



HAL
open science

L'intégration spatiale et temporelle du partage des ressources dans un système agroforestier noyers-céréales : une clef pour en comprendre la productivité ?

Grégoire Talbot

► To cite this version:

Grégoire Talbot. L'intégration spatiale et temporelle du partage des ressources dans un système agroforestier noyers-céréales : une clef pour en comprendre la productivité?. Ecosystèmes. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2011. Français. NNT: . tel-00664530

HAL Id: tel-00664530

<https://theses.hal.science/tel-00664530>

Submitted on 30 Jan 2012

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

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

ÉCOLE DOCTORALE SIBAGHE
(Systèmes Intégrés en Biologie, Agronomie, Géosciences, Hydrosociences, Environnement)

THÈSE

pour l'obtention du grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ MONTPELLIER II
Discipline: Ecosystèmes

présentée et soutenue publiquement

par

Grégoire TALBOT

le 26 Octobre 2011

L'intégration spatiale et temporelle du partage des ressources dans un système agroforestier noyers-céréales : une clef pour en comprendre la productivité ?

JURY:

Anil GRAVES	Cranfield University	Rapporteur
Harry OZIER-LAFONTAINE	INRA	Rapporteur
Philippe BALANDIER	CEMAGREF	Examineur
Christian JAY-ALLEMAND	Université Montpellier II	Examineur
Marie-Hélène JEUFFROY	INRA	Examineur
Chritian DUPRAZ	INRA	Directeur de thèse

UMR SYSTEM

Fonctionnement et conduite des systèmes de culture tropicaux et méditerranéens
Equipe AMPLUS: Analyse et Modélisation du champ cultivé PLUriSpécifique

Résumé

Des mesures sur parcelles agroforestières (mélanges d'arbres et de cultures) expérimentales mettent en évidence des productivités exceptionnelles, avec des gains de plus de 30% par rapport à l'assolement de cultures pures. Nous avons mis au point et utilisé un modèle numérique dynamique en 3-D (Hi-sAFe) pour (1) tester si l'intégration spatio-temporelle du partage des ressources (lumière, eau, azote) entre espèces suffit à expliquer cette productivité et (2) évaluer l'impact de différents choix de conception ou de gestion sur cette productivité, à partir d'une compréhension des processus impliqués.

Nous avons développé une méthode originale d'analyse des données simulées pour identifier et hiérarchiser les processus déterminant le rendement. Le modèle a été paramétré et calibré sur un système noyer hybride / blé dur situé sur le domaine de Restinclières (Hérault, France). Après une analyse détaillée du fonctionnement de ce système, nous avons exploré par expérimentation virtuelle sa réponse à des choix de conception : (1) traits phénologiques des espèces associées, et (2) densité et disposition des arbres sur la parcelle.

Par la richesse de son comportement, Hi-sAFe permet un regard nouveau sur le fonctionnement des systèmes agroforestiers. Il éclaire la complexité du système réel. Nos résultats permettent de proposer une interprétation déterministe du rendement de chaque espèce et de la productivité totale de l'association (Land Equivalent Ratio). L'analyse des expérimentations virtuelles permet de proposer des pistes concrètes pour l'optimisation des systèmes agroforestiers.

Mots clés : Agroforesterie, Noyer, Blé dur, Land Equivalent Ratio, modélisation mécaniste, 3-D, Hi-sAFe, Expérimentation virtuelle, Complémentarité, Compétition, Facilitation

Abstract

SPATIOTEMPORAL INTEGRATION OF RESOURCES SHARING IN A WALNUT-CEREALS SILVOARABLE AGROFORESTRY SYSTEM: A KEY TO UNDERSTANDING PRODUCTIVITY?

Measurements on experimental silvoarable agroforestry plots (mixed tree-crop) showed exceptionally high productivity, with yields more than 30% higher compared to the separate crop and tree systems. We developed a 3-D process-based model (Hi-sAFe) and used it to (1) test if the spatiotemporal integration of resources sharing (light, water, nitrogen) between species could explain this productivity and (2) assess how agroforestry design or management may affect this productivity.

