique des 30 cm superficiels d'un sol forestier après récolte finale, dessouchage et labour et gyrobroyage des adventices (Figure 5.25). Ils mettent en évidence une diminution de concentration en C organique de près de 50% en trois années partiellement expliquée par un enfouissement et l'effet de dilution correspondant, ainsi que par l'accélération de la minéralisation.
L'impact de la conversion de futaies de Pin maritime en cultures annuelles donne aussi une indication indirecte de l'impact du labour sur le stock organique du sol, e.g. les données de Arrouays et Pelissier (1994) en piémont pyrénéen. L'essentiel de ces opérations de préparation du sol et destruction des adventices et rémanents est pratiqué au cours des premières années de la vie d'un peuplement. Ces opérations doivent être prises en compte dans la modélisation du fonctionnement de révolutions forestières, mais relativement peu de références se rapportent à la modélisation des effets de ces pratiques sur le carbone du sol. L'objectif de cette partie est d'introduire un modèle simple décrivant ces effets de façon cohérente avec les données existantes.

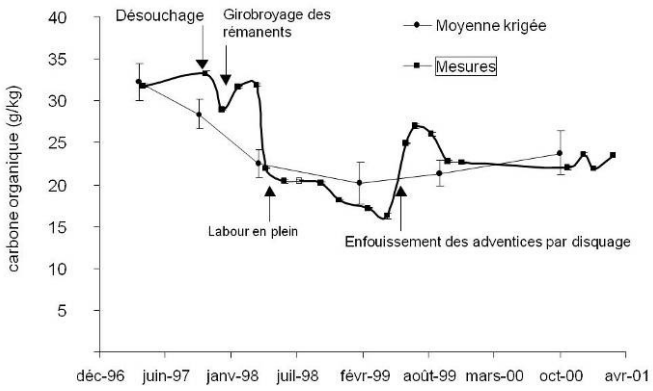


Figure 5. 25 (Jolivet 2000). Evolution de la concentration en carbone organique du sol (0-30 cm) postérieure à une coupe rase en forêt de Pins maritimes. Site de Pierroton, domaine INRA de l'Hermitage.

5.3.2 Adaptation de Roth-C au cas des forêts gérées

i. Roth-C 26.3

Nous avons utilisé un formalisme dérivé directement du modèle Roth-C 26-3 (Coleman & Jenkinson 1996, 2008, Falloon et Smith 2002). Ce modèle est suffisamment détaillé pour rendre compte de la dynamique de carbone du sol de plusieurs compartiments et des effets environnementaux principaux (température et humidité du sol) et assez simple et robuste pour pouvoir être implémenté à grande échelle (Paul et al. 2003a et b, Falloon et al. 2006). Il a déjà fait l'objet d'une application sur des sols forestiers sous *Eucalyptus* et Pin (Paul et Polglase 2004a). Roth-C décrit la dynamique du carbone du sol par une cinétique de décomposition de premier ordre de 4 compartiments de MO du sol, deux correspondants aux fractions décomposables et résistantes des apports (litière, rhizodéposition, nécromasse), DPM et RPM, et deux à la partie humifiée et à la biomasse des décomposeurs respectivement, HUM et BIO (Figure 5.26).

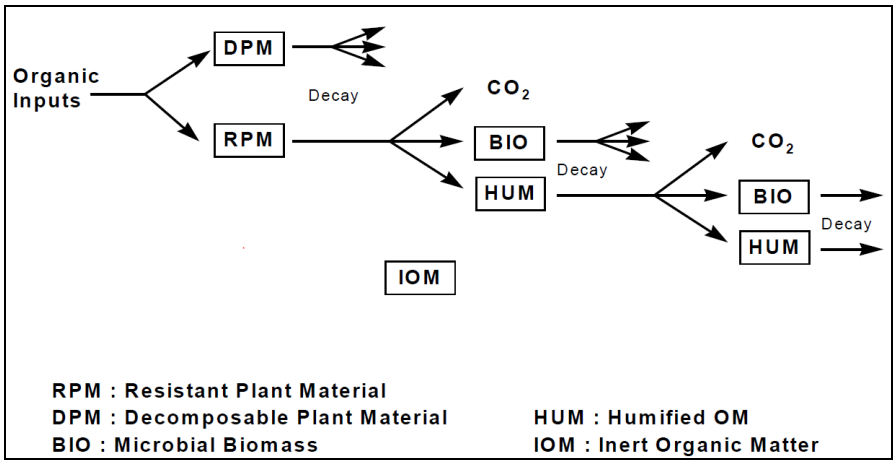


Figure 5. 26 Diagramme du modèle Roth-C (Coleman & Jenkinson 2008).

Un cinquième compartiment de MO du sol est considéré comme inerte, IOM. Ce modèle a été appliqué avec succès sur les forêts de plantation (Romanya et al. 2000, Paul et al. 2003, Gottschalk et al. 2010). Guillet et al. (2010) avaient déjà adapté une première fois un modèle analogue distribué sur trois couches horizontales d'humus (OL-OF, OH) et de sol (horizon A1, 0-10 et 10-20 cm) dans le cas de chronoséquences de pins maritimes et de hêtres et en déterminant les constantes de décomposition et l'âge apparent des fractions de MO du sol par leur activité ^{14}C, suivant une approche comparable à Gaudinski et al. (2000). Il avait en particulier montré que la constante de décomposition de HUM diminue en profondeur. Ici, nous avons implémenté Roth-C avec le modèle GRAECO en le désagrégeant à un pas de temps journalier, sans différenciation de strates horizontales dans le sol et en reprenant les valeurs des taux de décomposition des 4 compartiments actifs, *k*, du dispositif original à long terme de Rothamstead qui restent *a priori* valides sous forêt (Paul et Polglase 2004a) (Tableau

5.11). La température et l'humidité du sol et les retours de MO au sol par les parties aériennes et souterraines de la végétation ainsi que les rémanents post récoltes sont simulés par le modèle GRAECO. Les valeurs des 4 compartiments sont initialisées avec les valeurs mesurées disponibles (Arrouays et Pelissier 1994, Guillet et al. 2010) et la relation de Falloon et Smith (1998, 2000) pour le compartiment IOM.

Tableau 5. 11 Valeurs des paramètres de Roth-C appliquées par défaut dans le modèle GRAECO.

Parameters	Parameter abbreviation	Value	Unit	References
Clay content	Clay_PC	2.8	%	Trichet et al. (1999)
Time scaling parameter	-	0.00273785	y	
Decay rate of labile plant material	k_DPM	10	y^{-1}	
Decay rate of resistant plant material	k_RPM	0.1666	y^{-1}	(for bare soil, 0.1 otherwise)
Decay rate of soil biological carbon	k_BIO	0.66	y^{-1}	
Decay rate of soil humified carbon	k_HUM	0.02	y^{-1}	
Ratio of DPM/RPM of plant material :				
Leaves and fine roots				
Woody tissues (stemwood, bark , branches, stumps)	DPM_RPM ratio	0.5 0.05		

ii. Modélisation de l'effet des interventions sylvicoles sur le carbone du sol

- Travail du sol

Le concept adopté pour rendre compte de la chute rapide de carbone d'origine forestière provoquée par le labour diffère de l'approche proposée par Gottschalk et al. (2010). Ces auteurs séparent le pool de carbone humifié, HUM, en une fraction liée aux limons qui devient rapidement décomposable après labour, et une fraction liée aux argiles plus stable et insensible au labour (Balesdent et al. 1998). La fraction de MO du sol humifié (HUM) liée aux éléments minéraux de la fraction 2-50 µm (limons) verrait sa constante de décomposition *k*(HUM-*Silt*) modifiée par le travail du sol et prendrait alors la même valeur que *k*(RPM) soit un accroissement par un facteur 5 à 8 suivant la couverture du sol. Les autres paramètres du modèle resteraient inchangés par le labour. Ces auteurs préfèrent cette approche à la simple modification des paramètres du modèle mais elle les conduit à augmenter les apports de MO au sol de façon irréaliste. Cependant, ils ne tiennent apparemment pas

compte - en tout cas, ne mentionnent pas - des restitutions de rémanents forestiers qui constituent un apport élevé quantitativement après coupe rase, à faible décomposabilité (rapport DPM / RPM faible) et dont le retour effectif au sol peut être différé de une à plusieurs années suivant l'itinéraire technique considéré.

Nous avons préféré une approche modifiant les paramètres du modèle sans distinction de compartiments ou sous-compartiments et pour une durée limitée après chaque intervention. Nous la justifions par le fait que les opérations de travail d'un sol forestier modifient l'accès des décomposeurs à la matière organique du sol quelle que soit la fraction minérale à laquelle celle-ci peut être liée. Elle est plus aisée à implémenter dans le code actuel du modèle que celle consistant à différencier explicitement deux fractions de carbone humifié du sol. La principale originalité apportée se base sur le concept de **fraction de carbone du sol affectée** par chaque intervention qui est quantifiée par un paramètre que nous appelons f_p.

a- f_p est déterminée par les étapes de calcul suivantes :

i. Ajustement du profil vertical de stock de carbone du sol, X (gC m^{-2}), fonction de la profondeur, z (m). La forme par défaut est une décroissance exponentielle reprise du modèle proposé par Arrouays et Pelissier (1994), (Equation 5.7), dont la courbure, paramètre b, est choisie par l'utilisateur - qui peut déclarer soit la teneur de l'horizon superficiel, C_2 (gC.kg dm^{-3}), soit le stock de carbone total du sol, X.

$$\frac{C_z - C_1}{C_2 - C_1} = \frac{e^{-b\,z} - e^{-b\,z_1}}{e^{-b\,z_2} - e^{-b\,z_1}}$$

Equation 5.7

C_1 et C_2 étant la teneur en carbone de la base et du haut du profil et z le niveau de profondeur (m).

ii. Déclaration de la profondeur et de la fraction de la superficie de la parcelle affectées par l'intervention, respectivement D_p (m) et S_p (m^2 m^{-2}), et calcul du stock de carbone X_p cumulé à la profondeur D_p (Annexe 4.A).

iii. (i) + (ii) permettent de calculer f_p, par :

$$f_p = X_p / X \times S_p$$

Equation 5.8

b- Les valeurs des constantes de décomposition k (converties en j^{-1}) des quatre fractions de carbone organique, DPM, RPM, BIO et HUM sont multipliées par f_p et par un facteur d'amplification q dont la valeur a été ajustée aux données disponibles de Jolivet (2000), Arrouays et Pelissier (1994) et Balesdent et al. (1998), (Figures 5.25 et 5.26). Nous annoterons du symbole * la valeur modifiée après intervention. Considérant que, sans autre intervention, les constantes de décomposition du carbone du sol sont restaurées après une année, k^* décroît de façon exponentielle avec la durée écoulée depuis l'intervention, t_p (j), et s'amortit après une année pour reprendre sa valeur initiale k (Equation 5.9).

$$k^* = k \times f_p \times q \times e^{(-\omega\, t_p)}$$

Equation 5.9

où k^* est la valeur prise par k après intervention, t_p est le nombre de jours écoulés depuis l'intervention et ω définit la durée d'amortissement : une année correspond à une valeur ω = 0.0075.

c- Le même principe est appliqué à la fraction du flux de décomposition transformée en CO2, *to_CO2_rate* : l'intervention augmente ce paramètre au prorata de f_p de façon à ce que to_CO2_rate* prenne la valeur 1 quand f_p vaut 1 et la valeur pré-labour si f_p vaut 0. Cette variation de *to_CO2_rate* est amortie elle aussi en cinq années. *to_CO2_rate* n'est pas un paramètre explicite du modèle Roth-C, où elle est fixée en fonction du paramètre x qui dépend du taux d'argile du sol par :

$$to_CO_2_rate = x / (1 + x) \qquad \text{Equation 5.10}$$

Elle a été rendue explicite et le facteur *x* du modèle est recalculé par :

$$x = to_CO_2_rate / (1 - to_CO_2_rate) \qquad \text{Equation 5.11}$$

d- Interventions successives. Lorsque deux interventions se succèdent en moins de 3 ans, nous considérons que leurs effets sont additifs si ils affectent des fractions distinctes du pool de carbone du sol (ex. : un labour en ligne sur les rangs d'arbre suivi d'un disquage des inter-rangs). Nous conservons l'effet le plus élevé des deux interventions dans le cas contraire (ex. labour en plein succédant à un disquage).

- Apports de MO au sol

Nous avons établi, d'après les dires d'experts et les données de la littérature, une modélisation des retours au sol de MO provoqués par les principales interventions sylvicoles : résidus de récolte d'éclaircies ou coupe finale, souches, adventices ou sous-bois (destruction chimique ou mécanique), résumée dans le Tableau 5.12.

Tableau 5. 12 Caractéristiques des retours de MO au sol liés à différentes opérations culturales.

Intervention	Strate concernée	Biomasse apportée au sol	Durée de retour au sol	Estimation
Dépressages, éclaircies et coupe rase	1. Arbres	▪ Sans traitement Feuilles, petites racines, Branches, grosses racines, Souche, troncs ▪ Avec traitement (gyrobroyeur, « croque souche »)	3 mois 24 mois 48 mois Immédiat	Fonction de la fraction du peuplement récolté.
	2. Sous-bois	Feuilles Partie pérenne Racines	Immédiat	Fonction de la méthode de coupe et récolte (mécanisée ou non, précédée d'une destruction mécanique ou non)
Destruction du sous-bois • Disquage, labour • Gyrobroyage	Sous-bois	Feuilles Partie pérenne racines, feuilles	Immédiat	Au prorata de la surface traitée

5.3.3 Evaluation avec les données disponibles

Nous avons calé ce sous-modèle avec les données tirées d'un article et d'une thèse publiés respectivement par Arrouays et Pélissier (1994) et Jolivet (2000).

i. Cas 1.

Arrouays et Pélissier (1994) ont mesuré les stocks de carbone, leur composition granulométrique et leur $\delta^{13}C$ d'une chronoséquence d'une succession forêt de pins maritimes – monoculture de maïs du piémont pyrénéen. Les données présentées permettent ainsi de caractériser la cinétique de décomposition du carbone forestier suite à la mise en culture et l'évolution du stock de carbone organique du sol après mise en culture. Nous avons implémenté le modèle sur la base de ces données en utilisant la paramétrisation présentée en tableau 5.11 et en supposant un traitement post récolte impliquant le gyrobroyage des rémanents (estimés à 5000 gC m^{-2}), dessouchage et labour. Sous maïs, nous avons repris les données d'apports annuels en matière organique de Gottschalk et al. (2010), soient 500 gC m^{-2} an^{-1}. Les paramètres fixant les effets du travail du sol ont été réduits, considérant que le labour est répété à une fréquence annuelle et que son effet est amorti plus rapidement. Le facteur d'amplification q lié au labour passe de 15 sous forêt à 10 sous maïs et la durée d'amortissement de l'effet labour sur la dynamique du carbone du sol de 1 année sous forêt (ω = 0.0075) à 6 mois sous maïs (ω = 0.025). La distribution verticale du carbone dans le sol est aussi rapprochée de la distribution uniforme sous maïs, supposant que le labour tend à homogénéiser ce profil.

La Figure 5.27 montre que le modèle ainsi paramétré simule sans biais important la dynamique à long terme du carbone du sol sur une chronoséquence de 30 ans après conversion. Le flux de minéralisation potentiel ou respiration hétérotrophe, R_h, est assez proche de valeurs connues sous maïs mais atteint des valeurs irréalistes juste après déforestation, car nous imposons une accélération trop forte, d'un facteur q = 15, de la vitesse de décomposition des rémanents par le labour post coupe rase. Ceci pourrait être facilement corrigé en affectant une vitesse de décomposition variable suivant la nature de la biomasse apportée mais ce degré de sophistication ne se justifie pas à ce stade.

ii. Cas2.

Le deuxième cas étudié est une chronoséquence temporelle de teneur en carbone du sol (0-30 cm) post-récolte, réalisée par Jolivet (2000), dans le cadre de son travail de thèse et dont les données ont été aimablement mises à notre disposition pour cette calibration. Plusieurs hypothèses ont du être posées afin de recalculer le stock et d'implémenter notre modèle sur ces données. Nous avons estimé le stock de carbone 0-30 cm en supposant une densité apparente constante et égale à 1.135 et estimé les apports de matière organique au sol, ainsi que la fraction de sol et de surface affectée des

différentes interventions (Tableau 5.13). Enfin, faute d'information, nous considérons en première approximation que le profil de carbone du sol est insensible aux interventions.

Tableau 5. 13 Caractéristiques des interventions culturales du sol de la parcelle de Pierroton suivie par Jolivet (2000) telles qu'elles ont été estimées pour la simulation présentée en Figure 5.29.

Intervention	Date	Organic matter Input (guessed)			Depth of soil affected (D_p)	Fraction of area affected (S_p)
		$tC.ha^{-1}$	$gC . m^{-2}$	part	m	$ha . ha^{-1}$
Harvest	05/06/1997	0	0		0.10	0.05
Heavy disks	10/10/1997	12	1200	branch, needles, roots ground vegetation	0.10	1.00
Stump removal	15/12/1997	0	0		0.30	0.20
Cover crop	13/02/1998	8	800	Additional slash, ground vegetation	0.15	1.00
Tillage	07/04/1998	0	0		0.30	1.00
Cover crop & tillage	05 - 07/1999	15	1700	Organic layers Ground vegetation	0.20	1.00
Heavy disks	15/02/2002	4	400	Ground vegetation	0.10	0.75
Cover crop	18/02/2002	0	0		0.15	0.75
gyrobroyage	21/01/2003	2	200	Ground vegetation	0.05	0.75
gyrobroyage	18/02/2003	0	0		0.05	0.75
gyrobroyage	13/07/2003	2	200	Ground vegetation	0.05	0.75

La Figure 5.28 montre la modélisation du profil vertical de carbone organique opérée pour cet exemple et la compare aux profils mesurés par Guillet et al. (2010) et Schrumpf et al. (2011) sur deux peuplements proches, âgés de 32 ans (site du Bray) et de 92 ans (site de Baudes). La distribution ajustée au site de Pierroton donne des valeurs plus élevées, afin de correspondre au stock de carbone 0-30 cm estimé par Jolivet (2000), mais elle respecte la forme générale des profils telle qu'elle est observée dans ces sols forestiers de type podzol à humus de type mor et, par conséquent, diminue très rapidement.

Ce cas d'étude est particulièrement pertinent pour l'utilisation future du modèle dans l'appui à la décision en gestion sylvicole puisqu'il représente ici les effets des interventions les plus courantes opérées lors de la préparation du sol et de l'installation du peuplement. Le modèle capture là aussi la cinétique à long terme du stock de carbone du sol de façon précise mais peut présenter des biais importants à court terme lors de la succession d'interventions typiques de la préparation du sol en forêt landaise (Figure 5.29).

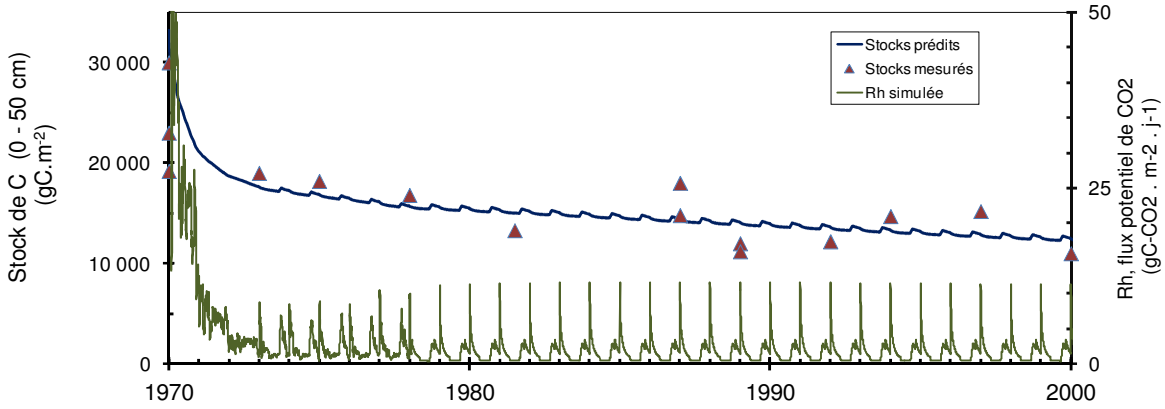
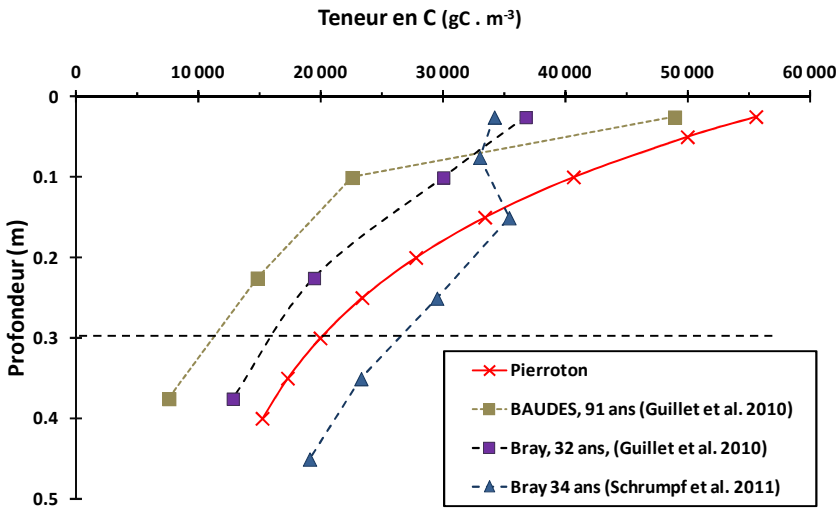


Figure 5. 27 Valeurs mesurées de stock de carbone du sol minéral sur 0-50 cm de profondeur pour une chronoséquence des sols cultivés (en maïs) après déforestation d'une futaie de Pins maritimes à Molinie (données d'Arrouays et Pélissier 1994, Arrouays et al. 1996, Gottschalk et al. 2010). Le flux potentiel de CO_2 de la minéralisation des pools organiques du sol est aussi représenté.



.

Figure 5. 28 Profil de carbone organique du sol (0-30 cm) reconstitué pour le site de Pierroton à partir des données de Jolivet (2000). Les données mesurées sur les sites du Bray et de Baudes par Guillet et al. (2010) et Schrumpf et al. (2011) sont indiquées. La profondeur du sol échantillonné par Jolivet (2000) est indiquée en pointillé.

Les valeurs ajustées de q et ω permettent, d'une part, de restituer sans biais majeur l'évolution à long terme du compartiment humifié et du stock total du sol et, d'autre part, le flux de respiration hétérotrophe, $R_{h,}$ qui présente des valeurs plausibles. Seuls les épisodes suivant les interventions présentent des valeurs de R_h en apparence élevées, mais à notre sens l'imprécision des données disponibles et les informations manquantes (changement de densité et de profil de C dus au labour) ne permettent pas d'affiner davantage le modèle proposé. Ne disposant pas de données suffisamment

détaillées sur l'impact des interventions sur la densité et le profil de carbone du sol, nous considérons toutefois que l'essentiel de la cinétique du carbone du sol telle qu'elle est modifiée par les interventions est restituée par le modèle. Cependant, les changements simulés à très court terme tant dans les stocks que dans le flux de CO_2 hétérotrophe semblent biaisés plus ou moins fortement et devraient être réévalués avec des données plus complètes. Nous manquons ici de deux types de données cruciaux pour ce calage : l'évolution du profil de densité apparente du sol d'une part et le flux de matière organique apportée au sol et son origine (biomasse aérienne, souterraine, couches organiques OL OF OH), d'autre part.

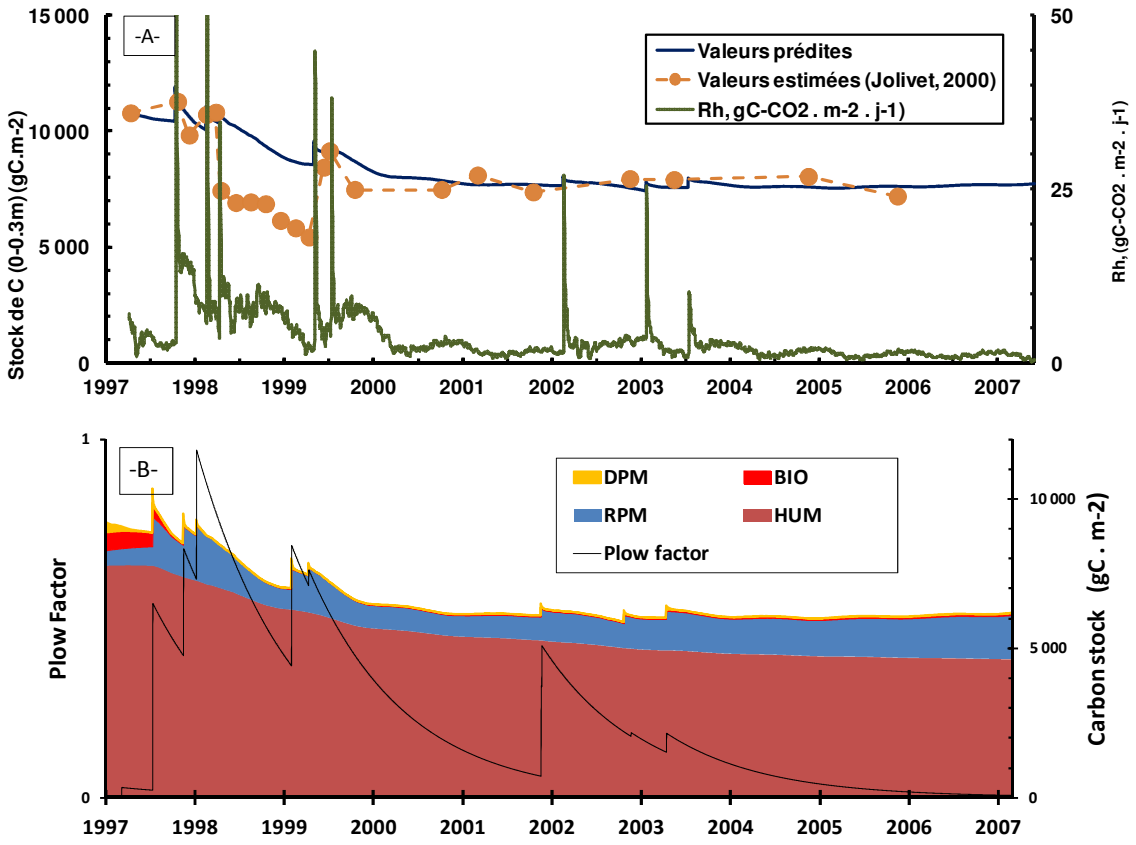


Figure 5. 29

A. Evolution du stock de carbone organique du sol (0-30 cm) et de la respiration hétérotrophe au cours des opérations de préparation du sol postérieures à la coupe finale. Les valeurs « mesurées » ont été estimées avec les données de Jolivet (2000). Les données simulées sont calculées par le modèle présent avec les hypothèses d'intervention résumées dans le tableau 5.13 et $q = 15$, $\omega = 0.0025$.

B. Evolution des différents pools de carbone du sol (0-30 cm) (aires colorées) et du facteur « labour » (courbe en noir).

5.3.4 Conclusion

L'approche développée pour compléter le modèle de fonctionnement Graeco pour la prise en compte des effets du travail du sol en forêt est avant tout pragmatique et s'appuie sur les données disponibles en forêts de Pin maritime. Elle donne des résultats assez encourageants et nous semble t il suffisamment robustes pour diagnostiquer les effets des pratiques sur ce type de sol. Ce complément à Graeco est indispensable pour son application à la simulation du cycle du carbone et de la croissance pour des révolutions complètes.

Ce développement encore limité intervient à propos, compte tenu de l'intensification sylvicole en cours en France et en Europe. Plusieurs données et information importantes manquent pour aller plus loin dans cette approche et en vérifier la robustesse. A ce stade, on ne doit donc pas attendre de cette représentation simplifiée une restitution précise des effets des pratiques de préparation du sol, et notamment de leur impact sur le flux de respiration hétérotrophe instantané. Ce module est plutôt une base de travail qui a pour vocation d'être enrichie avec de nouvelles données et informations dans le futur (projets en cours FAST et GHG-Europe). Il capture les tendances d'évolution à long terme observées à la suite d'interventions forestières courantes. Les apports de MO au sol et leur décomposabilité (rapport DPM / RPM) ainsi qu'une description plus précise des effets des interventions sur le profil de MO dans le sol et la structure et la densité du sol apparaissent nécessaires pour aller plus loin.

Le partitionnement de l'énergie disponible entre flux de chaleur latente et flux de chaleur sensible détermine la température de surface, qui elle-même, couplée à l'humidité du sol contrôle les cinétiques de minéralisation de la MO et donc le temps de résidence du carbone dans les sols (Verburg et al 1999). Ainsi, de par cette interaction étroite entre cycle de l'eau et cycle du carbone, le sous-bois nécessite une bonne représentativité de ces échanges avec la strate arborée et avec l'atmosphère. Connaître sa dynamique de croissance semble indispensable pour estimer raisonnablement les flux de transferts d'eau et de carbone au cours du cycle végétatif, tout en considérant l'apport de matière organique par mortalité naturelle ou forcée.

Pour son implémentation dans GRAECO, nous avons intégré ce module avec les modifications suivantes :

- Les apports de matière organique au sol sont générés par les modules de végétation et d'arbres de Graeco avec un rapport DPM / RPM propre ; ils correspondent à la mortalité « naturelle » des organes caduques des arbres, aux apports de biomasse de la végétation accompagnatrice consécutifs aux opérations de débroussaillement et de travail du sol, ainsi qu'aux rémanents de récolte des arbres (branches, feuilles, racines,…).
- La température et l'humidité du sol sont générées par le bilan d'énergie et le bilan hydrique du sol, calculés par Graeco.

5.4 Développement du module 'croissance du sous-bois'

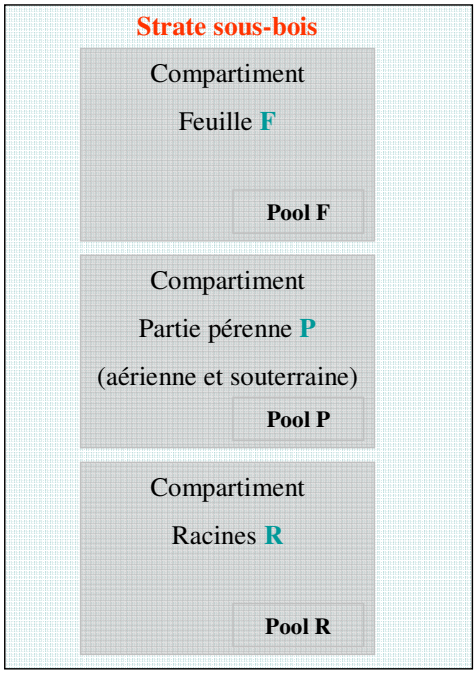
5.4.1 Introduction

Dans la version antérieure du modèle Graeco, la végétation en sous-bois constitue un compartiment unique représenté par sa partie foliaire uniquement, sans aucune distinction entre les parties aériennes et souterraines, les parties pérennes et non persistantes et les parties vertes et non vertes. Le modèle a été calé à partir d'un sous-bois de Molinie, espèce à feuillage annuel qui répond raisonnablement à ce critère compartiment unique grosse feuille. L'évolution annuelle de la Molinie est donc représentée par l'évolution de son LAI. Celui-ci est initialisé à 0 en début de chaque année puis évolue saisonnièrement entre différentes dates : notamment la date de débourrement, elle-même fonction d'un cumul de température, ou encore la date de sénescence, toutes les deux définies en paramètres d'entrée de simulation. Il s'agissait ici de dépasser cette version du fonctionnement du sous-étage pour la remplacer par un modèle capable de décrire de façon cohérente les échanges de masse et d'énergie de la végétation accompagnatrice ainsi que son développement, sa croissance et son bilan de carbone. Nous proposons de traiter le sous-bois comme une couche de végétation correspondant à un « agrégat » de différentes espèces et séparé en trois compartiments : le feuillage, les racines fines et une partie pérenne correspondant aux rhizomes, bulbes, graines, racines persistantes et éléments ligneux.

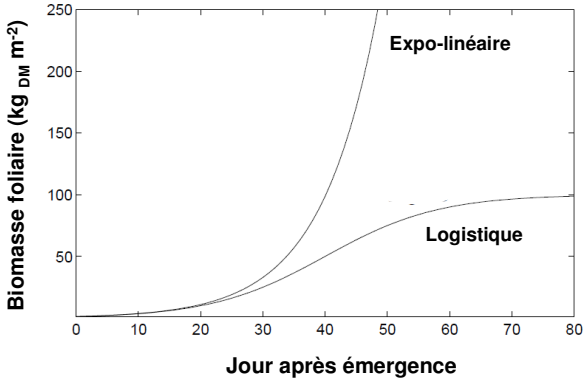
5.4.2 Modélisation de la croissance du sous bois : concept

Le sous-bois est décomposé en 3 compartiments : les feuilles (L), les racines (R), et une partie pérenne (P) constituée par exemple des branches et du tronc (pour les espèces ligneuses), de rhizomes et de tubercules (pour les espèces ligneuses ou herbacées). La partie pérenne se décompose elle-même en une partie aérienne (e.g. branches) et souterraines (e.g. rhizomes) (Figure 5.30 A).
La croissance de chacun de ces compartiments L, R et F est représentée par leur accroissement journalier en biomasse. De manière générale, la biomasse produite, croît de façon exponentielle au départ et de nombreux auteurs modélisent ce premier stade phénologique par une approche exponentielle ou expo-linéaire (Figure 5.30 B) (Thorney et Johnson 1990, Goudriaan et Monteith 1990, Ishag et Dennett 1998, Huyn Lee et al. 2003). Toutefois, les systèmes naturels ne peuvent pas soutenir une croissance linéaire indéfiniment et la capacité du milieu impose une limite maximale à la taille finale du système. Ainsi, il est souvent proposé une approche 'sigmoïde' ou 'logistique' pour décrire un processus biologique parvenant à saturation au cours du temps (Thorney et Johnson 1990) (Figure 5.30 C). De surcroît, des mécanismes de rétroactions négatives (croissance de la strate supérieure, mortalité) ou des contraintes environnementales (sécheresse, gel) peuvent ralentir ou bien même inhiber la croissance.

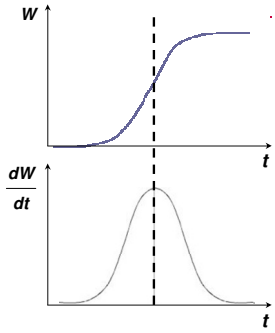
A.



B.



C.



D.

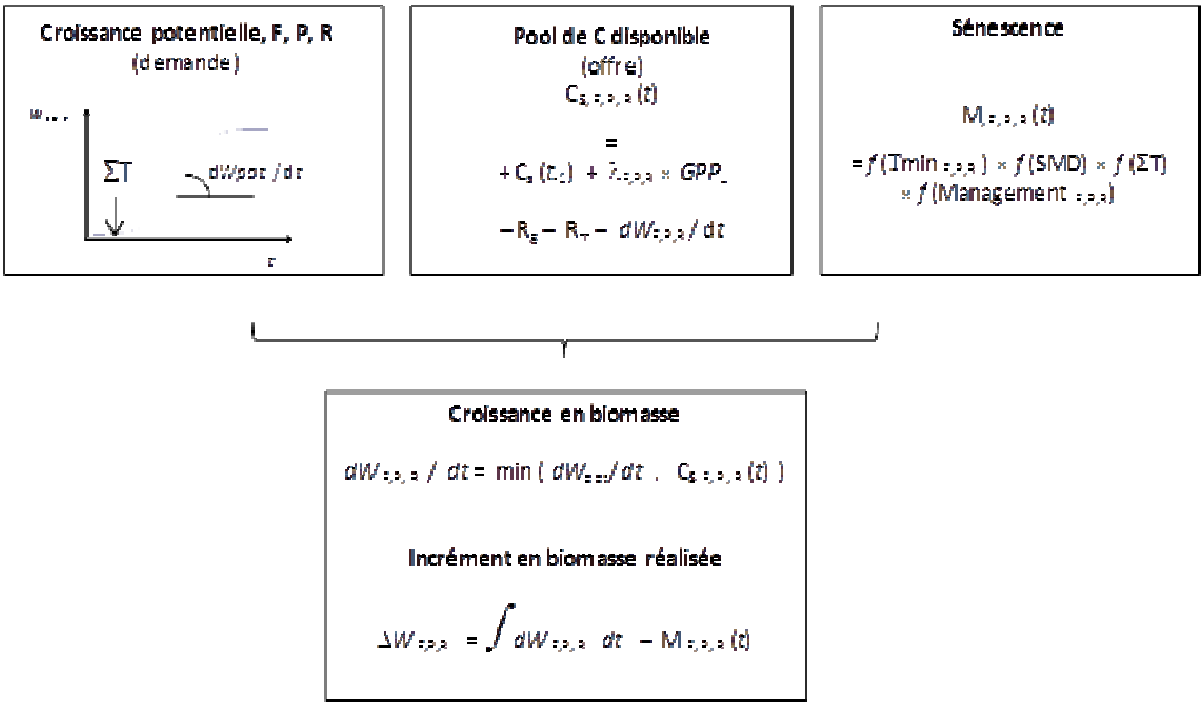


Figure 5. 30 A. Compartiment et pool de carbone du sous-étage. B. Courbes de croissance communément employées en écologie. C. Courbe logistique et sa dérivée. D. Schéma de croissance adopté : croissance potentielle, pool de carbone disponible pour la croissance de chaque compartiment, sénescence et croissance effectivement réalisée. Les symboles et variables sont expliqués dans les Equations 5.12 à 5.16.

Nous avons donc modélisé la croissance potentielle de la végétation accompagnatrice avec une fonction logistique, la croissance réelle en étant déduite après soustraction par différentes fonctions de réduction tenant compte de la phénologie, du carbone disponible, du stress hydrique, du gel et des opérations sylvicoles. Les étapes de calcul s'établissent ainsi (Figure 5.30 D), les valeurs des paramètres utilisés pour l'exemple illustré plus loin étant données en Annexe 4.B :

a. **La croissance potentielle** des compartiments feuille et racine est décrite par la dérivée de la courbe sigmoïdale (cas particulier de la fonction logistique de Verhulst), dW_{pot} / dt, dont les paramètres qui la caractérisent dans notre cas sont la date de démarrage et la durée de croissance. Celles-ci sont fixées par un modèle de phénologie calé sur les principales espèces de sous-bois connues, Molinie, Fougère aigle, Avoine de thore (Delzon 2000, Lopez 2005, Stahl 2006). La fonction sigmoïde étant bornée entre 0 et 1, la courbe de croissance potentielle est multipliée par une valeur de biomasse maximale atteignable, définie en entrée pour chaque compartiment. Cette valeur correspond à la valeur qu'atteindrait la végétation spontanée hors de toute limitation trophique. La croissance du compartiment pérenne est calculée comme la différence entre le carbone total disponible et la somme du carbone utilisé pour la croissance des compartiments feuille et racine.

b. **Le pool de carbone disponible,** $C_{s\ FPR}$, correspond à un compartiment de réserve conceptuel. Il permet de répondre à la demande de croissance ou limite la croissance possible quand le carbone devient limitant. Chaque compartiment a un pool de carbone disponible qui lui est associé. Chaque pool est alimenté par l'assimilation allouée au compartiment et vidé par la respiration et la croissance suivant l'équation :

$$C_{s,F,P,R}(t) = C_{s,F,P,R}(t-1) + (\ _{F,P,R} \times GPP_U - R_g - R_m - \frac{dW_{F,P,R}}{dt} \qquad \text{Equation 5.16}$$

c. **L'allocation de carbone à chaque pool,** $\lambda_{F,R} \times GPP_U$, est calculée comme la fraction de production primaire du sous étage, GPP_U , allouée au compartiment. GPP_U est calculée par Graeco suivant une approche LUE :

$$GPP_U = \boldsymbol{LUE}_U \times aPAR_U \qquad (\text{gC m}^{-2}\ \text{h}^{-1}) \qquad \text{Equation 5.17}$$

Le $\boldsymbol{LUE}_U$ du sous-étage est calculé par Graeco à partir de sorties de Maestra (Delzon, 2000). Le facteur d'allocation, $\lambda_{F,R}$, des compartiments feuille et racine varie entre ses valeurs minimum et maximum dans l'année, en fonction de la croissance potentielle. Il reste à sa valeur maximale après la fin de la croissance annuelle, le carbone alloué étant alors dirigé vers le pool de carbone, $C_{s\ F,R}$. De plus, l'allocation tient compte de l'effet d'ombrage par les arbres qui favorise à priori le compartiment foliaire : le facteur d'allocation maximal aux feuilles, λ_F, varie linéairement entre sa valeur minimum lorsque le LAI des arbres est nul, et sa valeur maximum lorsque le LAI des arbres dépasse une valeur de 5 m^2 m^{-2}. Le coefficient d'allocation aux racines, λ_R, est le

complémentaire à 1 de celui des feuilles et de la partie pérenne dont l'allocation est fixée à une constante, $\lambda_P = 0.05$.

d. **Le flux respiratoire** comprend deux composantes (Amthor 1989) : le flux de maintenance R_m et le flux de croissance R_g (gC m^{-2} h^{-1}). La respiration de maintenance (ou d'entretien) est proportionnelle à la biomasse W_i (Ryan 1990) du compartiment et varie en fonction de la température (de l'air pour F et P, aérien et du sol pour R et P souterrain) (Bosc 1999). La respiration de croissance est directement proportionnelle à la croissance et au coût respiratoire pour la croissance k_c (Penning de Vries 1975a).

$$Rm_{i,t} = W_{i,t} \times f\left(T_{i,t}\right) \qquad \text{(gC m}^{-2}\text{ h}^{-1}\text{)} \qquad \text{Equation 5.18}$$

$$Rg_{i,t} = k_c \times \frac{dWi}{dt} \qquad \text{(gC m}^{-2}\text{ h}^{-1}\text{)} \qquad \text{Equation 5.19}$$

e. **La sénescence de la biomasse,** $M_{F,P,R}$, est déterminée par trois facteurs abiotiques : le stress thermique, le stress hydrique et la mortalité en fin de vie et par les opérations sylvicoles. Pendant la période de croissance, lorsqu'une contrainte environnementale sévère intervient, nous affectons un taux de mortalité à chaque compartiment. Les deux contraintes environnementales retenues sont la température minimum de l'air et le déficit hydrique du sol :

- Pour un seuil de SMD défini pour chaque compartiment en entrée du modèle, les feuilles, racines et la partie pérenne meurent en 40 jours.
- Pour un minimum journalier de température de l'air inférieur à un seuil (défini pour chaque compartiment en entrée du modèle), les feuilles et les racines meurent en 10 jours. Le processus est plus lent pour la partie pérenne qui meure en 40 jours.

Chaque compartiment meurt à la date de fin de croissance suivant une cinétique de mortalité propre:

- Les feuilles meurent instantanément dès la fin de la saison de croissance.
- Les racines meurent en 1 mois.
- Le compartiment pérenne meurt en 5 ans, ce taux étant appliqué uniquement aux journées en dehors de la saison de croissance.

Les opérations sylvicoles de travail du sol (labour), désouchage, le passage d'engins et les interventions de destruction des adventices (disquage, gyrobroyeur) provoquent la mortalité des trois compartiments au prorata de la superficie de la parcelle concernée pour les parties aériennes, et de la fraction de biomasse racinaire affectée pour les parties souterraines. On a considéré que la fraction de carbone du sol affectée pouvait être un bon proxy pour celles-ci.

f. **La croissance,** $\frac{dW_{F,P,R}}{dt}$**, et l'incrément net en biomasse,** $\Delta W_{F,P,R}$, de chacun des trois compartiments sont finalement donnés par:

$$\frac{dW_{F,P,R}}{dt} = \min\left(\frac{dWpot_{F,P,R}}{dt}, C_{s_{F,P,R}}\right)$$

$$\Delta W_{F,P,R} = \int dW_{F,P,R}\, dt, -M_{F,P,R}(t)$$

Equation 5.20

Si le carbone produit et contenu dans le pool est supérieur à sa croissance potentielle, alors la croissance suit la courbe potentielle. A l'inverse, la croissance en biomasse est limitée par le carbone disponible. Enfin, en cas de sécheresse édaphique, défini par un seuil du SMD atteint, la croissance est nulle. Ce seuil de SMD pour la croissance est inférieur au seuil défini pour la mortalité.