We developed a novel method for the analysis of simulated data to identify and sort the processes determining yield by order of importance. The model was parameterized and calibrated on a hybrid walnut / durum wheat located on the Restinclières field (Hérault, France). After a detailed analysis of the functioning of this system, we explored by virtual experiments its response to design choices : (1) phenological traits of associated species, and (2) density and location of trees on the plot.

The comprehensiveness of the Hi-sAFe model provides a new insight into the functioning of agroforestry systems. It clarifies the complexity of the real system. Our results put forward a deterministic interpretation of the performance of each species and of the total productivity of the crop-tree association (Land Equivalent Ratio). The analysis of virtual experiments offers practical ways for optimizing agroforestry systems.

Keywords: Silvoarable agroforestry, Walnut, Durum wheat, Land Equivalent Ratio, process-based model, 3-D, Hi-sAFe, Virtual Experiments, Complementarity, Competition, Facilitation

Table des matières

Résumé	i
Abstract	iii
Table des matières	v
Remerciements	xiii
Introduction	1
Partie I :	
Développements méthodologiques	13
1 Hi-sAFe, un modèle biophysique de système agroforestier	15
1.1 Présentation générale et apports de la thèse	15
1.1.1 Genèse de Hi-sAFe et présentation générale	15
1.1.2 Apports de la thèse aux formalismes de Hi-sAFe	17
1.1.3 Développement d'outils informatiques pour l'utilisation intensive de Hi-sAFe	17
1.2 Documentation de Hi-sAFe	20
1.2.1 Les entrées du modèle	21
1.2.1.1 Définition de la scène simulée et initialisations	21
1.2.1.2 Données climatiques	23
1.2.1.3 Fichiers de paramètres	23
1.2.2 Le modèle d'arbre : sAFe-Tree	23
1.2.2.1 Phénologie	23
1.2.2.2 Fonctionnement aérien	24
1.2.2.3 Fonctionnement souterrain	28
1.2.2.4 Équilibre fonctionnel entre compartiments aériens et com- partiments souterrains	33

TABLE DES MATIÈRES

1.2.2.5	Initialisation	35
1.2.2.6	Interventions	35
1.2.3	Module de compétition pour la lumière : sAFe-Light	36
1.2.3.1	Représentation du rayonnement	36
1.2.3.2	Interception du rayonnement	37
1.2.3.3	Appels à sAFe-Light : un compromis entre précision et temps de calcul	38
1.2.4	Fonctionnement hydrique du système	39
1.2.4.1	Demande en eau des plantes	39
1.2.4.2	Algorithme de compétition pour l'eau : sAFe-Water	40
1.2.4.3	Communication entre STICS et Hi-sAFe	44
1.2.5	Fonctionnement azoté	44
1.2.5.1	Algorithme d'absorption d'azote par les plantes : sAFe-Nitrogen	44
2	La Décomposition du rendement relatif : une méthode d'analyse des déterminismes du rendement simulé	47
2.1	Introduction	50
2.2	Material and methods	52
2.2.1	Principle of the relative yield decomposition (RYD)	52
2.2.1.1	Decomposition at the analysis time-step	52
2.2.1.2	Using understanding of model formulation at the model time-step	52
2.2.1.3	Relative yield decomposition	54
2.2.2	Case study 1: analysing the simulation of an agroforestry system with Yield-SAFE	54
2.2.2.1	Case study presentation	54
2.2.2.2	Relative crop yield decomposition	55
2.2.2.3	Tree yield decomposition	56
2.2.3	Case study 2: analysing a virtual experiment with the crop model STICS	57
2.2.3.1	Case study presentation	57
2.2.3.2	Crop biomass decomposition at the model time step	58
2.2.3.3	Crop yield decomposition at the analysis time step	59
2.2.3.4	Final yield decomposition	60
2.3	Results	60
2.3.1	Understanding the simulation results of an agroforestry system	60
2.3.1.1	Crop annual relative yield decomposition	60
2.3.1.2	Trees relative yield decomposition	61
2.3.2	Identifying compensations in the simulation of shaded crops with STICS	62
2.3.2.1	First order yield decomposition	62

2.3.2.2	Second order decomposition of the relative light use efficiency	63
2.3.2.3	Second order decomposition of the relative harvest index	63
2.4	Discussion	64
2.5	Conclusion	66
2.6	Appendix : Application of the RYD to other crop models	67
2.6.1	The CERES family crop models (CERES-wheat, Apsim-wheat):	67
2.6.2	The SUCROS family crop models (WOFOST)	67
2.6.3	The CROPGRO crop model	68
2.7	Application au modèle sAFe-Tree	68
2.7.1	Décomposition de la biomasse	68
2.7.2	Décomposition de l'indice de récolte	69
2.7.3	Décomposition du rendement relatif	69

Partie II :

Instanciation du modèle Hi-sAFe pour simuler une parcelle expérimentale de référence 71

3 L'association noyer hybride/blé dur de Restinclières : données d'entrée et paramétrage 73

3.1	Présentation du site et données d'entrée	73
3.1.1	Conception et gestion de la parcelle agroforestière	73
3.1.2	Données pédo-climatiques	75
3.1.3	Simulation des témoins agricole et forestier	76
3.1.3.1	Quel témoin agricole expérimental pour la parcelle A3?	77
3.1.3.2	Quelle témoin forestier expérimental pour la parcelle A3?	78
3.1.3.3	Définition des témoins agricole et forestier virtuels	80
3.2	Paramètres spécifiques pour le noyer hybride et le blé dur	81
3.2.1	Calibration de sAFe-Tree pour le noyer hybride	82
3.2.1.1	Plan d'échantillonnage	82
3.2.1.2	Sélection de jeux de paramètres optimaux	84
3.2.1.3	Description des jeux de paramètres retenus	85
3.2.1.4	Conclusion	88

4 Analyse du fonctionnement d'un système agroforestier virtuel 89

4.1	Introduction	89
4.2	Croissance aérienne des noyers et partage de la lumière	91
4.2.1	Développement aérien des noyers	91
4.2.1.1	Valeurs simulées	91

TABLE DES MATIÈRES

4.2.1.2	Comparaison des croissances en diamètre mesurées et simulées	92
4.2.2	Une forte complémentarité temporelle pour l'utilisation du rayonnement	95
4.2.2.1	L'interception du rayonnement par les arbres	95
4.2.2.2	Phénologie des espèces et partage de la ressource	97
4.2.2.3	Discussion	99
4.3	Croissance racinaire des arbres et utilisation de l'eau	100
4.3.1	Dynamique d'expansion des systèmes racinaires	100
4.3.2	Dynamique et répartition verticale des racines fines	102
4.3.2.1	Des profils racinaires simulés très réactifs au régime hydrique	102
4.3.2.2	Comparaison entre profils racinaires mesurés et simulés	106
4.3.2.3	Quantités de racines et turn-over racinaire	109
4.3.3	Fonctionnement hydrique du système	110
4.3.3.1	Témoin agricole	110
4.3.3.2	Témoin forestier	110
4.3.3.3	Système agroforestier	113
4.3.3.4	Discussion	116
4.3.4	Fonctionnement azoté	118
4.4	Rendements des noyers, du blé et de la parcelle agroforestière	119
4.4.1	L'élaboration du rendement relatif par arbre	119
4.4.1.1	Analyse de la décomposition du rendement relatif	119
4.4.1.2	Discussion	121
4.4.2	Rendements annuels du blé dur : valeurs absolues, relatives, et déterminisme	123
4.4.2.1	Rendements simulés dans le témoin agricole	123
4.4.2.2	Rendements absolus et relatifs simulés en agroforesterie	125
4.4.2.3	Discussion	128
4.4.3	Productivité globale du système : le LER	132
4.4.3.1	Le LER simulé	132
4.4.3.2	LER et partage des ressources	134
4.4.3.3	Discussion	136
4.5	Conclusions	136

Partie III :