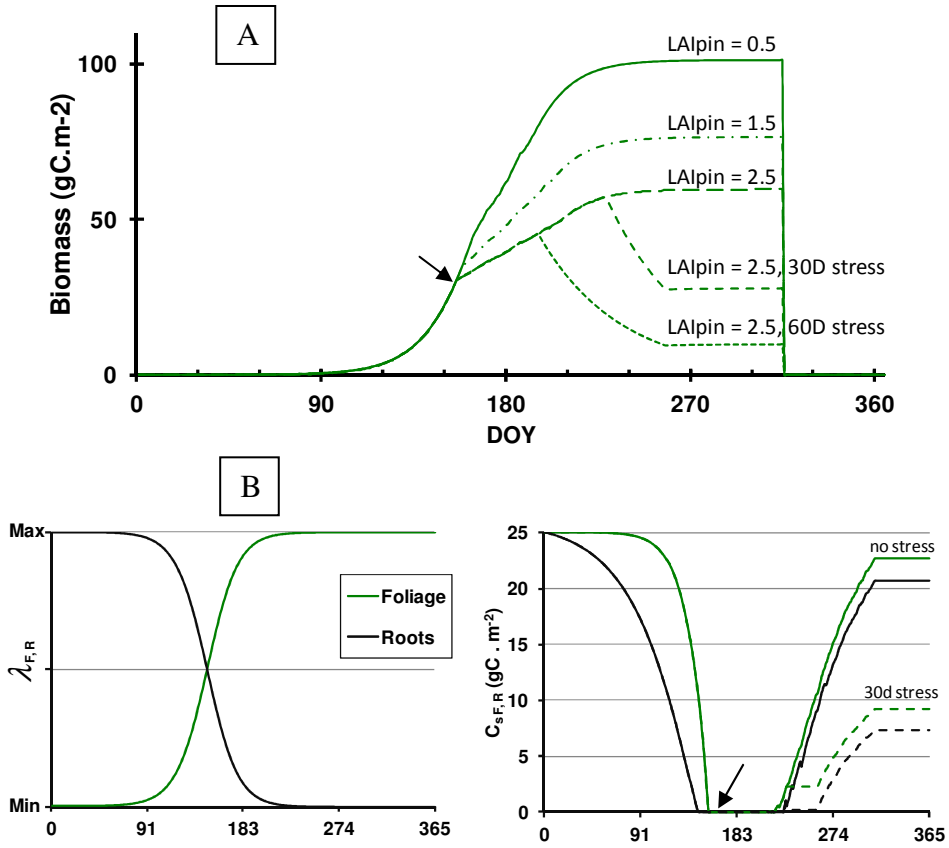


Figure 5. 31 Illustrations du comportement du modèle.

A. Evolution annuelle de la biomasse foliaire simulée pour différentes valeurs de LAI pin et de durée de stress (en jours). La croissance en début de saison est alimentée par le pool de carbone disponible. A LAI Pin = 2.5, la flèche indique l'instant où la croissance potentielle n'est plus satisfaite. Pour le cas où LAI pin =2.5, un début de sécheresse édaphique a été fixé au 15 juillet et au 15 août et sa durée à 30 et 60 jours respectivement. Les autres simulations sont sans stress.

B. Evolution annuelle des coefficients d'allocation aux compartiments feuillage et racines, $\lambda_{F,R,}$ (gauche) et du pool de carbone disponible, $C_{s\ F,\ R}$ (droite). Simulation pour LAIpin = 2.5, sans stress et avec 30 jours de stress.

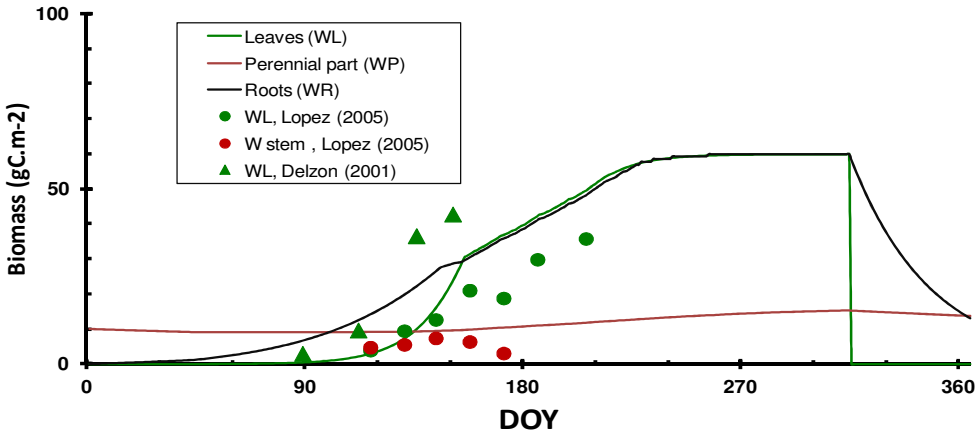


Figure 5. 32 Illustrations du comportement du modèle. Evolution annuelle des biomasses des trois compartiments de végétation du sous-étage, feuillage racines et partie pérenne et données disponibles provenant de différentes campagnes de mesure en sous-étage d'un peuplement adulte (Delzon 2000, Bray) et en coupe rase (Lopez 2005, Bilos).

5.4.3 Tests de validité du modèle implémenté dans GRAECO

La Figure 5.31 rend compte du comportement du modèle. Elle montre l'évolution de la biomasse foliaire pour 3 niveaux d'indice foliaire des arbres et pour trois niveaux de sécheresse simulés (A), ainsi que l'évolution de la biomasse prédite pour chacun des trois compartiments sous conditions de coupe rase et sans journée de sécheresse (B). Le modèle mis au point génère une famille de courbes de croissance qui embrasse une large gamme de situations possibles.

Dans le cas illustré par la Figure 5.31 A, la croissance potentielle peut être satisfaite par le pool de carbone disponible jusqu'au jour 154 sous couvert de pins à LAI = 2.5 (flèche) et au jour 164 pour un LAI pin de 0.5. Pour la situation intermédiaire (LAI pin = 1.5), cette journée est indiquée sur la figure par une flèche. Au-delà de cette date, elle est limitée par le flux alloué depuis la photosynthèse. Le modèle simule l'effet de la sécheresse sur la croissance et déclenche une mortalité progressive des compartiments, le feuillage étant le plus sensible. La figure 5.31 B représente l'évolution annuelle des coefficients d'allocation λ_F et λ_R et des pools de carbone disponible $C_{s\,F}$ et $C_{s\,R}$. Le modèle est particulièrement sensible à la taille du pool disponible en début de saison. Celui-ci est fixé par son remplissage en fin de saison précédente et il est affecté par la sécheresse de l'année.

À fin de comparaison avec des données observées, nous ne présentons ici qu'une reconstitution de la croissance de l'indice foliaire du sous-étage opérée avec ce modèle et comparée avec les données disponibles sur les jeunes plantations de pin maritime en forêt des Landes (Figure 5.32). L'évolution observée sous peuplement adulte du site du Bray par Delzon (2000) donne des valeurs supérieures à celles observées par Lopez (2005) en coupe rase au cours de la campagne *Carboeurope Regional Experiment* en 2005, au site de Bilos. Cette différence, contre-intuitive à priori,

est due à la différence de composition de la végétation des deux sites, le sous-bois du Bray étant exclusivement composé de graminées sociales rejetant de souches et celle de Bilos incluant une forte contribution d'ajonc de germinations dont le pool de réserve est faible (e.g. Phytolacca, ajonc). Les autres tests de calibration-validation sont présentés dans la partie suivante (Chapitre 6), avec une validation de Graeco dans sa version complète.

Ce modèle très simple présente évidemment un certain nombre de limites. Il est connu que l'allocation du carbone produit pourrait se faire préférentiellement vers les racines en cas de déficience en nutriments et en eau du sol (e.g. Cheaib 2006), mais nous avons établi notre critère d'allocation entre racines et feuilles en ne tenant compte que de l'effet d'ombrage. Sa paramétrisation relativement simple peut s'adapter à différentes situations et a pour objectif de représenter l'évolution de cette strate et son fonctionnement au cours du développement du peuplement d'arbres. Elle s'avèrera certainement assez complexe si l'on désire rendre compte de la variété de situations des forêts tempérées. Les strates herbacées forestières présentent en effet une composition spécifique et des formes de vie diverses et variables dans le temps selon le régime de perturbations et le biotope considéré. Néanmoins, nous considérons que sa simplicité peut justement permettre de l'adapter à ces situations. Cela constitue en tout cas une perspective que nous proposons. L'intégration d'une représentation du cycle de l'azote serait également un développement souhaitable et nécessaire afin de rendre compte des interactions sur la nutrition azotée des arbres, comme pour e.g. l'approche conceptuelle développée par McMurtrie et Wolf (1983).

5.5 Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de tirer parti des observations et expérimentations réalisées au cours de la première partie de la thèse, voir précédemment, pour adapter ou créer différents sous modèles de processus destinés à compléter un modèle de fonctionnement simple couvrant l'ensemble d'une rotation forestière, de la préparation du sol à la récolte finale. Le choix d'une approche combinant le modèle 3D Maestra et le modèle Graeco permet de relier les processus foliaires au couvert par une intégration mécaniste qui s'est révélée suffisamment cohérente pour les transferts radiatifs de courte longueur d'onde et l'assimilation du couvert. En revanche, ce choix a aussi révélé des incohérences sur la modélisation du bilan d'énergie et de la transpiration du couvert qui pourraient être en partie liées à un problème dans la représentation des échanges radiatifs de grande longueur d'onde. Nous n'avons pas développé ici la représentation des processus de transferts turbulents dans le couvert qui restent donc à adapter pour des couverts formés de jeunes arbres à couronnes disjointes et avec une végétation intercalaire développée. La représentation implémentée est empirique et provient d'un calage effectué sous couvert fermé. Elle conduit donc certainement à une sous-estimation significative des flux échangés entre sol, végétation accompagnatrice et atmosphère. Nous n'avons pas pu évaluer la vraisemblance de la représentation de ces processus de transfert aérodynamique dans Maestra et nous ne savons pas si la mauvaise prédiction du bilan d'énergie et de la transpiration par

Maestra pourrait aussi lui être attribuée. Nous recommandons en conséquence de prendre en compte les sorties de Maestra pour générer des paramètres d'un modèle analogue 1D en se limitant au transfert radiatif de courte longueur d'onde, aux échanges de carbone et à la conductance stomatique du couvert.

L'intégration du module Roth-C dans le modèle Graeco et la représentation des effets des opérations culturales ont donné des résultats prometteurs et encourageants. La prise en compte de tels effets constitue un enjeu important dans la perspective de l'intensification de la sylviculture en Europe et de la prise en compte des forêts dans le marché du carbone. Dans le chapitre suivant, nous en montrons une application pour la simulation des échanges de CO_2 d'une coupe rase suivie depuis 2000 au site de Bilos-1. Il serait intéressant d'appliquer sur d'autres jeux de données comme e.g. ceux du projet CARBOAGE (Kowalski et al. 2003), cette nouvelle version du modèle Graeco.

De même, le développement du modèle de végétation intercalaire proposé ici nous semble représenter une voie d'approche pertinente, que nous évaluons dans le Chapitre 6. Cette approche simple devra certainement être adaptée pour rendre compte de façon plus générique du fonctionnement d'une strate herbacée forestière. A ce stade, elle semble toutefois suffisamment complète pour pouvoir rendre compte des interactions en lien avec le transfert radiatif de courte longueur d'onde, le cycle du carbone et le bilan hydrique entre les arbres et la végétation intercalaire. Ce module permet ainsi de décrire une vaste gamme de situations sur peuplements jeunes ou adultes, une fois intégré dans un modèle complet.

Chapitre 6

Modélisation : Partie II

Simulations de cycles sylvicoles complets dans le Sud-Ouest de la France

Plan du chapitre

Chapitre 6. Simulations de cycles sylvicoles complets dans le Sud-Ouest de la France..... 173

6.1 Introduction générale..... 173

6.2 Évaluation du modèle en peuplement adulte de Pins maritimes : .....
Cas du Bray 1980-2009..... 176

6.2.1 Données mobilisées..... 176
6.2.2 Résultats et discussion..... 176

6.3 Adaptation et évaluation du modèle en jeune peuplement de Pins maritimes : .....
Étude de l'historique sylvicole de Bilos : 2000-2010..... 180

6.3.1 Chronologie des évènements et calage GRAECO 180
6.3.2 Expérience 1. Opérations de préparation du sol post coupe ras: calage 2000-2005... 180
6.3.3 Expérience 2. Du semis à 7 ans : calage 2006-2010..... 184

6.4 Adaptation et évaluation du modèle sur une nouvelle essence : .....
Étude de deux rotations d'un peuplement d'*Eucalyptus* 187

6.4.1 Rotation 1 : calage GRAECO à partir de Montbartier 2005-2011. 187
6.4.2 Rotation 2 191

6.5 Application à des révolutions entières sous différents scénarios climatiques 194

6.5.1 Genèse des expériences de simulation..... 194
6.5.2 Données et scénario climatiques 194
6.5.3 Itinéréraires sylvicoles sélectionnés et initialisation des simulations..... 197
6.5.4 Résultats 198

6.6 Discussion générale..... 203

6.7 Conclusion..... 207

Chapitre 6. Simulations de cycles sylvicoles complets dans le Sud-Ouest de la France.

6.1 Introduction générale

Atténuer et anticiper les effets du changement climatique, tels sont les enjeux à considérer dans la gestion de la forêt française dans un contexte d'intensification des pratiques sylvicoles. En ce sens, il existe une forte demande pour que l'impact du climat futur soit étudié aux échelles locale et globale et ce pour la mise en place de politiques pertinentes d'atténuation et d'adaptation des pratiques sylvicoles. Un des objectifs que se doit de poursuivre la gestion sylvicole est de maintenir le rôle majeur de la forêt dans la séquestration de carbone tout en répondant à la demande énergétique croissante par le recours à la production de biomasse (IPCC 2011). Le caractère intensif de la sylviculture pose donc un certain nombre de questions quant au maintien de la viabilité des forêts. L'intensification affecte les composantes du système sol-végétation-atmosphère (Chapitre 5) au travers de changements des propriétés du sol (travail du sol, tassement dû aux passages d'engin, retours de matière organique, fertilisation), des propriétés de surface (albédo, rugosité, interception de la pluie) et par conséquent le microclimat du système. La modélisation permet de comprendre la réponse des écosystèmes forestiers aux changements de pratiques sous un climat changeant et constitue un appui à la sylviculture et à l'aménagement du territoire forestier. Dans cet objectif, nous avons repensé le modèle GRAECO pour le rendre générique du point de vue des espèces considérées et de leur âge, des types de sols représentables et des opérations sylvicoles menées sur site, tout en maintenant les concepts écophysiologiques de base implémentés dans ces modules. Initialement développé pour un écosystème pin maritime adulte à sous-bois de Molinie, en lande humide, nous avons en particulier développé des adaptations et des modules supplémentaires permettant d'étendre les applications de ce modèle à la phase d'installation du peuplement. Nous avons proposé, dans le chapitre précédent, d'introduire de nouveaux modules capables de rendre compte dans une certaine mesure le stade juvénile de peuplements forestiers, ce qui n'avait pu être évalué au cours des recherches précédentes, faute de pouvoir le confronter à des données d'expérimentation. Nous ne prétendons pas ici avoir 'généréciser' le modèle mais les concepts introduits permettent, dans un premier temps, d'élargir le champ d'étude. Ainsi, l'introduction d'un module de croissance du sous-bois, généré pour tout type d'espèce permet de prendre en compte la coexistence {arbres-végétation adventice} dans les processus d'échanges d'énergie de carbone et d'eau dans l'écosystème, notamment dans la phase juvénile des peuplements forestiers de pin maritime. Par ailleurs, la prise en compte des modifications du fonctionnement du sol par la possibilité de considérer différentes interventions sylvicoles, et notamment le travail du sol, permet d'évaluer leur impact sur les échanges d'eau et de carbone pour un cycle sylvicole complet. Enfin, s'appuyant sur la généricité de la

représentation des processus écophysiologiques par le modèle GRAECO, nous proposons de substituer l'espèce Pin maritime par l'*Eucalyptus* et d'évaluer la pertinence de GRAECO à simuler les transferts hydriques, et, plus généralement, sa capacité à reproduire un schéma de croissance pertinent.

La démarche adoptée dans ce chapitre se décompose comme suit:

1. La première étape a consisté à évaluer la nouvelle version du modèle Graeco, que nous appellerons Graeco+, sur un peuplement adulte.
2. La deuxième étape a consisté à caler et évaluer Graeco+ pour de nouvelles configurations de peuplements forestiers. Nous entendons par calage un ajustement des paramètres d'entrée minimisant la somme des écarts au carré entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées de différentes variables de l'écosystème, telles que *NEE*, *GPP*, *R* écosystème, biomasse aérienne du sous-bois ou du compartiment arbre suivant les données disponibles. Ce calage s'est effectué sur 2 écosystèmes distincts : pins maritimes et *Eucalyptus*. Le premier correspond au site de Bilos depuis le semis jusqu'à un âge de 7 ans et le second au site de Montbartier depuis sa plantation jusqu'à la fin de la seconde rotation. L'évaluation de Graeco s'est basée sur un ensemble de données publiées pour le site de pins (Berbigier et al. 2001, Kowalski et al. 2003, 2004, Stella et al. 2009, Moreaux et al. 2011) ou non (R. Burlett, J.M. Bonnefond ou encore P. Trichet, D. Loustau, *comm. pers*) et à partir des mesures présentées au cours des chapitres précédents liées au bilan hydrique et à la croissance du peuplement sur le site d'*Eucalyptus* de Montbartier. Disposant d'un modèle allométrique de croissance en biomasse développé par le FCBA (Cavaignac et al. 2011), nous confrontons le modèle Graeco+ à ce modèle pour une deuxième et troisième rotation basée sur une recépée de la rotation précédente.
3. Enfin, nous évaluons la réponse de 2 itinéraires sylvicoles intensifiés à un climat changeant en estimant la productivité d'un écosystème Pin maritime sur une révolution de 2 × 15 ans et d'un écosystème *Eucalyptus* sur une révolution de 3 × 10 ans pour un point de grille SAFRAN (Bordeaux) sur trois périodes 1970-2000, 2020-2050 et 2070-2100, d'un scénario climatique type A2 (IPCC 2007).

Cette partie du travail consiste en l'étape 4 du schéma suivant (Figure 6.1).

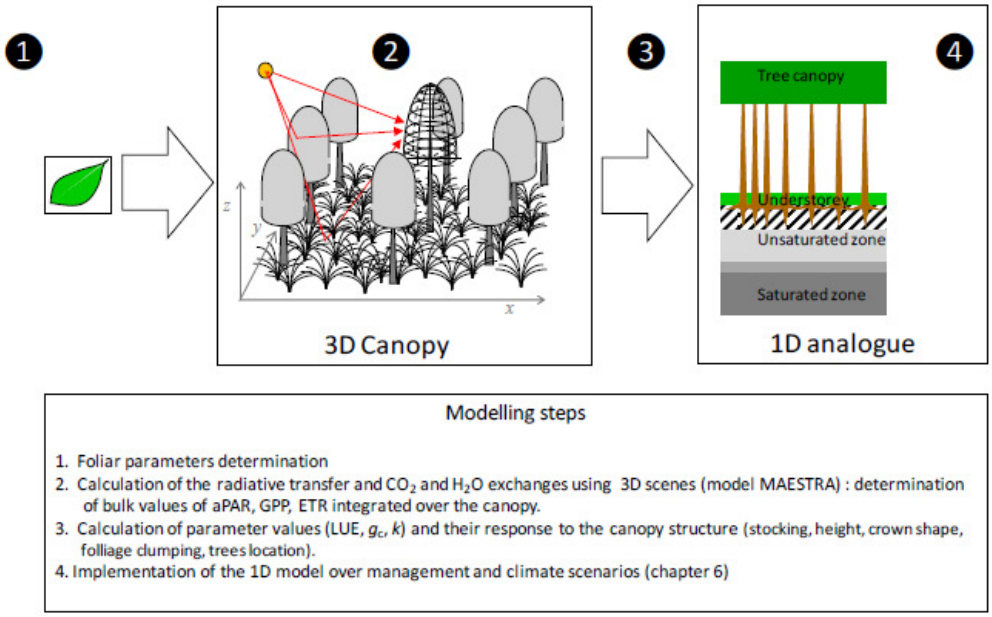


Figure 6. 1 Approche de modélisation conduite pour décrire et simuler le fonctionnement des peuplements forestiers en phase juvénile. Les étapes 1-3 sont détaillées dans la partie 5.2.

6.2 Évaluation du modèle en peuplement adulte de Pins maritimes : Cas du Bray 1980-2009

Dans cette partie, nous évaluons le modèle Graeco+ sur le jeu de données du site du Bray, qui avait servi au calage du modèle Graeco (Porté 1999 ; Loustau et al. 2001). Ce calage avait, par la suite, été utilisé dans le cadre de différents travaux de recherche visant à simuler la réponse des écosystèmes forestiers aux changements climatiques (projets Carbofor, Climator, Loustau et al. 2005, Ciais et al. 2010). **Nous cherchons ici à vérifier que l'implémentation des nouveaux modules dans cette nouvelle version Graeco+ a conservé la capacité du modèle pour la prédiction des différentes composantes d'échanges du système sol-végétation-atmosphère et que le modèle qui n'avait été évalué jusqu'à présent que sur des périodes de une à trois années maximum est suffisamment robuste pour décrire sans biais majeur une période de trente années.** Par la suite, nous utilisons pour les termes de biais (ou erreur systématique) et d'erreur non systématique les définitions proposées par Wallach et Goffinet (1987, 1989).

6.2.1 Données mobilisées

Le site du Bray se situe à 25 km au sud ouest de Bordeaux (44°N42'N, 0°46'W), soit environ 25 km au nord du site de Bilos. L'altitude est de 62 m. Ce site est situé en lande humide, avec quelques parties plutôt apparentées au type mésophile. Le sol est un podzol humique. En 2008, la végétation est composée de deux strates superposées : une strate de pins maritimes issus d'un semis de 1970, et une strate de sous-bois composée essentiellement de Molinie (*Molinia coerulea*) dans les zones basses et de Fougère-Aigle (*Pteridium aquilinum*) sur les parties plus élevées. La profondeur racinaire moyenne est de 75 cm. Les premières mesures de flux de sève, de transpiration, d'interception de la pluie, micrométéorologie et croissance ont été effectuées dés 1987 (Loustau et al. 1990, 1992a, 1992b, Berbigier et al. 1991, Diawara et al. 1991). Les flux par eddy-covariance ont été mesurés entre juin 1996 et fin 2009. La simulation est initialisée en 1980, le peuplement est alors âgé de 10 ans. Le paramétrage utilisé pour le site du Bray, ainsi que les interventions sylvicoles opérées sur ce site entre 1980 et 2009, sont décrits en Annexe 5.

6.2.2 Résultats et discussion

Commençant la simulation en 1980, cette expérience permet de vérifier que le modèle capture la dynamique des différents flux (Figure 6.2) et des variables d'état (Figure 6.3) du système. Après initialisation en 1980, Graeco+ simule la croissance et le développement des deux strates végétales et la dynamique du carbone et de l'eau du sol sans recalage. Graeco+ est comparé aux mesures de flux turbulents commençant à partir de 1996 (Figure 6.2). Le modèle Graeco+ reproduit les trajectoires des

différents flux mesurés, *LE, H et NEE*, et les différences interannuelles dues aux années sèches (2002, 2003, 2005). Ces années sont associées à une forte réduction du flux de chaleur latente et du flux de carbone par rapport à une année standard telle que 2001, ce que le modèle réussit à reproduire. A l'inverse, le flux de chaleur sensible augmente pendant ces périodes, conduisant à un rapport de Bowen élevé. L'année 2005 est également une année marquée par une sécheresse estivale qui impacte nettement le flux de chaleur latente. En revanche, en 2005, le flux de carbone semble surestimé, i.e. un rejet net de carbone est simulé par Graeco+ alors que les données mesurées tendent vers une assimilation de carbone. Un passage de rouleau lourd ayant eu lieu fin 2004, cela laisse sous-entendre une surestimation de la respiration du sol par le modèle suite à cette intervention (qui explique le pic de NEE occasionné fin 2004). Nous discutons de ces aspects par la suite. Statistiquement, les régressions entre valeurs prédites et valeurs observées montrent que le modèle sous-estime les flux avec une erreur non systématique non négligeable (nuage dispersé autour de la régression statistique et $R^2 < 0.6$). Cependant, le biais est faible et atteste de la bonne trajectoire des flux modélisés sur la période considérée. Par ailleurs, le modèle simule aussi sans biais l'évolution de la teneur en eau du sol et les épisodes de déficit hydrique édaphique (non montré).

Bien que l'on relève des erreurs ponctuelles, la version Graeco+ représente sans biais important la dynamique trentenaire de la croissance en biomasse du peuplement et de la végétation du sous-bois, de l'indice foliaire des arbres et du diamètre à 1.30 m moyen, en cohérence avec la précédente version de Graeco (Figure 6.3). Cette simulation sur 30 ans de la dynamique de croissance du sous-bois et de la dynamique du carbone du sol, confrontée aux mesures ponctuelles disponibles, est donc encourageante. Par exemple, l'impact sur la végétation du sous-bois du débroussaillage au rouleau lourd précédant l'éclaircie de 1995 (*understorey* W_F, Figure 6.3) est bien représenté par la simulation. Nous concluons donc de ces résultats que Graeco+ conserve, voire même améliore, les capacités de Graeco pour simuler les échanges biophysiques, compte tenu des erreurs potentielles sur les estimations de certaines variables simulées.

Ces résultats sont donc concluants quant à la capacité du modèle Graeco+ à capturer la trajectoire à long terme des flux et variables d'état du système, compte tenu de ce que l'on connaît de sa sensibilité aux erreurs commises sur les paramètres d'entrée et sur les variables de forçage. Les travaux de Pluviaud (2000) et Davi et al. (2010) avaient déjà analysé la sensibilité de ce modèle aux paramètres d'entrée et aux variables de forçage. Leurs résultats ont montré qu'elles se répercutent intégralement sur les variables simulées : une erreur de 10% sur la fonction LUE entraîne une erreur similaire sur GPP.

Ce jeu de données obtenu sur le peuplement du site du Bray commence en 1987 à l'âge de 17 ans et ne nous permet pas d'évaluer les performances de Graeco+ sur la phase d'installation et de croissance initiale du peuplement. La section suivante porte précisément sur un jeune peuplement de Pin maritime à la phase 0-7 ans. Cela permet à la fois (1) d'évaluer la représentation par Graeco+ des effets des opérations de travail du sol et leurs impacts sur les échanges sol-végétation-atmosphère et

(2) d'évaluer le modèle sur un peuplement dont la structure hétérogène n'est plus typique d'un peuplement fermé.

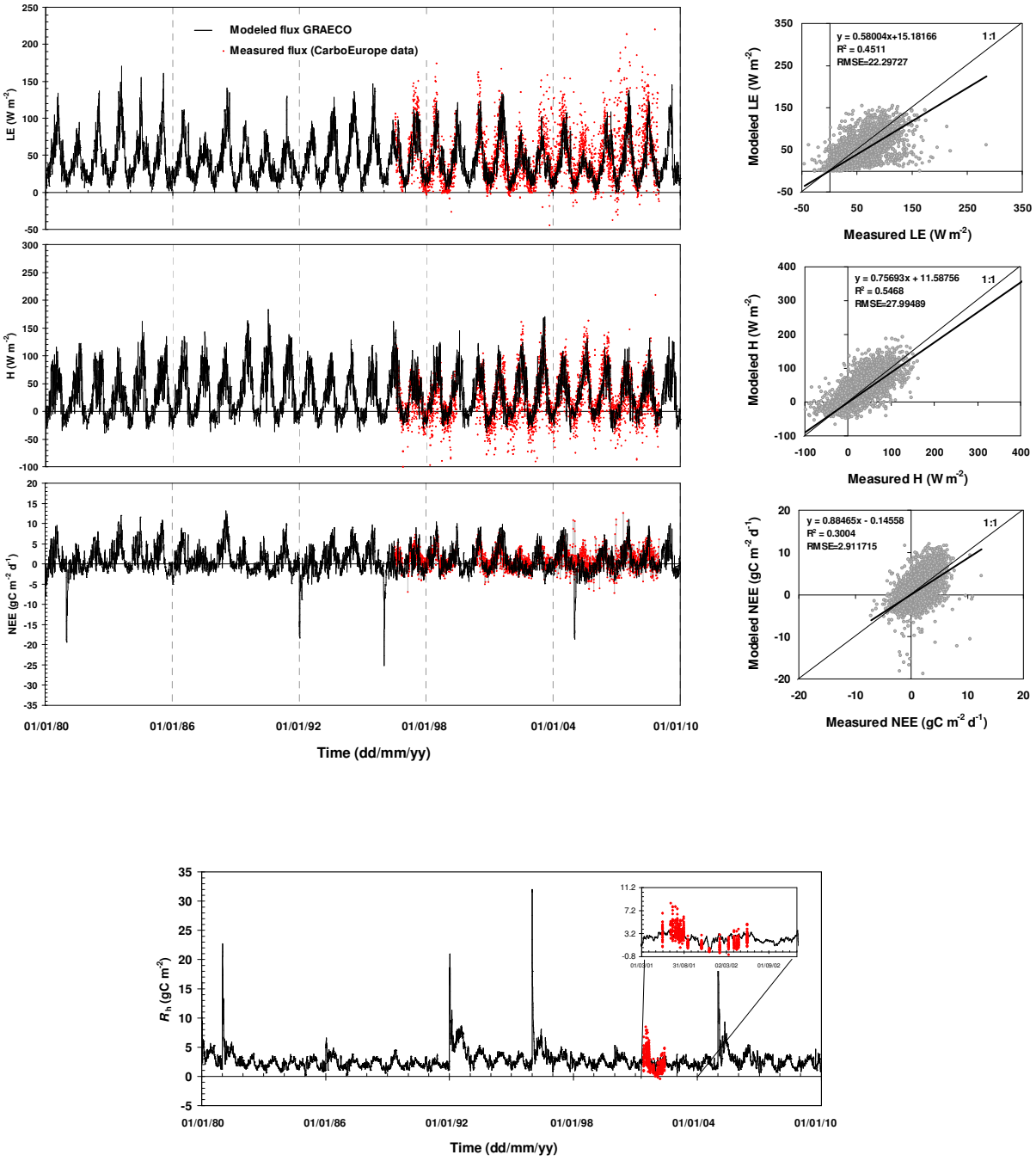


Figure 6. 2 Cinétiques journalières de variables de flux, *LE, H, NEE* et R_h simulées par Graeco+ (trait plein) et données mesurées (symboles en rouge). Sur cette figure uniquement, NEE négatif indique un rejet de carbone et NEE positif une fixation. Par souci de clarté, nous avons représenté les flux par leur moyenne mobile sur 4 jours.

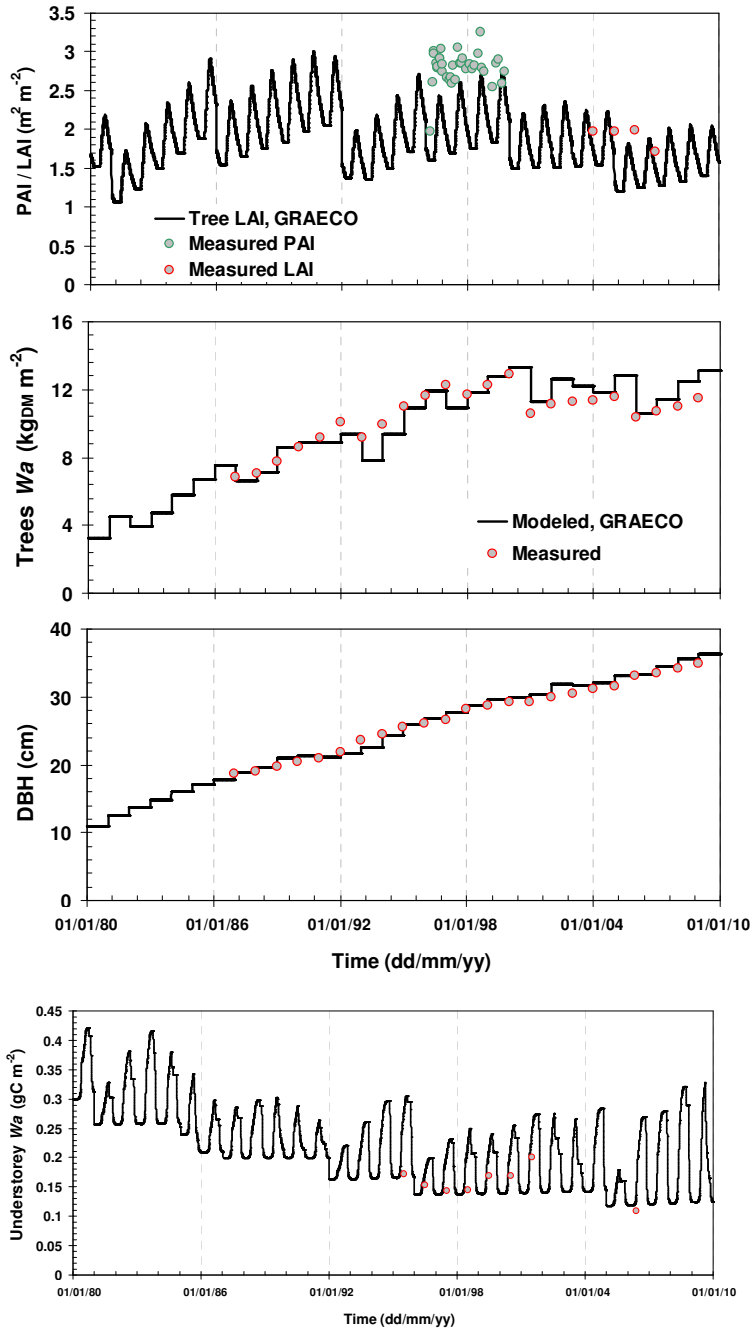


Figure 6. 3 Cinétiques journalières de variables de structure simulées par Graeco et confrontation aux données observées. Les sources de données utilisées sont les suivantes, de haut en bas de la figure :

- Mesures de *plant area index* (PAI) de la strate arborescente par une méthode optique (DAEMON, CSIRO, Berbigier et al. 2001)
- Estimation d'indice foliaire (LAI), de biomasse aérienne (W_a) et diamètre moyen à 1.3 m de hauteur (DBH) des arbres par équation allométrique (Porté et al. 2000, 2002) et à partir des données d'inventaires annuels des arbres (Trichet, Bernier et al. non publié)
- Estimation de biomasse aérienne (W_F) de la strate herbacée par inventaire annuel (20 prélèvements de 0.7 à 1 m² de surface unitaire, Trichet non publié).

6.3 Adaptation et évaluation du modèle en jeune peuplement de Pins maritimes : Étude de l'historique sylvicole de Bilos : 2000-2010

6.3.1 Chronologie des évènements et calage GRAECO

La parcelle de référence pour les simulations qui suivent est la parcelle de Bilos 1 présentée au cours des chapitres précédents. Le peuplement principal est un semis de Pins maritimes, dont la densité initiale a été réduite au cours d'un dépressage à 5 ans. Le sous-bois a été détruit à deux reprises, la première à 5 ans et la seconde à 6 ans. La chronologie des interventions présentée en Figure 6.4 remonte à la dernière coupe rase après la tempête de 1999. Graeco+ a été testé sur ce site en décomposant deux périodes caractéristiques des pratiques culturales entreprises à partir de la dernière coupe rase en 1999, puis à partir du semis de 2004 (Figure 6.4). Pour chacune de ces périodes, la paramétrisation s'est basée sur les mesures effectuées sur site et des données de la littérature.

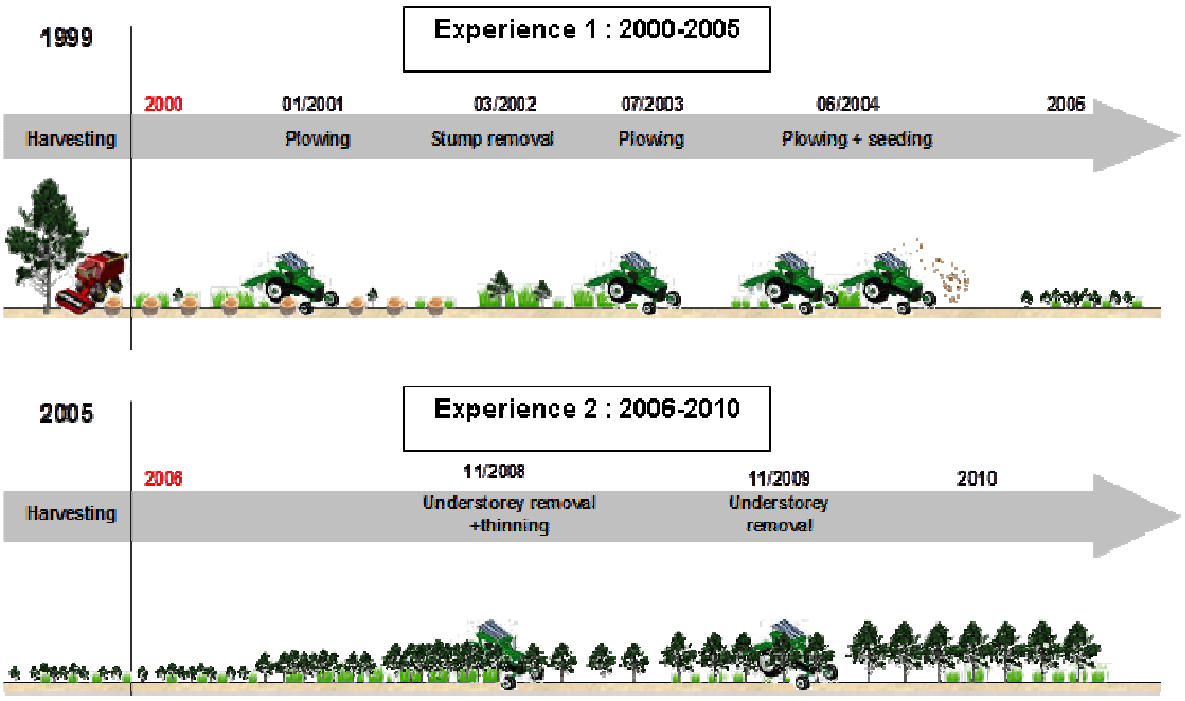


Figure 6. 4 Historique sylvicole du site de Bilos et présentation des 2 étapes de simulations. L'historique d'interventions a été reconstitué d'après les cahiers de laboratoire de l'unité EPHYSE (R. Burlett, S. Debesa, D. Garrigou et JM Bonnefond) et revérifié avec le gestionnaire de la parcelle, M. J.M. Beau (ONF, commune de Salles).

6.3.2 Expérience 1. Opérations de préparation du sol post coupe ras: calage 2000-2005

i. Initialisation

L'Annexe 5 propose une synthèse des valeurs de paramètres d'entrée retenues pour chacun des modules du modèle Graeco+.

- Peuplement principal

Les conditions initiales sont un sol après coupe rase, dont on ne trouve que quelques souches, de la végétation recolonisant la surface et de jeunes pins de moins de 5 ans éparses et issus de régénération naturelle. Le fichier de peuplement initial est donc caractérisé par une densité faible, de 50 arbres à l'hectare dont les biomasses aériennes et racinaires prennent les valeurs respectives de 0.33 ± 0.03 kg arbre^{-1} et 0.06 ± 0.01 kg arbre^{-1}. La présence de ces quelques pins sur le site ne représente qu'une contribution négligeable aux échanges dans l'écosystème.

- Données micrométéorologiques

Les données météorologiques journalières sur la période 2000-2005 correspondent au point de grille SAFRAN contenant la parcelle de Bilos (Chapitres 4 et 5). Les variables d'entrée du modèle sont les données journalières de rayonnement global (MJ m^{-2}), de la température maximale et minimale (°C), de l'humidité relative maximale et minimale (%), la vitesse du vent (m s^{-1}) et les précipitations incidentes (mm).

- Compartiment sol

Les différents compartiments du module Roth-C adapté pour GRAECO ont pu être initialisés à partir des teneurs en carbone mesurées sur ce site en 2001, soit 2 ans après la coupe rase (Trichet, *comm. pers.*). Nous avons également tenu compte des rémanents estimés à partir du peuplement précédent la coupe rase et considéré comme les branches et les parties non ligneuses (aiguilles, cônes). Ceux-ci ont été répartis entre fractions facilement décomposables (DPM) et résistantes (RPM) à raison de 10% et 90%. Les stocks initiaux sont présentés sur la Figure 6.5. D'un point de vue hydrique, le sol est considéré comme un podzol de lande humide sans horizon induré (alios) (Chapitre 2).

- Compartiment sous-bois

Le sous-bois est représenté dans Graeco+ comme un ensemble de plusieurs espèces caractérisé par trois pools de réserves distincts entre partie racinaire, partie foliaire et partie pérenne (souterraine et aérienne). Ces pools de carbone foliaires et racinaires sont initialisés à 25 gC m^{-2} et la partie pérenne à 50 gC m^{-2}. D'un point de vue allométrie, nous avons défini une surface massique (SLA) moyenne pondérée par les valeurs mesurées des espèces en présence, soit une valeur moyenne de 10.2 m^{-2} kg^{-1}, obtenue à partir des mesures effectuées sur le site de Bilos entre 2008 et 2011 (Yauschew Raguenes 2012, chapitre 2).

ii. Résultats

Le modèle représente relativement bien la dynamique de *NEE* et de respiration du sol durant la période de trois années précédant le labour (Figure 6.5 A). Il prédit des valeurs annuelles proches des observations pour l'année 2001 (Tableau 6.1). Il surestime l'impact du travail du sol, comme nous l'avons vu dans le cas du Bray, ce qui provoque une large surestimation de *NEE* à l'instant de la perturbation et durant les jours suivants. La succession des deux labours (2003 et 2004) accélèrent la décomposition de la matière organique du sol et induit une minéralisation accrue, avec une respiration hétérotrophe augmentée en conséquence. Cependant, ce flux respiratoire hétérotrophe est très supérieur aux flux de respiration estimé à partir des mesures de covariance turbulente. Ceci peut s'expliquer par la signification/interprétation de la respiration hétérotrophe simulée (§ discussion générale). Cet effet est atténué avec le temps, si bien que Graeco+ réussit à retrouver une dynamique dans les ordres de grandeurs suggérés par les données acquises sur site. A ce stade de la paramétrisation, il semble que *NEE* (en valeur absolue) soit surestimé par le modèle en période estivale (cf. 2001, et 2005 Figure 6.5). Deux explications peuvent être avancées : il est possible qu'à ce stade du paramétrage, la sensibilité à la sécheresse estivale ne soit pas suffisamment prise en compte pour le compartiment végétation adventice, la seconde hypothèse étant que le bilan hydrique est biaisé et ne représente pas bien le déficit en eau du sol. La sous-estimation du flux d'évaporation pourrait plaider pour cette dernière. La dispersion du nuage de point de *NEE* modélisé indique une forte erreur non systématique entre les données modélisées et observées. La plus grande part de celle-ci provient de la surestimation apparente de l'effet du travail du sol.

La dynamique de la végétation adventice est cohérente avec les différentes interventions pratiquées. La végétation accompagnatrice atteint donc son potentiel maximal de croissance en 2001 et 2002 en termes de surface foliaire, avec une transpiration associée maximale. A ce stade, la faible densité des pins limite les effets de compétition. En 2003 et 2004, au moment des deux interventions, la surface foliaire est ramenée à 0, mais ces interventions ayant lieu au mois de juin, les réserves de la partie pérenne non affectée par les interventions permettent probablement à cette strate de se redévelopper rapidement. Sa croissance est limitée en 2006 probablement par la croissance en parallèle des pins dont la contribution aux flux de carbone (GPP) semble prendre le dessus. Dans cette simulation, l'hypothèse d'une surestimation de la contribution du peuplement de pins initialisée de manière fictive pour lancer la simulation peut aussi expliquer une sous-estimation du LAI de la végétation adventice en 2005 (Figure 6.5 B).