Expérimentations virtuelles : vers l'optimisation d'un système

agroforestier noyer-blé ?	139
5 Traits phénologiques des espèces et comportement du blé agroforestier	141
5.1 Introduction	143
5.2 Materials and methods	147
5.2.1 Hi-sAFé : a process-based model for temperate silvoarable agro- forestry	147
5.2.2 Site/Simulations	148
5.2.3 Design of the virtual experiment	149
5.2.4 Crop yield analysis: the relative yield decomposition	150
5.2.4.1 Crop biomass decomposition	150
5.2.4.2 Harvest index decomposition	151
5.2.4.3 Final relative yield decomposition	152
5.2.5 Statistical analysis	152
5.3 Results	154
5.3.1 Tree growth and light use	154
5.3.2 Crop yield: main trends	155
5.3.3 Understanding the annual crop yield: the relative yield decompo- sition	157
5.3.3.1 Light competition by trees (<i>i</i> effect)	159
5.3.3.2 Compensation by an increased light use efficiency: effects <i>p</i> , <i>n</i> , <i>w</i> , <i>s</i> and <i>t</i>	159
5.3.3.3 Compensation due to the dynamics of leaf area: effect <i>a</i>	160
5.3.3.4 The harvest index issue	161
5.4 Discussion	162
5.5 Conclusions	166
5.6 Acknowledgements	167
6 Comment placer les arbres dans une parcelle agroforestière ?	169
6.1 Introduction	169
6.2 Matériel et méthode	170
6.2.1 Plan d'expérimentation virtuelle	170
6.2.2 Analyse des résultats	171
6.2.2.1 Sélection de variables explicatives	172
6.2.2.2 Décomposition du rendement relatif	173
6.3 Résultats	173
6.3.1 Dépendance du LER à l'agencement des arbres	173
6.3.1.1 Valeurs finales (à 40 ans)	173
6.3.1.2 Trajectoires de LER	174
6.3.2 Déterminisme du rendement des arbres agroforestiers	176
6.3.2.1 Croissance en diamètre	176
6.3.2.2 Rendement du peuplement	178

TABLE DES MATIÈRES

6.3.2.3	Les rendements relatifs et leur déterminisme	178
6.3.3	Déterminisme du rendement des cultures agroforestières	182
6.3.3.1	Du rendement placette au rendement relatif intégré : illustration par la comparaison de simulations nord-sud et est-ouest	182
6.3.3.2	Déterminants du rendement relatif annuel	185
6.4	Discussion	188
6.4.1	Relation entre agencement et croissance des arbres agroforestiers .	188
6.4.1.1	Motif de plantation	188
6.4.1.2	Orientation des lignes d'arbres	189
6.4.2	Organisation spatiale et rendement des cultures	191
6.4.3	Pour maximiser le LER, planter toujours plus dense ?	192
6.4.4	LER et concavité de la courbe de croissance en volume du peuple- ment	195
6.5	Conclusions et perspectives	196
Discussion générale et perspectives		199
Annexes		215
A Entrées du modèle pour la simulation noyer hybride - blé dur à Restinclières		217
A.1	Paramètres du noyer hybride (fichier .tree)	217
A.1.1	Paramétrage de la phénologie	221
A.1.2	Paramétrage aérien du noyer hybride	222
A.1.3	Paramètres obtenus par calibration	223
A.2	Paramètres du blé dur (fichiers .plt et .csp)	227
A.3	Définition d'une nouvelle espèce pour simuler la végétation spontanée du témoin forestier	232
A.4	Description et initialisation de la scène (fichier .pld)	233
A.5	Itinéraire technique	235
A.6	Modèle de dynamique de hauteur de nappe (fichier climat)	236
B Simple models for light competition within agroforestry discontinuous tree stands : are leaf clumpiness and light interception by woody parts relevant factors ?		239
B.1	Introduction	240
B.2	Materials and methods	243
B.2.1	Light competition model	243
B.2.1.1	Simplified stand description	243

B.2.1.2	Incident radiation	244
B.2.1.3	Ray-tracing method	244
B.2.1.4	A law for radiation interception by tree crowns	244
B.2.1.5	Optimizing the triggering of the light model	245
B.2.2	Field estimation of the clumping index and wood area density . .	245
B.2.2.1	Tree measurements and ellipsoid calibration	245
B.2.2.2	Using hemispherical photographs to compute the gap fraction at the cell level	247
B.2.2.3	Parameter estimation	247
B.2.3	Evaluation of the model for predicting the shaded fraction by cross-validation.	248
B.2.4	Sensitivity analysis	249
B.3	Results	250
B.3.1	Ellipsoid calibration	250
B.3.2	Parameters estimation	251
B.3.2.1	Estimates of the wood area density	251
B.3.2.2	Estimates of the clumping coefficient	251
B.3.3	Model evaluation	252
B.3.3.1	Predicting the shaded fraction under leafless trees	252
B.3.3.2	Predicting the shaded fraction by leafy trees	252
B.3.4	Sensitivity analysis	254
B.3.4.1	Light capture efficiency of trees	254
B.3.4.2	PAR transmittance under leafy trees	257
B.3.4.3	PAR transmittance under leafless trees	257
B.4	Discussion	257
B.4.1	Should we account for light interception by branches and stems? .	257
B.4.2	Should we take leaf clumping within crown into account?	258
B.4.3	Accuracy of model predictions	259
B.4.4	Using gap-inversion methods for estimating canopy parameters of wide-spaced trees	259
B.5	Conclusions	260

Remerciements

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes ayant contribué au bon déroulement de cette thèse, de près comme de loin.

Merci à Christian Dupraz d'avoir encadré cette thèse. Merci en particulier pour ton optimisme débordant, probablement essentiel face à mes crises de pessimisme quant à l'utilité de mon travail, et pour m'avoir assuré une connexion avec le monde des systèmes agroforestiers réels avec des vraies plantes poussant dans de vrais sols et cultivées par de vrais gens.

Merci à tout le personnel de l'UMR System. Merci en particulier à l'équipe technique « agroforesterie » (officiellement inexistante puisque partie intégrante de l'équipe dite SIME) : Jeff, Lydie et Pierre. Merci de m'avoir décollé un peu de mon écran de temps à autres.

Merci à Christian Jay-Allemand d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse. À Harry Ozier-Lafonfaine et Anil Graves d'en avoir été les rapporteurs, et à Marie-Hélène Jeuffroy et Philippe Ballandier les examinateurs.

À tous les membre de mon comité de thèse : Hervé Monod, Guillaume Simioni, Françoise Ruget, Serge Rambal. Un très grand merci à Grégoire Vincent pour ses avis éclairés de modélisateur.

Aux super développeurs de Capsis, François de Coligny et Samuel Dufour, pour leur support et leur conseils. A Isabelle Lecomte, sans qui Hi-sAFe ne serait rien, pour son temps passé à m'en expliquer les ficelles. Merci à Marie Launay, pour qui STICS n'a (presque) pas de secrets.

Aux compagnons de galère qui ont mis aussi la main de la cambouis de Hi-sAFe : Sitraka, Aurélie, Rémi. Bon courage pour la suite.

À Sébastien Roux, qui m'a incité et aidé à formaliser et à généraliser la méthode de décomposition du rendement. Merci aussi pour cette petite routine perl qui m'a économisé tellement de temps. Longue vie aux modèles de culture !

À Aurélie Metay pour ses relectures et conseils dans la structuration du manuscrit. À Dominique Nicolas, Christian Gary et Jacques Wery pour leur soutiens et conseils pendant la période de rédaction.

À Nathalie, pour toutes ces discussion sur le sens de « Tout ça ». En espérant que tu trouveras le tien.

À « mes » stagiaires Elisabeth Duchatel et Jérôme Possoz pour leur participation à

l'expérimentation virtuelle sur la phénologie.

À Rachmat Mulia et Meine Van Noordwijk pour leur remarques sur l'automate racinaire et le module d'extraction d'eau.

Aux chercheurs croisés pendant mon petit bout de route dans ce milieu. En particulier à Alain Paquette, Guéric Lemaire et Christophe Jourdan.

À tous les camarades de bureau de pause café-gâteaux et de questions de stats : Alpha, Fagaye, Aude, Hélène, Nguyen, Louise, Nicolas, Cynthia, Natacha, Sylvestre, Ines, Gabriel, Céline.