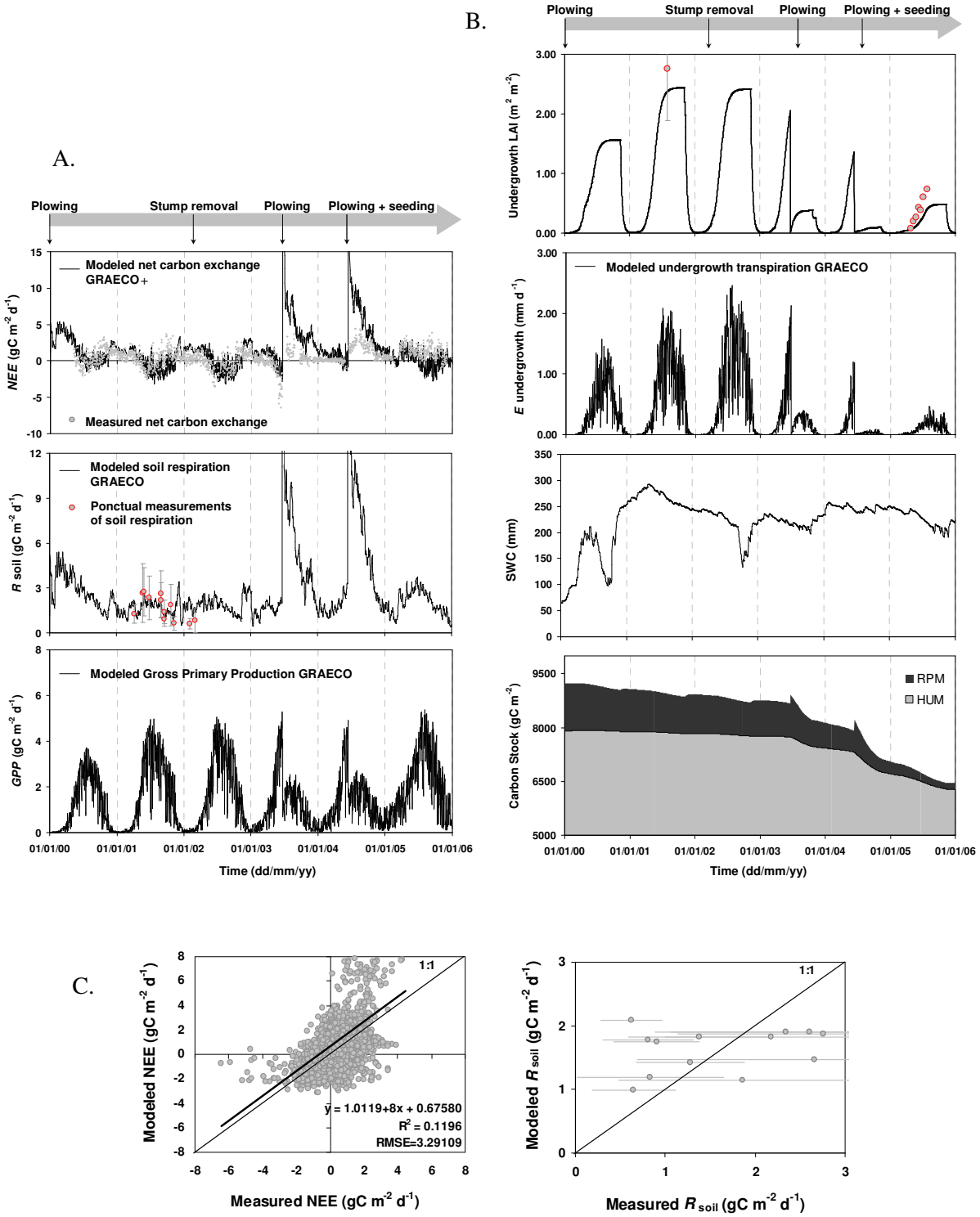


Figure 6. 5 A. B. Cinétiques journalières des flux de carbone et d'eau dans les différents compartiments entre 2000 et 2005, et C. analyse statistique associée. *NEE* est compté négativement en phase d'assimilation de carbone par l'écosystème. Pour la respiration hétérotrophe, la régression statistique n'est pas représentée du fait du faible échantillon de mesures et du grand écart type associé aux valeurs mesurées. Les données observées proviennent de Kowalski et al. (2004), (Loustau *comm. pers*) pour la respiration du sol et Trichet (*comm. pers.*) et Lopez (2005) pour l'indice foliaire du sous-étage (LAI).

Tableau 6. 1 Bilans de carbone et hydrique annuels disponible sur le site de Bilos et confrontation aux bilans simulés par Graeco.

gC m^{-2}	Données mesurées en 2001 (Kowalski et al. 2003, 2004)	Données simulées Graeco
NEE	+ 161	+ 45
GPP	602	598
R_E	763	643
ETR	358	255

Enfin, la succession des interventions tend à diminuer le stock en carbone du sol. Le court laps de temps entre les deux interventions intensifie notablement la perte en carbone du sol (2004-2005). Comme nous l'avons évoqué précédemment (Chapitre 5), il ne s'agit pas là d'une restitution précise des effets de succession de labour sur le flux de CO_2, mais nous montrons la capacité de Graeco+ à rendre compte de la dynamique du stock de carbone du sol avec une diminution sensible de RPM et HUM provoquée par l'activation de la minéralisation par le travail du sol et par les faibles apports de carbone organique au cours de la phase juvénile.

6.3.3 Expérience 2. Du semis à 7 ans : calage 2006-2010

i. Initialisation

Le paramétrage utilisé pour cette simulation (relations allométriques, transfert radiatif, assimilation nette du carbone, conductance stomatique, interception des précipitations, et calcul du bilan d'énergie) est identique à celui du Bray. Les valeurs retenues sont présentées en Annexe 5. Pour l'initialisation de cette simulation, les compartiments de carbone et eau du sol sont modifiés et leur valeur initiale est reprise des valeurs finales de l'expérience 1. Le contenu en carbone du sol correspond donc aux données simulées au 31/12/2004, après travail du sol.

ii. Résultats

Dans cette simulation, nous ne regardons plus seulement l'impact du travail du sol mais également l'interaction pins et végétation adventice. Les observations auxquelles nous avions abouties précédemment sur la surestimation des flux respiratoires restent valables dans ce contexte et induisent une surestimation de R_E en période de travail du sol (Figure 6.6 C) et, logiquement, un pic de *NEE* au même moment. La trajectoire des flux est cependant bien restituée après rééquilibrage du système (Figure 6.6 A en 2010).

Si le cycle du carbone semble bien appréhendé dans le modèle avec notamment une restitution cohérente de *GPP* à la fois en valeurs instantanées et en dynamique ($R^2 > 0.6$), l'évapotranspiration

totale est largement sous-estimée (R^2 > 0.6) en raison d'une mauvaise estimation de l'évapotranspiration de l'écosystème {sol + sous-bois} (Figure 6.6 B). La dynamique du sous-bois a révélé être bien simulée d'après les tests précédents, malgré une légère sous-estimation de la biomasse produite (Figure 6.6 B). Cependant, cette sous-estimation ne peut, à elle seule, expliquer la forte sous-estimation de l'*ETR*. Nous attribuons cette sous-évaluation de l'*ETR* au comportement du sol vis-à-vis de l'évaporation, qui dans son codage actuel ne satisfait pas la prise en compte des effets de structure liés à une végétation en rang, comme représentée par cette phase du cycle sylvicole.

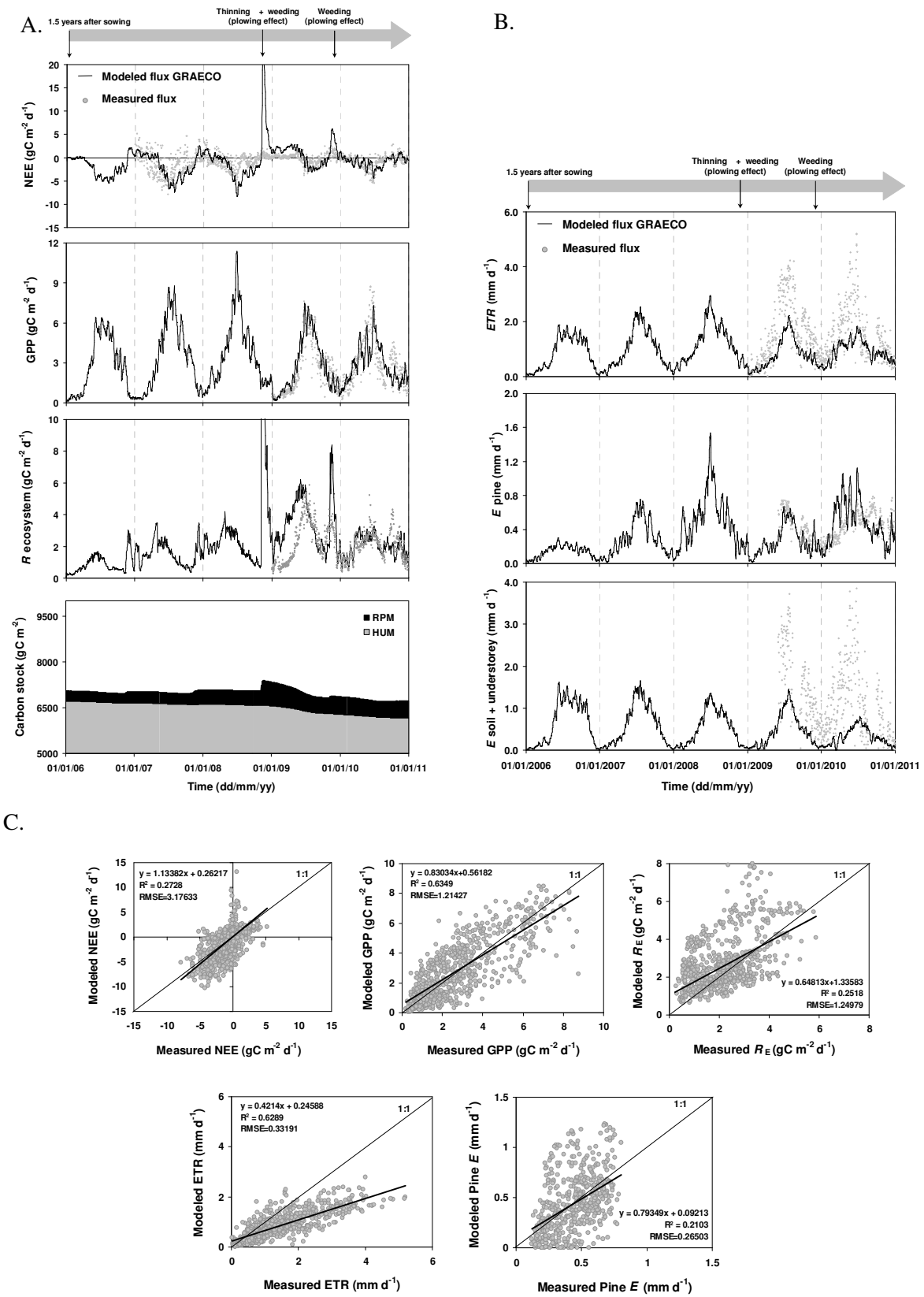


Figure 6. 6 Cinétiques journalières des flux de carbone (A) et d'eau (B) dans les différents compartiments entre 2006 et 2010 et analyse statistique associée lorsque les mesures sont disponibles pour la comparaison (C).

6.4 Adaptation et évaluation du modèle sur une nouvelle essence : Étude de deux rotations d'un peuplement d'*Eucalyptus*

6.4.1 Rotation 1 : calage GRAECO à partir de Montbartier 2005-2011.

La parcelle de référence pour les simulations qui suivent est la parcelle de Montbartier composés d'*Eucalyptus* gundal hybride entre *E. gunnii* et *E. Dalrympleana*. La paramétrisation de GRAECO pour cette espèce s'est effectuée à partir des mesures effectuées sur site ou des données de la littérature, ou pour les inconnues, nous avons conservé le paramétrage pins maritimes (Annexe 5).

i. Paramétrage, initialisation et données de forçage.

- Fichier peuplement

Le peuplement initialisé au 1er janvier 2005 est caractérisé par une densité de 1150 arbres à l'hectare dont nous avons reconstitué les caractéristiques en biomasse racinaire et aérienne à partir de nos données de croissance en diamètre et des relations allométriques obtenues entre 2009 et 2011. Les biomasses aériennes et racinaire initiales prennent les valeurs respectives de 5.57 ± 0.37 kg $_{DM}$ arbre $^{-1}$ et 1.11 ± 0.07 kg $_{DM}$ arbre^{-1}. A cette initialisation, notons que les arbres ont déjà connu une saison de croissance.

- Fichier météorologique

Afin de simuler une rotation sur dix ans, nous avons ajouté à la série chronologique 2005-2011 des données météorologiques 'fictives' pour 2012-2014, correspondant aux climats de Montbartier entre 2000 et 2002, l'intérêt ici étant d'évaluer la capacité de GRAECO+ à simuler les flux d'eau mesurés entre 2009 et 2011 et à restituer la croissance annuelle.

- Paramètres d'entrée

L'annexe 5 propose une synthèse des paramètres d'entrée utilisés pour chacun des modules du modèle. Certains de ces paramètres sont explicités ci-dessous :

- **Compartiment arbre : allométrie**

Les relations allométriques ont été initialement ajustées à partir des relations allométriques établies entre la biomasse aérienne totale et les différents compartiments (feuilles, bois de tronc + écorces) et caractéristiques propres des arbres (DBH, hauteur) obtenues sur le site de Montbartier au cours d'un échantillonnage effectué par le FCBA (Cavaignac et NguyenThe, *com pers*.). Dans le Chapitre 4, nous avions établi un certain nombre de relations allométriques reliant le diamètre à 1.30 m, DBH, à la biomasse aérienne totale W_a et à celle des différents compartiments {feuille}, {troncs + écorce} et {branches}. Ces relations sont rappelées dans le Tableau 6.2. Pour estimer la biomasse de chaque compartiment, le DBH et la hauteur à partir de la biomasse aérienne totale telle qu'imposée par le modèle GRAECO, nous avons simplement inversé la relation entre W_a et DBH pour exprimer DBH en fonction de W_a, puis intégré cette relation dans les équations pour les faire dépendre de W_a.

Tableau 6. 2 Rappel des relations allométriques reliant DBH aux biomasses par compartiment, relation du type $W_i = a_i \times \mathrm{DBH}^{bi}$.

Modèle allométrique	a_i	b_i	*Somme des carrées*		*P-value*
			Total	Résidus	
Biomasse foliaire	260.6	1.7521	605.1	6.5611	<0.0001
Biomasse du tronc	1926.3	2.1646	6355.0	24.3061	<0.0001
Biomasse de l'écorce	153.9	1.7745	192.9	0.8406	<0.0001
Biomasse des branches	1276.6	2.4178	1026.0	24.3849	<0.0001
Biomasse aérienne totale W_a	3281.7	2.1143	22527.3	44.3645	<0.0001

Pour la relation reliant DBH à la hauteur, nous avons introduit un effet âge, disposant de mesures de hauteur à plusieurs âges.

- **Assimilation par les *Eucalyptus***

La valeur initiale de $\boldsymbol{LUE}_{\max}$, moteur du calcul de l'assimilation et indirectement de la biomasse aérienne, a été initialement paramétrée à la valeur de celle des Pins : 0.59, similaire à la valeur estimée dans le Chapitre 5 pour l'*Eucalyptus* (Tableau 5.10). Le calage du modèle vis-à-vis de notre jeu de données nous a incités à réduire ce paramètre à une valeur de 0.50.

- **Conductance stomatique des *Eucalyptus***

La conductance maximale a été initialisée à une valeur de 0.035 m s^{-1}, et les paramètres de la réponse de la conductance au SMD et au VPD ont été ajustés d'après les équations suivantes et la Figure 6.7

$$f(SMD) = 1 - SMD^{k_SMD1}$$ Avec k_SMD1 = 2 (Figure 6.7a)

$$f(VPD) = Minof(1, \frac{1}{k_vpd1 \times (VPD+1)^{k_vpd2}})$$ Avec k_vpd1=0.02, k_vpd2=1.07 (Figure 6.7b)

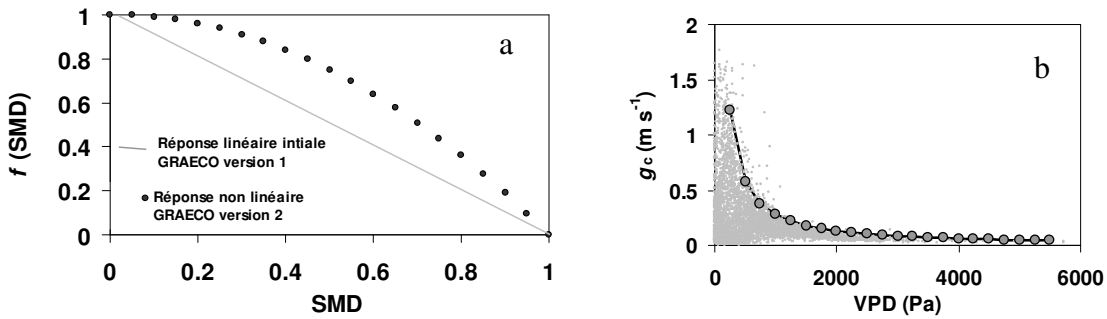


Figure 6. 7 Fonction de réponse au SMD (a) et au VPD (b) de la conductance stomatique.

- **Compartiment sous-bois**

Dans les peuplements d'*Eucalyptus*, le sous-bois est détruit les trois premières années de la plantation et sa croissance lors des années suivantes est inexistante du fait d'un couvert quasiment fermé et des potentiels effets allélopatiques (Chapitre 2). Compte tenu de cette observation, nous avons négligé l'existence d'un sous bois dans toute la simulation. Nous n'avons pas comptabilisé l'existence d'apports au sol de biomasse suite à ces interventions, faute d'information.

- **Compartiment sol**

Le compartiment sol est moins connu par rapport au compartiment arbre et sa paramétrisation initiale a nécessité d'admettre plusieurs hypothèses. Nous avons admis une zone racinaire d'1.30 m de profondeur, contenue dans une couche non saturée initiale de 2 m. Une zone de 50 cm d'épaisseur constitue une zone à la capacité au champ, en dessous de laquelle on retrouve une nappe profonde. Par conséquent, le comportement a été défini arbitrairement. Un fort coefficient de drainage (Annexe 5, kDr0) a été forcé afin d'éviter que la nappe simulée ne remonte en surface, puisque, tel qu'évoqué dans les Chapitres 2 et 4, nous n'avons pas noté la présence de nappe au-dessus de 2 m. Par ailleurs, nous avons initialisé les différents compartiments du sol en tenant compte des ordres de grandeurs comparables entre la zone repérée en Gironde et celle du Tarn et Garonne (Gis Sol. 2011, base de données BDAT).

ii. Résultats

Tout comme pour les simulations précédentes, nous avons commencé la simulation en début de cycle, et nous évaluons la capacité de Graeco à capturer la dynamique des flux disponibles. Pour cela, nous disposons des données de transpiration estimées à partir des densités de flux de sève (Chapitre 4). Graeco+ permet de reproduire la dynamique et les valeurs de la transpiration (R^2=0.6817 ; Figure 6.8). L'effet âge du peuplement est également bien simulé avec des faibles taux de transpiration en début de cycle pour atteindre un maximum en 2010 (à 6 ans). L'année 2011, marquée par une sécheresse précoce, montre également une réduction de la transpiration par les *Eucalyptus* simulés. Parallèlement, la prédiction du contenu en eau du sol présente une dynamique réaliste et suit dans une certaine mesure l'évolution des valeurs mesurées. L'écart observé est probablement dû à la sous-estimation des valeurs réelles par nos mesures, la partie superficielle du sol étant mal prospectée par les capteurs.

Nous n'avons pas d'autres données liées aux flux qui nous permettraient d'évaluer la trajectoire des flux de carbone. Nous analysons seulement la capacité de Graeco+ à rendre compte des effets climatiques. Ainsi, les années 2009, 2010 et tout particulièrement 2011 (Figure 6.8 B), le GPP des *Eucalyptus* est réduit drastiquement en été, avec une réduction précoce en 2010 et 2011, comme nous l'avions souligné au cours du Chapitre 4.

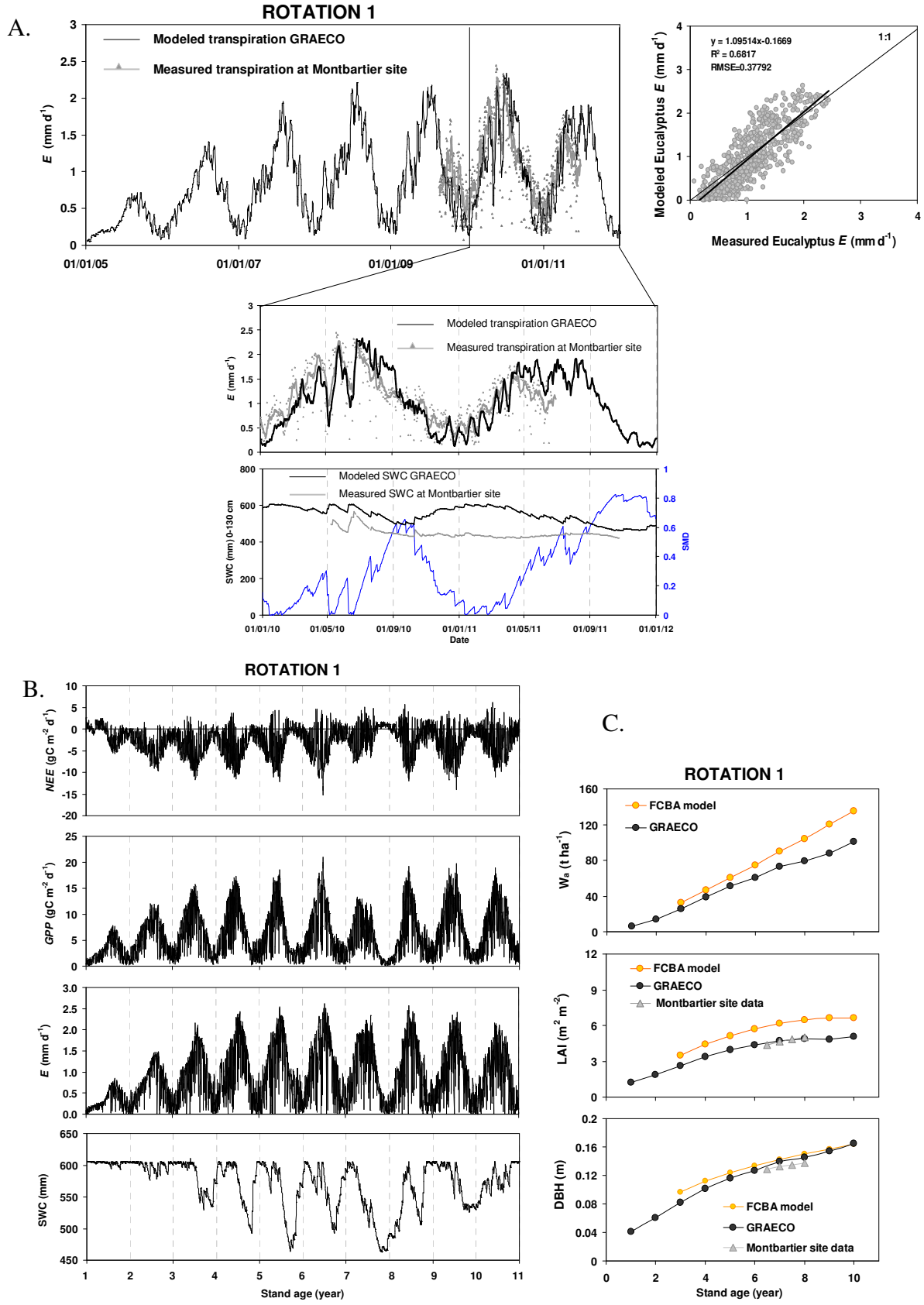


Figure 6. 8 A. Cinétiques observée et prédite de la transpiration journalière des *Eucalyptus* et statistiques associées. Un encart sur la période mesure est également représenté (*E* et SWC).

B. Cinétiques journalières des flux de carbone modélisés par Graeco+. C. Evolution des valeurs annuelles de biomasse (Wa), indice foliaire (LAI) et DBH sur la rotation entière comparée aux valeurs prédites par le modèle de croissance en biomasse du FCBA (Cavaignac et al. 2011).

Le calage proposé permet de bien rendre compte de l'évolution des paramètres structurels du peuplement, à savoir LAI et DBH qui concordent avec les données mesurées. Notre simulation sous-estime la biomasse aérienne totale et le LAI par rapport aux données modélisées par le modèle du FCBA. Cependant, les ordres de grandeurs sont respectés. Nous précisons que le modèle établi par le FCBA résulte d'un panel de données recueillies au cours des 30 dernières années, sur différentes placettes expérimentales d'*Eucalyptus* plantées à une densité de 1250 tiges ha^{-1} dans le Sud-Ouest de la France. Il est représentatif d'un climat moyen sur la période 1975-2005. Nos simulations, quant à elles, résultent d'un climat caractéristique pour chaque année. Ainsi, l'augmentation de l'écart entre leur modèle et notre simulation est très probablement due aux climats particuliers de 2009, 2010 et 2011, i.e. à partir de 6 ans, qui réduisent la production en biomasse aérienne.

Graeco se révèle adapté dans sa capacité à prendre en compte une autre essence et à simuler sa dynamique de croissance. Nous proposons donc d'aller plus loin en testant le modèle pour une deuxième rotation du cycle 3 × 10 ans.

6.4.2 Rotation 2

i. Adaptation de GRAECO pour le cas d'un recépage : concept

Le type de pratique sylvicole appliqué dans le cas des plantations d'*Eucalyptus* consiste en un recépage des souches présentes après la coupe de la rotation 1 et ce pour les deux rotations suivantes (révolution sur 3 × 10 ans comme nous l'avions explicité précédemment). Le système racinaire constitue la majeure partie de la biomasse totale initiale lors de la deuxième et troisième rotation, alors que la biomasse aérienne ne constitue plus qu'une fraction de la biomasse totale, celle de la souche laissée sur site. Si Graeco+ permet aujourd'hui de prendre en compte un travail du sol, une éclaircie, ou une coupe rase, il ne permet pas de modéliser cette notion de recépage après récolte. Nous avons montré précédemment la capacité de Graeco+ à simuler la croissance en biomasse des *Eucalyptus* de 1ère rotation en confrontant les sorties du modèle avec les données disponibles à Montbartier (Chapitre 4) et sur la région Sud-Ouest (FCBA). Nous utilisons les sorties de la première rotation pour initialiser la deuxième rotation :

- La biomasse aérienne initiale est calculée comme celle de souche de 10 cm de hauteur laissée par la rotation précédente ;
- La biomasse racinaire de la rotation précédente est conservée ;
- Nous avons introduit la notion d'**âge aérien** et d'**âge souterrain** pour distinguer les parties souterraines anciennes des parties aériennes. Nous faisons l'hypothèse que les processus d'allocation entre partie racinaire et aérienne seront modifiés du fait de ces proportions inversées en début de seconde rotation (et de 3ème rotation). Cela nous

amène à introduire un concept empirique : la notion d'**équilibre d'allocation**, défini comme le rapport à l'équilibre entre la biomasse racinaire et la biomasse aérienne, que nous avons fixé à ***k_équilibre*** = 0.2118 (applicable en peuplement d'*Eucalyptus* et de Pins maritimes). En début de deuxième rotation, l'allocation est dirigée préférentiellement vers la biomasse aérienne. Pour rendre compte de cet effet, nous avons pondéré la fonction exponentielle par une fonction bornée entre 0 et 1 représentant le rapport [***k_équilibre*** / $(W_r / W_a)_{réel}$]. Tant que ce rapport $(W_r / W_a)_{réel}$ n'a pas atteint sa valeur à l'équilibre, l'allocation aux racines est réduite et se fait préférentiellement vers la biomasse aérienne.

- En outre et comme dans la version antérieure de Graeco, l'allocation aux racines s'effectue dans Graeco+ par une loi exponentielle en réponse à un indicateur de stress lui-même défini par le rapport entre la transpiration annuelle des arbres et l'évapotranspiration potentielle annuelle.

ii. Confrontation modèle GRAECO - modèle FCBA

Nous ne disposons pas de mesures sur site en deuxième rotation permettant d'évaluer la cohérence des simulations et nous avons donc seulement comparé l'évolution de la biomasse sur pied simulée par Graeco+ avec le modèle du FCBA déjà mentionné. Les valeurs moyennes annuelles simulées sur une rotation sont cohérentes avec les valeurs modélisées par le FCBA.
Le calage retenu en 2ème rotation et les ajustements proposés dans le code Graeco permet de rendre compte de l'évolution des paramètres de biomasse et de structure du peuplement (Figure 6.9 B). L'allocation préférentielle aux parties aériennes en début de rotation est représentée. Ainsi, la biomasse souterraine diminue par une différence entre allocation aux racines et mortalité des racines négatives, mais l'équilibre est rapidement ré-atteint entre biomasse aérienne et racinaire (vers 4 ans). Notre simulation aboutit à des ordres de grandeurs comparables aux estimations du modèle FCBA tout en tenant compte que ce dernier est entaché d'une incertitude (Cavaignac et al. 2011). .

Les différents tests de calage/évaluation ont abouti à des résultats encourageants pour les perspectives de modélisation, mais restent dans un cadre exploratoire. La discussion générale (§ 6.6) établit les limites de ces simulations. L'exercice qui suit consiste à appliquer les différentes modifications opérées dans le Chapitre 5 et dans la partie que nous venons de décrire. Cette tache se focalise sur un point spécifique du Sud-Ouest de la France et permet de comparer, une fois de plus à titre exploratoire, les itinéraires sylvicoles Pins maritimes/*Eucalyptus* à courte rotation et leurs comportements biophysiques, en réponse à un scénario critique de changement climatique.

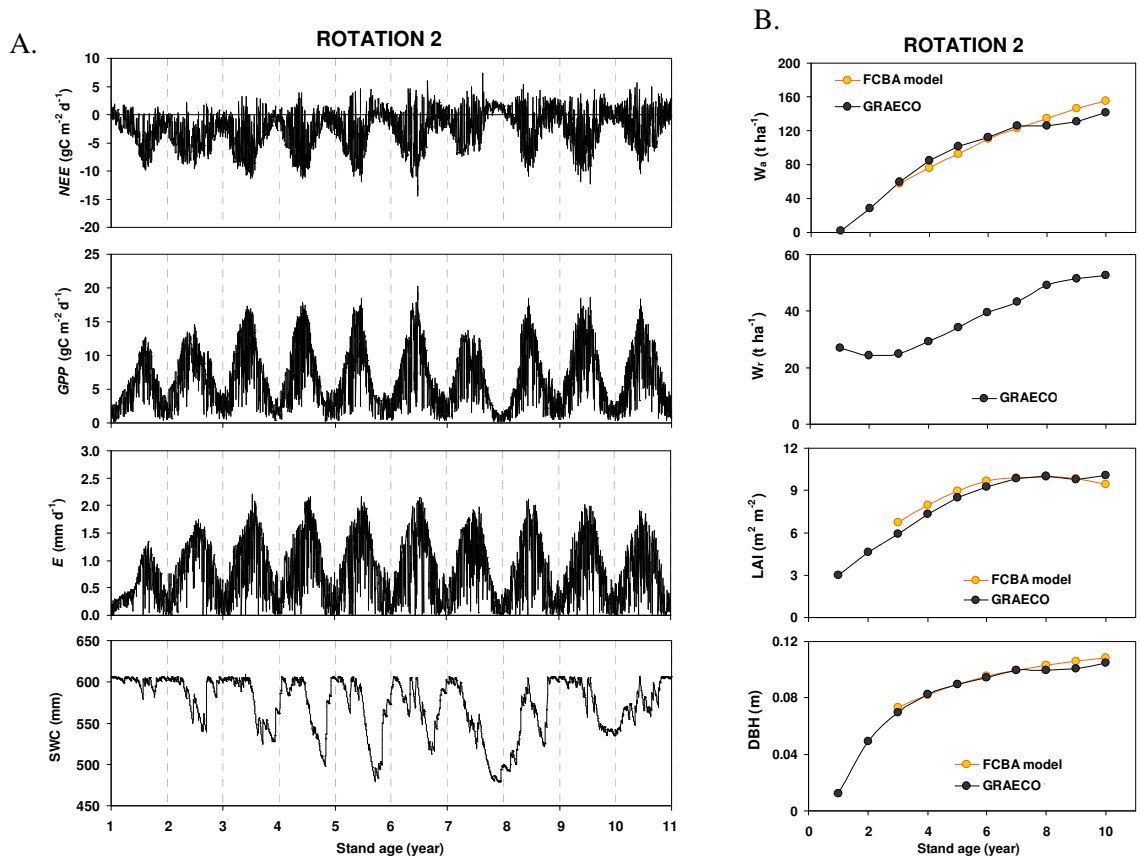


Figure 6. 9 A. Cinétiques journalières des flux de carbone et d'eau modélisés par Graeco+ en deuxième rotation d'*Eucalyptus*.

B. Evolution de la biomasse sur pied (Wa et Wr), de l'indice foliaire des arbres (LAI) et du diamètre de tronc moyen (DBH) en 2ème rotation (modèle FCBA : Cavaignac et al. 2011).

6.5 Application à des révolutions entières sous différents scénarios climatiques

6.5.1 Genèse des expériences de simulation

Dans les prochaines années, les changements attendus d'utilisation des terres d'un point de vue sylvicole, en réponse aux récents évènements climatiques et à l'évolution projetée du climat, posent la question de la gestion durable des écosystèmes forestiers sur les plans économiques et environnementaux. Nous proposons dans cette partie de rendre compte de trois itinéraires sylvicoles intensifs envisageables dans le Sud-Ouest de la France et d'analyser leur comportement en réponse à un climat changeant. A l'image des simulations entreprises dans les travaux de Loustau et al. (2005) ou Ciais et al. (2010), nous avons pour objectif d'analyser le fonctionnement hydrique, le cycle du carbone et la production de ces différents itinéraires sur une période unitaire de 30 ans, représentant de une à trois rotations sylvicoles suivant le cycle considéré. Cet exercice de simulation tend également à produire un aperçu des effets potentiels des pratiques sylvicoles sur ces comportements et sur les modifications de l'environnement dans lequel ils évoluent. L'expérience de modélisation s'appuie sur le modèle Graeco+ et son calage décrit dans la partie précédente (§ 6.3 et § 6.4).

6.5.2 Données et scénario climatiques

La diversité des scénarios climatiques existant résulte non seulement des incertitudes associées aux simulations du climat, mais également de la variabilité des trajectoires socio-économiques possibles. Pour les simulations climatiques qui suivent, nous avons utilisé le scénario **SRES-A2** (Nakicenvoic et al, 2000, SRES : Special Report on Emission Scenarios), noté A2 dans la suite du chapitre. Ce choix s'est basé sur la volonté de représenter les évolutions possibles des comportements de peuplement forestier sous une forte contrainte climatique. Rappelons que le scénario A2 est caractérisé par un monde hétérogène. La population mondiale augmente de façon continue et l'autonomie et les identités locales sont accentuées. La population atteint ainsi plus de 10 milliards en 2050. Le développement économique est à vocation régionale et le développement technologique est relativement lent, par rapport aux autres scénarios. Les émissions cumulées de CO_2 d'ici le milieu et la fin du 21ème siècle sont projetées à environ 600 et 1850 GtC respectivement, ce qui correspond à des concentrations de CO_2 pour le milieu et la fin du 21ème siècle de 575 et 870 ppm, respectivement. Notons que la concentration relevée en 2011 atteint 391.57 ± 0.12 ppm (http://co2now.org/Current-CO2/CO2-Now/noaa-mauna-loa-co2-data.html). Par ailleurs, ce scénario se caractérise par l'augmentation des émissions d'oxyde nitreux et de méthane au cours du 21ème siècle. L'augmentation de température atteinte dans ce scénario est de l'ordre de 4°C en 2100 mais ne représente pas le scénario le plus pessimiste (Figure 6.10).

Le point géographique retenu pour l'exercice de simulation concerne le **point Bilos** pour la période 1970-2000 dont la météorologie est décrite par le point de grille SAFRAN (n° 7744). Pour le climat futur (périodes 2020-50 et 2070-2100), nous disposons des données du point grille Bordeaux en scénario **A2**, simulées par le modèle ARPEGE (Gibelin et Déqué 2003) et régionalisées suivant la méthode quantile-quantile (Brisson et al. 2010). Sur la Figure 6.10 est représenté le choix des périodes d'études pour l'exercice de simulations qui suit. Ces données ont été aimablement mises à disposition par le CNRM (J.C. Calvet) :

- **1970-2000** : climat actuel de référence (point de grille SAFRAN), caractérisé par une température moyenne, des précipitations annuelles, une humidité relative moyenne et une concentration en CO_2 de 12.7°C, 951 mm, 81%, et 344 ppm respectivement ;
- **2020-2050** : climat futur à moyen terme (modèle ARPEGE régionalisé), caractérisé par une température moyenne, des précipitations annuelles, une humidité relative moyenne et une concentration en CO_2 de 14.6°C, 920 mm, 77%, et 463 ppm respectivement ;
- **2070-2100** : climat futur à plus long terme (modèle ARPEGE régionalisé), caractérisé par une température moyenne, des précipitations annuelles, une humidité relative moyenne et une concentration en CO_2 de 17.5°C, 656 mm, 70%, et 722 ppm respectivement.

A partir de 2060, une rupture est visible à la fois sur les données de température et les données de précipitations avec une augmentation des températures et une diminution des précipitations annuelles. La période 2070-2100 est donc très critique en termes de contraintes environnementales (Figure 6.10)

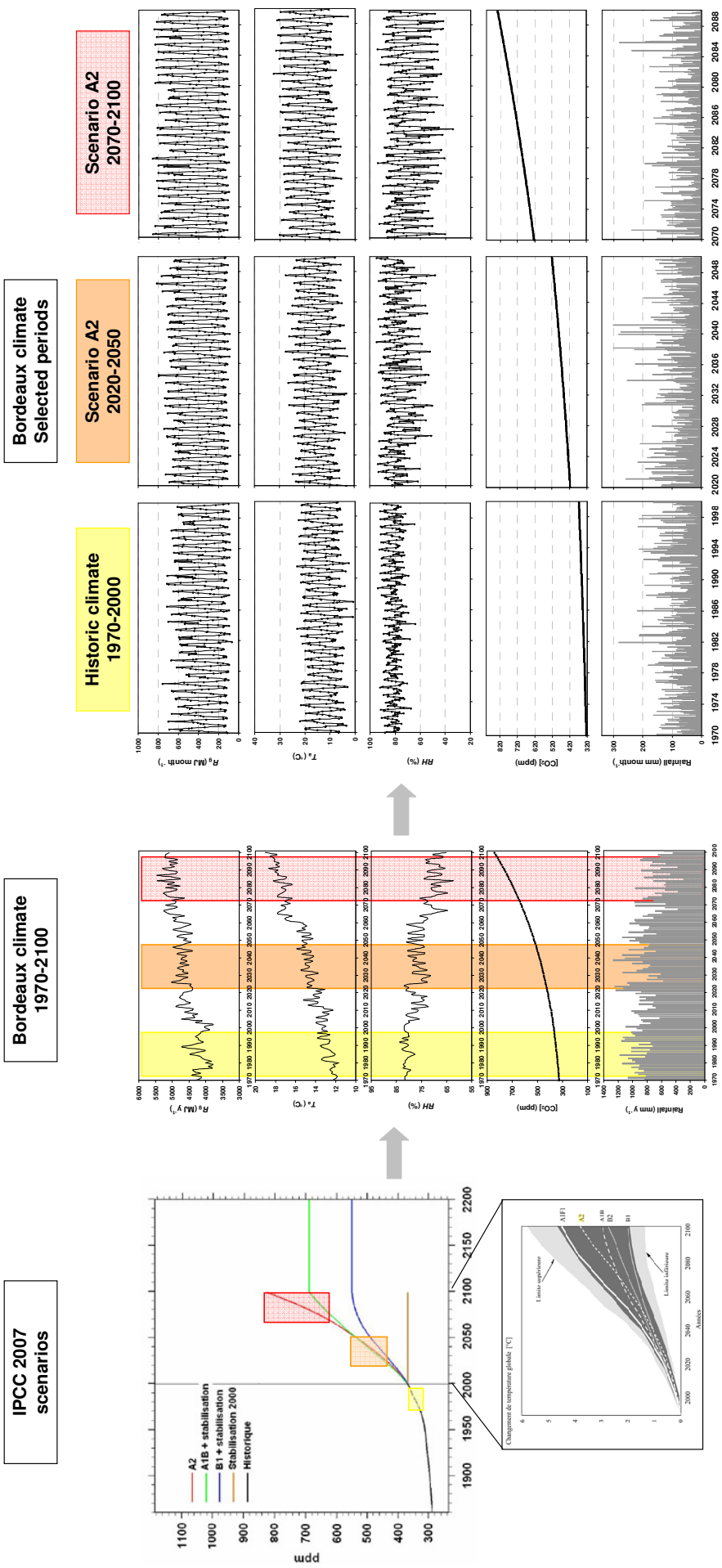


Figure 6.10. Scénario climatique utilisé pour l'expérience de simulation 3 et comparaison avec les données observées à Bordeaux, 1970-2100, (SAFRAN)

6.5.3 Itinéréraires sylvicoles sélectionnés et initialisation des simulations

Les itinéraires sylvicoles sélectionnés (ITK) sont résumés dans le Tableau 6.3.

Tableau 6. 3 Itinéraires sylvicoles et pratiques menées pour ces itinéraires intensifs à pin maritime et *Eucalyptus* analysés.

	ITK 1. Pin -30	ITK 2. Pin-15	ITK 3 Eu
Essences	Pins maritimes + sous bois	Pins maritimes + sous-bois	*Eucalyptus*
Scénarios sylvicoles	30 ans	2 × 15 ans	3 × 10 ans
Densité initiale (tige ha^{-1})	13 300	13 300	1 200
Pratiques sylvicoles	- Labour initial - Débroussaillement à 5 ans (= passage du rouleau landais + apports de litière au sol) - Dépressage à 5 ans pour atteindre une densité de 1 700 tiges ha^{-1} (= apport de litière) - Eclaircie à 18 ans pour atteindre 900 tiges ha^{-1} (passage du rouleau landais) - Coupe rase à 30 ans	- Labour initial - Débroussaillement à 5 ans (= passage du rouleau landais + apports de litière au sol) - Dépressage à 5 ans pour atteindre une densité de 1 700 tiges ha^{-1} (= apport de litière) - Coupe rase à 15 ans - 2ème rotation identique à la précédente	- Sans labour initial - Sous-bois détruit chimiquement pendant 3 années consécutives donc absence total de sous-bois dans les simulations - Coupe à 10 ans (souche de 10 cm maintenues) - Recépée en rotation 2 et 3 pour atteindre une densité de 5 000 tiges ha^{-1}

Pour ITK 1 et 2, il s'agit d'itinéraires intensifs qui relèvent d'une situation théorique mais s'appuyant sur des discussions engagées dans le cadre de la production intensive de biomasse-énergie (Lesgourgues et Drouineau 2009). Pour ITK 3, il s'agit des itinéraires actuellement développés dans la région Sud-Ouest.

Les simulations pour chaque itinéraire sont donc réalisées sur le même site d'un point de vue climatique et d'un point de vue carbone initial du sol, mais le statut hydrique du sol diffère entre le site d'*Eucalyptus* qui est calé sur le sol observé à Montbartier et les deux sites de pins en partant du calage établi précédemment.

6.5.4 Résultats

Les résultats présentés ci-dessous relèvent d'une synthèse des simulations opérées avec le modèle Graeco+. Les annotations 1985, 2035, 2085 correspondent au climat moyen des périodes 1970-2000, 2020-2050 et 2070-2011 respectivement.

i. Productivité

1- En climat actuel, l'évolution de l'incrément en biomasse aérienne (*Ag Inc*) au cours des périodes trentenaires souligne la forte productivité des *Eucalyptus* avec une valeur atteinte de 410 t $_{DM}$ ha^{-1} au terme de trois rotations successives (Figure 6.11). Pour les deux itinéraires de Pins, la production en biomasse aérienne atteint 108 t $_{DM}$ ha^{-1} après deux rotations successives contre un Ag Inc de 95 t $_{DM}$ ha^{-1} pour la simulation de Pins sur une rotation unique de 30 ans, mais ce chiffre ne tient pas compte de la biomasse aérienne exportée lors de l'éclaircie à 18 ans et qui s'élève à 21 t $_{DM}$ ha^{-1}. Pour la partie souterraine, l'écart entre les *Eucalyptus* et les Pins est réduit par rapport à celui observé sur la partie aérienne. Les racines d'*Eucalyptus* croissent fortement en première rotation et leur taux de croissance diminue en deuxième et surtout en troisième rotation. Cette partie souterraine a un âge réel de 30 ans en fin de rotation, ce qui explique son accroissement discontinu avec une mortalité accrue en début de 2ème et 3ème rotation, à chaque recépée. Pour les pins, l'accumulation se fait de façon continue dans le cas ITK Pin-30 ans avec une réduction au moment de l'éclaircie. Cette croissance a tendance à saturer en fin de rotation. Le cumul pour l'ITK Pin-15 ans rejoint celui pour l'*Eucalyptus* avec un renouvellement complet des racines en début de deuxième rotation. Les différences en productivité aérienne se retrouvent directement dans l'évolution du LAI, avec un fort LAI maintenu lors des trois rotations d'*Eucalyptus*. Le LAI atteint pour les deux options sylvicoles du pin aboutit aux mêmes valeurs d'un scénario à l'autre.

2- D'une période climatique à l'autre, les trois options réagissent inégalement au scénario climatique considéré (Figure 6.11). Le climat intermédiaire 2035 semble favorable aux *Eucalyptus* qui présentent un accroissement positif de *Ag Inc* de +4% alors que pour les deux options de Pins, celui-ci est réduit de -11% et -21% pour l'ITK Pin-30 ans et l'ITK Pin-15 ans respectivement. Dans les trois cas, nous notons une allocation plus importante à la partie souterraine en climat intermédiaire 2035 qu'en climat de référence 1985. En 2085, l'Ag Inc des trois essences est fortement réduit, mais celui des *Eucalyptus* est moins sensible avec une réduction de 31% par apport à 1985 contre 61% pour les deux options de Pins. Si le LAI des *Eucalyptus* maintient des valeurs élevées suivant les périodes climatiques, la première rotation de l'itinéraire *Eucalyptus* semble plus affectée (réduction nette de 50% entre 1985 et 2085) que les deuxième et troisième rotations (réduction nette de 7%). Notons que le LAI maximal est atteint plus tôt avec une saturation sur les trois dernières années du cycle en climat intermédiaire 2035 puis en climat lointain 2085, avec une réduction visible en rotation 1. L'évolution du LAI chez les Pins est plus lente et sa réduction en fin de cycle atteint également 50%.

Les coupes dans le cas de l'*Eucalyptus* et de l'ITK Pin-15 ans ont tendance à redynamiser la croissance des deux essences tout en étant fortement impactées par le climat changeant. Quant aux effets de l'éclaircie à 18 ans sur la croissance en biomasse pour l'ITK Pin-30 ans, ceux-ci deviennent négligeables sur la production aérienne et le développement du LAI en climat fortement contraignant de 2085.

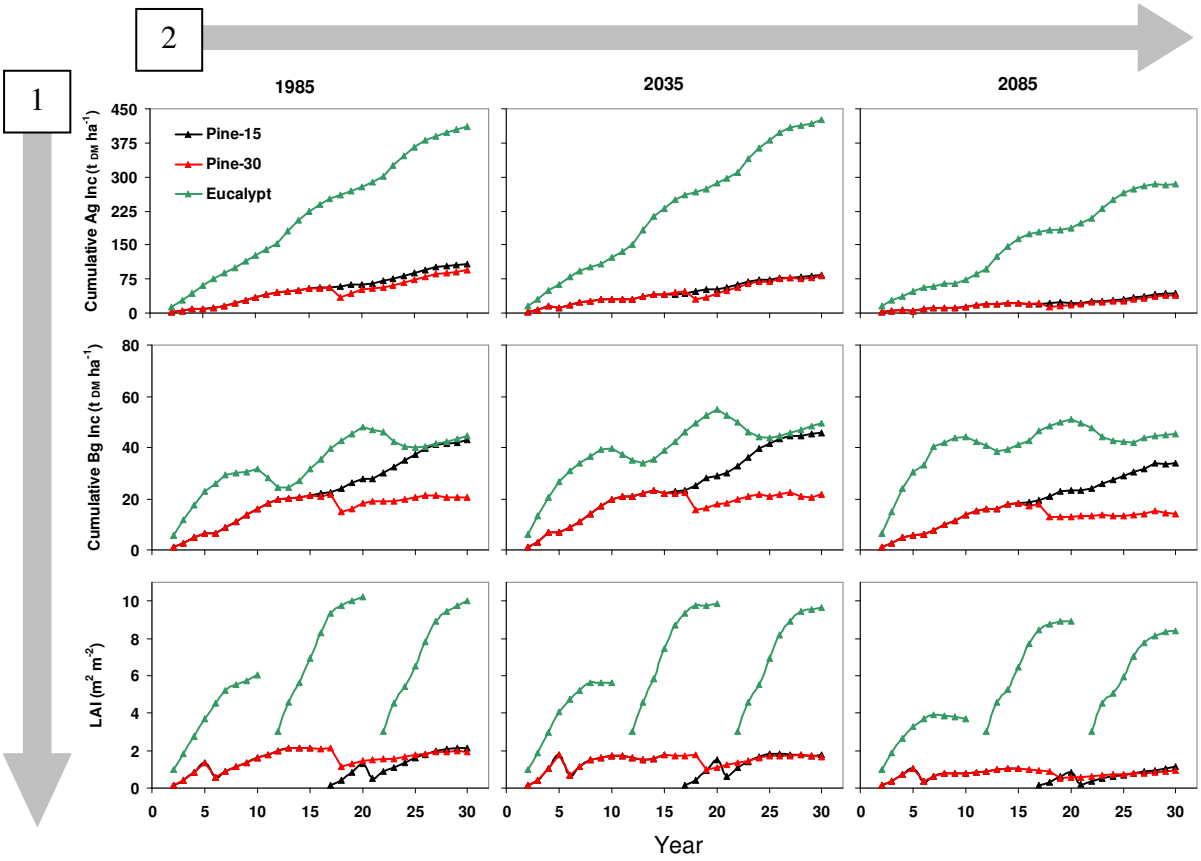


Figure 6. 11 Evolution du cumul de l'incrément en biomasse des parties aériennes et souterraines et du LAI pour les arbres des trois options sylvicoles (taillis d'*Eucalyptus* 10 ans, et rotations de Pin 15 et 30 ans) et pour trois périodes climatiques (Site de Bilos) (Entre 0 et 15 ans, les deux simulations Pin-15 et Pin-30 sont confondues).

ii. Bilans hydrique et carboné des trois itinéraires sylvicoles

- Changements du stock de carbone dans le sol entre fin et début de cycle (Figure 6.12)

L'itinéraire considéré pour l'*Eucalyptus* ne comporte aucune intervention sur le sol, les variations simulées par Graeco+ correspondent donc aux variations naturelles du stock de carbone dans le sol entre le début de la rotation et la fin de la rotation et aux effets du climat sur ces stocks. En 1985 et 2035, l'itinéraire *Eucalyptus* accumule du carbone à un taux annuel de 69 gC m^{-2} an^{-1} dû à une accumulation majoritaire dans la partie matière organique résistante. L'effet d'un changement climatique sur le carbone du sol n'est pas clairement notable sur cet itinéraire, seule la diminution du compartiment RPM de 8% est visible en 2085, expliquée probablement par la baisse de production en

biomasse et la diminution corrélative des retours de litière aérienne et racinaire comme nous l'avons vu précédemment (Figure 6.11). De manière générale, son sol demeure stabilisé. Dans le cas des itinéraires Pin-15 ans et Pin-30 ans, la dynamique du sol est fortement impactée par les interventions sylvicoles (labour et rouleau lourd) pratiquées de façon répétée, et plus fréquemment sur l'ITK Pin-15 ans. Le compartiment de carbone humifié du sol (HUM) est très affecté par l'accroissement du taux de décomposition et de minéralisation par les interventions, si bien que les deux itinéraires déstockent du carbone. Les apports de matières organiques ne sont pas suffisants pour compenser la perte en carbone par effet labour. Les compartiments DPM et BIO perdent constamment du carbone entre le début du cycle et la fin du cycle, mais le travail du sol et l'impact du climat changeant ne contribuent pas à modifier ces vitesses de décompositions.

- Flux de carbone (Figure 6.13)

Les fortes valeurs de *GPP* rencontrées sur le site d'*Eucalyptus* témoignent de la forte productivité de cette essence sous tout type de climat en accord avec les fortes valeurs de LAI estimées sur ce site. Au cours des trois périodes climatiques, l'itinéraire *Eucalyptus*, en l'absence de perturbations du sol, représente un puits de carbone conséquent, permettant la séquestration de 965 gC m^{-2} an^{-1} en moyenne et ce essentiellement dans la biomasse aérienne. Pour un *NEE* moyen de -76 gC m^{-2} an^{-1}, les deux itinéraires de Pins sont également un puits de carbone moyen sur les trois périodes. Sur un cycle de 30 ans, cette valeur semble relativement faible et s'explique par les perturbations successives du sol et une respiration hétérotrophe importante de 696 gC m^{-2} an^{-1} et 700 gC m^{-2} an^{-1} pour un *GPP* des arbres de 841 gC m^{-2} an^{-1} et 964 gC m^{-2} an^{-1} respectivement sur l'ITK Pin-15 ans et l'ITK Pin-30 ans.

En étudiant séparément les trois périodes climatiques, il apparait clairement un effet climatique sur l'évolution de ces variables. Ainsi, la seconde période climatique 2035 semble être favorable aux trois essences en termes de fixation de carbone puisque *GPP* augmente de 10% chez *Eucalyptus* et de 6% et 2 % pour les itinéraires Pin-15ans et Pin-30 ans respectivement. Cependant, en 2085, malgré l'augmentation continuelle de la concentration en CO_2, la diminution des précipitations et l'augmentation de température défavorables au fonctionnement des essences expliquent la réduction de *GPP* de -15% dans le cas de l'*Eucalyptus* et de -38% pour les deux itinéraires de Pins. La respiration hétérotrophe constitue une contribution importante aux échanges de carbone dans l'écosystème. Elle traduit également ces conséquences du scénario A2 en 2085 par une réduction de près de 10% pour les itinéraires de Pins, alors qu'elle se maintient pour le site *Eucalyptus*. Cette réduction peut être attribuée à deux causes indépendantes, l'aggravation du déficit en eau du sol qui inhibe la décomposition de la matière organique du sol et, surtout, la réduction des apports de carbone organique au sol induite par la diminution drastique de productivité primaire. Ces deux effets contre balancent celui de l'augmentation de la température du sol.

L'impact du scénario climatique et sylvicole envisagé favorise la dynamique de croissance du sous-bois. En effet, dans un itinéraire où le sous-bois n'est plus contrôlé après 6 ans (cas de l'ITK Pin-15 ans et ITK Pin-30 ans), celui-ci bénéficie de l'augmentation du rayonnement transmis provoqué par la réduction de l'indice foliaire des pins pour accroître sa fixation de carbone entre les trois périodes

climatiques. Finalement, notons qu'en 2085, le schéma sylvicole Pins-15 ans devient source de carbone (+17 gC m^{-2}) et le cas Pins-30 ans est proche de la neutralité.

- Flux hydriques (Figure 6.14)

Les trois itinéraires présentent des variations inter-périodes climatiques différentes dans l'évolution des composantes du bilan hydrique (Figure 6.14). Ainsi, le fort LAI des *Eucalyptus* augmente l'interception des précipitations par cette essence par rapport aux ITK des Pins, laquelle diminue logiquement avec une réduction du LAI en 2085. La dynamique est similaire pour les deux itinéraires de pins, mais pour un plus faible LAI que le cas *Eucalyptus*, l'interception est plus faible. Par ailleurs, la transpiration des *Eucalyptus* se maintient à des valeurs élevées au cours des trois périodes, et la diminution d'apport d'eau par précipitations n'affecte la transpiration des *Eucalyptus* que très faiblement (réduction de 4% entre 2035 et 2085), son effet portant surtout sur le drainage profond qui est réduit de presque moitié en 2085. Il est manifeste que les *Eucalyptus* maintiennent un taux de transpiration élevé malgré l'assèchement du climat ce qui s'explique aussi par le paramétrage différent du sol sous *Eucalyptus* avec une réserve plus forte que les pins. En contre partie, le drainage profond ou le ruissellement est réduit de 48% parallèlement à un assèchement du sol. Chez les Pins, la réduction de l'évapotranspiration des pins s'élève à 35% pour les deux itinéraires entre 2035 et 2085, avec une diminution combinée de l'interception par la chute du LAI et de la transpiration des pins. Le drainage est affecté dans une moindre mesure avec une réduction de 27% entre 2035 et 2085. La partie sous-bois des itinéraires de Pins est plus stable. La plausibilité de ces résultats au vu de la rareté des données connues est impossible à tester et à évaluer plus quantitativement. Ces projections se rapprochent cependant des dires d'experts concernant le comportement de ces essences, avec une régulation homéostatique importante chez le Pin maritime et un comportement hydrique très consommateur d'eau chez l'*Eucalyptus*. C'est dans l'allocation au feuillage que se fait la différence prédite par Graeco puisque le fonctionnement stomatique lui-même n'est guère différent entre les deux espèces. L'indice foliaire, facteur clé du fonctionnement hydrique du couvert (Granier et al. 2000) présente par contre une dynamique très accentuée chez l'*Eucalyptus* comparativement au Pin (Chapitre 4).

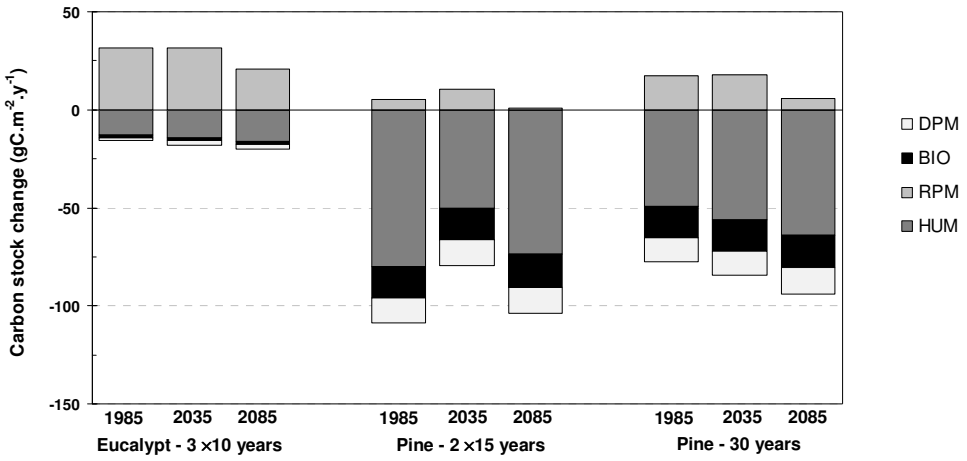


Figure 6. 12 Variations moyennes annuelles des stocks de carbone des compartiments du sol pour trois options sylvicoles (taillis d'*Eucalyptus* 10 ans, et rotations de Pin 15 et 30 ans) et pour trois périodes climatiques (Scénario A2). Un accroissement est compté positivement.

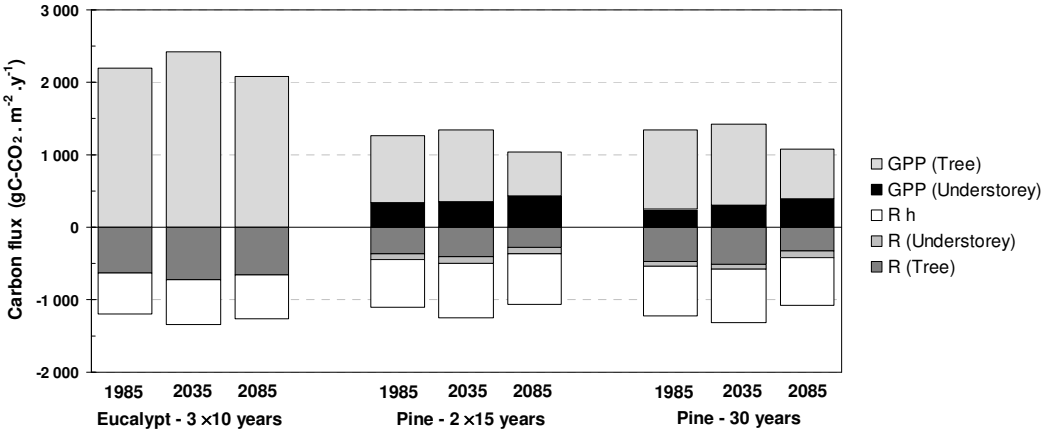


Figure 6. 13 Valeurs moyennes annuelles des flux de C-CO_2 simulés pour les trois options sylvicoles (taillis d'Eucalyptus 10 ans, et rotations de Pin 15 et 30 ans) et pour trois périodes climatiques. Les flux descendants (assimilation) sont comptés positivement.

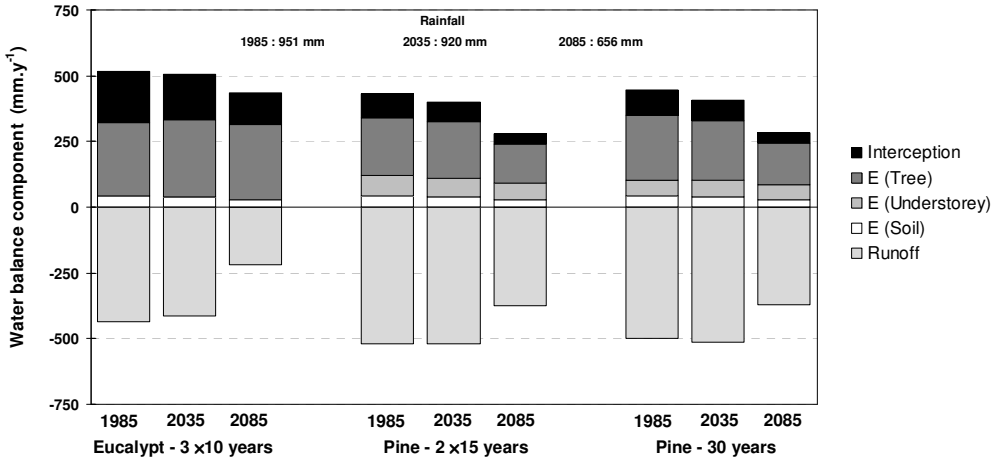


Figure 6. 14 Valeurs moyennes annuelles des flux hydriques simulés pour les trois options sylvicoles (taillis d'*Eucalyptus* 10 ans et rotations de Pin 15 et 30 ans) et pour trois périodes climatiques.

6.6 Discussion générale

L'exercice de simulation proposé s'inscrit dans une volonté de tester la capacité du modèle sur des cycles complets de croissance de peuplements forestiers et d'évaluer sa capacité à représenter les potentiels changements dans le fonctionnement du cycle complet de vie de ces écosystèmes en réponse à un climat modifié. Cet exercice de simulation présente un caractère purement exploratoire et s'appuie sur des hypothèses de scénario et des conditions stationnelles théoriques. Il ne représente en aucun cas des éléments permettant d'appuyer la décision opérationnelle, notamment sur l'opportunité de tels ou tels itinéraires sylvicoles.

- **Evaluation du modèle Graeco+**

La première phase de cette partie a consisté à évaluer le modèle complet sur différentes situations observées. L'ensemble des simulations sur Pins et *Eucalyptus* permet de discuter de la robustesse du modèle GRAECO nouvellement implémenté à établir le fonctionnement hydrique dans une certaine mesure et surtout le bon fonctionnement carboné de système. Nous avons notamment vérifié que la validité du modèle comportant les nouveaux modules implémentés sur un peuplement adulte de pins maritimes est inchangée. Nous vérifions ici cette propriété de robustesse (capacité du modèle à l'extrapolation) qui est confortée pour des prédictions à long terme (30 ans). Graeco+ capture correctement les trajectoires trentenaires des flux et de l'évolution temporelle des variables d'état du système considéré, incluant parmi elles de nouvelles variables clés comme la biomasse du sous-étage et le carbone du sol. La pertinence du modèle à établir le fonctionnement hydrique et carboné de peuplements de pins maritimes adultes avait déjà été évaluée et confrontée à d'autres modèles de fonctionnement biophysique tels que CASTANEA (Dufrêne et al. 2005) ou ORCHIDEE (Krinner et al. 2005). La bonne simulation des flux et des aspects croissance et productivité du peuplement adulte vérifiée ici avec un ensemble de données contraignant à long terme est encourageante. Elle témoigne de la capacité du modèle à rendre compte non seulement des variations climatiques temporelles, de la croissance et du développement des deux strates de végétation mais aussi des effets des interventions et opérations sylvicoles. Nous avons ainsi pu accroître sensiblement la capacité à modéliser des processus biophysiques déjà bien simulés dans les précédents travaux (Porté 1999, Loustau et al. 2005, Ciais et al. 2010, Brisson et al. 2010). Par ailleurs, une analyse de sensibilité du modèle GRAECO aux conditions environnementales et aux paramètres écophysiologiques avait également permis de mettre en avant l'importance de la paramétrisation initiale du modèle (Pluviaud 2000).

L'adaptation de Graeco+ à la phase juvénile (peuplement de jeunes pins) est moins convaincante à notre sens, et bien que la trajectoire des flux de carbone soit bien restituée, il semble que le modèle de fonctionnement hydrique nécessite encore quelques ajustements. La transpiration du sous-bois et l'évaporation du sol sont en effet largement sous-estimées. Pour le

premier terme, il est probable que le paramétrage d'entrée ne permette pas un bon ajustement du LAI et par conséquent induise une certaine sous-estimation de la transpiration. Pour le second terme, sa sous-estimation témoigne directement d'un biais non négligeable dans la représentation des propriétés de surface en couvert ouvert. Dans la version précédente du modèle GRAECO, les processus turbulents (profil de vent et conductance aérodynamique) sont décrits de manière très simplifiés. Ils permettent par la suite de calculer une évapotranspiration à l'échelle de l'écosystème, en passant par la détermination de chaque composante du bilan hydrique du continuum sol-plante-atmosphère. L'approche monocouche type grosse feuille adopté dans le modèle GRAECO justifiait donc raisonnablement les approximations établies pour décrire les processus turbulents dans les différentes strates du modèle (sous couvert, sous le sous-bois et en surface) dans une structure horizontale homogène telle que rencontrée en peuplement à couvert fermé (Exemple du Bray ou de l'itinéraire *Eucalyptus*). On retrouve cependant dans le code un certain nombre de relations semi-empiriques, basées sur l'ensemble des expérimentations menées sur ce site qui pourrait être complètement inapproprié en couvert dispersé et fragmenté. Nous considérons que ce paramétrage était donc bien adapté pour une structure à double strate superposée (couvert de pins+sous-bois) où le microclimat de chaque strate était défini également de façon empirique à partir des mesures recueillies sur le site du Bray. L'approche pour le calcul de l'évapotranspiration est donc basée sur la formulation de Penman-Monteith. Cette dernière assimile le couvert à une grosse feuille qui transpire et évapore un niveau fictif ($d + z_o$), ce qui est adapté pour une végétation uniforme et couvrante. Cette hypothèse doit être remise en question dans un couvert en rang en raison de l'hétérogénéité de la pénétration du rayonnement de courte longueur d'onde et de la turbulence au sein des différentes couches. Pour les jeunes peuplements, assimilés à un couvert en rang pendant ses 7 premières années de croissance environ, le formalisme adopté jusqu'alors dans le modèle Graeco et réutilisé ici avec Graeco+, nécessitera donc une adaptation basée sur le critère de structure. Des approches telles que développées par Shuttleworth et Wallace (1985) et reprise dans plusieurs travaux (Brenner & Incoll. 1997, Villagarcia et al. 2007) ont été considérées pour calculer l'évaporation au niveau de la surface. La méthode consisterait à distinguer les fractions de sol couverte par la végétation et celles non couvertes, qui présentent des propriétés de surface différentes et des microclimats propres. A partir de là, un modèle de conductance aérodynamique globale prenant en compte cette forme d'hétérogénéité pourrait être implémentée dans l'équation de Penman-Monteith.

Le travail du sol et l'impact sur les flux de carbone montre la capacité de GRAECO+ à prendre en compte les effets des pratiques sylvicoles. Cependant, nous avons noté la forte surestimation de la respiration hétérotrophe quasi instantanée, au moment de l'intervention qui ne semble par réaliste en termes d'échelle de temps et d'amplitude, malgré une dynamique très vraisemblable et la capacité de Graeco à rejoindre la trajectoire des flux à long terme pour suivre une dynamique cohérente. Plusieurs explications doivent être proposées. Il est d'abord nécessaire de considérer que les effets du passage du rouleau landais ont probablement un effet non instantané, autrement dit que la minéralisation du carbone organique s'effectue plus lentement dans le temps. Par ailleurs, le modèle a été calé sans prendre en compte les éventuelles fuites de carbone par 'lessivage',

puisque, dans ce type de sol (podzol), une partie du carbone et même des minéraux peut se retrouver sous forme soluble (Trichet et al. 1999, Jolivet 2000), ce qui peut directement expliquer la surestimation de R_h. L'effet mécanique de la coupe rase, dans un premier temps, puis la succession du travail du sol ont un impact important sur la minéralisation des stocks de matières organiques (Richer de Forges 1998, Jolivet 2000). Une partie de la matière organique humifiée se minéralise, ce qui entraîne une diminution progressive de ce compartiment. Cependant, les trois passages du rouleau landais permettent un apport de matières organiques dans les horizons de surface par mélange des horizons OF, des résidus de la végétation du sous-bois et réalimente le compartiment HUM. Les travaux de Balesdent et al. (2000) démontrent que le labour joue un rôle principal dans la 'déprotection' de la matière organique présente dans les macro-aggrégats. En forêts tempérées, Arrouays et Pélissier (1994) montrent que dans le cas d'un déboisement, entre 40 et 50% du carbone du sol est perdu en l'espace de quelques décennies, dont la moitié se produit en moins de 5 ans. Nous n'avons pas implémenté l'effet de déstructuration du sol et de modification de son profil organique par les opérations de travail du sol. Ceci restera à développer afin de tester correctement la fonctionnalité de Roth-C.

A ce stade, la conservation des paramètres écophysiologiques d'entrée du modèle pour le calcul de la transpiration des pins ou de l'assimilation entre peuplements adultes et jeunes a permis une bonne estimation du comportement des pins. Mais des effets d'âge du peuplement et structure du couvert pourraient aussi être envisagés dans l'implémentation de Graeco+, comme il a été décrit dans le chapitre précédent.

- **Itinéraires techniques complets et scénario climatique : impact sur les échanges de carbone et d'eau**

Le scénario climatique A2 présente une rupture importante entre 2035 et 2085, notamment en termes de précipitations, vecteurs des échanges hydriques des écosystèmes forestiers. Le point choisi dans la région Sud-Ouest (Bordeaux) présente donc une réduction de 31% entre 1985 et 2085, ce qui correspond à l'une des plus fortes réductions vis-à-vis des autres régions de France (Déqué et Cloppet 2010). Par ailleurs, la température projetée par ce scénario atteint 4.8°C et une concentration en CO_2 atmosphérique de 750 ppm d'ici 2099. Une élévation de la concentration en CO_2 a montré des effets bénéfiques sur les plantes, suivant de nombreuses études (e.g. Gielen et Celeumans 2001, Norby et al. 2005). Medlyn et al. (1999) montrent une augmentation de la photosynthèse pouvant atteindre 50% entre un environnement à 380 ppm et un environnement à 550 ppm, ce qui corrobore les estimations de Graeco+ en 2035 par rapport à 1985 et ce pour les trois itinéraires après augmentation du CO_2 de 344 à 463 ppm. Mais l'impact d'un scénario climatique complet ne traduit par forcément une augmentation en proportion de la productivité (*NPP*) dans la mesure où la respiration autotrophe (R_a) peut aussi augmenter (Loustau et al. 2005). Nos projections aboutissent au même résultat et, dans notre cas, *NPP* augmente de 10%, et donc moins que *GPP* pour les trois options sylvicoles en 2035. Cette augmentation de *NPP* a été estimée à 23% pour différents écosystèmes forestiers, peu après une augmentation forcée de [CO_2] en chambre fermée pour l'expérimentation FACE (Norby et al. 2005).

La plus faible réponse de productivité que nous obtenons s'explique par d'autres facteurs limitants, la ressource en eau dans notre cas. Les échanges nets de carbone de l'écosystème diminuent au cours des trois périodes climatiques pour les itinéraires de pins et traduisent directement l'augmentation de R_h dû à l'intensification des pratiques sur ces itinéraires. Ceci est moins le cas pour l'*Eucalyptus* dont *NEE* augmente en 2035 dû à une plus faible augmentation de R_h par l'absence de pratique sylvicole. Nous reviendrons sur cet aspect plus loin. A de telles concentrations, les plantes C3 ne sont pas à saturation en CO_2, si bien que l'activité de stockage de carbone (dans la partie aérienne et/ou souterraine) est stimulée. A plus long terme (2085), la réponse de *GPP* devient négative en réponse notamment à une diminution importante du LAI. Des rétroactions à la fois biochimiques, morphologiques et physiologiques peuvent alors limiter les bénéfices d'une fertilisation en CO_2. A l'augmentation de [CO_2] se combine une augmentation de la température. Si Körner (2006) montre que pour une température augmentant entre 1 et 3°C, *GPP* ne devrait pas être affectée, une augmentation de près de 5°C dans notre cas pourrait potentiellement avoir un effet négatif sur la production primaire brute avec un dépassement de la température optimale pour la photosynthèse, ce qui expliquerait la réduction de *GPP* en 2085 avec une réduction du LAI.

Parallèlement, il est montré que cette augmentation de la concentration tend à diminuer la conductance stomatique, permettant de réguler les pertes en eau par les plantes (Medlyn et al. 2001). A partir de là, on peut s'attendre à une augmentation de l'efficience d'utilisation en eau (WUE) par les arbres (Medlyn et al. 2011), ce qui a déjà été mis en avant dans les travaux de modélisation de Davi et al. (2006b). Dans notre cas, nous n'avons pas implémenté d'effet du CO_2 sur la conductance stomatique, inexistant pour le Pin maritime et par manque de donnée pour l'*Eucalyptus*. La diminution de la consommation en eau par les pins et les *Eucalyptus*, due à une régulation stomatique et à la chute du LAI, est bien visible dès 2035 (résultats non montrés) entraînant une augmentation de *WUE* de 10% et de 5% respectivement entre 1985 et 2035 (WUE présentée comme le rapport *GPP* / *E* (arbre), non montrée). En revanche, le climat de 2085 impacte négativement cette efficience plus particulièrement dans l'itinéraire *Eucalyptus* pour lequel la transpiration des arbres est maintenue, alors que *GPP* diminue fortement. Finalement, les effets des sécheresses accrues en 2085 sur la dynamique des flux d'eau et de carbone sont en accord avec les résultats présentés par le projet CLIMATOR à l'échelle du Sud-Ouest (Brisson et al. 2010) pour lesquels les sécheresses édaphiques et atmosphériques sont considérées comme les contraintes majeures.

- **Itinéraires techniques complets et scénario climatique : impact des pratiques sylvicoles**

Une augmentation de température peut accroître l'activité microbienne en accélérant le taux de décomposition de la matière organique du sol. Ceci est d'autant plus vrai dans des peuplements jeunes où la pénétration du rayonnement dans les inter-rangs augmente très probablement la température de surface et du sol (Chapitre 2). Ainsi, Pregitzer et Euskirchen (2004) montrent non seulement une augmentation de la respiration hétérotrophe après une perturbation mais également que celle-ci est d'autant plus importante dans la classe d'âge 0-10 ans de forêts tempérées. A l'inverse, l'augmentation de la croissance des plantes liée à l'augmentation de température peut contre-balancer l'augmentation

de la perte en carbone du sol (Medlyn et al. 2000). Cependant, tel que nous l'observons à travers cet exercice de simulation, cet effet pourrait être limité par un travail du sol à répétition pour des durées de rotations courtes (cas des peuplements de Pins). Combinés à l'effet climatique, nous avons vu que le labour, qui vise à aérer le sol et à lutter contre les adventices ou les travaux de dessouchages, stimulent la minéralisation de la matière organique par les micro-organismes du sol. Plusieurs études de modélisation ont été entreprises pour rendre compte des effets de la gestion sylvicole sur les bilans de carbone globaux des écosystèmes (Thornton et al. 2002, Liu et al. 2011). Plus qu'un exercice de simulation comme nous venons de le proposer, de récents travaux estimant le bilan en gaz à effet de serre d'un système de taillis à courte révolution de peuplier à l'échelle européenne a été entrepris (Liberloo et al. 2010). Cette étude utilise le modèle global de fonctionnement de la végétation {ORCHIDEE} couplé à un module de gestion forestière {FM} (Bellassen et al. 2010, 2011). Ces auteurs stipulent une augmentation de la production énergétique sous un climat enrichi en CO_2, notamment en passant d'un cycle de révolution de 3 ans à 2 ans. Les auteurs précisent cependant que leurs projections sur les changements de carbone dans le sol sont limitées en termes de valeur absolue et de dynamique temporelle et ne sont donc pas pris en compte dans le calcul du bilan net des gaz à effet de serre durant le cycle de vie complet de la révolution.

6.7 Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de tester la nouvelle implémentation du modèle Graeco comprenant un module de croissance du sous-bois et un travail du sol, avec un bilan de carbone complet du sol et de proposer un calage du paramétrage d'entrée cohérent pour, à terme, simuler la réponse de différents itinéraires techniques à des contraintes climatiques et des pratiques sylvicoles. Nous avons vérifié la capacité de Graeco à simuler la dynamique des flux d'échanges d'énergie et de masse en peuplement adulte et à prendre en compte les effets climatiques sur ces flux. Dans un second temps, nous avons testé le modèle Graeco avec un calage adapté des paramètres d'entrée sur le site de Bilos dans un contexte dominé par les opérations de travail du sol puis par l'installation et la croissance d'un semis de pins maritimes et de la végétation adventice. Enfin, nous avons testé le modèle sur une nouvelle espèce, un taillis d'*Eucalyptus*. Les résultats encourageants de ces tests sur les différentes structures de peuplements proposés montrent encore quelques limites notamment à prendre en compte les effets de structure des jeunes peuplements à travers l'estimation de la composante hydrique (cas des jeunes pins), émanant très probablement d'une mauvaise estimation de l'évaporation du sol, et éventuellement du sous-étage. A ce stade, nous n'avons pas proposé d'analyse de sensibilité du modèle ni d'analyse d'incertitude, conscients donc du caractère d'une utilisation du modèle à titre strictement exploratoire. Pour ce que nous voulions rendre compte, l'exercice proposé reste encourageant et les simulations futures restent cohérentes avec les travaux existants.

Les améliorations apportées au modèle permettent de le rendre apte à simuler de façon vraisemblable les trajectoires à long terme (30 ans) des flux d'énergie, d'eau et de carbone ainsi que de

l'évolution temporelle des stocks de principaux compartiments du cycle biogéochimique du carbone : les compartiments de biomasse aériens et souterrains des arbres et de la végétation du sous-étage et la dynamique des pools de carbone organique du sol. Ces performances ont été vérifiées pour un petit nombre de situations, trois stations forestières du Sud Ouest, suivant trois expériences d'évaluation. Ce test était cependant contraignant puisque, aussi bien une situation de sol nu recolonisé puis labouré, que celle d'une futaie fermée subissant éclaircies, débroussaillages et chablis ou encore un taillis à croissance rapide, ont pu être évaluées. Ce modèle et ces concepts nous semblent pouvoir maintenant être testé à plus large échelle et sur d'autres espèces. Malgré une complexité accrue, nous avons aussi vérifié que le modèle Graeco+ proposé conserve bien la faculté de se projeter de façon vraisemblable sur des scénarios à long terme et sur des bases de données spatiales étendues. Nous donnerons en conclusion les perspectives liées à ce travail de modélisation.

Chapitre 7

Conclusion générale

Plan du chapitre

Chapitre 7. Conclusion générale 211

7.1 Bilan général et apport du travail de thèse 211

7.2 Principaux résultats 212

7.3 Limites 216

7.4 Perspectives à court et long termes 218

Chapitre 7. Conclusion générale

L'objectif général de nos recherches était de mieux comprendre **le fonctionnement biophysique et biogéochimique (cycle du carbone) de peuplements forestiers à croissance rapide dans leur phase juvénile ainsi que les effets des pratiques sylvicoles et du climat sur ce fonctionnement, sur la croissance et la production de tels systèmes. Ce travail s'est effectué en parallèle du projet *Optimal* du programme *Enerbio* de la Fondation *Tuck* et s'appuyait sur l'observation de sites expérimentaux installés et développés dans le cadre du SOERE F-ORE-T et du projet européen GHG-Europe. Nous avons développé une approche expérimentale et d'observation** et une approche de **modélisation**. L'introduction envisagée d'une nouvelle espèce exotique, l'*Eucalyptus*, dans le contexte français, et plus précisément le Sud-Ouest impliquait d'en étudier la productivité et les performances de croissances dans le cadre de notre travail. Nous avons pris en compte ce contexte en analysant son fonctionnement en termes d'échanges hydriques et de productivité et en le confrontant à l'espèce indigène de référence, le Pin maritime.

7.1 Bilan général et apport du travail de thèse

Dans un premier temps, nous avons caractérisé les échanges d'énergie et de masse de couverts de Pins maritime et d'*Eucalyptus* au stade juvénile, présentant une variété de **structures et au cours d'une période de deux années caractérisées par plusieurs épisodes de sécheresse consécutifs** (Chapitres 3, 4). Cette partie de nos recherches à caractère expérimental et d'observation prolongeait un suivi commencé en 1987 qui s'était consacré aux peuplements adultes quasi exclusivement. Il avait permis de suivre de façon quasi continue les échanges d'énergie, d'eau et de CO_2 avec l'atmosphère et les variables auxiliaires associées (structure du couvert, croissance, indice foliaire, eau du sol, etc.) documentant ainsi de façon très précise tous les aspects biophysiques liés au système sol-végétation-atmosphère et permettant de renseigner les modèles de fonctionnement biophysique. Ces recherches avaient plus spécifiquement permis de développer le modèle de fonctionnement monodimensionnel à trois strates (arbre/sous-bois/sol) GRAECO, bien adapté à un peuplement adulte équien, homogène, à strates superposées, en Lande Humide.

Ce projet de **thèse sur les jeunes peuplements a permis de mieux renseigner le fonctionnement de ces stades juvéniles en taillis ou futaie, de compléter les modèles existants et de les faire évoluer vers une utilisation plus générique** (Chapitres 5, 6). Nos travaux ont nécessité la caractérisation de ces échanges pour **deux essences forestières destinées à la production intensive de biomasse et pour la végétation accompagnatrice** (Chapitres 4,5 et 6). Ils ont mis en évidence le **rôle de la structure du couvert végétal et celui des pratiques sylvicoles et ont permis d'implémenter de nouveaux modules dans un modèle complet de fonctionnement et production**

basé sur les processus biophysiques et biogéochimiques, Graeco+ qui consiste en une évolution du modèle Graeco (Chapitres 5 et 6). **Son évaluation aux stades juvénile et adulte et son application à des rotations entières** ont été réalisées. Cette partie de modélisation encore exploratoire s'est révélée suffisamment robuste pour être implémentée sur des **rotations sylvicoles complètes et pour différentes tranches climatiques futures (2035 et 2085) tirées du scénario A2 régionalisé.**

7.2 Principaux résultats

- Au terme de cette étude, nous avons pu caractériser le fonctionnement de jeunes couverts forestiers où **coexistent jeunes arbres et végétation accompagnatrice**. Nous avons pu quantifier la contribution de la strate accompagnatrice aux échanges hydriques et son impact sur le partitionnement de ces échanges dans l'écosystème, point qui jusqu'à alors n'avait fait l'objet que de très peu d'études dans le contexte sylvicole landais (Kowalski et al. 2003, 2004 ; Stella et al. 2009). En comparant les comportements énergétique, hydrique et le cycle du carbone de deux jeunes peuplements de Pins maritimes à structure contrastée (Chapitre 3), **nous avons pu quantifier le rôle des adventices dans la dynamique saisonnière de ces échanges**. Ainsi, que ce soit par une sensibilité accrue à la sécheresse édaphique (parcelle de pin non débroussaillée) ou par une dynamique de recolonisation rapide d'un inter-rang ayant subi un débroussaillement (parcelle de pins débroussaillée à deux reprises à un an d'intervalle), la végétation accompagnatrice a contribué à créer des dynamiques intra-annuelles particulières des flux échangés entre les compartiments sol-végétation et atmosphère. Dans un peuplement adulte, la canopée des arbres surplombe le sous-étage et c'est le comportement des pins, à travers son **LAI**, qui conditionne l'énergie disponible au niveau du sous-bois et domine le sous-étage. Durant la phase d'installation et au stade juvénile, les deux strates sont plutôt juxtaposées et interagissent de façon « horizontale », accédant aux mêmes ressources (lumière – eau – éléments nutritifs) sans effet de dominance nette. Le LAI des deux strates régule alors ces échanges. Après intervention sur la strate accompagnatrice, la contribution de la surface de sol laissée découverte, i.e. 75 % de la surface totale de la parcelle en hiver, puis de la surface recolonisée dès le printemps, est importante et cette dynamique rapide doit être considérée dans les modèles de fonctionnement. Elle explique la tendance saisonnière de la répartition des flux énergétiques et hydrique, à travers le LAI mais également la disponibilité en eau du sol (Chapitres 3, 4). Ainsi, intuitivement, les plus faibles valeurs de l'**évapotranspiration totale** depuis la parcelle débroussaillée et dépressée ont été associées à **la réduction de la surface terrière et de l'indice foliaire** du couvert, Cependant, la réduction de la surface foliaire a accru les **apports d'énergie et d'eau, et sans doute les transferts turbulents à la surface du sol, ce qui en retour a favorisé l'évaporation de la surface du sol laissée nue après débroussaillement ainsi que celle de la végétation qui recolonise l'inter-rang**. Nous soulignons aussi le rééquilibrage des échanges de chaleur sensible et latente de la surface entre deux situations contrastées et le caractère conservatif du rayonnement net entre les deux

situations. Dans la configuration de peuplement que nous avons étudiée, la végétation accompagnatrice dominée par de l'ajonc a semblé plus sensible à la sécheresse que les pins. Ces résultats sont opposés avec les observations sur d'autres types de sous-bois, *e.g.* la strate de graminées sociales sous arbres adultes en Lande humide dont l'évapotranspiration est peu affectée par la sécheresse (Berbigier et al. 1991). Cette observation démontre l'importance de considérer la nature de la strate accompagnatrice et la structure globale du couvert pour la distribution des puits et sources de chaleur dans le couvert.

Le LAI des arbres intervient également pour expliquer les différences de comportement inter-espèces {Pin maritime *vs Eucalyptus*}, en accord avec les conclusions de Granier et al. (2000). Ces deux espèces présentent des taux de transpiration similaires exprimés par unité de surface foliaire en conditions pédoclimatiques non limitantes, et la réponse de leur conductance stomatique de couvert aux facteurs de l'environnement semble aussi assez similaire. Cependant, exprimée par unité de surface au sol, la transpiration des *Eucalyptus* est bien plus élevée que celle des Pins et cet écart est principalement sinon exclusivement imputable au fort LAI des *Eucalyptus*. Un point surprenant de l'étude est **la réponse simultanée de la transpiration des arbres à des contraintes climatiques et notamment de sécheresse** et ce malgré des différences de structures (Chapitre 3) et d'essences considérées et plus inattendu malgré les différences de situations géographiques, relativement éloignées pour une même région (Chapitre 4). Ce comportement conservatif peut s'expliquer par la sensibilité de la conductance stomatique au déficit de pression de vapeur (Roberts 2007) similaire entre les sites. Nous concluons avec Granier et al. (2000) que **les caractéristiques écophysiologiques joueraient un rôle secondaire pour expliquer les différences d'évapotranspiration observées et traduiraient même une convergence des comportements écophysiologiques et hydrauliques entre les deux espèces étudiées ici, pourtant éloignées phylogénétiquement mais proches écologiquement.**

- Nous avons vu que le déficit hydrique saisonnier affecte l'état hydrique et la transpiration des espèces considérées, pins, ajoncs, et *Eucalyptus*. Il s'ensuit une réduction saisonnière de l'assimilation carbonée (chapitre 3), telle qu'en fin de saison de croissance, les deux sites présentent un bilan de carbone comparable. Nous n'avons pas étudié le bilan de carbone dans le peuplement d'*Eucalyptus*, les résultats en termes de flux de carbone échangés concernent donc exclusivement les deux sites de Pins maritimes. **A l'échelle annuelle, la forte diminution du LAI entre les situations débroussaillée+dépressée et non traitée explique une fois de plus le stockage net réduit de 73% entre ces deux situations à l'échelle annuelle** (Moreaux et al. 2011). L'obtention des données de flux nous a permis de se replacer dans un contexte plus large. Au terme des 10 dernières années de mesures sur le site de Bilos 1 (parcelle débroussaillée et dépressée), nous avons pu compléter la chronoséquence sur ce site (Tableau 7.1 A.) et avons pu mettre en évidence le passage du site d'une source à un puits de carbone après intervention sylvicole. Après quatre saisons de croissance, l'ensemble pins et strate accompagnatrice était déjà un puits de carbone (Stella et al. 2009), mais **l'impact du débroussaillement de fin 2008 a ramené le bilan à la quasi neutralité** (à 6 ans, au

31/12/2009, NEE = -50 gC m^{-2}). Nous interprétons cette évolution par l'effet de l'augmentation de la respiration hétérotrophe liée à la décomposition des rémanents et l'activation de la minéralisation de la matière organique du sol sous l'effet du travail superficiel du sol. Sans intervention sylvicole, au même âge, les valeurs de *NEE* sur le site non débroussaillé s'élevaient à -372 gC m^{-2}. Ce site est redevenu rapidement un puits de carbone (NEE=-307gC m^{-2}) par une augmentation de la production primaire brute et une réduction de la respiration hétérotrophe.

Tableau 7.1. Synthèse générale. Estimation des flux de carbone sur les deux sites de pins maritimes.

A. Parcelle Bilos 1 avec interventions sylvicoles

Années (01/01 - 31/12)	**Stade sylvicole (âge en années)**	**NEE gC m^{-2}**	**GPP gC m^{-2}**	**R_E gC m^{-2}**	**Références**
2001	0	+177	602	763	Kowalski et al. 2004
2004	semis	+295	-	-	Burlett, non publié
2007	4	-335	1950	1615	Stella et al. 2009
2008	5	-185 *	688 *	503 *	Bonnefond, non publié
2009	6	-50	904	854	Cette étude
2010	7	-307	1044	737	Cette étude

* du 01/01/2008 au 30/06/2008

B. Parcelle Bilos 2 sans intervention

Années (01/01 - 31/12)	**Stade sylvicole (âge en années)**	**NEE gC m^{-2}**	**GPP gC m^{-2}**	**R_E gC m^{-2}**	**Références**
2009	5	-255*	1210*	955*	Cette étude
2010	6	-372	1306	934	Cette étude

* du 30/04/2009 au 31/12/2009

Le second débroussaillement opéré fin 2009 n'a pas eu la même intensité sur les flux respiratoires, et le climat favorable du printemps 2010 a favorisé la croissance de la végétation adventice et des pins. La durée entre deux interventions et leur intensité respective justifient alors l'approche utilisée pour modéliser le travail du sol en fonction de la succession des interventions (Chapitre 5).

Le suivi dendrométrique a permis de quantifier clairement l'impact d'un débroussaillement et d'un dépressage sur la croissance en diamètre des arbres (chapitre 3, 4). **Les pins en peuplement mélangé avec les ajoncs et à forte densité ont eu une croissante nettement réduite**. Il a été surprenant de voir que le site d'*Eucalyptus* et le site de Pins débroussaillé ont atteint **une croissance similaire en diamètre à la fin de notre étude** (mi-2011), malgré une dynamique intra-annuelle distincte. Si les deux espèces allouent similairement aux racines, les relations allométriques diffèrent fortement entre les deux espèces avec une plus forte allocation aux parties foliaires dans le cas de l'*Eucalyptus*. La productivité des *Eucalyptus* est accrue dans la mesure où sa croissance est quasi continue dans l'année, avec un pic au printemps, puis à l'automne et une courte période de repos (2 mois dans notre cas suivant les contraintes environnementales). En terme de traits fonctionnels, ici le seul pour lequel nous ayons pu trouver une différence significative étant la surface massique spécifique (SLA), les plus fortes valeurs obtenues pour l'*Eucalyptus* (Nguyen The et Gueudet, *comm. pers.*) lui permettent une absorption du PAR et une fixation de carbone plus importante. **La forte**

productivité des *Eucalyptus* est associée à une forte consommation en eau avec une contribution des arbres de 75% et une évapotranspiration totale qui excède les précipitations annuelles, provoquant un déficit hydrique marqué du sol (20-130 cm). Sa capacité à réguler la transpiration à la fois par fermeture stomatique en réponse au déficit hydrique de l'air constitue une stratégie d'évitement à la sécheresse comparable au Pin maritime. Mais sa capacité à satisfaire sa demande évaporative en développant un système racinaire en profondeur contribue au maintien d'une productivité supérieure, résultats qui convergent fonctionnellement vers le genre *Eucalyptus*. Nous avons cependant soulevé, qu'à plus long terme, le potentiel de productivité et finalement de rentabilité d'*E. gunnii* × *dalrympleana* pourrait être réduit de manière significative en région Sud-Ouest, au moins dans la mesure où celle-ci est exposée à une augmentation de la durée et de l'intensité des sécheresses estivales au cours des prochaines décennies. Le travail de modélisation engagé sur cette espèce a d'ailleurs permis d'en rendre compte.

- Notre travail de modélisation de caractère exploratoire a permis de rendre compte de ces différences de productivité observées entre *Eucalyptus* et Pin maritime. Nous avons, **dans un premier temps**, dû adapter le modèle Graeco de manière à prendre en compte les jeunes peuplements, en interaction avec ou sans sous-bois et perturbé par un travail du sol à répétition. **L'intégration du module Roth-C dans le modèle Graeco et la représentation des effets des opérations culturales ont donné des résultats prometteurs et encourageants.** Cette approche s'est appuyée sur les données disponibles en forêts de Pin maritime et nous a semblée assez robuste pour diagnostiquer les effets des pratiques sur ce type de sol, en capturant les tendances d'évolution à long terme observées à la suite de ces interventions forestières courantes. Ce schéma a donc pu être intégré pour une simulation du cycle du carbone et de la croissance sur des révolutions complètes. Nous **avons aussi intégré un module de croissance du sous-bois qui s'est révélé assez complet, malgré sa simplicité, pour pouvoir rendre compte des interactions entre les arbres et la végétation adventice pour le transfert radiatif de courte longueur d'onde, le cycle du carbone et le bilan hydrique**. La dynamique de croissance des espèces de sous-bois est importante en peuplement forestier (Yauschew-Raguenes 2012) et elle varie suivant le cycle phénologique des espèces considérées. **Le module intégré a été conçu pour décrire une vaste gamme de situations sur peuplements jeunes ou adultes**. Nous avons vu que le sous-bois a une dynamique de recolonisation rapide après une intervention, même si la biomasse produite est inférieure à la situation avant intervention et nous avons pu en rendre compte par l'introduction dans le modèle des réserves (pool de sucres) conférant la possibilité de recoloniser l'inter-rang.

La caractéristique des jeunes peuplements est sans doute l'hétérogénéité horizontale de la végétation. Elle se manifeste par la coexistence de plusieurs espèces et la présence de sol nu. Le choix d'une approche combinant le modèle 3D Maestra et le modèle 1D Graeco nous a paru pertinent pour relier les processus foliaires au couvert par une intégration mécaniste rendant compte des effets de structure en 3D, sur des variables analogues en 1D implémentées dans le modèle Graeco. **Cette étude s'est révélée assez cohérente pour simuler les transferts radiatifs de courte longueur d'onde et l'assimilation du couvert dans différentes structures**. En revanche, elle a aussi révélé des

incohérences sur la modélisation du bilan d'énergie et de la transpiration du couvert qui pourraient être en partie liées à un défaut de représentation des échanges radiatifs de grande longueur d'onde. Si cette étape du travail s'est révélée plus ardue que prévue, elle a permis de confirmer que l'approche Maestra se prête bien à la détermination des paramètres 1D liés aux transferts radiatifs de courte longueur d'onde (***K***, *aPAR* et par conséquent *LUE*) et à l'établissement de fonctions de réponses de ces paramètres clés à la structure et à la composition du couvert. Cependant, le manque de réalisme de Maestra pour les transferts hydriques (transpiration, conductance aérodynamique et bilan d'énergie), a interdit d'utiliser l'analogue 1D de ses sorties, et imposé de conserver le formalisme initial de Graeco dans Graeco+.

Dans un second temps, nous avons testé Graeco+ puis établi son calage pour simuler la réponse de différents itinéraires techniques à des contraintes climatiques et des pratiques sylvicoles. **Nous avons vérifié la capacité de Graeco à simuler la dynamique des flux d'échanges d'énergie et de masse en peuplement adulte et à prendre en compte les effets climatiques.** Les résultats des tests sur les deux structures de peuplements proposés (Pins+sous-bois et *Eucalyptus*) se sont révélés encourageants, en particulier pour l'*Eucalyptus*, une espèce qui n'avait jusqu'alors pas été introduite dans ce modèle. **Ces améliorations ont permis de simuler de façon vraisemblable les trajectoires à long terme (30 ans) des flux d'énergie, d'eau et de carbone ainsi que de l'évolution temporelle des stocks de principaux compartiments du cycle biogéochimique du carbone : les compartiments de biomasse aériens et souterrains des arbres et de la végétation du sous-étage et la dynamique des pools de carbone organique du sol.** Ces performances ont été vérifiées pour un petit nombre de situations, trois stations forestières du Sud-Ouest, suivant trois expériences d'évaluation. L'ensemble de ce travail a donc abouti à une meilleure représentation des cycles sylvicoles complets, mais présente aussi des limites que nous proposons de développer ci-dessous.

7.3 Limites

- Le travail réalisé a été mené dans un **contexte spécifique** et, faute d'avoir encore été évalué dans d'autres conditions, les résultats qui en découlent en termes de modélisation du fonctionnement des écosystèmes forestiers à croissance rapide sont encore contingents des conditions climatiques et stationnelles de nos expérimentations. Les caractéristiques spécifiques du site de Bilos (semis à densité élevée, accompagné d'ajoncs nains et subissant deux débroussaillements successifs) justifient de poursuivre l'évaluation de Graeco+ en élargissant les situations testées en terme géographiques et climatiques en utilisant notamment les sources de données existantes (Fluxnet, Carbo-Extreme). De même, le site de Montbartier a subi des conditions climatiques particulièrement arides en 2010 et 2011 et donc peu propice à la croissance des *Eucalyptus.* A ce stade, nos conclusions doivent donc encore être restreintes au contexte météorologique des années 2010-2011 et pédoclimatique de Montbartier et de Bilos.

En revanche, nos conclusions sur le comportement écophysiologique des espèces étudiées, notamment en réponse aux contraintes environnementales et à la structure du couvert, convergent avec les connaissances actuelles sur ces espèces et revêtent donc un caractère plus générique qui confère à leur modélisation une portée plus générale.

- Les expérimentations réalisées et les résultats qu'elles ont permis d'obtenir sont sujets à une incertitude que nous avons pu appréhender et quantifier de façon plus ou moins précise. Tous les capteurs utilisés entre les trois sites étudiés ont été inter-comparés à l'exception des sondes d'humidité du sol dont l'étalonnage et la calibration sont relativement complexes. Les mesures de densité de flux de sève ont pu révéler des incertitudes importantes. En raison de leur proximité du sol, le gradient thermique naturel de capteurs est significatif et entraîne une sous-estimation de l'ordre de 10%. mais il n'a pu être considéré que pour une partie des mesures, l'année 2009, Nous confirmons donc l'hypothèse que le gradient thermique naturel amène une sous-estimation du flux de sève (Köstner et al. 1998). Dans le cas de l'*Eucalyptus*, la mesure de la proportion d'aubier n'a pu être entreprise que sur un échantillon relativement réduit et à une seule date. Elle a révélé la présence de bois de cœur qui s'est formé assez tôt (3 ans). Faute de données, nous n'avons pas considéré l'évolution dans le temps de cette proportion qui se répercuterait intégralement sur la valeur du flux de sève total de l'arbre et du peuplement.

Un point crucial est l'estimation du LAI sur le site de Montbartier (produit du SLA et de la biomasse foliaire à une densité près). Le LAI des Eucalyptus du site de Montbartier s'est révélé particulièrement élevé par rapport à ce qui est proposé dans la littérature en relation avec sa forte productivité. Les valeurs de SLA mesurées (Nguyen The et Gueudet, *comm. pers*) sont cohérentes avec la littérature (De Almeida 2003, Nzinski et al. 2008, Nouvellon et al. 2010) mais là encore, nous n'avons cependant pas tenu compte des variations saisonnières qui pourraient être significatives et se répercuter sur le calcul de la conductance stomatique. Cette dynamique intra-annuelle marquée n'est donc pas représentée dans le modèle Graeco+. Sans nécessairement remettre en cause les valeurs annuelles des bilans simulés, cette variation saisonnière de paramètres de structure pourrait certainement améliorer la représentation des variations saisonnières et journalières des flux modélisés.

Malgré l'investissement méthodologique consenti, seules quelques périodes de mesures ont pu être considérées pour l'analyse des données d'interception des précipitations par les différentes strates du couvert ce qui n'a pas permis de rendre compte des variations intra-annuelles ou même saisonnières. Même si nos résultats semblent converger avec les estimations de Loustau et al. (1992a) nous n'avons pu caractériser la dynamique temporelle de l'interception en situation hétérogène (cas d'un peuplement en rang avec un inter-rang sans végétation) à renseigner dans le modèle Graeco tel que Gash et al. (1995).

- Les effets de structure des jeunes peuplements à travers l'estimation de la composante hydrique (cas des jeunes pins) restent encore limités, très probablement par une mauvaise estimation de l'évaporation du sol, et éventuellement du sous-étage. La représentation implémentée est empirique et provient d'un calage effectué sous couvert fermé, elle conduit donc certainement à une sous-estimation significative des flux échangés entre sol, végétation accompagnatrice et atmosphère.

- Une incertitude liée à la méconnaissance de certains termes à renseigner en paramétrage d'entrée est une des limites de l'étude menée ici, à la fois sur le modèle Maestra et sur le modèle Graeco. Dans une telle situation, une analyse de sensibilité et de propagation d'erreur apparaît essentielle. Ayant déjà été réalisée sur le modèle Graeco (Pluviaud 2000) sur le paramétrage déjà existant, il sera approprié de réaliser des analyses similaires pour les nouveaux paramètres implémentés. A ce stade, nous n'avons pas proposé d'analyse de sensibilité du modèle ni d'analyse d'incertitude, conscients donc du caractère d'une utilisation du modèle à titre strictement exploratoire.

7.4 Perspectives

Les limites méthodologiques ou conceptuelles de nos résultats et conclusions conduisent naturellement à proposer autant de prolongements et de pistes de recherche correspondantes, sur le plan méthodologique ou en modélisation.

Sur le premier point, sans négliger le défaut de connaissances sur l'écophysiologie et la phénologie de l'*Eucalyptus* étudié, nous avançons que le suivi saisonnier des paramètres de structure de la partie aérienne et de la partie souterraine du couvert est le principal verrou à lever pour élargir la portée de nos résultats, et ceci tant pour l'*Eucalyptus* que pour les jeunes peuplements de Pin maritime. Une description plus précise du compartiment sol, des profils de distribution des racines et de carbone organique du sol, des relations entre matière organique et propriétés physiques du sol ainsi que des effets des interventions sylvicoles permettraient d'introduire des relations fonctionnelles plus génériques et d'élargir la portée de nos conclusions et du modèle développé. Cette prise en compte des effets du travail du sol en sylviculture constitue par ailleurs un enjeu important dans la perspective de l'intensification de la sylviculture en Europe et de la prise en compte des forêts dans le marché du carbone. Actuellement, plusieurs données importantes manquent pour aller plus loin dans nos conclusions et en vérifier la robustesse.

Sur le deuxième point, nous considérons que le modèle développé ici à partir du modèle Graeco est encore un outil exploratoire qui devra être enrichi et évalué avec de nouvelles données et informations. Les voies de recherche suivantes nous semblent mériter un développement prochain.

- L'approche développée pour représenter le sous-étage devra certainement être testée et améliorée pour rendre compte de façon générique du fonctionnement d'une strate herbacée forestière. L'hypothèse des pools de réserves de carbone disponible, indépendants, satisfaisant la croissance du compartiment qu'ils représentent pourrait évoluer vers l'hypothèse d'un pool unique rendant compte des phénomènes de compétitions inter-organes.
- Le fonctionnement du sol dans ce modèle demeure aussi relativement frustre. La prise en compte des relations entre contenu organique et propriétés physiques (albédo, propriétés hydrodynamiques et thermiques) et des relations hydrauliques entre nappe, zone vadose et

végétation, est un point qui nous semblent prioritaires pour améliorer la cohérence de ce modèle.

- La prise en compte des effets de structure du couvert sur le transport atmosphérique de vapeur et CO_2 dans le couvert constitue également un développement indispensable comme le suggère les écarts entre observations et prédictions des flux de vapeur tels qu'ils demeurent à l'issue de notre projet.

Ces améliorations doivent permettre d'utiliser ce type de modèle à plus large échelle ce qui est un enjeu sylvicole, économique et environnemental important dans le contexte d'intensification déjà maintes fois évoqué ici.

Malgré ces limites, nos recherches ont montré que les pratiques de sylviculture associées à l'intensification (essence choisie, type de couvert, dépressages, éclaircies et durée des rotations, travail du sol et de débroussaillement) sont déterminantes dans le fonctionnement des forêts de production à croissance rapide. Elles confirment que le développement des connaissances pour la prise en compte des opérations et pratiques sylvicoles associées dans le fonctionnement des peuplements intensifiés en Europe est indispensable mais elles soulignent aussi le frein que constitue le relatif manque de données expérimentales sur leur fonctionnement biophysique et biogéochimique.

Nous confirmons aussi que la modélisation constitue une approche prédictive puissante qu'impose le contexte de changements environnemental et socio-économique rapides. La relative simplicité du type de modèle utilisé et développé ici permet d'envisager de lui adjoindre un module biogéochimique rendant compte du cycle des éléments majeurs, facteur limitant de la productivité aussi important que le fonctionnement hydrique et le climat, et sans doute plus facilement contrôlable. De manière générale, les effets de l'augmentation des dépôts azotés sur la croissance des arbres et leur rôle dans la séquestration de carbone sont attestés (Magnani et al. 2007) mais aussi controversés (Ciais et al. 2008b). Leur rôle dans le changement de productivité observé depuis plusieurs décennies en Europe fait cependant consensus. Dans la forêt des Landes de Gascogne, l'azote provient essentiellement de la libération d'azote par la matière organique des sols (Trichet et al. 1999) et minoritairement de dépôts atmosphériques. Cependant, le rôle des espèces fixatrices d'azote, pouvant fixer entre 4 et 88 kg N ha^{-1} an^{-1}, et leur interaction avec la fertilisation en phosphore est considérable (Augusto et al. 2005), aussi bien sur la productivité primaire et la croissance (Trichet et al. 2008) que sur l'allocation du carbone (Bakker et al. 2008). Le couplage cycle du carbone-cycle de l'azote devrait donc logiquement constituer une suite à notre travail de thèse et notamment le couplage du modèle Graeco+ avec un module décrivant les processus du cycle de l'azote dans le sol (*e.g.* Li et al. 1992a).

Références bibliographiques

A

Aber, J.D., Federer, C.A., 1992. A generalized, lumped-parameter model of photosynthesis, evapotranspiration, and net primary production in temperate and boreal forest ecosystems. Oecologia. 92: 463-474.

Aber, J.D., S.V. Ollinger, C.A. Federer, P.B. Reich, M.L. Goulden,D.W. Kicklighter, J.M. Melillo and R.G. Lathrop, Jr. 1995. Predicting the effects of climate change on water yield and forest production in the Northeastern U.S. Climate Research 5:207-222.

Aber, J.D., P.B. Reich and M.l. Goulden. 1996. Extrapolating leaf CO2 exchange to the canopy: a generalized model of forest photosynthesis validated by eddy correlation. Oecologia 106:257-265.

Achat D 2009 Biodisponibilité du phosphore dans les sols landais pour les peuplements forestiers de pin maritime. p.291. Thèse de Doctorat de l'Université Bordeaux 1, Talence, FRA.

Achat DL, Bakker MR, and Trichet P. 2008. Rooting patterns and fine root biomass of *Pinus pinaster* assessed by trench wall and core methods. Journal of Forest Research 13: 165-175.

Adams MA and Attiwill PM 1991. Nutrient balance in forest of northern Tasmania. 1. Atmospheric inputs and within-stand cycles. Forest Ecology and Management 44: 93-113.

AFES, 1995 – Référentiel Pédologique 1995. – D. Baize et M.C. Girard coord. INRA Éditions, Paris. 332pp.

ADEME, 2009. Biomasse forestière, populicole et bocagère disponible pour l'énergie à l'horizon 2020, étude réalisée par l'IFN, le FCBA et l'association SOLAGRO, novembre 2009, Contrat n°0601C0134, 105 p.

Allen RG, Pereira LS, Raes D and Smith M. 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, Italy: United Nations FAO.

Almeida AC. 2003. Application of a process-based model for predicting and explaining growth in *Eucalyptus* plantations. PhD Thesis, The Australian National University. 232p.

Almeida AC, Soares JV, Landsberg JJ and Rezende GD. 2007. Growth and water balance of *Eucalyptus grandis* hybrid plantations in Brazil during a rotation for pulp production. Forest Ecology and Management 251: 10-21.

Amiro, B.D., J.I. MacPherson and R.L. Desjardins. 1999b. BOREAS flight measurements of forest-fire effects on carbon dioxide and energy fluxes. Agric. For. Meteorol. 96: 199-208.

Amthor JS. 1989. Respiration and crop productivity. New York: Springer, p 215.

Arp P.A. and Oja T., 1997. A forest soil vegetation atmosphere model (ForSVA), I: Concepts. Ecol. Modell. 95, pp. 207–220.

Arrouays, D., J. L. Kicin, J. Daroussin and P. Berbigier, 1996. Modeling soil organic carbon fluxes attributable to conversion of forest to corn cropping in a landscape of southwest France. Soil Science 161(3): 188-193.

Arrouays, D. and P. Pelissier, 1994. Changes in Carbon Storage in Temperate Humic Loamy Soils after Forest Clearing and Continuous Corn Cropping in France. Plant and Soil 160(2): 215-223.

Arvizu, D., T. Bruckner, O. Edenhofer, S. Estefen, A. Faaij, M. Fischedick, G. Hiriart, O. Hohmeyer, K. G. T. Hollands, J. Huckerby, S. Kadner, A. Killingtveit, A. Kumar, A. Lewis, O. Lucon, P. Matschoss, L. Maurice, M. Mirza, C. Mitchell, W. Moomaw, J. Moreira, L. J. Nilsson, J. Nyboer, R. Pichs-Madruga, J. Sathaye, J. Sawin, R. Schaeffer, T. Schei, S. Schlomer, K. Seyboth, R. Sims, G. Sinden, Y. Sokona, C. von Stechow, J. Steckel, A. Verbruggen, R. Wiser, F. Yamba, T. Zwickel, 2011: Technical Summary. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Aubinet, M., A. Grelle, A. Ibrom, U. Rannik, J. Moncrieff, T. Foken, A.S. Kowalski, P.H. Martin, P. Berbigier, C. Bernhofer, R. Clement, J. Elbers, A. Granier, T. Grünwald, K. Morgenstern, K. Pilegaard, C. Rebmann, W. Snijders, R. Valentini and T. Vesala. 2000. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology. Adv. Ecol. Res. 30, 113-175.

Augusto, L., Badeau, V., Arrouays, D., Trichet, P., Flot, J.L., Jolivet, C., Merzeau, D., 2006. Caractérisation physico-chimique des sols à l'échelle d'une région naturelle à partir d'une compilation de données. Exemple des sols du massif forestier landais. Étude Gest Sols 13, 07–22.

Augusto, L., M.R. Bakker, C. De Lavaissière, L. Jordan-Meille and E. Saur. 2009. Estimation of nutrient content of woody plants using allometric relationships: quantifying the difference between concentration values from the literature and actuals. Forestry. 82: 463-477.

Augusto L., Crampon N., Saur E., Bakker M., Pellerin S., De Lavaissiere C., Trichet P., 2005. High rates of N2-fixation of Ulex species in the understory of maritime pine stands (Pinus pinaster Ait.) and potential effect of P-fertilisation. Canadian Journal of Forest Research, 35: 1183-1192.

B

Baize D and Girard MC. 2008. Référentiel pédologique 2008. Association Française pour l'Etude des Sols. QUAE, Versailles 407p.

Bakker MR, Augusto L, Achat DL. 2006. Fine root distribution of trees and understorey in mature stands of maritime Pine (*Pinus pinaster*) on dry and humid sites. Plant Soil 286:37-51

Bakker, D. C. E., Hoppema, M., Schröder, M., Geibert, W., & de Baar, H. J. W. (2008). A rapid transition from ice covered CO2–rich waters to a biologically mediated CO2 sink in the eastern Weddell Gyre. Biogeosciences, 5, 1373–1386.

Baldocchi, D.D. 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. Global Change Biology, 9, 479-492.

Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthoni, P., Bernhofer, C., Davis, K., Evans, R., Fuentes, J., Goldstein, A., Katul, G., Law, B.E., Lee, X., Malhi, Y., Meyers, T., Munger, J.W., Oechel, W., Paw, K.T., Pilegaard, K., Schmid, H.P., Valentini, R., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K., & Wofsy, S. (2001) FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. Bulletin of the American Meteorological Society, 82, 2415-2434.

Baldocchi, D.D., B.E. Law and P. Anthoni. 2000c. On measuring and modeling energy fluxes above the floor of a homogeneous and heterogeneous conifer forest. Agric. For. Meteorol. 102: 187-206.

Baldocchi, D. D., and P. C. Harley, 1995. Scaling carbon dioxide and water vapour exchange from leaf to canopy in a deciduous forest, II, Model testing and application, Plant Cell Environ., 18, 1157–1173.

Baldocchi, D.D., C.A. Vogel and B. Hall. 1997. Seasonal variation of carbon dioxide exchange rates above and below a boreal jack pine forest. Agric. For. Meteorol. 83: 147-170.

Baldwin, V. C., H. E. Burkhart, J. A. Westfall and K. D. Peterson, 2001. Linking growth and yield and process models to estimate impact of environmental changes on growth of loblolly pine. Forest Science 47(1): 77-82.

Balesdent, J., E. Besnard, D. Arrouays and C. Chenu, 1998. The dynamics of carbon in particle-size fractions of soil in a forest-cultivation sequence. Plant and Soil 201(1): 49-57.

Balesdent, J., C. Chenu and M. Balabane, 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. Soil & Tillage Research 53(3-4): 215-230.

Ball, J. T., Woodrow, I. E., and Berry, J. A. 1987. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions, in: Progress in photosynthesis research, edited by: Biggins, J., Martinus-Nijhoff Publishers, Dordrecht, the Netherlands, 221–224.

Barry K.M., G.J. Newnham and C. Stone. 2009. Estimation of chlorophyll content in Eucalyptus globulus foliage with the leaf reflectance model PROSPECT. Agricultural and Forest Meteorology. 149:1209-1231.

Bastien J.C., Marron N., Berthelot A., et Leplus A. 2009. Les systèmes dédiés à la production de bois énergie. Communication orale. Atelier Regefor. Champenoux, France.

Battaglia M, Cherry ML, Beadle CL, Sands PJ and Hingston A. 1998. Prediction of leaf area index in eucalypt plantations: effects of water stress and temperature. Tree Physiology 18: 521-528.
Battaglia M., Sands P., White D. and Mummery D., 2004. CABALA: a linked carbon, water and nitrogen model of forest growth for silvicultural decision support, Forest Ecology and Management 193 (1–2), pp. 251–282.

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

Bellassen V., G. le Maire, O. Guin , J.F Dhôte , N. Viovy, P. Ciais, 2011. Modelling forest management within a global vegetation model 1 – Part 2: model validation from tree to continental scale Ecological Modeling 222: 57-75.

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

Ben-Brahim, M. 1996. Effets de la nutrition phosphatée sur la photosynthèse et la croissance de jeunes plants de Pin maritime. Thèse de doctorat de l'université de Nancy 1: 150p.

Berbigier, P., A. Diawara and D. Loustau. 1991. Etude microclimatique de l'effet de la sècheresse sur l'évaporation d'une plantation de pins maritimes et du sous-bois. Ann. Sci. For. 22: 157-177.

Berbigier P. & Bonnefond J. M. 1995. Measurement and modelling of radiation transmission within a stand of maritime pine (*Pinus pinaster* Aït.). Annales des Sciences Forestières, 52, 23-42.

Berbigier, P., J.-M. Bonnefond, P. Mellmann. 2001. CO_2 and water vapour fluxes for 2 years above Euroflux forest sites. Agric. For. Meteorol. 108: 183-197.

Bernhardt-Reversat F. 1986. Le recyclage des éléments minéraux par la strate herbacée dans un peuplement naturel à Acacia et dans une plantation d'*Eucalyptus* au Sénégal. Oecol. Gener 7 : 353-364.

Binkley, D., Stape, J.L., Bauerle, W.L., Ryan, M.G., 2010. Explaining growth of individual trees: light interception and efficiency of light use by Eucalyptus at four sites in Brazil. For. Ecol. Manage. 259, 1704–1713.

Bouzigues R and Vinas A. 1989. Identification de différents faciès structuraux dans les horizons argiliques des sols de boulbènes. Conséquences sur les transferts hydriques. Travail de synthèse AIP Drainage CEMAGREF-INRA S.E.S 595 : 92 p.

Bosc A. 1999. Etude expérimentale du fonctionnement hydrique et carboné des organes aériens du Pin maritime (Pinus pinaster Ait.). PhD Thesis, Universite de Bordeaux 2, Bordeaux, France.

Bosc, A., A. de Grandcourt and D. Loustau. 2003. Variability of stem and branch maintenance respiration in a *Pinus pinaster* tree. Tree Physiol. 23: 227-236.

Bossel H., 1996. Treedyn3 forest simulation model. Ecol. Modelling, 90 (3), pp. 187-227.

Brenner, A.J., Incoll, L.D., 1997. The effect of clumping and stomatal response on evaporation from sparsely vegetated shrublands. Agricultural and Forest Meteorology 84, 187–205.

Brisson N, Frédéric Levrault, éditeurs. 2010. Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le Livre Vert du projet CLIMATOR (2007-2010). ADEME. 336 p.

Brooks A, Farquhar GD.1985. Effect of temperature on the C02/02, specificity of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase and the rate of respiration in the light. Planta 165 397-406

Burba, G., 2001. Illustration of Flux Footprint Estimates Affected by Measurement Height, Surface Roughness and Thermal Stability. In K.Hubbard and M. Sivakumar (Eds.). Automated Weather Stations for Applications in Agriculture and Water Resources Management. Current Use and Future Perspectives. World Meteorological Organization publication No.1074. HPCS Lincoln, Nebraska - WMO Geneva, Switzerland, 77-87.

Burba, G., and D. Anderson, 2010. A Brief Practical Guide to Eddy Covariance Flux Measurements: Principles and Workflow Examples for Scientific and Industrial Applications. LI-COR Biosciences, Lincoln, USA, 211 pp.

C

Cabral OMR, Rocha HR, Gash JHC, Ligo MAV, Freitas H.C. and Tatsch J.D. 2010. The energy and water balance of a *Eucalyptus* plantation in southeast Brazil. Journal of Hydrology 388: 208-216.

Calvet JC, Noilhan J and Bessemoulin P. 1998. Retrieving the Root-Zone Moisture from Surface Soil Moisture or Temperature Estimates: A feasibility Study Based on Field Measurements. Journal of Applied Meteorology 37:371-386.

Calvet JC and Noilhan J. 2000. From Near-Surface to Root-Zone Soil Moisture Using Year-Round Data. Journal of Hydrometeorology 1: 393-411.

Cauvin B and Potts BM. 1991: Selection for extreme frost resistance in *Eucalyptus*. In Schonau, A.P.G. (Ed.): intensive forestry: the role of *Eucalyptus*. Proceedings of the IUFRO Symposium, P2.02-01 Productivity of Eucalypts, 2–6 September 1991. Southern Africa. Institute of Forestry, Durban, South Africa: 209–220.

Chiesi, M., F. Maselli, M. Bindi, L. Fibbi, P. Cherubini, E. Arlotta, G. Tirone, G. Matteucci and G. Seufert, 2005. Modelling carbon budget of Mediterranean forests using ground and remote sensing measurements. Agricultural and Forest Meteorology 135(1-4): 22-34.

Cavaignac S., Nguyen The N., Melun F., Bouvet A. 2011. Elaboration d'un modèle de croissance pour l'Eucalyptus Gundal. FCBA INFO ISSN : 2108-6435.

CGDD, Commissariat Général au Développement Durable – SoeS, Service de l'Observation et des Statistiques. 2009. Chiffres clés de l'Energie, 40 p.

Cheaib 2006. Effets de la limitation croisée en phosphore et en lumière sur la croissance et la morphogenèse aérienne et racinaire de jeunes plants de pin maritime. Thèse de doctorat. Université de Bordeaux 1. 243 p.

Chalk, P. M. 1998. Dynamics of biologically fixed N in legume-cereal rotations: a review. Aust. J. Res., 49 : 303-316.

Chang SX, Preston C.M. 2000. Understorey competition affects tree growth and fate of fertilizer-applied 15N in a Coastal British Columbia plantation forest: 6-year results. Canadian Journal of Forest Research, 30: 1379-1388.

Chen, J., K. Tha Paw U, S.L. Ustin, T.H. Suchanek, B.J. Bond, K.D. Brosofske and M. Falk. 2004. Net ecosystem exchanges of carbon, water, and energy in young and old-growth Douglas-fir forests. Ecosystems. 7:534-544.

Chen C.W., Tsai W.T. and Lucier A.A., 1998. A model of air–tree–soil system for ozone impact analysis, Ecol Modell., 111, pp. 207–222.

Choisnel E, Payen D and Lamarque P. 1987. Climatologie de la Zone du projet HAPEX - MOBILHY, Météorologie Nationale, Paris, France, 73 p.

Christina, M., Laclau, J.P., Gonçalves, J.M.L., Jourdan, C., Nouvellon, Y. and Bouillet, J.P., 2011. Almost symmetrical vertical growth rates above and below ground in one of the world's most productive forests. Ecosphere, 2(3). Article 27. 10p.

Chum, H., A. Faaij, J. Moreira, G. Berndes, P. Dhamija, H. Dong, B. Gabrielle, A. Goss Eng, W. Lucht, M. Mapako, O. Masera Cerutti, T. McIntyre, T. Minowa, K. Pingoud, 2011: Bioenergy. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Ciais P., Loustau D., Bosc A., Ogée J., Dufrêne E., François C., Viovy N., Delage F., Piao S. 2010. How will the production of French forests respond to climate change? An integrated analysis from site to country scale. In « Forest, carbon cycle and climate change », D. Loustau coord., Eds Quae, Versailles, 2010.

Ciais, P., M. Reichstein, N. Viovy, A. Granier, J. Ogee, V. Allard, M. Aubinet, N. Buchmann, C. Bernhofer, A. Carrara, F. Chevallier, N. D. Noblet, A. Friend, P. Friedlingstein, T. Grunwald, B. Heinesch, P. Keronen, A. Knohl, G. Krinner, D. Loustau, G. Manca, G. Matteucci, F. Miglietta, J. M. Ourcival, D. Papale, K. Pilegaard, S. Rambal, G. Seufert, J. F. Soussana, M. J. Sanz, E. D. Schulze, T. Vesala and R. Valentini (2005). "Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003." Nature 437: 529-533.

Ciais, P., M.J. Schelhaas, S. Zaehle, S.L. Piao, A. Cescatti, J. Liski, S. Luyssaert, G. Le-Maire, E.-D. Schulze, O. Bouriaud, A. Freibauer, R. Valentini and G. J. Nabuurs. 2008b. Carbon accumulation in European forests. Nature Geoscience, 1:425-429.

Clearwater, M.J., F.C. Meinzer, J.L. Andrade, G. Goldstein and N.M. Holbrook. 1999. Potential errors in measurement of nonuniform sap flow using heat dissipation probes. Tree Physiol. 19: 681-687.

Coleman, K., Jenkinson, D.S., 1996. RothC-26.3 – A model for the turnover of carbon in soil. In: Powlson, D.S., Smith, P., Smith, J.U. (Eds.), Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing Long-Term Datasets. Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 237–246.

Coleman K. and Jenkinson D.S. 1999. RothC-26.3 - A Model for the turnover of carbon in soil : Model description and windows users guide : November 1999 issue. Lawes Agricultural Trust Harpenden. ISBN 0 951 4456 8 5.

Colin A., Mereudieu C, Labbe T. et Belouard T. 2010. Etude rétrospective et mise à jour de la ressource en pin maritime du massif des Landes de Gascogne après la tempête Klaus du 24 janvier 2009. Rapport final de la convention IFN / MAAP n° E18 /2010 du 21 juin 2010 (IFN n°2010-CER-2-077)

Comins and McMurtrie, 1993. H.N. Comins and R.E. McMurtrie, Long-term response of nutrient-limited forests to CO_2 enrichment; equilibrium behaviour of plant-soil models. Ecol. Appl. 3, pp. 666–681.

CRPFA, 2008. La Forêt des Landes de Gascogne. Fiche techniques du Centre Régional de la Propriété Forestière d'Aquitaine, 2 p.

D

Datt, B. 1999. Visible/near infrared reflectance and chlorophyll content in eucalyptus leaves. Int. J. Remote Sens. 20:2741-2759.

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. Agric. Forest Meteorol. 141, 35–56.

David TS, Ferreira MI, David JS and Pereira JS. 1997. Transpiration from a mature *Eucalyptus globulus* plantation in Portugal during a spring-summer period of progressively higher water deficit. Oecologia 110: 153-159.

Deckmyn G. et al. 2008. ANAFORE : A stand-scale process-based forest model that includes wood tissue development and labile carbon storage in trees. Ecol. Modell., 215, 345-368.

Delzon S. (2000). Photosynthèse de la Molinie (*Molinia caerulea* (L.) Moench) en sous-bois de Pin maritime, aux niveaux de la feuillle et du couvert. Mémoire DEA Ecophysiologie végétale, Université Paris XI. INRA, Bordeaux, 32 pages.

Delzon, S., M. Sartore, R. Burlett, R. Dewar and D. Loustau. 2004. Height-related constraints on the water balance of maritime pine trees. Plant Cell Environ. 27:1077–1087.

Delzon, S., A. Bosc, L. Cantet and D. Loustau. 2005. Variation of the photosynthetic capacity across a chronosequence of maritime pine correlates with needle phosphorus concentration. Ann. For. Sci. 62: 537-543.

Delzon, S. and D. Loustau. 2005. Age-related decline in stand water use: sap flow and transpiration in a pine forest chronosequence. Agric. For. Meteorol. 129: 105-119.

de Pury, D.G.G. and G.D. Farquhar. 1997. Simple scaling of photosynthesis from leaves to simple canopies without the errors of big-leaf models. Plant Cell Environ. 20:537–557.

Demounem R. 1979. Essai de définition et de caractérisation de niveaux écophysiologiques dans le massif forestier des Landes de Gascogne. Thèse de doctorat d'état de l'université de Grenoble-1.440 p.

Déqué M. 2007. Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. Global and Planetary Change 57:16-26.

Déqué M, Cloppet E. 2010. Possible future climates over France. In « Forest, carbon cycle and climate change», D. Loustau coord., EdsQuae, Versailles 311p.

Dezi, S., B.E. Medlyn, G. Tonon, F. Magnani. 2010. The effect of nitrogen deposition on forest carbon sequestration: a model-based analysis. Global Change Biol. 16: 1470-1486.

Domec, J. C. 1995. Transferts hydriques et thermiques dans un arbre sur pied. Application à un Pin maritime (Pinus pinaster Ait.) de 25 ans en conditions naturelles. Mémoire de D.E.A., Université de Nancy 1, 26p.

Doré, S., T.E. Kolb, M.C. Montes-Helu, S.E. Eckert, B.W. Sullivan, B.A. Hungate, J.P. Kaye, S.C. Hart, G.W. Koch and A. Finkral. 2010. Carbon and water fluxes from *ponderosa* pine forests disturbed by wildfire and thinning. Ecol. Appl. 20:663-683.

Dreyer E, Le Roux X, Montpied P, Daudet FA, Masson F 2001. Temperature response of leaf photosynthetic capacity in seedlings from seven temperate tree species. Tree Physiol 21:223–232

Ducoudré N., Laval K., Perrier A., 1993. SECHIBA, a new set of parametrizations of the hydrologic exchanges at the land-atmosphere interface within the LMD atmospheric general circulation model. Journal of Climate, 6, 248-273.

Dufrêne, E., Davi, H., Francois, 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. Ecol. Modell. 185 (2–4), 407–436.

Dupraz, C et al. 2004. Integrating tree-crop dynamic interactions with the HiSAFE model. Keynote paper, 1rst World Congress of Agroforestry, Orlando, USA.

Duursma RA, Barton CVM, Eamus D, Medlyn BE, Ellsworth DS, Forster MA, Tissue DT, Linder S and McMurtrie RE. 2011. Rooting depth explains [CO2] × drought interaction in *Eucalyptus saligna*. Tree Physiology 31:922-931.

Dye PJ. 1996. Response of *Eucalyptus grandis* trees to soil water deficits. Tree Physioly 16:233-238.

E

El-Hadj-Moussa, F. (1989). Circulation de l'eau dans un écosystème de Pin maritime en Landes de Gascogne. Bilan hydrique d'un peuplement de 18 ans et fonctionnement hydrique de l'arbre adulte. Thèse de Doctorat de l'Université de Pau. 127p.

F

Fabiao, A., Madeira, M., Steen, E., Katterer, T., Ribeiro, C., Arauyo, C., 1995. Development of root biomass in an Eucalyptus globulus plantation under different water and nutrient regimes. Plant Soil 168–169, 215–223.

Falge, E., Tenhunen, J.D., Aubinet, M., Bernhofer, C., Clement, R., Granier, A., Kowalski, A., Moors, E., Pilegaard, K., Rannik, Ü., Rebmann, C., Valentini, R., 2001a. A model-based study of carbon fluxes at ten European forest sites. In: Valentini, R. (Ed.), Fluxes of Carbon, Water and Energy of European Forests. Ecological Studies Series. Springer, Heidelberg. 113, 53–74.

Falge, E., Baldocchi, D., Olson, R.J., Anthoni, P., Aubinet, M., Bernhofer, C., Burba, G., Ceulemans, R., Clement, R., Dolman, H., Granier, A., Gross, P., Grünwald, T., Hollinger, D., Jensen, N.-O., Katul, G., Keronen, P., Kowalski, A., Ta Lai, C., Law, B.E., Meyers, T., Moncrieff, J., Moors, E., Munger, J.W., Pilegaard, K., Rannik, Ü., Rebmann, C., Suyker, A., Tenhunen, J., Tu, K., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K., Wofsy, S., 2001b. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. Agric. For. Meteorol. 107, 43–69.

Falloon, P. D. and P. Smith, 2000. Modelling refractory soil organic matter. Biology and Fertility of Soils 30(5-6): 388-398.

Falloon, P. D. & Smith, P. 2002. 'Simulating SOC dynamics in long-term experiments with RothC and Century: model evaluation for a regional scale application'. Soil Use & Management, vol 18, pp. 101-111.

Falloon, P., P. Smith, R. I. Bradley, R. Milne, R. Tomlinson, D. Viner, M. Livermore and T. Brown, 2006. RothCUK - a dynamic modelling system for estimating changes in soil C from mineral soils at 1-km resolution in the UK. Soil Use and Management 22(3): 274-288.

Falloon, P., P. Smith, K. Coleman and S. Marshall, 1998. Estimating the size of the inert organic matter pool from total soil organic carbon content for use in the Rothamsted carbon model. Soil Biology & Biochemistry 30(8-9): 1207-1211.

Falloon, P., P. Smith, K. Coleman and S. Marshall, 2000. How important is inert organic matter for predictive soil carbon modelling using the Rothamsted carbon model? Soil Biology & Biochemistry 32(3): 433-436.

Faria JC. 2011. Resources of Tinn-R GUI/Editor for R Environment.UESC, Ilheus, Brazil.

Farquhar, G.D., S. von Caemmerer, and J.A. Berry 1980. A Biochemical Model of Photosynthetic CO2 Assimilation in Leaves of C3 species. Planta 149:78-90.

Favrot JC. 1970. Etude pédologique sur les terrasses alluviales de la Garonne et du Tarn. Etude pédologique sur les terrasses alluviales de la Garonne et du Tarn. Publication INRA Montpellier, Frnace. SES 137 : 46p.

Feikema PM, Morris JD and Connell LD. 2010. The water balance and water sources of a *Eucalyptus* plantation over shallow saline groundwater. Plant Soil 332:429-449.

Foken, T. 2008. The energy balance closure problem: an overview. Ecol. Appl. 18 :1352-1367.

Foken, T. and B. Wichura. 1996. Tools for quality assessment of surface based flux measurements. Agric. For. Meteorol. 78, 83-105.

Forrester, D.I., Collopy, J.J., Morris, J.D., 2010. Transpiration along an age series of Eucalyptus globulus plantations in southeastern Australia. Forest Ecology and Management 259:1754-1760.

Friedlingstein, P., R. A. Houghton, G. Marland, J. Hackler, T. A. Boden, T. J. Conway, J. G. Canadell, M. R. Raupach, P. Ciais and C. Le Quere, 2010. Update on CO(2) emissions. Nature Geoscience 3(12): 811-812.

Friend A.G, PGEN, 1995. An integrated model of leaf photosynthesis, transpiration and conductance. Ecol. Modell. 77, pp. 233–255

G

Gash, J.H.C., Wright, I.R. and Lloyd, C.R., 1980. Comparative estimates of interception loss from three coniferous forests in Great Britain. J. Hydrol., 48: 89-105.

Gash, J.H.C., Shuttleworth, W.J., Lloyd, C.R., Andre, J-C., Goutorbe, J-P. and Gelpe, J., 1989. Micrometeorological measurements in Les Landes Forest during HAPEX-MOBILHY. Agric. For. Meteorol., 46: 131-147.

Gash, J.H.C., Lloyd, C.R. and Lachaud, G., 1995. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. J. Hydrol., 170: 79-86.

Gaudinski, J. B., S. E. Trumbore, E. A. Davidson and S. Zheng, 2000. Soil carbon cycling in a temperate forest: radiocarbon-based estimates of residence times, sequestration rates and partitioning of fluxes. *Biogeochemistry* 51(1): 33-69.

Gholz, H.L. and K.L. Clark. 2002. Energy exchange across a chronosequence of slash pine forests in Florida. Agric. For. Meteorol. 112: 87-102.

Giannakopoulos C, Le Sager P, Bindi M, Moriondo M, Kostopoulou E, Goodess CM. 2009. Climatic changes and associated impacts in the Mediterranean resulting from a 2°C global warming. Global and Planetary Change 68:209-224.

Gibelin A.L. and Déqué, M., 2003: Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. Climate Dyn., 20, 327-339

GICC. GIP Ecofor. INRA. 2004. Rapport Final du Projet Carbofor : Séquestration de Carbone dans les Grands Ecosystèmes Forestiers en France, 136 p.

Gielen B, Ceulemans R. 2001. The likely impact of rising atmospheric CO_2 on natural and managed Populus: a literature review. Environmental Pollution 115: 335–358.

Gis Sol. 2011. L'état des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, 188 p.

Gottschalk, P., J. Bellarby, C. Chenu, B. Foereid, P. Smith, M. Wattenbach, S. Zingore and J. Smith, 2010. Simulation of soil organic carbon response at forest cultivation sequences using (13) C measurements. *Organic Geochemistry* 41(1): 41-54.

Gloaguen, J.C. (1986) Les ajoncs de Bretagne. Bulletin de la Société Botanique de France – lettres, 133, 363–385.

Gominho, J, Pereira, H. 2000. Variability of heartwood content in plantation-grown Eucalyptus globulus Labill. Wood Fiber Sci. 32 (2), 189-195.

Goudriaan, J., Monteith, J.L., 1990. A mathematical function for crop growth. Ann. Bot. 66, 695–701.

Gracia C.A., Tello E., Sabaté S. and Bellot J., 1999. GOTILWA: An Integrated Model of Water Dynamics and Forest Growth. In Rodà F. et. al. (eds) Ecology of Mediterranean Evergreen Oak Forests. Ecological Studies, Vol. 137. Springer Verlag, Berlin Heidelberg. pp 163-179.

Granier, A., 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. Ann. Sci. for. 42 : 81-88.

Granier, A., 1987. Sap flow measurement in Douglas fir stems using a new thermal method. Ann. For. Sci. 44:1-14.

Granier, A., Bobay, V., Saugier, B., Gelpe, J., Gash, J.H.C. and Shuttleworth, W.J., 1990. Sap flow measurements of transpiration from a stand of maritime pine (Pinus pinaster Ait.) in Les Landes Forest. Agric. For. Meteorol., 51: 309-320.

Granier A and Loustau D. 1994. Measuring and modelling the transpiration of a maritime Pine canopy from sap-flow data. Agricultural and Forest Meteorology 71: 61-81.

Granier A, Loustau D and Bréda N. 2000. A generic model of forest canopy conductance dependent on climate, soil water availability and leaf area index. Annals of Forest Sciences 57: 755-765.

Granier, A., M. Reichstein, N. Pregitzer, I.A. Janssens, E. Falge, P. Ciais, T. Grünwald, M. Aubinet, P. Berbigier, C. Bernhofer, N. Buchmann, O. Facini, G. Grassi, H. Ilvesniemi, P. Keronen, A. Knohl, B. Köstner, F. Lagergren, A. Lindroth, B. Longdoz, D. Loustau, J. Mateus, L. Montagnani, C. Nys, E. Moors, D. Papale, M. Peiffer, K. Pilegaard, G. Pita, J. Pumpanen, S. Rambal, C. Rebmann, A. Rodrigues, G. Seufert, J. Tenhunen, T.Vesala and Q. Wang. 2007. Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. Agric. For. Meteorol. 143:123-145.

Grant, R.F., Jarvis, P.G., Massheder, J.M., Hale, S.E., Moncrieff, J.B., Rayment, M., Scott, S.L. and Berry, J.A. 2001. Controls on carbon and energy exchange by a black spruce – moss ecosystem: testing the mathematical model ecosys with data from the BOREAS experiment. Global Biogeochem. Cycles. 15:129-147.

Grieu P. et Maury P. 2004. Croissance et consommation d'eau de l'Eucalyptus in situ et en serre. Rapport d'activité ENSAT 5 p.

Guillet, B., J.-R. Disnar, D. Loustau and J. Balesdent (2010). Dynamics of soil carbon and moder horizons related to pine and beech stands age. Forests, Carbon Cycle and Climate Change. D. Loustau. Versailles, Quae: 55-79.

Guillot M., 2011, Analyse rétrospective des relations nappe-végétation de sous-bassins versants forestiers de la rivière Leyre. Thèse de doctorat de l'Université de Bordeaux I, 300 p.

H

Halldin S. and Grip H., 1979. Actual forest transpiration by a simple model, Abstract EOS. Trans. Am. Geophys. Union 60, p. 580.

Hanson PJ, Amthor JS, Wullschleger SD et al., 2004. Oak forest carbon and water simulations: model intercomparisons and evaluations against independent data. Ecol Monogr 74:443–489

Hanson, P. C., A. Pollard, D. L. Bade, K. Predick, S.R. Carpenter, and J. Foley. 2004. A model of carbon evasion and sedimentation in temperate lakes. Global Change Biology 10: 1285-1298.

Hardcastle PD. 2006. A review of the potential impacts of short-rotation forestry. LTS International. 153 p.

Herbst, M., P.T. W. Rosier, M.D. Morecroft and D.J. Gowing. 2008. Comparative measurements of transpiration and canopy conductance in two mixed deciduous woodlands differing in structure and species composition. Tree Physiol. 28: 959-970.

Hsieh, C.-I., Katul, G. and Chi, T.-w., 2000. An approximate analytical model for footprint estimation of scalar fluxes in thermally stratified atmospheric flows. Advances in Water Resources, 23(7): 765-772.

Hubbard, R.M., J.L. Stape, M.G. Ryan, A.C. Almeida, J. Rojas. 2010. Effects of irrigation on water use and water use efficiency in two fast growing Eucalyptus plantations. Forest Ecology and Management 259: 1714 1721.

Hyun Lee, J., Goudriaan J., Challa, H., 2003. Using the expolinear growth equation for modelling crop growth in year-round cut chrysanthemum. Annals of Botany (2003) 92: 5, 697-708.

I

IEFC. 2002. Forest Atlas of the South Atlantic Arc 78 pp.

IFN, 2010. Les résultats issus des campagnes d'inventaire 2005 à 2009. IFN éd., 91 p.

IFN 2010. La forêt française - Les résultats issus des campagnes d'inventaire 2005 à 2009 - Les résultats pour la région Aquitaine.

IFN 2010. La forêt française - Les résultats issus des campagnes d'inventaire 2005 à 2009 - Les résultats pour la région Midi-Pyrénées.

Ishag K.H.M. and Dennett M.D., 1998. Use of the expolinear growth model to analyse the growth of faba bean, peas and lentils at three densities: fitting the model. Annals of Botany 82(4), 497-505.

Iida, S., T. Ohta, K. Matsumoto, T. Nakai, T. Kuwada, A.V. Kononov, T.C. Maximov, M.K. van der Molen, H. Dolman, H. Tanaka and H. Yabuki. 2009. Evapotranspiration from understory vegetation in an eastern Siberian boreal larch forest. Agric. For. Meteorol. 149: 1129-1139.

IPCC, 2007. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 18 p.

IPCC, 2011: Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

J

Jackson RB, Jobbagy EG, Avisasar R, Baidya Roy S, Barrett DJ, Cook CW, Farley KA, Le Maitre DC, McCarl BA and Murray BC. 2005. Trading water for carbon with biological carbon sequestration. Science 310:1944-1947.

Janssens, I.A, H. Lankreijer, G. Matteucci, A.S. Kowalski , N. Buchmann, D. Epron, K . Pilegeerd, W. Kutsch, B. Longdoz, T. Gruenwald, L. Montagnani, S. Dore, C. Rebmann, E.J. Moors, A. Grelle, UÈ. Rannik, K. Morgenstern, S. Oltchev, R. Clement, J.GU. Mundsson, S. Minerbi, P. Berbigier, A. Ibrom, J. Moncrieff, M. Aubinet, C. Bernhofer, N.O. Jensen, T. Vesala, A. Granier, E.D. Schulze, A. Lindroth, A.J. Dolman, P.G. Jarvis, R. Ceulemans and R. Valentini. 2001. Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests. Global Change Biol. 7: 269–278.

Jarosz, N., P. Béziat, J.M. Bonnefond, Y. Brunet, J.C. Calvet, E. Ceschia, J.A. Elbers, R. W.A. Hutjes, and O. Traullé. 2009. Effect of land use on carbon dioxide, water vapour and energy exchange over terrestrial ecosystems in Southwestern France during the CERES campaign. Biogeosciences Discuss. 6: 2755-2784.

Jarosz N, Brunet Y, Lamaud E, Irvine M, Bonnefond JM and Loustau D. 2008. Carbon dioxide and energy flux partitioning between the understorey and the overstorey of a maritime Pine forest during a year with reduced soil water availability. Agricultural and Forest Meteorology 148: 1508-1523.

Jarvis P. 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. Philosphical Transactions of the Royal Society, London B 273:593-610.

Jenkinson DS and Rayner JH 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. Soil Science 123, 298-305.

Johnson, D. W. and P. S. Curtis, 2001. Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis. Forest Ecology and Management 140(2-3): 227-238.

Johnson, C. M., I. C. G. Vieira, D. J. Zarin, J. Frizano and A. H. Johnson, 2001. Carbon and nutrient storage in primary and secondary forests in eastern Amazonia. Forest Ecology & Management 147(2/3): 245-252.

Jolivet C. 2000. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne.

Jones H.G. 1992. Plants and microclimate: A quantitative approach to environmental plant physiology. Cambridge University Press, Cambridge. England 428p.

Juodvalkis, A., L. Kairiukstis and R. Vasiliauskas. 2005. Effects of thinning on growth of six tree species in north-temperate forests of Lithuania. Eur. J. For. Res. 124: 187-192.

K

Kaimal, J.C. and J.J. Finnigan. 1994. Atmospheric boundary layer flows, their structure and measurements. Oxford University Press, UK.

Kidston, J., C. Brümmer, T.A. Black, K. Morgenstern, Z. Nesic, J.H. McCaughey and A.G. Barr. 2010. Energy Balance Closure Using Eddy Covariance Above Two Different Land Surfaces and Implications for CO_2 Flux Measurements. Bound.-Lay. Meteorol. 136: 193-218.

Kimmins, J.P., and Scoullar, K. 1979. FORCYTE: a computer simulation approach to evaluating the effect of whole-tree harvesting on the nutrient budgets in Northwest forests. In Forest Fertilization Conference Proceedings. Institute of Forest Resources, Univ. Washington, Seattle. Contribution No. 40. pp. 266-273.

King, A.W., W.M. Post, S.D. Wullschleger. 1997. The potential response of terrestrial carbon storage to changes in climate and atmospheric CO2. Climate Change 35: 199-227.

King, D. A. 1997. The functional significance of leaf angle in *Eucalyptus*. Australian Journal of Botany. 45, 619–639.

Kirschbaum, M.U.F., 1999. CenW, a forest growth model with linked carbon, energy, nutrient and water cycles. Ecol Modell., 181: 17-59.

Kljun, N., P. Calanca, M.W. Rotach, H.P. Schmid: 2004, 'A Simple Parameterisation for Flux Footprint Predictions', Boundary-Layer Meteorology, 112, 503-523. http://footprint.kljun.net/varinput.php

Kok, B. 1949. On the interrelation of respiration and photosynthesis in green plants. Biochim. Biophys. Acta. 3: 625-631.

Körner, C. 2006. Plant CO_2 responses: an issue of definition, time and resource supply. *New Phytologist* 172: 393-411.

Köstner, B., Granier, A. & Cermak, J. 1998. Sapflow measurements in forest stands: methods and uncertainties. Annales des Sciences Forestières 55: 13–27.

Kowalski, A.S., D. Loustau, P. Berbigier, G. Manca, V. Tedeschi, M. Borghetti, R. Valentini, P. Kolari, F. Berninger, U. Rannik, P. Hari, M. Rayment, M. Mencuccini, J. Moncrieff and J. Grace. 2004. Paired comparisons of carbon exchange between undisturbed and regenerating stands in four managed forests in Europe. Global Change Biol. 10: 1707-1723.

Kowalski, A.S., M. Sartore, R. Burlett, P. Berbigier and D. Loustau. 2003. The annual carbon budget of a French pine forest (*Pinus pinaster*) following harvest. Global Change Biol. 9: 1051-1065.

Kreuzwieser J, Gessler A 2010. Global climate change and tree nutrition: influence of water availability. Tree Physiol., 30(9): 1221-34.

Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudre, N., Ogèe, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S., and Prentice, C. 2005: A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system, Glob. Biogeochem. Cyc., 19, GB1015, doi:10.1029/2003GB002199.

L

Lacaze JF. 1962. La résistance au froid des *Eucalyptus*. Compte rendu d'un test précoce sur *E. gunnii* (Hook) et *E. cinerea* (FvM). Revue forestière française 3: 422-429.

Lafitte J.J. et Lerat J.F. 2009. Reconstitution des peuplements forestiers détruits par la tempête du 24 janvier 2009 dans le massif forestier des Landes de Gascogne. Rapport du conseil général de l'agriculture de l'alimentation et des espaces ruraux n°1928. 81 p.

Lai CT, Katul G, Ellsworth D et al., 2000. Modelling vegetationatmosphere CO2 exchange by a coupled Eulerian–Langrangian approach. Boundary-Layer Meteorology, 95, 91–122.

Landsberg, J.J., and R.H. Waring, 1997. A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance, and partitioning. *Forest Ecology and Management* 95:209-228.

Landmann G., Gosselin F. et Bonhême I. (coord.). 2009. Bio2 Biomasse et Biodiversité forestière. Augmentation de l'utilisation de la biomasse forestière : implications pour la biodiversité et les ressources naturelles. Paris, GIP ECOFOR, 211 p.

Lane PNJ, Morris J, Ningnan Z, Guangyi Z, Guoyi Z and Daping X. 2004. Water balance of tropical eucalypt plantations in south-eastern China. Agricultural and Forest Meteorology 124: 253-267.

Lamaud, E., J. Ogée, Y. Brunet and P. Berbigier. 2001. Validation of eddy flux measurements above the understorey of a pine forest. Agric. For. Meteorol. 106: 187-203.

Lasslop, G., M. Reichstein, D. Papale, A.D. Richardson, A. Arneth, A. Barr, P. Stoy and G. Wohlfahrt. 2010. Separation of net ecosystem exchange into assimilation and respiration using a light response curve approach: critical issues and global evaluation. Global Change Biol. 16: 187-208.

Launiainen S. 2010. Seasonal and inter-annual variability of energy exchange above a boreal Scots pine forest. Biogeosciences 7: 3921-3940.

Law, B.E., M. Williams, P. Anthoni, D.D. Baldocchi, M.H. Unsworth. 2000. Measuring and modeling seasonal variation of carbon dioxide and water vapor exchange of a *Pinus ponderosa* forest subject to soil water deficit. Global Change Biol. 6: 613-630.

Le Maire G., Marsden C., Verhoef W., Ponzoni F.J, Lo Seen D., Bégué A., Stape J.L and 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.

Le Roux D., Bond W. D., Maphanga D., 1996. Dry mass allocation, water use efficiency and $\delta^{13}C$ in clones of E. grandis, E. grandis x E. camaldulensis and E. grandis x nitens grown under two irrigation regimes. Tree Physiol. 16, 497-502.

Leersnijder R.P, 1992. PINOGRAM: a pinegrowth area model. PhD thesis, Wageningen Agricultural University, The Netherlands.

Lesgourgues Y. et Chantre G. 2009. Expertise sur l'avenir du massif des Landes de Gascogne. Rapport de synthèse du groupe de travail itinéraires sylvicoles.

Lesgourgues Y. et Drouineau S. 2009. Élaboration de nouveaux itinéraires techniques de régénération de la forêt landaise en réponse aux scénarios possibles. Innovations Agronomiques 6, 101 :112.

Lesgourgues Y., D. Merzeau, L. Crémière and V. Bailleres. 1997. Conduite des boisements de Pin maritime sur le plateau landais : itinéraires techniques – pistes pour le futur. Conférence : De la forêt cultivée à l'indstrie de demain. De la gestion au développement durable, 207-222. Bordeaux. 20-21 Novembre 1997.

Leslie A.D, Mencuccini M, Perks M. 2012. The potential for *Eucalyptus* as a wood fuel in the UK. Applied Energy 89: 176-182.

Li, C.S., Frolking, S., Frolking, T.A., 1992a. A model of nitrous-oxide evolution from soil driven by rainfall events. 1. Model structure and sensitivity. Journal of Geophysical Research–Atmospheres 97, 9759–9776.

Liberloo M., Luyssaert. S, Bellassen V., Njakou Djomo S., Lukac M., Calfapietra C., Janssens I.A., Hoosbeek M.R., Viovy N., Churkina G., Scarascia-Mugnozza G., Ceulemans R. 2010. Bio-Energy Retains Its Mitigation Potential Under Elevated CO_2.

Lopez S. 2005. Mesure de biomasse dans le cadre du projet CarboEurope. Rapport de Master. Université de Bordeaux 1. 30p.

Loustau D, Granier A, Moussa FEH. 1990. Seasonal variations of sap flow in maritime Pine stand. Annals of Forest Sciences 47: 599-618.

Loustau, D., Cochard H., 1991. Utilisation d'une chambre de transpiration portable pour l'estimation de l'évapotranspiration du sous-bois de pin maritime. Ann. Sci. For. 48 :29-45.

Loustau, D., Berbigier, P. and Granier, A., 1992a. Interception loss, throughfall and stemflow in a maritime pine stand. II. An application of Gash's analytical model of interception. J. Hydrol., 138: 469-485.

Loustau, D., Berbigier, P., Granier, A. and El Hadj Moussa, F., 1992b. Interception loss, throughfall and stemflow in a maritime pine stand. I. Variability of throughfall and stemflow beneath the pine canopy. J. Hydrol., 138: 449-467.

Loustau, D.P., Berbigier, P., Roumaginac, P., Arruda-Pacheco, C., David, J.S., Ferreira, M.I., Pereira, J.S., Tavares, R., 1996. Transpiration of a 64-year-old maritime pine stand in Portugal. I. Seasonal course of Water flux thought maritime pine. Oecologia 107, 33–42.

Loustau, D., M. Ben-Brahim, J. P. Gaudillere and E. Dreyer, 1999. Photosynthetic responses to phosphorus nutrition in two-year-old maritime pine seedlings. Tree Physiology 19(11): 707-715.

Loustau, D., F. Pluviaud, A. Bosc, A. Porté, P. Berbigier, M. Déqué and V. Pérarnaud. 2001. Impact of a regional 2 × CO2 climate scenario on the water balance, carbon balance and primary production of maritime pine in southwestern France. In Models for the Sustainable Management of Plantation Forests. Ed. M. Tomé. European Cultivated Forest Inst., EFI Proc. No. 41D, Bordeaux, pp 45–58.

Loustau, D., A. Bosc, A. Colin, J. Ogée, H. Davi, C. Francois, E. Dufrene, M. Deque, E. Cloppet, D. Arrouays, C. Le Bas, N. Saby, G. Pignard, N. Hamza, A. Granier, N. Breda, P. Ciais, N. Viovy and F. Delage. 2005. Modeling climate change effects on the potential production of French plains forests at the sub-regional level. Tree Physiol. 25: 813-823.

Loustau, D. 2010. Forests, carbon cycle and climate change, QUAE, Versailles, 350 pp.

Loustau D. et A. Bosc, 2011. Contraintes climatiques sur les forêts. In "Carrefours de l'innovation agronomique 2011. Forêt-bois: quelles ressources pour quels produits ?". Huyghe C. Eds, INRA- Agro paris-Tech – Pres de l'Université de Lorraine, Paris, p. 53-69.

Liu, S., B. Bond-Lamberty, J. Hicke, R. Vargas, S. Zhao, J. M. Chen, S. Edburg, J. Liu, A. D. McGuire, J. Xiao, B. Keane, W. Yuan, J. Tang, Y. Luo, C. Potter, and J. Oeding. 2011. Simulating the Impacts of Disturbances on

Forest Carbon Cycling in North America: Processes, Data, Models, and Challenges. Journal of Geophysical Research-Biogeosciences 116, 22 p.

Lu, P., L. Urban and P. Zhao. 2004. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice. Acta Bot. Sin. 46:631–646.

Luo Y, Medlyn B, Hui D, Ellsworth D, Reynolds J, Katul G 2001. Gross primary productivity in Duke Forest: modeling synthesis of CO2 experiment and eddy-flux data. Ecol Appl 11:239–252

Luyssaert, S., P. Ciais, S.L. Piao, E.D. Schulze, M. Jung, S. Zaehle, M.J. Schelhaas, M. Reichstein, G. Churkina, D. Papale, G. Abril, C. Beer, J. Grace, D. Loustau, G. Matteucci, F. Magnani, G.J. Nabuurs, H. Verbeeck, M. Sulkava, G.R. van der Werf, I.A. Janssens and C.-I.S. Team. 2010. The European carbon balance. Part 3: forests. Glob. Change Biol.16: 1429-1450.

M

Magnani F., 2000. Carbon allocation and tree growth under hydraulic constraints in Scots pines (Pinus Sylveestris L.). PhD Thesis, University of Edinburgh.

Magnani F, Mencuccini M, Borghetti M, Berbigier P, Berninger F, Delzon S, Grelle A, Hari P, Jarvis PG, Kolari P, Kowalski AS, Lankreijer H, Law BE, Lindroth A, Loustau D, Manca G, Moncrieff JB, Rayment M, Tedeschi V, Valentini R, Grace J. 2007. The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests. Nature 447: 848-850.

Martinez-Vilalta, J. and J. Pinol, 2002. Drought-induced mortality and hydraulic architecture in pine populations of the NE Iberian Peninsula. Forest Ecology and Management 161(1-3): 247-256.

Massman, W.J. and X. Lee. 2002. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. Agric. For. Meteorol. 113: 121-144.

McCaughey, J. L. 1985. Energy balance storage terms in a mature mixed forest at Petawawa, Ontario - a case study. Bound.-Lay. Meteorol. 31: 89-101.

McMurtrie R.E., 1985. Forest productivity in relation to carbon partitioning and nutrient cycling: a mathematical model. In: M.G.R. Cannell and J.E. Jackson, Editors, Trees as Crop Plants, Institute of Terrestrial Ecology, Monks Wood, Abbotts Ripton, U.K., pp. 194–207.

McMurtrie, R. and L. Wolf. 1983. Above and below ground growth of forest stands: a carbon budget model. AM. Bot. 52:437-448.

McMurtrie, R.E., D.A. Rook and F.M. Kelliher. 1990. Modelling the yield of Pinus radiata on a site limited by water and nutrition. For. Ecol. Manag. 30:381--413.

Medhurst J, Beadle C. 2001. Crown structure and leaf area index development in thinned and unthinned *Eucalyptus nitens* plantations. Tree Physiol. 21(12–13): 989-999.

Medlyn, B.E., McMurtrie, R.E., Dewar, R.C., Jeffreys, M.P., 2000. Soil processes dominate the long-term response of forest net primary productivity to increased temperature and atmospheric CO2 concentration. Can. J. For. Res. 30, 873–888.

Medlyn, B.E., C.V.M. Barton, M.S.J. Broadmeadow, R. Ceulemans, P.D. Angelis, M. Forstreuter, M. Freeman, S.B. Jackson, S. Kellomäki, E. Laitat, A. Rey, P. Roberntz, B.D. Sigurdsson, J. Strassemeyer, K. Wang, P.S. Curtis and P.G. Jarvis 2001. Stomatal conductance of forest species after long-term exposure to elevated CO2 concentration: a synthesis. New Phytologist. 149:247-264.

Medlyn, B. E., D. Loustau and S. Delzon. 2002a. Temperature response of parameters of a biochemically based model of photosynthesis. I. Seasonal changes in mature maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). Plant Cell Environ. 25:1155-1165.

Medlyn B.E., E. Dreyer, D. Ellsworth, M. Forstreuter, P.C. Harley, M.U.F. Kirschbaum, X. Le Roux, P. Montpied, J. Strassemeyer, A. Walcroft, K. Wang and D. Loustau, 2002b. Temperature response of parameters of a biochemically based model of photosynthesis. II. A review of experimental data. Plant Cell Environ 25(9): 1167-1179.

Medlyn B. E. 2004. A MAESTRO Retrospective. In "Forests at the Land-Atmosphere Interface", eds. M Mencuccini, J Moncrieff, K McNaughton and J Grace. CABI Publishing.

Medlyn B.E., Berbigier P, Clement R, Grelle A, Loustau D, Linder S, Wingate L, Jarvis PG, Sigurdsson BD, McMurtrie RE (2005) The carbon balance of coniferous forests growing in contrasting climatic conditions: a model-based analysis. Agricultural and Forest Meteorology, 131:97-124.

Medlyn, B. E., Zeppel, M., Brouwers, N. C., Howard, K., O'Gara, E., Hardy, G., Lyons, T., Li, L. and Evans, B. 2011. Biophysical impacts of climate change on Australia's forests. Contribution of Work Package 2 to the Forest Vulnerability Assessment, Gold Coast, Australia, National Climate Change Adaptation Research Facility.

Melun F. 2011. Eucalyptus Gundal: une espèce remarquable pour la production de biomasse. FCBA Institut Technologique. <http://www.fcbainfo.fr/ihm/medias/office/Gundal_FCBA_INFO.pdf> .

Melun F, Nguyen The N. 2006. Fiches clonales Eucalyptus: Eucalyptus gundal. AFOCEL. 4p.

Merzeau D. 1995. Une culture traditionnelle, un moteur économique. IDF, Forêt-Entreprise n° 105, 33-44.

Michel J.C., D. Tessier et J.C. Favrot. 2003. Comportement et organisation de sols de Boulbène dans le Tarn. Étude et Gestion des Sols.10, 71-91.

Mielke MS, Oliva MA, de Barros NF, Penchel RM, Martinez CA and Almeida AC. 1999. Stomatal control of transpiration in the canopy of a clonal *Eucalyptus grandis* plantation. Trees 13:152-160.

Misset, M. T. & Golrret, J.P. 1996. Flow cytometric analysis of the different ploidy levels observed in the genus *Ulex* L Faboideae-Genisteae in Brittany (France). Acta Botanica 109: 72-79.

Misson, L., Tu, K., Boniello, R., Goldstein, A., 2006. Seasonality of photosynthetic parameters in a multi-specific and vertically complex forest ecosystem in the Sierra Nevada of California. Tree Physiology. 26: 729–741.

Misson, L., D.D. Baldocchi, T.A. Black, P.D. Blanken, Y. Brunet, J. Curiel Yuste, J.R. Dorsey, M. Falk, A. Granier, M.R. Irvine, N. Jarosz, E. Lamaud, S. Launiainen, B.E. Law, B. Longdoz, D. Loustau, M. McKay, K.T. Paw U, T. Vesala, D. Vickers, K.B. Wilson and A.H. Goldstein. 2007. Partitioning forest carbon fluxes with overstory and understory eddy-covariance measurements: a synthesis based on FLUXNET data. Agric. For. Meteorol. 144: 14-31.

Misson, L., J. Tang, M. Xu, M. McKay and A. Goldstein. 2005. Influences of recovery from clear-cut, climate variability, and thinning on the carbon balance of a young *ponderosa* pine plantation. Agric. For. Meteorol. 130:207-222.

Moffat, A.M., Papale, D., Reichstein, M., Hollinger, D.Y., Richardson, A.D., Barr, A.G., Beckstein, C., Braswell, B.H., Churkina, G., Desai, A.R., Falge, E., Gove, J.H., Heimann, M., Hui, D., Jarvis, A.J., Kattge, J., Noormets, A., Stauch, V.J., 2007. Comprehensive comparison of gap filling techniques for net carbon fluxes. Agric. Forest Meteorol. 147, 209–232.

Mohren G.M.J., Bartelink H.H., IJorritsma .T.M. and Kramer K., 1993. A process-based growth model (FORGRO) for analysis of forest dynamics in relation to environmental factors. In: M. Broekmeijer, W. Vos and H.G.J.M. Koop, Editors, Proceedings of Forest Reserves WorkshopWageningen, , Pudoc, Wageningen , pp. 273–280.

Moomaw, W., F. Yamba, M. Kamimoto, L. Maurice, J. Nyboer, K. Urama, T. Weir, 2011: Introduction. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga,

Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Moore, C.J. 1986. Frequency response corrections for Eddy Correlation systems. Bound. -Lay. Meteorol. 37:17-35.

Moore, M.M., C.A. Casey, J.D. Bakker, J.D. Springer, P.Z. Fulé, W. Wallace Covington and D.C. Laughlin. 2006. Herbaceous vegetation responses (1992–2004) to restoration Treatments in a *ponderosa* pine forest. Rangeland Ecol. Manage. 59: 135-144.

Macinnis-Ng C.M.O, Fuentes S, O'Grady A.P, Palmer A.R, Taylor D, Whitley R.J, Yunusa I, Zeppel M.J.B and Eamus D. 2010. Root biomass distribution and soil properties of an open woodland on a duplex soil. Plant Soil 327: 377-388.

Morais MC, Pereira H. 2007. Heartwood and sapwood variation in Eucalyptus globulus Labill. trees at the end of rotation for pulpwood production. Ann For Sci 64: 665-671.

Morais M.C., Pereira H. 2011. Variation of extractives content in heartwood and sapwood of *Eucalyptus globulus* trees. Springer-Verlag, Wood Science and Technology.

Moureaux, C. 2004. Conception et mise au point d'un système de mesure des flux de CO2 échangés par une culture agricole (2004). Master Thesis.

Moreaux V, Lamaud E, Bosc A, Bonnefond JM, Medlyn B and Loustau D. 2011. Paired comparison of water, energy and carbon exchanges over two young maritime Pine stands (*Pinus pinaster* Aït.): effects of thinning and weeding in the early stage of tree growth. Tree Physiology 31: 903-921.

Moreaux V., O' Grady A., Nguyen The N. and Loustau D. 2012: Water use of young maritime Pine and Eucalyptus stands in response to climatic drying in south-western France. Plant Ecology and Diversity. (under press).

Myneni, R. B., Keeling, C. D., Tucker, C. J., Asrar, G. and Nemani, R. 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981-1991. Nature, 386:698-701.

N

Nabuurs, G.-J., M.J. Schelhaas, G.M.J. Mohren and C.B. Field. 2003. Temporal evolution of the European forest sector carbon sink from 1950 to 1999. Glob. Change Biol. 9: 152-160.

Nabuurs, G.J., E. Thurig, N. Heidema, K. Armolaitis, P. Biber, E. Cienciala, E. Kaufmann, R. Makipaa, P. Nilsen, R. Petritsch, T. Pristova, J. Rock, M.J. Schelhaas, R. Sievanen, Z. Somogyi and P. Vallet. 2008. Hotspots of the carbon cycle in European forests. For. Ecol. Manag. 256: 194-200.

Nakicenvoic et al., 2000. Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Cambridge. 599 pp.

Nguyen, A. (1986). Effets d'une contrainte hydrique racinaire sur de jeunes plants de pin maritime (Pinus pinaster Ait.). Thèse de Doctorat de l'université de Bordeaux-1, 149p.

Nizinski J.J., Morand D.,Loumeto J.J., Galat-Luong A., Galat G., 2008. Bilan hydrique comparé d'une savane et d'une plantation dans le bassin du Kouilou (Congo-Brazzaville). Climatologie, 5, 99-112.

Nizinski JJ and Saugier B. 1989. A model of transpiration and soil-water balance for a mature oak forest. Agricultural and Forest Meteorology 47: 1-17.

Norby R.H, Evan H. DeLucia, Birgit Gielen, Carlo Calfapietra, Christian P. Giardina, John S. King, Joanne Ledford, Heather R. McCarthy, David J. P. Moore, Reinhart Ceulemans, Paolo De Angelis, Adrien C. Finzi, David F. Karnosky, Mark E. Kubiske, Martin Lukac, Kurt S. Pregitzer, Giuseppe E. Scarascia-Mugnozza,

William H. Schlesinger, and Ram Oren. 2005. Forest response to elevated CO2 is conserved across a broad range of productivity. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA 102: 18052-18056.

Norman JM, Welles JM. 1983. Radiative transfer in an array of canopies. Agron. J. 75: 481-488.

Nouvellon Y, Laclau JP, Epron D, Kinana A, Mabiala A, Rouspard O, Bonnefond JM, le Maire G, Mardsen C, Bontemps JD and 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.

O

O' Grady A.P, Eamus D and Hutley L.B. 1999. Transpiration increases during the dry season: patterns of tree water use in eucalypt open-forests of northern Australia. Tree Physiology 19:591-598.

O'Loughlin, E. and Nambiar, E. K. S. 2001. Plantations, farm forestry and water: a discussion Paper. Water and Salinity Issues in Agroforestry No. 8. Rural Industries Research and Development Corporation, Canberra.

Ogée J. 2000. Développement et applications du modèle MuSICA : étude des échanges gazeux entre une pinède landaise et l'atmosphère. Thèse de l'Université Paul Sabatier Toulouse III, Toulouse, soutenue le 27 Janvier 2000.

Ogée J., Brunet Y., Loustau D., Berbigier P. & Delzon S. 2003a. MuSICA, a CO2, water and energy multilayer, multileaf pine forest model: evaluation from hourly to yearly time scales and sensitivity analysis. Global Change Biology, 9, 697-717.

Ogée, J., E. Lamaud, Y. Brunet, P. Berbigier and J.M. Bonnefond. 2001. A long-term study of soil heat flux under a forest canopy. Agric. For. Meteorol. 106: 173-186.

Olbrich, B.W., Le Roux, D., Poulter, A.G., Bond, W.J. and Stock, W.D., 1993. Variation in water use efficiency and 13 C levels in Eucalyptus grandis clones. Journal of Hydrology 150: 615-633.

Op de Beeck M., B. Gielen, I. Jonckheere, R. Samson, I. A. Janssens, and R. Ceulemans. 2010. Needle age-related and seasonal photosynthetic capacity variation is negligible for modelling yearly gas exchange of a sparse temperate Scots pine forest. Biogeosciences, 7, 199–215.

P

Pan, Y. D., R. A. Birdsey, J. Y. Fang, R. Houghton, P. E. Kauppi, W. A. Kurz, O. L. Phillips, A. Shvidenko, S. L. Lewis, J. G. Canadell, P. Ciais, R. B. Jackson, S. W. Pacala, A. D. McGuire, S. L. Piao, A. Rautiainen, S. Sitch and D. Hayes, 2011. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. Science 333(6045): 988-993.

Parton W.J., Stewart J.W.B. and Cole C.V., 1988. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model. Biogeochemistry 5, pp. 109–131.

Pastor, J., and W. M. Post. 1985. Development of a linked forest productivity-soil process model. ORNL/TM-9519. Oak Ridge, Tennessee.

Paul, K. I. and P. J. Polglase, 2004a. Calibration of the RothC model to turnover of soil carbon under eucalypts and pines. Australian Journal of Soil Research 42(8): 883-895.

Paul, K. I. and P. J. Polglase, 2004b. Prediction of decomposition of litter under eucalypts and pines using the FullCAM model. Forest Ecology and Management 191(1/3): 73-92.

Paul, K. I., P. J. Polglase and G. P. Richards, 2003. Predicted change in soil carbon following afforestation or reforestation, and analysis of controlling factors by linking a C accounting model (CAMFor) to models of forest

growth (3PG), litter decomposition (GENDEC) and soil C turnover (RothC). Forest Ecology and Management 177(1/3): 485-501.

Paul, K. I., P. J. Polglase and G. P. Richards, 2003. Sensitivity analysis of predicted change in soil carbon following afforestation. Ecological Modelling 164(2/3): 137-152.

Peng, C.H., J.X. Liu, Q.L. Dang, M.J. Apps and H. Jiang, 2002. TRIPLEX: A generic hybrid model for predicting forest growth and carbon and nitrogen dynamics. Ecol. Modell., 153: 109-130.

Penning de Vries FWT. 1975a. The cost of maintenance processes in plant cells. Annals of Botany 39: 77-92.

Pereira De Almeida A and Riekerk H. 1990. Water balance of *Eucalyptus globulus* and *Quercus suber* forest stands in south Portugal. Forest Ecology and Management 38: 55-64.

Pereira JS, Mateus JA, Aires LM, Pita G, Pio C, David JS, Andrade V, Banza J, David TS, Paco TA and Rodrigues A. 2007. Net ecosystem carbon exchange in three contrasting Mediterranean ecosystems - the effect of drought. Biogeosciences 4:791-802.

Pinto I., Pereira H. and Usenius A. 2004. Heartwood and sapwood development within maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) stems. Trees 18(3): 284-294. © 2004 Springer-Verlag.

Planton S, Deque M, Chauvin F, Terray L 2008. Expected impacts of climate change on extreme climate events. Comptes Rendus Geoscience 340: 564-574.

Pluviaud, F. 2000. Impact climatique d'un scénario de doublement de CO2 sur le bilan hydrique, la production primaire et la croissance du pin maritime dans les Landes de Gascogne. École Nationale des Ingénieurs de la Météorologie, Toulouse, France, 63 p.

Polge H, Illy G. 1967. Observations sur l'anisotropie du Pin maritime des landes. Annales des Sciences Forestières 24: 205-231.

Poore M. E. D. et Fries C. 1986. Les effets écologiques des eucalyptus. Etude FAO forêts: 59. O'Grady AP, Worledge D, Battaglia M (2008) Constraints on transpiration in Eucalyptus globulus in southern Tasmania. Agricultural and Forest Meteorology 148, 453-465.

Porté, A. 1999. Modélisation des effets du bilan hydrique sur la production primaire et la croissance d'un couvert de pin maritime (Pinus pinaster Ait.) en lande humide. Ph.D. Thesis, Univ. Paris XI, Orsay, France, 160 p.

Porté, A. and D. Loustau. 1998. Variability of the photosynthetic characteristics of mature needles within the crown of a 25-year-old Pinus pinaster. Tree Physiol. 18:223–232.

Porté A, Bosc A, Champion I and Loustau D. 2000. Estimating the foliage area of maritime Pine (*Pinus pinaster* Aït.) branches and crowns with application to modelling the foliage area distribution in the crown. Annals of Forest Science 57:73-86.

Porté A. and D. Loustau. 2001. Seasonal and inter-annual variations in carbon isotope discrimination in a maritime pine (Pinus pinaster Aït.) stand assessed from the isotopic composition of the cellulose of annual rings. Tree Physiol. 21(18-19): 861-868.

Porté, A., P. Trichet, D. Bert and D. Loustau. 2002. Allometric relationships for branch and tree woody biomass of maritime pine (Pinus pinaster Ait.). For. Ecol. Manage. 158:71– 83.

Potter, C. S., J. T. Randerson, C. B. Field, P. A. Matson, P. M. Vitousek, H. A. Mooney, and S. A. Klooster. 1993. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. Global Biogeochemical Cycles 7: 811-841.

Pottering H.-G and Necas P.2009. Directive 2009/28/CE du parlement européen et de conseil. Journal officiel de l'Union européenne. L 140 :16-62.

Pregitzer, K.S., Euskirchen, E.S., 2004. Carbon cycling and storage in world forests: biome patterns related to forest age. Global Change Biology 10, 2052–2077.

Prieur A. 2004. Les ressources forestières : produits du bois, usages énergétiques, capture et stockage du carbone. Thèse de doctorat. Université de Bordeaux I, 200 p.

Puech. 2009. Mise en valeur de la forêt française et développement de la filière bois. Rapport remis à Monsieur Nicolas Sarkozy Président de la République. Paris, 75 p.

R

Randle, T.J. and Ludlow, A.R. 1998. Growth costs to plantations: modelling the cumulative effect of defoliation be Elatobium abietinum. In: The Green Spruce Aphid in Western Europe: Ecology, Status, Impacts and Prospects for Management, 32-40. Eds KR Day, G Halldorsson, S Harding and NA Straw. Technical Paper 24, Forestry Commission, Edinburgh, UK.

Reichstein, M., E. Falge, D. Baldocchi, D. Papale, M. Aubinet, P. Berbigier, C. Bernhofer, N. Buchmann, T. Gilmanov, A. Granier, T. Grünwald, K. Havránková, H. Ilvesniemi, D. Janous, A. Knohl, T. Laurila, A. Lohila, D. Loustau, G. Matteucci, T. Meyers, F. Miglietta, J.M. Ourcival, J. Pumpanen, S. Rambal, E. Rotenberg, M. Sanz, J. Tenhunen, G. Seufert, F. Vaccari, T. Vesala, D. Yakir and R. Valentini. 2005. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. Glob. Change Biol. 11: 1424-1439.

Reynolds O. 1895. On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A 186:123-161.

Richer de Forges, A. 1998. Variabilité spatiale et temporelle de la biomasse microbienne des sols des Landes de Gascogne. DESS Université de Bourgogne, 55p.

Roberts J.M. 1983. Forest transpiration: A conservative hydrological process? Journal of Hydrology 66: 133-141.

Roberts J. 2007. The role of plant physiology in hydrology: looking backwards and forwards. Hydrology and Earth System Sciences 11: 256-269.

Roberts J., C.F. Pymar, J.S. Wallace and R.M. Pitman, 1980. Seasonal changes in leaf area, stomatal and canopy conductances and transpiration from bracken below a forest canopy. Journal of Applied Ecology 17: 409-422.

Roberts J., J.S. Wallace and R.M. Pitman, 1984. Factors affecting stomatal conductance of bracken below a forest canopy. Journal of Applied Ecology 21: 643-655.

Romanya, J., J. Cortina, P. Falloon, K. Coleman and P. Smith, 2000. Modelling changes in soil organic matter after planting fast-growing Pinus radiata on Mediterranean agricultural soils. European Journal of Soil Science 51(4): 627-641.

Rost, J. and H. Mayer. 2006. Comparative analysis of albedo and surface energy balance of grassland site and an adjacent Scots pine forest. Clim Res. 30: 227-237.

Running, S. W. and J. C. Coughlan, 1988. A General Model of Forest Ecosystem Processes For Regional Applications I. Hydrologic Balance, Canopy Gas Exchange and Primary Production Processes. Ecol. Modell., Volume 42, page 125-154.

Ryan, M. G. 1990. Growth and maintenance respiration in stems of Pinus contorta and Picea engelmannii. - Can. J. For. Res. 20: 48-57.

S

Saur E. 1989. Nutrition oligo-minérale du pin maritime: Interaction phosphore-cuivre ; Thèse de Doctorat de l'Institut Polytechnique de Lorraine, 184p.

Schotanus, P., F.T.M. Nieuwstadt, H.A.R. Debruin. 1983. Temperature-Measurement with a Sonic Anenometer and its Application to Heat and Moisture Fluxes. Bound.-Layer 26(1), 81-93.

Schmid, H.P., 2002. Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: a review and perspective. Agricultural and Forest Meteorology 113, 159-183.

Schwalm CR, Ek AR. 2004. A process-based model of forest ecosystems driven by meteorology. Ecological Modelling 179: 317–348.

Scott, D.F. and Prinsloo, F.W., 2008. Longer-term effects of pine and eucalypt plantations on streamflow. Water Resources Research, 44: W00A08.

Shaiek, O., D. Loustau, P. Trichet, C. Méredieu, B. Bachtobji, M.H. El Aouni. 2010. Generalized biomass equations for the main aboveground biomass components of maritime pine across contrasting environments. Ann. For. Sci. In press.

Schrumpf, M., E. D. Schulze, K. Kaiser and J. Schumacher, 2011. How accurately can soil organic carbon stocks and stock changes be quantified by soil inventories? Biogeosciences 8(5): 1193-1212.

Schuepp, P. H., Leclerc, M. Y., MacPherson, J. I., and Desjardins, R. L.: 1990, 'Footprint Prediction of Scalar Fluxes from Analytical Solutions of the Diffusion Equation', Boundary-Layer Meteorol. 50, 355-373.

Shuttleworth, W.J., Wallace, J.S., 1985. Evaporation from sparse crops ± an energy combination theory. Q.J.R. Meteorol. Soc. 111, 839±855.

Silberstein R, Held A, Hatton T, Viney N and Sivapalan M. 2001. Energy balance of a natural jarrah (*Eucalyptus marginata*) forest in Western Australia: measurements during the spring and summer. Agricultural and Forest Meteorology 109: 79-104.

Silva FC, Shvaleva A, Maroco JP, Almeida MH, Chaves MM and Pereira JS. 2004. Responses to water stress in two *Eucalyptus globulus* clones differing in drought tolerance. Tree Physiology 24:1165-1172.

Simonin, K., T.E. Kolb, M.C. Montes-Helu and G.W. Koch. 2007. The influence of thinning on components of stand water balance in a *ponderosa* pine forest stand during and after extreme drought. Agri. For. Meteorol. 143: 266-276.

Sinoquet H. et al. 2001. RATP: a model for simulating the spatial distribution of radiation absorption, transpiration and photosynthesis within canopies: application to an isolated tree crown. Plant Cell Environ. 24:395-406.

Smethurst, P. J. and E. K. S. Nambiar, 1995. Changes in soil carbon and nitrogen during the establishment of a second crop of Pinus radiata. Forest Ecology and Management 73(1/3): 145-155.

Soares JV and Almeida AC. 2001 Modeling the water balance and soil water fluxes in a fast growing *Eucalyptus* plantation in Brazil. Journal of Hydrology 253: 130-147.

Sohngen, B. 2008. Climate change, agriculture, forests, and biofuels. International Agricultural Trade Research Consortium. December 7-9, 2008. Scottsdale, Arizona.

Stahl C., 2006. Réponses phénologiques et écophysiologiques à l'ouverture du couvert de trois espèces herbacées du sous-bois de pin maritime. Rapport de stage de Master II, Fonctionnement et modélisation des écosystèmes terrestres, Université de Bordeaux 1, 33 p.

Stape, J.L., D. Binkley, M.G. Ryan. 2008. Production and carbon allocation in a clonal *Eucalyptus* plantation with water and nutrient manipulations. For. Ecol. Manage. 255:920-930.

Stape JL, Binkley D, Ryan MG, Fonseca S, Loos RA, Takahashi EN, Silva CR, Silva SR, Hakamada RE, Ferreira JMA, Lima AMN, Gava JL, Leite FP, Andrade HB, Alves JM, Silva GGC and Azevedo MR. 2010. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. Forest Ecology and Management 259: 1684-1694.

Stape, J.L., Ryan, M., Binkley, D., 2004. Testing the utility of the 3-PG model for growth of Eucalyptus grandis x urophylla with natural and manipulated supplies of water and nutrients. For. Ecol. Manage. 193, 219–234.

Stella, P., E. Lamaud, Y. Brunet, J.-M. Bonnefond, D. Loustau and M. Irvine. 2009. Simultaneous measurements of CO_2 and water exchanges over three agroecosystems in South-West France. Biogeosciences. 6: 2957-2971.

Stokes, K.E. 2002. The demography of Ulex gallii and Ulex minor across a parapatric range boundary. PhD Thesis, University of East Anglia, Norwich, UK.

Stokes, K.E., Bullock, J.M., & Watkinson, A.R. 2003. Ulex gallii Planch. and Ulex minor Roth. Journal of Ecology, 91, 1106-1124.

Sun, G., A. Noormets, M.J. Gavazzi, S.G. McNulty, J. Chen, J.C. Domec, J.S. King, D.M. Amatya and R.W. Skaggs. 2010. Energy and water balance of two contrasting loblolly pine plantations on the lower coastal plain of North Carolina, USA. For. Ecol. Manag. 259:1299-1310.

T

Tanaka, H. T. Hiyama, N. Kobayashi, H. Yabuki, Y. Ishii, R.V. Desyatkin, T.C. Maximov and T. Ohta. 2008. Energy balance and its closure over a young larch forest in eastern Siberia. Agri. For. Meteorol. 148: 1954-1967.

Thornley JHM. 1991. A transport-resistance model of forest growth and partitioning. Annals of Botany 68: 211-226.

Thornley JHM. 1998a. Grassland Dynamics: An Ecosystem Simulation Model, CAB International, Wallingford, Oxon OX10 8DE UK.

Thornley, J.T., Johnson, I.R., 1990. Plant and Crop Modelling. Clarendon Press, Oxford.

Thornton, P.E., Law, B.E., Gholz, H.L., Clark, K.L., Falge, E., Ellsworth, D.S., Goldstein, A.H., Monson, R.K., Hollinger, D., Falk, M., Chen, J., Sparks, J.P., 2002. Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needle leaf forests. Agric. For. Meteorol. 113, 185–222.

Trichet P, Bakker MR, Augusto L, Alazar P, Merzeau D and Suar E. 2009. Fifty year of fertilization experiments on Pinus pinaster in southwest France: the importance of phosphorus as a fertilizer. Forest Science, 55, 390-402.

Trichet P., Jolivet CI., Arrouays D., Loustau D., Bert D., Ranger J., 1999. Le maintien de la fertilité des sols forestiers landais dans le cadre de la sylviculture intensive de pins maritimes. Étud. Gestion Sols, 6(4), 197-214.

Trichet, P., D. Loustau, C. Lambrot and S. Linder, 2008. Manipulating nutrient and water availability in a maritime pine plantation: effects on growth, production, and biomass allocation at canopy closure. Annals of Forest Science 65(8): 814p1-814p11.

Turner, J. and J. Kelly, 1977. Soil chemical properties under naturally regenerated Eucalyptus spp. and planted Douglas-fir. Australian Forest Research 7(3): 163-172.

Turner, J. and M. J. Lambert, 1983. Nutrient cycling within a 27-year-old Eucalyptus grandis plantation in New South Wales. Forest Ecology and Management 6: 155-168.

Turner, J., Lambert, M.J., 2000. Change in organic carbon in forest plantation soils in eastern Australia. For. Ecol. Mgmt. 133, 231–247.

Twine, T.E., W.P. Kustas, J.M. Norman, D.R. Cook, P.R. Houser, T.P. Meyers, J.H. Prueger, P.J. Starks and M.L. Wesely. 2000. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. Agric. For. Meteorol. 103: 279-300.

V

Valente F, David JS and Gash JHC. 1997. Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. Journal of Hydrology 190: 141-162.

Van Dam, J.C., 2000. Field-scale water flow and solute transport. SWAP model concepts, parameter estimation, and case studies. PhD-thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 167 p., English and Dutch summaries.

van Dijk, A.I.J.M. and Keenan, R.J., 2007. Planted forests and water in perspective. Forest Ecology and Management, 251: 1-9.

van Gorsel, E., N. Delpierre, R. Leuning, A. Black, J. W. Munger, S. Wofsy, M. Aubinet, C. Feigenwinter, J. Beringer, D. Bonal, B. Chen, J. Chen, R. Clement, K.J. Davis, A.R. Desaim, D. Dragoni, S. Etzold, T. Grünwald, L. Gu, B. Heinesch, L.R. Hutyra, W.W.P. Jans, W. Kutsch, B.E. Law, M.Y. Leclerc, I. Mammarella, L. Montagnani, A. Noormets, C. Rebmann and S. Wharton. 2009. Estimating nocturnal ecosystem respiration from the vertical turbulent flux and change in storage of CO_2. Agric. For. Meteorol. 149: 1919-1930.

Van Oijen M, Ågren GI, Chertov O, Kellomäki S, Komarov A, Mobbs DC, Murray MB. Evaluation of past and future changes in European forest growth by means of four process-based models – Chapter 4.4. In: Kahle HP, Karjalainen T, Schuck A, Ågren GI, Kellomäki S, Mellert K, Prietzel J, Rehfuess KE, Spiecker H, (editors). Causes and Consequences of Forest Growth Trends in Europe - Results of the RECOGNITION Project. European Forest Institute Research Report 21. Brill., Leiden, 2008, pp. 183–199.

Verburg P.S.J.,Van Dam D., Hefting M.M. and Tietema A. 1999. Microbial transformations of C and N in a boreal forest floor as affected by temperature. Plant and Soil 208: 187–197.

Vesala, T., N. Kljun, U. Rannik, J. Rinne, A. Sogachev, T. Markkanen, K. Sabelfeld, Th. Foken and M.Y. Leclerc, 2008. Flux and concentration footprint modelling: State of the art. Environmental Pollution 152, 653-666.

Vidal J-P, Martin E, Franchistéguy L, Baillon M and Soubeyroux J-M. 2009. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with Safran system. International Journal of Climatology.

Villagarcía, L., Were, A., Domingo, F., García, M., Alados-Arboledas, L., 2007. Estimation of soil boundary-layer resistance in sparse semiarid stands for evapotranspiration modeling. J. Hydrol. 342 (1–2), 173–183.

W

Wallach D., Goffinet B. (1987): Mean Squared Error of Prediction in Models for Studying Ecological and Agronomic Systems. Biometrics 43:561-573.

Wallach D. & Goffinet B. (1989): Mean squared error of prediction as a criterion for evaluating and comaring system models. Ecol. Modell. 44: 209-306.

Wang, S., Grant R.F., Verseghy D.L., and Black T.A., 2002. Modelling carbon dynamics of boreal forest ecosystems using the Canadian Land Surface Scheme. Climatic Change, Vol. 55, pp. 451-477.

Wang Y.P. 1988. Crown structure, radiation absorption, photosynthesis and transpiration. PhD thesis, University of Edinburgh, 78 pp.

Wang YP, Jarvis P.G., 1990a. Description and validation of an array model – MAESTRO. Agric. For. Meteorol., 51:257-280.

Wang YP, Jarvis P.G., 1990b. Influence of crown structural properties on PAR absorption, photosynthesis, and transpiration in Sitka spruce – application of a model (MAESTRO). Tree Physiol. 7: 297-316.

Wang, Y.P., Jarvis, P.G. and Benson, M.L. 1990. Two-dimensional needle-area density distribution within the crowns of Pinus radiata. Forest Ecology and Management 32, 217-237.

Watson FGR; Vertessy RA, Grayson RB.1999. Large-scale modelling of forest hydrological processes and their long-term effect on water yield. Hydrological Processes 13:689–700.

Watt, M.S., P.W. Clinton, D. Valente, B. Richardson, E.G. Mason and A.C. Leckie. 2003. Above-ground biomass accumulation and nitrogen fixation of broom (*Cytisus scoparius* L.) growing with juvenile Pinus radiata on a dryland site. For. Ecol. Manag. 184: 93-104.

Webb, E.H., G.I. Pearman and R. Leuning. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water transfert, Q. J. Roy. Meteorol. Soc. 106: 85-100.

Wicke, W. and C. Bernhofer C. 1996. Energy balance comparison of the Hartheim forest and an adjacent grassland site during the HartX experiment. Theor. Appl. Climatol. 53: 49-58.

Williams M., Rastetter E.B., Fernandes D.N., Goulden M.L., Wofsy S.C., Shaver G.R., Melillo J.M., Munger J.W., Fan S.-M. & Nadelhoffer K.J. (1996) Modelling the soil-plantatmosphere continuum in a Quercus-Acer stand at Harvard Forest: the regulation of stomatal conductance by light, nitrogen and soil/plant hydraulic properties. Plant, Cell and Environment 19, 911–927.

Wilson, K.B. and D.D. Baldocchi. 2000. Seasonal and interannual variability of energy fluxes over a broadleaved temperate deciduous forest in North America. Agric. For. Meteorol. 100: 1-18.

Wilson, K., A. Goldstein, E. Falge, M. Aubinet, D. Baldocchi, P. Berbigier, C. Bernhofer, R. Ceulemans, H. Dolman, C. Field, A. Grelle, A. Ibrom, B.E. Law, A. Kowalski, T. Meyers, J. Moncrieff, R. Monson, W. Oechel, J. Tenhunen, R. Valentini and S. Verma. 2002. Energy balance closure at FLUXNET sites. Agric. For. Meteorol. 113: 223-243.

Wilson, K.B., D. D. Baldocchi and P. J. Hanson. 2001. Leaf age affects the seasonal pattern of photosynthetic capacity and net ecosystem exchange of carbon in a deciduous forest. Plant, Cell and Environment 24, 571–583

Whitehead D. 2011. Forests as carbon sinks—benefits and consequences. Tree Physiol. 31:893–902.

Whitehead D and Beadle CL. 2004. Physiological regulation of productivity and water use in *Eucalyptus*: a review. Forest Ecology and Management 193: 113–140.

Wullschleger SD, Gunderson CA, Tharp ML, Post WM and West DC. 2003. Simulated patterns of forest succession and productivity as a consequence of altered precipitation. pg. 433-446. In P.J. Hanson and S.D. Wullschleger (eds.) North American Temperate Deciduous Forest Responses to Changing Precipitation Regimes. Springer-Verlag, New York, NY.

Y

Yauschew Raguenes. 2012. Hétérogénéité régionale de la dynamique saisonnière de la végétation forestière (arbres et sous-bois) dans le massif de pin maritime des Landes. Titre provisoire. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1. En cours.

Z

Zimmer, D., Bouzigues, R., Chossat, J.C., Favrot, J.C., Guiresse, A.M. 1991. Importance et déterminisme des infiltrations profondes en luvisols-redoxisols drainés. Incidence sur les modalités de drainage. Science du Sol. 29 (4) : 321-337

A Annexes

ANNEXE 1

ÉLÉMENTS DE CLIMATOLOGIE ET DE STRUCTURE SUR LES SITES ÉTUDIÉS

i. Bilos

Les données SAFRAN (Vidal 2010) ont permis de retracer l'historique climatique sur le site de Bilos dont le suivi météorologique n'a commencé qu'en 2001. Une rétrospective de la climatologie observée sur le point de grille SAFRAN (maille France n° 7744) a donc été établie entre 1969 et début 2011. Ce point a une résolution de 8×8 km et contient notre site d'étude.

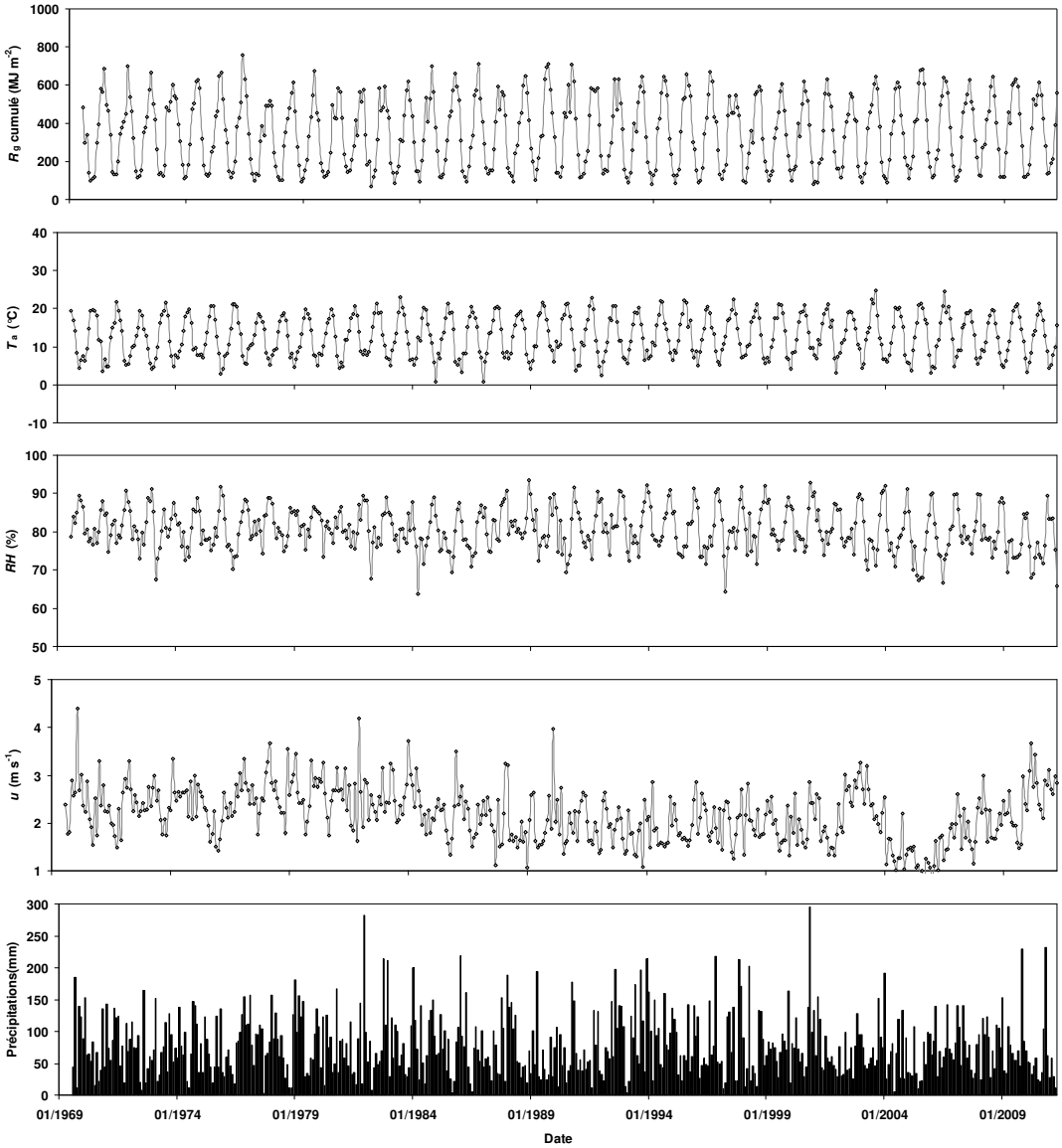


Figure A1.1 Rétrospective de la climatologie sur le point de grille SAFRAN n° 7744, contenant le site de Bilos. Les points représentent des données mensuelles. Le rayonnement global cumulé (R_g MJ m^{-2}), la température moyenne de l'air (T_a), l'humidité relative (*RH*), la vitesse de vent moyenne (*u*) et les précipitations mensuelles sont représentées.

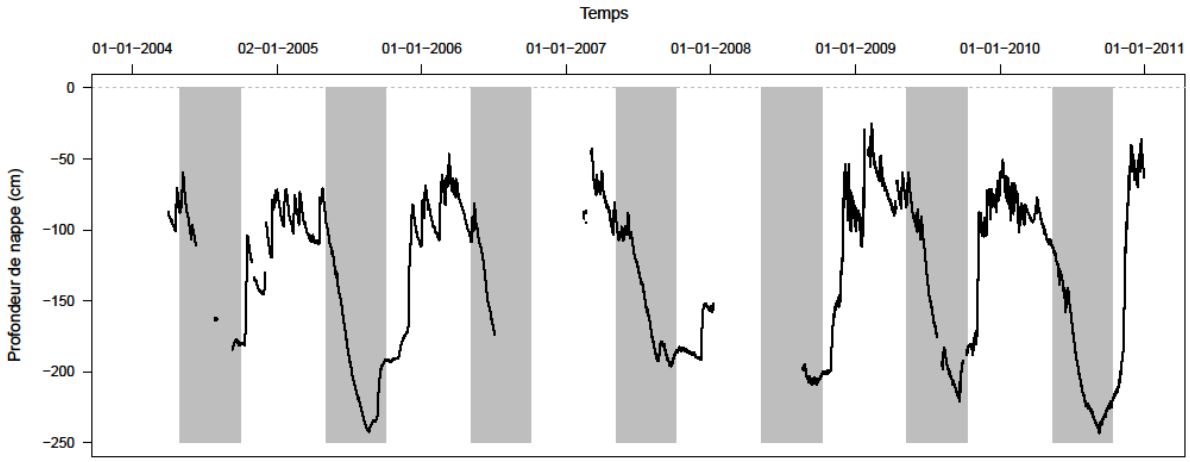


Figure A1.2 Chronique d'évolution de la profondeur de nappe de la zone d'étude Bilos depuis 2004.

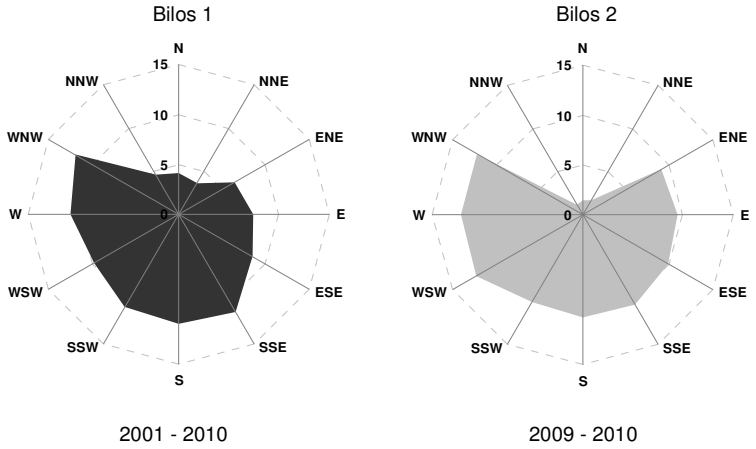


Figure A1.3 Synthèse 2001-2010 pour l'orientation des vents recensée à Bilos 1 et pour 2009-2010 à Bilos 2.

Les vents enregistrés à Bilos 1 sur la période 2001-2010 et Bilos 2 sur la période 2009-2010 proviennent à 75% d'un axe Ouest-Nord-Ouest/Est-Sud-Est. L'orientation de ces vents a eu toute son importance dans le choix du positionnement des mâts portant les mesures turbulentes sur ces deux parcelles.

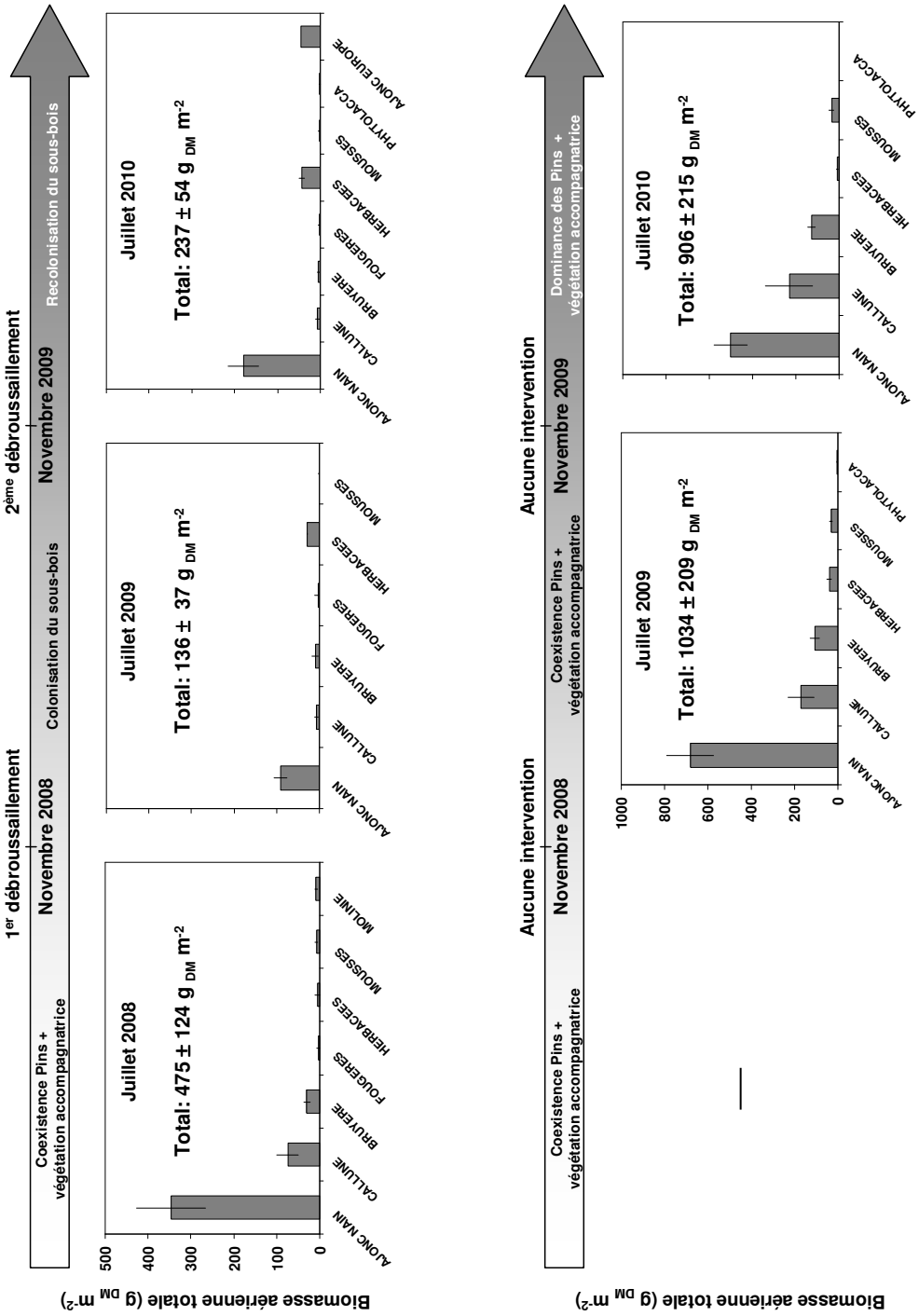


Figure A1.4 Chronologie des interventions sylvicoles pendant la période d'étude et biomasse aérienne (foliaire + pérenne si espèce ligneuse) de la végétation adventice associée sur le site de Bilos 1 (en haut) et sur le site de Bilos 2 (en bas).

ii. Montbartier

De la même façon que pour Bilos, une rétrospective de la climatologie observée sur le point de grille SAFRAN (maille France n° 8472) a été établie entre 1969 et début 2011 pour le site de Montbartier. Ce point a une résolution de 8×8 km et contient les coordonnées de notre site d'étude. Les caractéristiques des années étudiées au cours de ce travail (2009-2010-2011) sont décrites au cours des chapitres suivants.

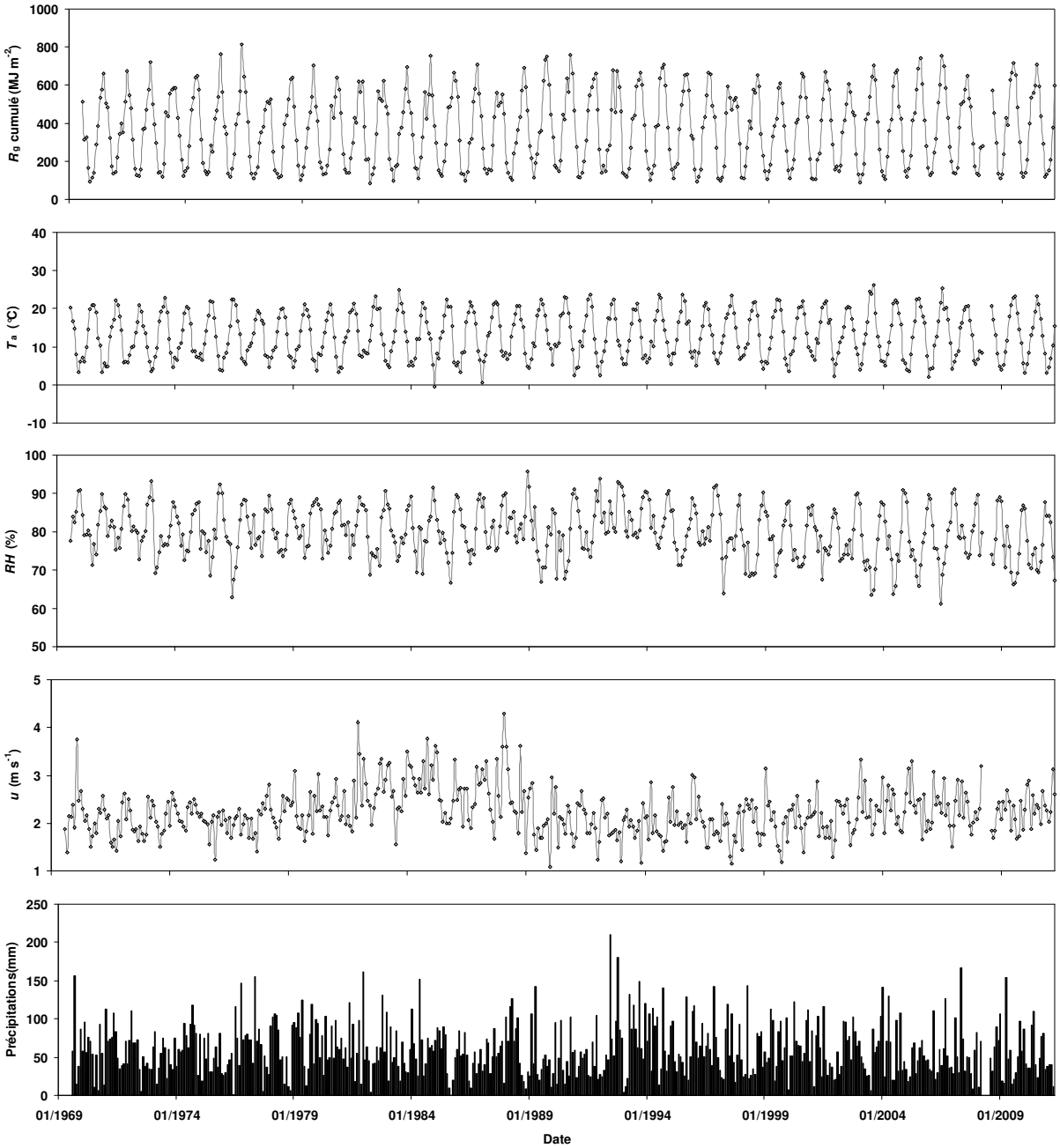


Figure A1.5 Rétrospective de la climatologie sur le point de grille SAFRAN n° 8472, contenant le site de Montbartier. Les points représentent des données mensuelles. Le rayonnement global cumulé (R_g MJ m^{-2}), la température moyenne de l'air (T_a), l'humidité relative (*RH*), la vitesse de vent moyenne (*u*) et les précipitations mensuelles sont représentées.

Les caractéristiques des années étudiées au cours de ce travail (2009-2010-2011) sont développées au cours des chapitres suivants.

Le site n'a pas été suivi d'un point de vue piézométrique. La profondeur de nappe a pu être caractérisée dans un triangle autour du site d'*Eucalyptus* grâce aux données disponibles sur le portail d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines (ADES, http://www.ades.eaufrance.fr/, dernier accès le 07/07/2011). Trois sites ont été retenus autour du site d'étude en tenant compte de la plus faible distance possible les séparant (Figure X.). Les chroniques piézométriques représentées commencent en 2005 (Figure X.).

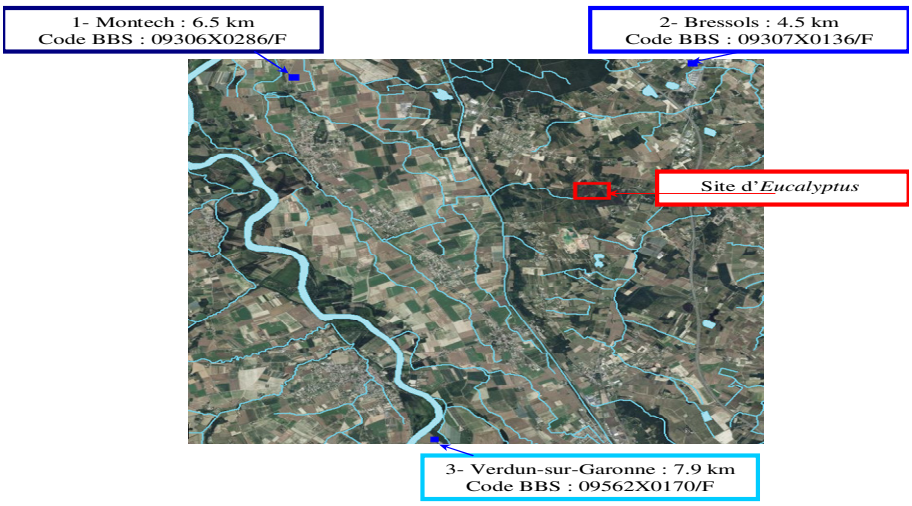


Figure A1.6 Localisation des piézomètres présents autour du site d'étude.

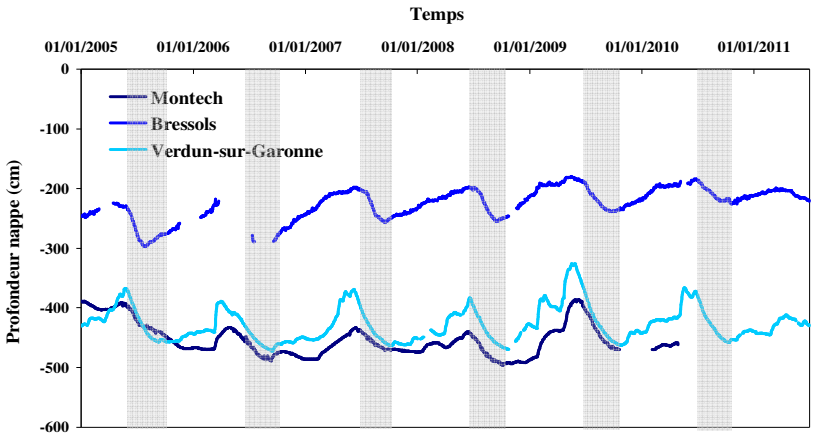


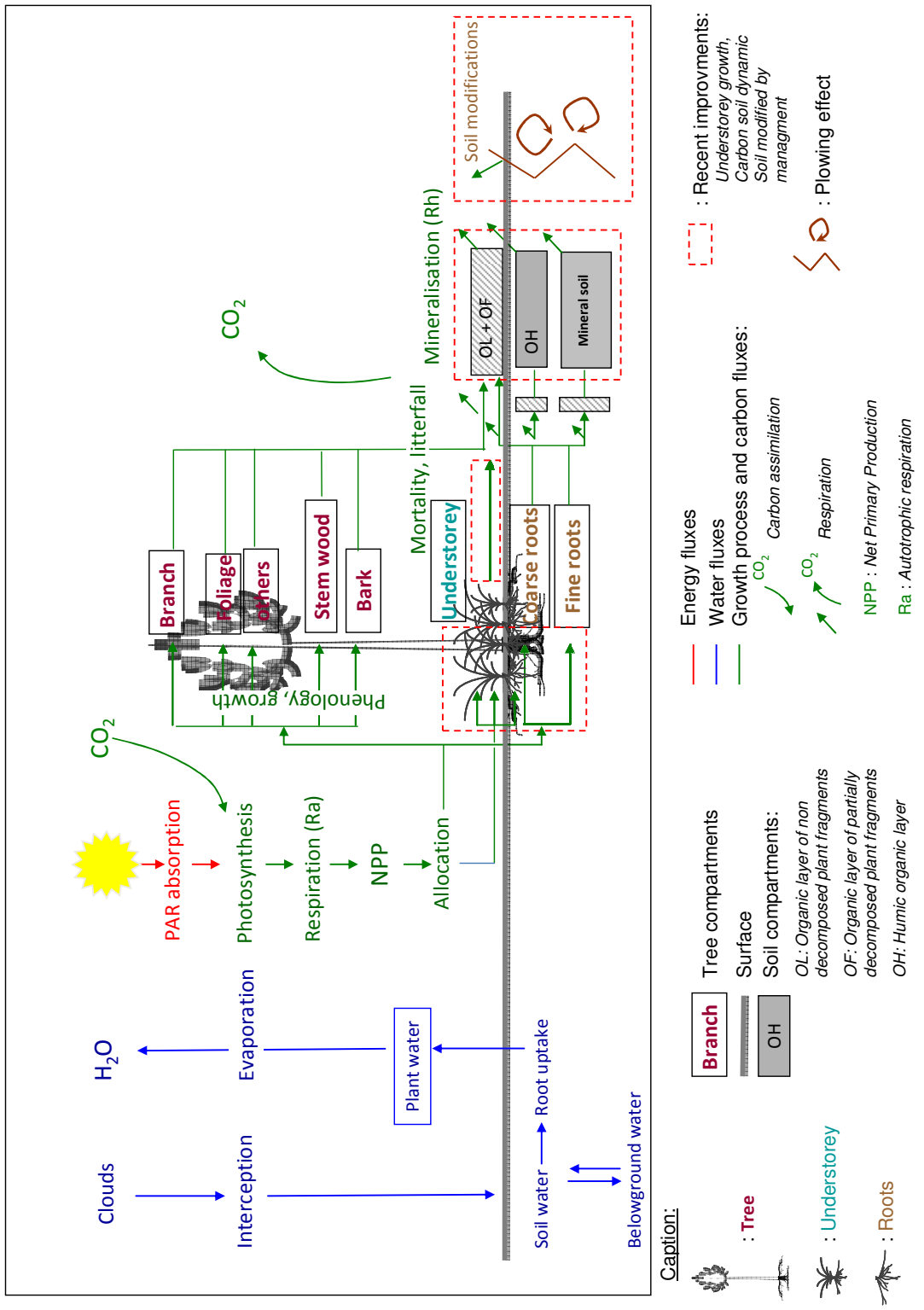
Figure A1.7 Chroniques piézométriques des sites repérés autour de la zone d'étude depuis 2005.

Cette analyse rapide montre que la nappe phréatique n'atteint jamais la surface sur les points considérés et que le plafond hivernal est atteint vers 2 m (Bressols). Si ces chroniques ne nous permettent pas d'attester l'existence ou non d'une nappe en surface sur notre site d'étude, nous faisons l'hypothèse qu'il n'existe pas de nappe permanente dans la zone racinaire du site d'étude (0 – 1.50 m). La présence d'une fosse creusée sur 1.50 m de profondeur n'a pas révélé de remontée de nappe en hiver. Cependant, nous verrons au cours du Chapitre 4 que ce type de sol peut révéler la présence de nappe temporaire perchée en période de fortes précipitations.

ANNEXE 2

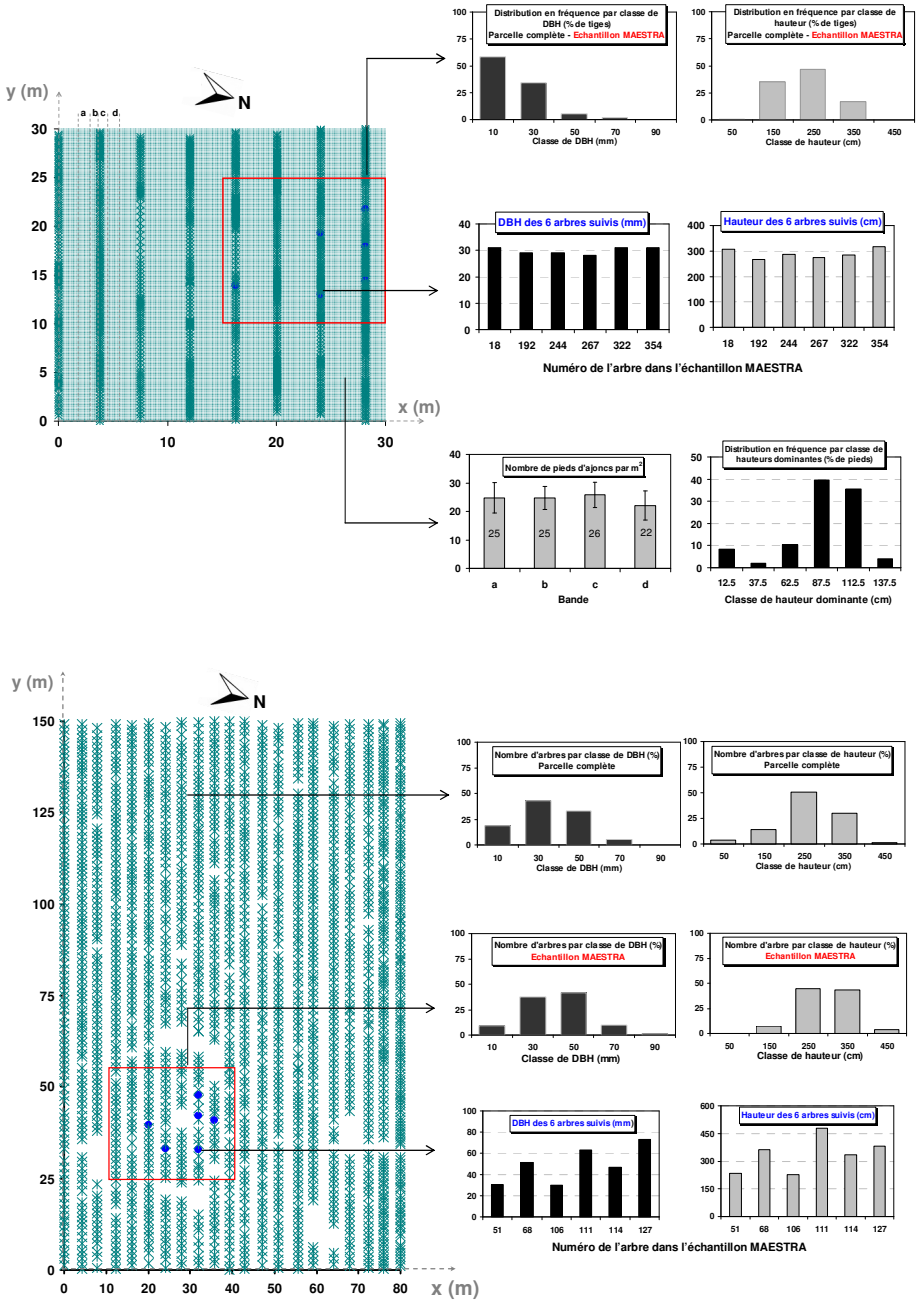
GRAECO + : APPROCHE MULTI-PROCESSUS

Les parties pointillées rouge indiquent les apports à la version GRAECO antérieure



ANNEXE 3

A- DESCRIPTION DES PARCELLES-CHANTILLON UTILISÉES DANS MAESTRA



(Suite Figure 5.4.) Plan des parcelles échantillon utilisées pour la paramétrisation des scènes du modèle Maestra et histogramme de distribution en diamètre et hauteur des arbres de la parcelle et de l'échantillon des arbres 'cible' suivis en flux de sève et accroissement radial pour chaque placette. B. Pins maritimes. C. Pins maritimes et ajoncs.

B- DESCRIPTION DES PARAMÈTRES D'ENTRÉE DU MODÈLE MAESTRA

Description des variables et unités	Symboles	*Eucalyptus*	Pins	Ajoncs (+Pins)	Référence (cas du Pins)
Longueur de la parcelle suivant X m	**X0**	0	0	0	**cette étude**
Longueur de la parcelle suivant Y m	**Y0**	0	0	0	**cette étude**
Coordonnée d'origine de l'axe X m	**XMAX**	50	30	15	**cette étude**
Coordonnée d'origine de l'axe Y m	**YMAX**	50	30	15.5	**cette étude**
Nombre d'arbres dans la parcelle	**NOTREES**	287	151	1337	**cette étude**
Pente suivant la direction X °	**XSLOPE**	0	0	0	**cette étude**
Pente suivant la direction Y °	**YSLOPE**	0	0	0	**cette étude**
Angle (X-Sud)°	**BEARING**	290	164.5	164.5	**cette étude**
Hauteur de mesure m	**ZHT**	16	6.4	6	**cette étude**
Hauteur de déplacement m	**ZPD**	10.5	2.29	1.9	**cette étude**
Longueur de rugosité m	**Z0HT**	1.4	0.29	0.2	**cette étude**
Coordonnées dans la placette	**XYCOORD**	FIGURE 5.3	FIGURE 5.3	FIGURE 5.3	**cette étude**
Rayon de la couronne suivant l'axe x (uniforme) m	**ALLRADX**	Mesures	Mesures	Mesures	**cette étude**
Rayon de la couronne suivant l'axe y (uniforme) m	**ALLRADY**	Mesures	Mesures	Mesures	**cette étude**
Hauteur de la couronne (par arbre) m	**INDIVHTCROWN**	Mesures	Mesures	Mesures	**cette étude**
Hauteur du tronc (par arbre) m	**INDIVHTTRUNK**	Mesures	Mesures	Mesures	**cette étude**
Diamètre du tronc à 1.30 m (par arbre) m	**INDIVDIAM**	Mesures	Mesures	Mesures	**cette étude**
Surface foliaire m^2	**INDIVLAREA**	Mesures	Mesures	Mesures	**cette étude**

Description des variables et unités	Symboles	*Eucalyptus*	Pins	Ajoncs (+Pins)	Référence (cas du Pins)
Orientation/distribution de l'angle foliaire	**ELP**	0.5	1	1	
Type de distibution du feuillage	**JLEAF**	Uniform	β-distribution	Uniform	
Nombre de classe d'âge pour lequel BPT est spécifié	**NOAGEC**	-	3	-	
Coefficient de la β– distribution	**BPT**	-	(H1) 13.5830-2.2983-0.9600	-	
(Equation 5.1)			(R1) 55.6227-4.3913 - 4.35		**Adapté de Porté et al. 2000**
Pour 3 classes d'âges		-	(H2) 568.26- 2.81-5.6136	-	**cette étude**
Exemple :			(R2) 63.6298-2.1796-4.3102		
H1 : distribution horizontale classe d'âge 1		-	(H3) 568.26- 2.81-5.6134	-	
R1 : distribution radiale classe d'âge 1			(R3) 63.6298-2.1796-4.3100		
Coefficient d'agrégation des cohortes	**RANDOM**	0.7	0.74	0.74	**Ogée 2000**
Coefficient d'atténuation du vent dans le couvert	**EXTWIND**	1.3	1.2	1.2	**Estimation**
Concentration en CO_2 atmosphérique ppm	**CA**	380	380	380	**Estimation**
Point de flétrissement mm	**SWMIN**	500	50	50	**cette étude**
Capacité au champ mm	**SWMAX**	680	140	140	**cette étude**
Rayonnement global W m^{-2}	**RAD**	Mesures	Mesures	Mesures	**cette étude**
Rayonnement photosynthétiquement actif µmol m^{-2} s^{-1}	**PAR**	Mesures	Mesures	Mesures	**cette étude**
Température de l'air (°C)	**TAIR**	Mesures	Mesures	Mesures	**cette étude**
Humidité relative (%)	**RH%**	Mesures	Mesures	Mesures	**cette étude**
Vitesse du vent m s^{-1}	**WIND**	Mesures	Mesures	Mesures	**cette étude**
Pression atmosphérique (Pa)	**PRESS**	Mesures	Mesures	Mesures	**cette étude**
Déficit de presssion de vapeur (Pa)	**VPD**	Mesures	Mesures	Mesures	**cette étude**
Contenu en eau du sol mm	**SW**	Mesures	Mesures	Mesures	**cette étude**
Proportion du feuillage par classe d'âge	**PROP**	-	0.6078 -0.383 - 0.0092	-	**Porté et al. 2000**
Réflectance du sol dans les trois domaines (PAR – NIR – IRT)	**RHSOL**	0.10 - 0.30 -0.05	0.05 - 0.30 - 0.03	0.05 - 0.30 - 0.03	**Berbigier et Bonnefond, 1995**
Transmittance des feuilles dans les trois domaines (PAR – NIR – IRT)	**ATAU**	0.093 - 0.34 - 0.01	0.015 - 0.5 - 0.01	0.015 - 0.5 - 0.01	**Berbigier et Bonnefond, 1995**
Réflectance des feuilles dans les trois domaines (PAR – NIR – IRT)	**ARHO**	0.082 - 0.49 - 0.05	0.09 - 0.55 - 0.05	0.09 - 0.55 - 0.05	**Berbigier et Bonnefond, 1995**

Description des variables et unités	Symboles	*Eucalyptus*	Pins	Ajoncs (+Pins)	Référence (cas du Pins)
Modèle de conductance : Jarvis	**MODELGS**		Jarvis		
conductance maximale mol m^{-2} s^{-1}	**GSREF**	0.35	1.58	1.58	**cette étude**
conductance minimale mol m^{-2} s^{-1}	**GSMIN**	0	0	0	**cette étude**
Paramètre pour la réponse de la conductance au PAR µmol m^{-2} s^{-1}	**PAR0**	25	25	25	**cette étude**
Paramètre pour la réponse de la conductance au VPD Pa	**D0**	79.6963	18	18	**cette étude**
Largeur des feuilles/aiguilles	**WLEAF**	0.02	0.002	0.003	**Estimation**
Nombre de face avec stomates	**NSIDES**	2	2	2	**Estimation**
Paramètre pour la réponse de la conductance à SMD	**SMD1**	0.0156	0.0156	0.0156	**Granier et Loustau 1994**
Paramètre pour la réponse de la conductance à SMD	**SMD2**	4.269	4.269	4.269	**Granier et Loustau 1994**

Description des variables et unités	Symboles	*Eucalyptus*	Pins	Ajoncs (+Pins)	Référence (cas du Pins)
Nombre de classe d'âge à considérer pour les paramètres photosynthétiques	**NOLAYERS**	1	3	1	**Medlyn et al. 2005**
Flux maximal de transport des électrons µmol m^{-2} s^{-1}	**JMAX**	191	180 - 120 - 120	180	**Medlyn et al. 2005**
Vitesse maximale de carboxylation µmol m^{-2} s^{-1}	**VCMAX**	82	120 - 80 - 80	120	**Medlyn et al. 2005**
Conccavité de la réponse de Jmax à aPAR	**THETA**	0.7	0.95	0.95	**Porté et Loustau 1998**
Efficience quantique pour les trois classes d'âge	**AJQ**	0.324	0.2 - 0.15 - 0.15	0.2	**Porté et Loustau 1999**
Paramètres pour la courbe de réposne de Jmax à T (J mol^{-1})	**EAVJ**	43790	38670	38670	**Medlyn et al. 2002a**
Paramètres pour la courbe de réposne de Jmax à T (J mol^{-1})	**EDVJ**	200000	200000	200000	**Dreyer et al. 2001, Medlyn et al. 2002a**
Paramètres pour la courbe de réposne de Jmax à T (J mol^{-1})	**DELSJ**	644.4338	638.1	638.1	**Medlyn et al. 2002b**
Choix de la référence pour la dépendance de Km à la température	**IECO**	1	1	1	**Medlyn et al. 1999**
Paramètres pour la courbe de réposne de Vcmax à T (J mol^{-1})	**EAVC**	51560	58520	58520	**Medlyn et al. 2002a**
Taux de respiration foliaire nocturne µmol m^{-2} s^{-1}	**RD**	0.41	0.74	0.74	**Medlyn et al. 2005**
Température à laquelle RD est spécifiée (°C)	**RTEMP**	25	25	25	**Fixé**
Coefficient de l'exponentielle pour la réponse de R à la T	**Q10F**	0.0693	0.0693	0.0693	**Bosc et al. 2003**
Fraction de réduction de la respiration nocturne à la lumière	**DAYRESP**	0.6	0.6	0.6	**Brooks and Farquhar 1985**

Pour l'*Eucalyptus*, Les paramètres photosynthétiques sont obtenus d'après Duursma (*comm.pers*).

ANNEXE 4

A- CALCUL DU STOCK DE CARBONE CUMULÉ À UNE PROFONDEUR Z.

Le profil vertical de teneur en carbone du sol, C (gC.m^{-3}) en fonction de la profondeur, z (m), est donné par l'équation (A5.1) reprise du modèle proposé par Arrouays et Pelissier (1994), dont la courbure, paramètre b, est fixée par l'utilisateur et les teneurs en haut et en bas du profil du sol, C_2 et C_1, sont connues.

$$\frac{C_z - C_1}{C_2 - C_1} = \frac{e^{-b\,z} - e^{-b\,z_1}}{e^{-b\,z_2} - e^{-b\,z_1}} \qquad \text{(A 5.1)}$$

C_1 et C_2 sont les teneurs aux cotes $z = z_1$ et $z = z_2$, respectivement en bas et en haut de profil. L'intégration de $C_z\,dz$ donne le stock de carbone du sol à la profondeur z, X_z :

$$X_z = \frac{T1}{b} \cdot \left(1 - e^{-b\,z1}\right) + z \cdot T2 \qquad \text{(A 5.2)}$$

Avec :

$$T1 = \frac{C_2 - C_1}{e^{-b\,z_2} - e^{-b\,z_1}} \qquad \text{(A 5.3)}$$

$$T2 = C_2 - T1 \cdot e^{(-b\,z)} \qquad \text{(A 5.4)}$$

L'équation (A5.2) donne directement le stock de carbone cumulé entre la surface du sol et une profondeur donnée si C_1 et C_2 sont connus, le stock total de carbone étant le cas ou z=z_1.

Alternativement, si le stock total est connu mais pas la teneur en haut de profil, le stock cumulé à une profondeur donnée z est calculée de la même façon à partir de la teneur en bas de profil, C_1, et de la profondeur totale de sol z_1, C_2 étant alors donné par :

$$C_2 = \frac{b \cdot (z_1 \cdot C_1 - X)}{e^{-b\,z1}(b \cdot z_1 + 1) - 1} \cdot \left(e^{-b\,z_2} - e^{-b\,z_1}\right) + C_1 \qquad \text{(A 5.5)}$$

B- PARAMÈTRES TEST POUR LE MODULE DE CROISSANCE DU SOUS-BOIS

Ce paramétrage est associé à la Figure 5.32 du Chapitre 5.

Tableau 1. Value of parameters of the understorey growth module used for the prediction shown in chapter 5 section 5.3 (Figures 5.30- 5.31).

Parameter	**Component**			**Units**
	Foliage	Roots	Perennial	
dW_{pot} / dt (derivative of logistic equation)	$W(t\text{-}1) \times [\mu - (W(t\text{-}1) / W_{max}) \times (\mu - 1)]$		-	
μ	1.068	1.025	-	
Temperature sum for leaf unfolding	40	0	-	deg. day
W_{max} value	125	150	-	$gC.m^{-2}$
Maximal growing season duration	270	270	365	day
GPP allocation coefficient				-
Min(λ)	0.47	0.48	0.05	
Max(λ)	0.48	0.47	0.05	
Leaf area to mass ratio	20			$m^2.kg^{-1}$
LUE_U	0.2			$gC.mol\ PAR^{-1}$
SMD threshold for growth	0.6	0.6	-	-
SMD threshold for mortality	0.85	0.085	-	-
Temperature threshold of mortality	0 (in air)	0 (in soil)	-	°C
Mortality rate for :				
- water stress	0.025	0.0125	0	day^{-1}
- frost	0.1	0.1	0	day^{-1}
- end of season	1	0.03	0.0021	day^{-1}

ANNEXE 5

A- PARAMETRISATION DE GRAECO+ POUR LES TROIS SITUATIONS

Ce tableau se réfère au Chapitre 6, § 6.1, 6.2 et 6.3.

Paramètres	Définitions	Unités	1980-2008	2000-2005	2006-2010	2005-2011	2005-2011
Peuplement			**PINS MARITIMES**			**EUCAL. 1ère ROTATION**	**EUCAL. 2ème ROTATION**
Longitude	Longitude du site	°	0.77	0.96	0.96	1.29	1.29
Latitude	Latitude du site	°	44.7	44.49	44.49	43.9	43.9
Altitude	Altitude	m	61	40	40	147	147
Stand area	Surface de la parcelle	m^2	10 000	10 000	900	2500	2500
Year of plantation	Année de plantation / semis	année	1970	1999	2004	2004	1994
Age of last cut clump	Age souterrain	an	0	0	0	0	10
1. Compartiment arbres							
Cycle du carbone							
Allométrie et croissance							
Carbon fraction	Fraction de carbone contenu dans la matière sèche	-	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48
SLA	Surface massique spécifique	$m^2_{LA}\ kg^{-1}$	6.5	8.9	8.9	10.46	10.46
LAI_LeafArea_ratio	Facteur de conversion surface totale/surface projetée	$m^2_{LAI}\ m^{-2}_{LA}$	0.389	0.5	0.5	0.5	0.5
a1_SenBch	Paramètre de sénescence des branches	-	0.3678	0.3678	0.3678	0.5	0.0243
a2_SenBch	‘’	-	1.0966	1.0966	1.0966	1.0966	1.1435
a3_SenBch	‘’	-	-1.256	-1.256	-1.256	-1.256	0
a1_SenRoot	Paramètre de sénescence des racines	-	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1
a2_SenRoot	‘’	-	1	1	1	1	1
a3_SenRoot	‘’	-	0	0	0	0	0
a1_Wn	Paramètre pour l’estimation de la biomasse foliaire	-	1.7495	1.7495	1.7495	0.206	0.206
a2_Wn	‘’	-	0.8682	0.8682	0.8682	0.8287	0.8287
a3_Wn	‘’	-	-0.761	-0.761	-0.761	0	0
a1_Wn1	Paramètre pour l’estimation de la 1ère cohorte	-	0.8212	0.8212	0.8212	0.5475	0.4692
a2_Wn1	‘’	-	0.796	0.796	0.796	0.796	0.8287
a3_Wn1	‘’	-	-0.602	-0.602	-0.602	-0.602	-0.2
a1_DBH	Paramètre pour l’estimation du diamètre du tronc à 1.30m	-	3.633	3.633	3.633	0.0217	0.0217
a2_DBH	‘’	-	0.42208	0.42208	0.42208	0.4730	0.4730
a3_DBH	‘’	-	-0.064594	-0.064594	-0.064594	0	0
a1_H	Paramètre pour l’estimation de la hauteur	-	1.5814	1.5814	1.5814	1.3040	1.3040
a2_H	‘’	-	0.39745	0.39745	0.39745	0.2195	0.2195
a3_H	‘’	-	0.04182	0.04182	0.04182	0.8366	0.8366
a1_Wstem	Paramètre pour l’estimation de la biomasse du tronc	-	0.34387	0.34387	0.34387	0.4692	0.4692
a2_Wstem	‘’	-	1.0628	1.0628	1.0628	1.0767	1.0767
a3_Wstem	‘’	-	0.13145	0.13145	0.13145	0	0
a1_WrEq	Constante à l’équilibre de la biomasse racinaire et aérienne	-	0.2118	0.2118	0.2118	0.2118	0.2118
Respiration	(Bosc (1999)						
RmQ10	Facteur d’augmentation de la	-	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13

	respiration pour une augmentation de T de 10°C						
Rm15	Respiration d'entretien à 15°C	gC	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
RgCost	Coût respiratoire de la croissance	-	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28

Paramètres	**Définitions**	**Unités**	**1980-2008**	**2000-2005**	**2006-2010**	**2005-2011**	**2005-2011**
Peuplement			**PINS MARITIMES**			**EUCAL ; 1ère ROTATION**	**EUCAL. 2ème ROTATION**
1. Compartiment arbres (suite)							
Kb_Growth	Paramètre pour l'intensité de la croissance de l'organe (Bosc 1999)	-	105.5	105.5	105.5	105.5	105.5
Kc_Growth	''	-	2.084	2.084	2.084	2.084	2.084
Kd_Growth	''	-	62.85	62.85	62.85	62.85	62.85
Heat sum for B4	Somme de température pour le début de la croissance	°C day	1400	1400	1400	1400	1400
Assimilation	Delzon (2004)						
LUEmax	Efficience d'utilisation de la lumière maximale	gC mol $_{PAR}$	0.5901	0.5901	0.5901	0.5	0.5
k_v	Paramètre de la fonction de pondération de LUE au VPD	-	0.000048	0.000048	0.000048	0.000048	0.000048
k_q	Paramètre de la fonction de pondération de LUE au rayonnement global	-	0.1365	0.1365	0.1365	0.1365	0.1365
k_T0	Paramètre de la fonction de pondération de LUE aà la température	-	1.466	1.466	1.466	1.466	1.466
k_T1	''	-	0.4091	0.4091	0.4091	0.4091	0.4091
k_T2	''	-	0.1975	0.1975	0.1975	0.1975	0.1975
k_s	Paramètre de la fonction de pondération de LUE à sinnus β	-	0.8199	0.8199	0.8199	0.8199	0.8199
k_CO2	Paramètre de la fonction de pondération de LUE à la concentration en CO2 atmosphérique	-	0.269	0.269	0.269	0.269	0.269
k_SMD	Paramètre de la fonction de pondération de LUE au déficit hydrique du sol	-	1	1	1	1	1
N_Leaf	Paramètre de la fonction de pondération de LUE à l'azote foliaire	-	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1
RmLeaf25	Respiration d'entretien des feuilles à 25°C	gC m^{-2} h^{-1}	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
RmLeafQ10	Facteur d'augmentation de la respiration pour une augmentation de T de 10°C	-	2	2	2	2	2
Allocation							
Istress1	Paramètres pour la fct d'allocation partie	-	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32

	aérienne/partie racinaire						
Istress2	‘’	-	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Istress3	‘’	-	2	2	2	2	2
Cycle de l’eau							
gsmax	Conductance stomatique maximale	$m\ s^{-1}$	0.00424	0.00424	0.00424	0.035	0.035
k_SMD1	Paramètre de la fonction de pondération de gs au déficit hydrique du sol	-	1	1	1	2	2
k_rs1	Paramètre de la fonction de pondération de gs au rayonnement intercepté	-	0.00918	0.00918	0.00918	0.00918	0.00918
k_rs2	‘’	-	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13
k_vpd1	Paramètre de la fonction de pondération de gs au VPD	-	0.000811	0.000811	0.000811	0.02	0.02
k_vpd2	Paramètre de la fonction de pondération de gs au VPD	-	1.08	1.08	1.08	1.07	1.07
Storage capacity	Capacité de stockage (Loustau et al. 1992)	$kg\ m^{-2}$	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125
k_interception	Coefficient d’interception	-	-0.33	-0.33	-0.33	-0.33	-0.33
Bilan d’énergie							
k_d	Rapport hauteur de couvert/hauteur de déplacement d	-	0.9	0.75	0.75	0.9	0.9
k_z0	Rapport hauteur de couvert/longueur de rugosité z0	-	0.13	0.1	0.1	0.13	0.13
k_dif	Coefficient d’extinction du rayonnement de courte longueur d’onde diffus	-	-0.467	-0.467	-0.467	-0.467	-0.467
k_dir	Coefficient d’extinction du rayonnement de courte longueur d’onde direct	-	-0.33	-0.33	-0.33	-0.33	-0.33
Albedo	Albédo	-	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Kth1	Coefficient d’atténuation du rayonnement thermique	-	-0.538	-0.538	-0.538	-0.538	-0.538
Kth2	Coefficient d’atténuation du rayonnement thermique	-	0.0177	0.0177	0.0177	0.0177	0.0177
Emissivity	Emissivité	-	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
2. Compartiment sous-bois							
W_L	Biomasse foliaire initiale	$kg_{MS}\ m^{-2}_{sol}$	0	0	0.01	0	0
W_R	Biomasse racinaire initiale	$kg_{MS}\ m^{-2}_{sol}$	0	0	0.01	0	0
W_P	Biomasse pérenne initiale	$kg_{MS}\ m^{-2}_{sol}$	2	2	0.19	0	0
Cpool_L	Pool initiale de carbone du compartiment feuille	$gC\ m^{-2}_{sol}$	25	25	32	0	0
Cpool_R	Pool initiale de carbone du compartiment feuille	$gC\ m^{-2}_{sol}$	25	25	22	0	0
Cpool_P	Pool initiale de carbone du compartiment feuille	$gC\ m^{-2}_{sol}$	50	50	0.74	0	0
Allométrie							
SLA	Surface massique spécifique	$m^2_{LA}\ kg^{-1}$	20	20.4	20.4	0.0001	0.0001
LAI_LeafArea_ratio	Facteur de conversion surface totale/surface projetée	$m^2_{LAI}\ m^{-2}_{LA}$	1	0.5	0.5	1	1

Paramètres	Définitions	Unités	1980-2008	2000-2005	2006-2010	2005-2011	2005-2011
Peuplement			**PINS MARITIMES**			**EUCAL ; 1ère ROTATION**	**EUCAL. 2ème ROTATION**
2. Compartiment sous-bois (suite)							
Height_max	Hauteur maximale de la strate	m	0.8	0.95	0.95	0.05	0.05
Aerial_fraction_of_perennial	Fraction aérieenne de la parrtie pérenne	-	0.15	0.3	0.3	0	0
Phénologie							
Annual heat-sum to start leaf growth	Somme des dégrés-jour pour la croissance foliaire	°C jour	450	40	40	450	450
Annual soil heat sum to start root growth	Somme des dégrés-jour pour la croissance racinaire	°C jour	450	1	1	450	450
Annual heat-sum to start perennial growth	Somme des dégrés-jour pour la croissance de la partie pérenne	°C jour	450	40	40	450	450
Growth length of leaf	Durée de croissance des feuilles	jour	200	270	270	200	200
Growth length of root	Durée de croissance des racines	jour	200	270	270	200	200
Growth length of perennial	Durée de croissance de la partie pérenne	jour	200	270	270	200	200
Croissance							
Maximal annual LAI production	LAI maximal potentiellement atteignable par le sous-bois	m^2 m^{-2} / cycle de croissance	5	5	5	0	0
Maximal annual fine root production	Biomasse maximale potentiellement atteignable par les racines	kg_{DM} / cycle de croissance	1	1	1	1	1
Maximal annual perennial production	Biomasse maximale potentiellement atteignable par la partie pérenne	kg_{DM} / cycle de croissance	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
SMD limiting growth of leaf	Seuil de SMD limitant la croissance des feuilles	-	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
SMD limiting growth of root	Seuil de SMD limitant la croissance des racines	-	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
SMD limiting growth of perennial	Seuil de SMD limitant la croissance de la partie pérenne	-	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Allocation							
Allocation to perennial	Allocation de carbone à la partie pérenne	-	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Mortalité des feuilles							
Temperature threshold	Seuil de température pour la mortalité des feuilles	°C	0	0	0	0	0
Temperature mortality rate	Taux de mortalité des feuilles du au seuil de la température atteint	kg_{DM} / kg_{DM} / jour	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Paramètres	Définitions	Unités	1980-2008	2000-2005	2006-2010	2005-2011	2005-2011
Peuplement			**PINS MARITIMES**			**EUCAL ; 1ère ROTATION**	**EUCAL. 2ème ROTATION**
2. Compartiment sous-bois (suite)							
Mortalité des feuilles (suite)							
SMD threshold	Seuil de SMD pour la mortalité des feuilles	-	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
SMD mortality rate	Taux de mortalité des feuilles du au seuil de déficit hydrique du sol atteint	kg_{DM} / kg_{DM} / jour	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
DOY threshold	Stade phénologique de la mortalité des feuilles	jour	315	315	315	315	315
DOY mortality rate	Taux de mortalité des feuilles du au stade phénologique atteint	kg_{DM} / kg_{DM} / jour	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Litterfall DPM on RPM rate	Taux de litière feuilles vers le compartiment DPM par rapport au compartiment RPM	gC / gC	4	4	4	4	4
Litterfall mean age	Age moyen de la litière feuilles	année	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Mortalité des racines							
Temperature threshold	Seuil de température pour la mortalité des racines	°C	0	0	0	0	0
Temperature mortality rate	Taux de mortalité des racines du au seuil de la température atteint	kg_{DM} / kg_{DM} / jour	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
SMD threshold	Seuil de SMD pour la mortalité des racines	-	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
SMD mortality rate	Taux de mortalité des racines du au seuil de déficit hydrique du sol atteint	kg_{DM} / kg_{DM} / jour	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
DOY threshold	Stade phénologique de la mortalité des racines	jour	315	315	315	315	315
DOY mortality rate	Taux de mortalité des racines du au stade phénologique atteint	kg_{DM} / kg_{DM} / jour	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Litterfall DPM on RPM rate	Taux de litière racines vers le compartiment DPM par rapport au compartiment RPM	gC / gC	2	2	2	2	2
Litterfall mean age	Age moyen de la litière racines	année	2	2	2	2	2
Mortalité de la partie pérenne							
Temperature threshold	Seuil de température pour la mortalité de la partie pérenne	°C	-15	-15	-15	-15	-15
Temperature mortality rate	Taux de mortalité de la partie pérenne du au seuil de la température atteint	kg_{DM} / kg_{DM} / jour	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025

SMD threshold	Seuil de SMD pour la mortalité de la partie pérenne	-	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
SMD mortality rate	Taux de mortalité de la partie pérenne du au seuil de déficit hydrique du sol atteint	kg_{DM} / kg_{DM} / jour	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
DOY threshold	Stade phénologique de la mortalité de la partie pérenne	jour	0	0	0	0	0
DOY mortality rate	Taux de mortalité du au stade phénologique atteint	kg_{DM} / kg_{DM} / jour	0	0	0	0	0
Litterfall DPM on RPM rate	Taux de litière partie pérenne vers le compartiment DPM par rapport au compartiment RPM	gC / gC	4	0.8	0.8	0.8	0.8
Litterfall mean age	Age moyen de la litière partie pérenne	année	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Cycle du carbone							
Carbon fraction	Fraction de carbone contenu dans la matière sèche	-	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Assimilation	Delzon (2004)						
LUEmax	Efficience d'utilisation de la lumière maximale	gC mol_{PAR}	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
k_v1	Paramètre de la fonction de pondération deLUE au VPD	-	0.0001248	0.0001248	0.0001248	0.0001248	0.0001248
pDirInefficace	Paramètre de la fonction de pondération de LUE à la fraction de rayonnement direct	-	0.669	0.669	0.669	0.669	0.669
k_CO2	Paramètre de la fonction de pondération de LUE à la concentration en CO2 atmosphérique	-	0.269	0.269	0.269	0.269	0.269
k_N	Paramètre de la fonction de pondération de LUE à l'azote foliaire	-	1	1	1	1	1
Respiration des feuilles							
RmQ10	Facteur d'augmentation de la respiration pour une augmentation de T de 10°C	-	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13
Rm15	Respiration d'entretien à 15°C	gC kg_{DM}^{-1} h^{-1}	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
RgCost	Coût respiratoire de la croissance	gC / gC	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
Respiration des racines							
RmQ10	Facteur d'augmentation de la respiration pour une augmentation de T de 10°C	-	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13
Rm15	Respiration d'entretien à 15°C	gC kg_{DM}^{-1} h^{-1}	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
RgCost	Coût respiratoire de la croissance	gC / gC	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
Respiration de la partie							

pérenne							
RmQ10	Facteur d'augmentation de la respiration pour une augmentation de T de 10°C	-	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13
RmS15	Respiration d'entretien à 15°C	gC kg_{DM}^{-1} h^{-1}	0.000682	0.000682	0.000682	0.000682	0.000682
RgCost	Coût respiratoire de la croissance	gC / gC	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
Cycle de l'eau							
gsmax	Conductance stomatique maximale	m s^{-1}	0.0062	0.0062	0.0062	0.0062	0.0062
k_SMD1	Paramètre de la fonction de pondération de gs au déficit hydrique du sol	-	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
k_rs1	Paramètre de la fonction de pondération de gs au rayonnement intercepté	-	0.0473	0.0473	0.0473	0.0473	0.0473
k_rs2	''	-	0.765	0.765	0.765	0.765	0.765
k_vpd1	Paramètre de la fonction de pondération de gs au VPD	-	0.0000127	0.0000127	0.0000127	0.0000127	0.0000127
k_vpd2	Paramètre de la fonction de pondération de gs au VPD	-	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59
Storage capacity	Capacité de stockage	kg m^{-2}	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125
k_interception	Coefficient d'interception	-	-0.33	-0.33	-0.33	-0.33	-0.33
Bilan d'énergie							
k_Ga	Paramètre empirique pour le calcul de la conductance aérodynamique	-	116	116	116	116	116
k_dif	Coefficient d'extinction du rayonnement de courte longueur d'onde diffus	-	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4
k_dir	Coefficient d'extinction du rayonnement de courte longueur d'onde direct	-	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4
Albedo	Albédo du sous-bois	-	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Kth1	Coefficient d'atténuation du rayonnement thermique	-	-0.538	-0.538	-0.538	-0.538	-0.538
Kth2	Coefficient d'atténuation du rayonnement thermique	-	0.0177	0.0177	0.0177	0.0177	0.0177
Emissivity	Emissivité du sous-bois	-	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98

Peuplement			PINS MARITIMES			EUCAL. 1ère ROTATION	EUCAL. 2ème ROTATION
Paramètres	**Définitions**	**Unités**	**1980-2008**	**2000-2005**	**2006-2010**	**2005-2011**	**2005-2011**
32. Compartiment sol (suite)							
Bilan hydrique							
Root layer depth	Profondeur racinaire	m	0.75	0.6	0.8	1.30	1.30
Initial depth of field capacity layer	Profondeur initial de la couche à la capacité au champ	m	0.25	0.6	0.8	2	2
Initial depth of groundwater	Profondeur initial de nappe phréatique	m	0.45	0.8	0.8	2.5	2.5
Initial water content of layer A	Contenu initial de la couche A (entre la surface et la profondeur de la couche à la capacité au champ)	mm	100	105	200	933	933
Saturation	Contenu en eau à la saturation	mm/m	420	350	350	566	566
Field capacity	Contenu en eau à la capacité au champ	mm/m	187	175	175	466	466
Wilting point	Contenu en eau au point de flétrissement	mm/m	40	62	62	333	333
kAds	Paramètre de la courbe de drainage	-	0.1	0.1	0.1	0.9	0.9
kDr0	Paramètre de la courbe de drainage	-	1.6	1.6	5	160	160
kDr1	Paramètre de la courbe de drainage	-	1.7	1.7	3	1.7	1.7
kDr2	Paramètre de la courbe de drainage	-	1	1	3	1	1
Storage capacity	Capacité de stockage	kg m^{-2}	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Bilan d'énergie							
k_Ga	Paramètre empirique pour le calcul de la conductance aérodynamique	-	116	116	116	116	116
albedo	Albédo du sol	-	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3
emissivity	Emisivté de surface	-	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
kTa	Paramètre empirique pour le calcul de la température du sol à 10 cm	-	0.01128	0.01128	0.01128	0.01128	0.01128
kTp	''	-	0.004588	0.004588	0.004588	0.004588	0.004588
Tprof	''	-	11.81	11.81	11.81	11.81	11.81
Cycle du carbone							
Clay %	Fraction d'argile contenue dans la zone racinaire	%	2.8	2.8	2.8	18	18
k_HUM	Constante de décomposition du compartiment HUM	année^{-1}	0.02	0.015	0.015	0.02	0.02
k_BIO	Constante de décomposition du compartiment BIO	année^{-1}	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66
k_DPM	Constante de	année^{-1}	10	10	10	10	10

	décomposition du compartiment DPM						
k_RPM	Constante de décomposition du compartiment RPM	année^{-1}	0.14	0.16666	0.16666	0.12	0.12
HUM initial	Contenu en carbone initial du compartiment HUM	gC m^{-2} $_{SOL}$	5023	7901	6711	5023	5023
BIO initial	Contenu en carbone initial du compartiment BIO	gC m^{-2} $_{SOL}$	200	604	10.24	200	200
DPM initial	Contenu en carbone initial du compartiment DPM	gC m^{-2} $_{SOL}$	150	483	0.63	150	150
RPM initial	Contenu en carbone initial du compartiment RPM	gC m^{-2} $_{SOL}$	1979	1329	345	1979	1979
IOM initial	Contenu en carbone initial du compartiment IOM	gC m^{-2} $_{SOL}$	2500	1830	1830	2500	2500
HUM age	Âge du pool HUM	année	100	100	100	100	100
BIO age	Âge du pool BIO	année	100	100	100	100	100
DPM age	Âge du pool DPM	année	10	10	10	10	10
RPM age	Âge du pool RPM	année	10	10	10	10	10
IOM age	Âge du pool IOM	année	50000	50000	50000	50000	50000
k_PlowEffect		-	15	15	15	15	15
k_PlowEffect_HalfTime		-	277	277	277	277	277
Area fraction affected by a recent plowing	Fraction du sol affectée par un labour avantle début de la simulation	-	0.75	0	0	0	0
Soil carbon fraction affected under recent plowing	Fraction de carbone du sol affecté par un labour avant le début de la simulation	-	0.4	0	0	0	0
First year of simulation	Date début de simulation	année	1980	2000	2006	2005	2005
Last year of simulation	Date fin de simulation	année	2009	2005	2010	2014	2011

B- PARAMETRISATION DE GRAECO+ POUR LES INTERVENTIONS SYLVICOLES

Le Bray : 1980-2008

[Begin - Parameters]
[Begin - Thinning Hiver 1975-1976]
Intervention type : Thinning
Start reason : Year
Start value : 1975
Objectif : Keep_N_Trees
Objectif value : 1600
Thinning factor : 1
[End]
[Begin - Plowing Hiver 1975-1976]
Intervention type : Plowing
Start reason : Year
Start value : 1975
Area fraction plowed : 0.75
Soil carbon fraction affected under plowing : 0.4
Soil perennial fraction affected under plowing : 0.1
[End]
[Begin - Thinning Hiver 1980-1981]
Intervention type : Thinning
Start reason : Year
Start value : 1980
Objectif : Keep_N_Trees
Objectif value : 1100
Thinning factor : 1
[End]
[Begin - Plowing Hiver 1980-1981]
Intervention type : Plowing
Start reason : Year
Start value : 1980
Area fraction plowed : 0.75
Soil carbon fraction affected under plowing : 0.4
Soil perennial fraction affected under plowing : 0.1
[End]

[Begin - Thinning Hiver 1985-1986]
Intervention type : Thinning
Start reason : Year
Start value : 1985
Objectif : Keep_N_Trees
Objectif value : 828
Thinning factor : 1
[End]
[Begin - Plowing Hiver 1985-1986]
Intervention type : Plowing
Start reason : year
Start value : 1985
Area fraction plowed : 0.75
Soil carbon fraction affected under plowing : 0.4
Soil perennial fraction affected under plowing : 0.1
[End]

[Begin - Thinning Hiver 1991-1992]
Intervention type : Thinning
Start reason : Year
Start value : 1991
Objectif : Keep_N_Trees
Objectif value : 620
Thinning factor : 0.3
[End]
[Begin - Disk Plowing Hiver 1991-1992]
Intervention type : Plowing
Start reason : Year
Start value : 1991

Bilos 2000-2005

[Begin - Parameters]
[Begin - Plowing 1]
Intervention type : Plowing
Start reason : YYYY-DOY
Start value : 2002-101
Area fraction plowed: 0.0223
Soil carbon fraction affected under plowing : 0.79
Soil perennial fraction affected under plowing : 0.1
[End]
[Begin - Plowing 2]
Intervention type : Plowing
Start reason : YYYY-DOY
Start value : 2003-172
Area fraction plowed: 1
Soil carbon fraction affected under plowing : 0.36
Soil perennial fraction affected under plowing : 0.1
[End]
[Begin - Plowing 3]
Intervention type : Plowing
Start reason : YYYY-DOY
Start value : 2004-164
Area fraction plowed: 1
Soil carbon fraction affected under plowing : 0.74
Soil perennial fraction affected under plowing : 0.8
[End]
[End]

Bilos 2006-2011

[Begin - Parameters]
[Begin - 6 years_Disk Plowing]
Intervention type : Plowing
Start reason : YYYY-DOY
Start value : 2008-310
Area fraction plowed: 0.75
Soil carbon fraction affected under plowing : 0.59
Soil perennial fraction affected under plowing : 0.6
[End]
[Begin - 6 years_Thinning]
Intervention type : Thinning
Start reason : YYYY-DOY
Start value : 2008-315
Objectif : Keep_N_Trees
Objectif value : 151
Thinning factor : 1
[End]
[Begin - 7 years_Disk Plowing]
Intervention type : Plowing
Start reason : YYYY-DOY
Start value : 2009-310
Area fraction plowed: 0.75
Soil carbon fraction affected under plowing : 0.3
Soil perennial fraction affected under plowing : 0.1
[End]
[End]

```
        Area fraction plowed : 0.75
        Soil carbon fraction affected under
plowing : 0.4
        Soil perennial fraction affected under
plowing : 0.1
    [End]
    [Begin - Thinning Hiver 1995-1996]
        Intervention type : Thinning
        Start reason : Year
        Start value : 1995
        Objectif : Keep_N_Trees
        Objectif value : 522
        Thinning factor : 1
    [End]
    [Begin - Disk Plowing Hiver 1995-1996]
        Intervention type : Plowing
        Start reason : Year
        Start value : 1995
        Area fraction plowed : 0.75
        Soil carbon fraction affected under
plowing : 0.4
        Soil perennial fraction affected under
plowing : 0.1
    [End]
     [Begin - Storm Hiver 1999-2000]
        Intervention type : Thinning
        Start reason : Year
        Start value : 1999
        Objectif : Keep_N_Trees
        Objectif value : 426
        Thinning factor : 0.3
    [End]
    [Begin - Thinning post storm Hiver 2001-
2002]
        Intervention type : Thinning
        Start reason : Year
        Start value : 2001
        Objectif : Keep_N_Trees
        Objectif value : 413
        Thinning factor : 0.7
    [End]
    [Begin - Thinning post storm  Hiver 2002-
2003]
        Intervention type : Thinning
        Start reason : Year
        Start value : 2002
        Objectif : Keep_N_Trees
        Objectif value : 392
        Thinning factor : 0.85
    [End]
    [Begin - Thinning Hiver 2004-2005]
        Intervention type : Thinning
        Start reason : Year
        Start value : 2004
        Objectif : Keep_N_Trees
        Objectif value : 313
        Thinning factor : 1
    [End]
    [Begin - Plowing Hiver 2004-2005]
        Intervention type : Plowing
        Start reason : Year
        Start value : 2004
        Area fraction plowed : 0.75
        Soil carbon fraction affected under
plowing : 0.4
        Soil perennial fraction affected under
plowing : 0.1
    [End]
[End]
```

Résumé

Ce projet a porté sur la prise en compte de la phase juvénile des peuplements forestiers du Sud-Ouest de la France dans la caractérisation des échanges sol-végétation-atmosphère. L'étude s'est focalisée sur des structures contrastées de jeunes peuplements de Pins maritimes et d'*Eucalyptus*.

La première partie de ces recherches a consisté à étudier de façon expérimentale les échanges de masse et d'énergie de jeunes plantations d'*Eucalyptus* et de Pins maritimes du Sud-Ouest. Trois sites instrumentés pour la détermination en continu des échanges de CO_2 et H_2O, bilan d'énergie, flux de sève et de croissance et production des arbres ont été suivis durant deux années marquées par des épisodes répétés de sécheresse. Le comportement des essences présentes a été comparé ainsi que les effets de l'environnement et des pratiques culturales sur le fonctionnement de ces écosystèmes. Les bilans annuels d'eau, de carbone et la croissance et la production des trois peuplements ont été établis et comparés.

A partir de ces mesures enrichies par des données déjà disponibles et en se basant sur le modèle de production forestière et de transfert sol-végétation-atmosphère GRAECO (INRA-EPHYSE), modèle mécaniste biophysique monodimensionnel, la deuxième partie a consisté à développer une nouvelle évolution de ce modèle pour l'adapter au cas des systèmes de culture de biomasse forestière à croissance rapide. L'approche proposée en couplant ce modèle avec le modèle MAESTRA (Medlyn 2004) a permis de dépasser les hypothèses d'homogénéités verticale et horizontale du couvert pour rendre compte de l'effet de la structure en trois dimensions de peuplements jeunes à couronnes disjointes et sous-étage développé sur les transferts radiatifs, de CO_2 et vapeur d'eau. De plus, le modèle a été complété par trois nouveaux modules décrivant respectivement la dynamique du carbone du sol (Roth-C) et la croissance et fonctionnement du sous-étage et du taillis. Il a été évalué sur les données existantes couvrant différents sites et séries temporelles et incluant une série d'interventions de type labour, désouchage, disquage superficiel, semis, dépressages, éclaircies et recépées.

Enfin, ce modèle a été implémenté sur un jeu de données décrivant le climat local sous le forçage du scénario climatique A2 régionalisé sur un point de la grille SAFRAN de Météo-France pour trois itinéraires sylvicoles de Pin maritime et *Eucalyptu*s, afin d'évaluer, à titre exploratoire, les potentialités de productivité de ces itinéraires.

Mots-clés : *Pinus pinaster*, *Eucalyptus*, bilan d'énergie, bilan hydrique, bilan de carbone, forêts intensifiées, modélisation, changement climatique.

Abstract

In this thesis, the juvenile phase of forest stands of southwestern France was studied in order to characterise soil-vegetation-atmosphere exchanges. The study focused on contrasted structures of young pines and *Eucalyptus* stands.

The first part of this research was to study experimentally the mass and energy exchanges of young plantations of pines and *Eucalyptus* growing in southwestern France. Continuous measurements of CO_2 and H_2O fluxes, energy balance, sapflow and tree growth and production were carried out for two years, a period marked by repeated episodes of drought. The behavior of these species was compared, as well as the effects of the environment and cultural practices on these ecosystems. The annual water and carbon balances, growth and production of the three stands were established and compared.

These measurements were enriched by data already available and allowed in a second part to develop a new version of the 1D-mechanistic model of forest production and soil-vegetation-atmosphere transfer GRAECO (INRA-EPHYSE) in order to be applied to crop systems for fast-growing forest. By coupling this evolution of the model with the 3D-model MAESTRA (Medlyn 2004), the assumptions of vertical and horizontal homogeneities in the canopy can be exceeded thus accounting for the effect of the three-dimensional structure on the radiative, CO_2 and water vapor transfers in young stands, where crowns are separate and the understorey is well-developed. In addition, the model was supplemented by three new modules describing the dynamics of soil carbon (Roth-C) and the growth and functioning of the understory and coppice. It was evaluated on existing data covering different sites and time series and including a series of forest practices, such as plowing, stump removal, superficial disking, seeding, early thinning, thinnings and cutting down close to the ground.

Finally, as an exploratory work, this model has been implemented on a data set describing the local climate forced by the A2 climate scenario which was regionalized on a SAFRAN grid point ('Météo-France') for three forest itineraries of maritime pine and *Eucalyptus*, in order to assess the potential productivity of these systems.

Keywords: *Pinus pinaster*, *Eucalyptus*, energy balance, water balance, carbon cycle, forest intensification, modelling, climate change.