Enfin, merci aux gens qui m'entourent, qui m'aiment et m'ont soutenu, en particulier pendant cette moyennement agréable dernière année... Merci aux compagnons de jardin et aux collègues de passing, activités on ne peut plus salvatrices pour ma santé psychologique. Merci à mes amis d'être mes amis. Merci à tous les colloqs pour cette tranche de vie commune. Merci à mes familles. Celle dont j'ai hérité et celle que j'ai construite et que je (nous) continu(ons) à construire.

Introduction

Le retour de l'agroforesterie tempérée ?

“Agroforesterie” est un terme générique qui désigne l'ensemble des pratiques agricoles associant des arbres avec des cultures ou de l'élevage. Autrefois courantes en Europe, ces pratiques ont été abandonnées progressivement au cours du XX^e siècle (Dupraz & Newman, 1997; Eichhorn et al., 2006; Dupraz & Liagre, 2008), essentiellement pour des raisons liées à l'intensification et la mécanisation de l'agriculture.

Une forme d'agroforesterie associant des alignements d'arbres pour la production de bois avec des cultures intercalaires (“silvoarable agroforestry” en anglais¹) connaît aujourd'hui un regain d'intérêt, car elle est compatible avec la mécanisation des cultures. L'agroforesterie permet une diversification des exploitations agricoles, combinant un revenu régulier avec la production continue des cultures avec la mise en place d'un capital sur pied². Des travaux récents montrent que certains systèmes agroforestiers pourraient être jusqu'à 30 % plus productifs que des assolements avec parcelles agricoles d'un côté, et reboisement de terres agricoles de l'autre (Graves et al., 2007; Dupraz et al., 2010). Politiquement, l'agroforesterie est surtout mise en avant pour ses performances agri-environnementales. Elle serait en particulier un moyen de lutte efficace contre l'érosion des sols, la pollution des nappes et des rivières par les nitrates, l'uniformisation des paysages et l'érosion de la biodiversité (Nair, 2007; Palma et al., 2007; Jose, 2009; Quinckenstein et al., 2009). Reisner et al. (2007) estiment ainsi que 56 % des terres arables européennes sont potentiellement adaptées à la mise en place de systèmes agrofores-

1. Les nord américains utilisent le terme “alley cropping” pour désigner ces systèmes, ce qui porte à confusion puisque ce terme est aussi utilisé pour désigner les “cultures en couloir” des régions tropicales qui consistent à intercaler des bandes cultivées et des haies de petite dimension, régulièrement taillées pour nourrir le bétail et/ou fertiliser les cultures. En français, il n'y a pas de traduction consensuelle pour “silvoarable agroforestry”. Les québécois utilisent le terme “systèmes de cultures intercalaires” (SCI). Certains auteurs ont proposé les termes “agro-sylviculture” ou “agro-ligniculture”. Dans ce travail, nous utiliserons simplement le terme “agroforesterie” pour désigner l'association d'alignements d'arbres à vocation de production de bois avec des bandes de cultures intercalaires.

2. Un reboisement partiel des terres agricoles permet également la même diversification de l'exploitation. C'est pourquoi il est important de comparer la production d'une parcelle agroforestière à la production d'un assolement agriculture forêt, ce qui sera fait plus loin en utilisant un critère adapté, le Land Equivalent Ratio.

tiers productifs, et que 70 % de ces 56 % (soit 90 millions d’hectares) sont sujets à des risques environnementaux qui pourraient être diminués par l’agroforesterie (pollution par les nitrates, érosion des sols, uniformisation du paysage). De plus, avec la montée des préoccupations liées au changement climatique, le potentiel des systèmes agroforestiers comme puits de carbone a été mis en avant par de nombreux auteurs (Oelbermann et al., 2004; Peichl et al., 2006; Nair et al., 2009).

De 2002 à 2005, l’Union Européenne a financé le projet SAFE (Silvoarable Agroforestry For Europe, Dupraz et al., 2005) afin d’établir des bases scientifiques pour la prise en compte des systèmes agroforestiers dans les prochaines révisions de la Politique Agricole Commune (PAC). Les résultats de ce projet ont contribué à faire reconnaître officiellement l’agroforesterie comme une pratique agricole à part entière, pouvant être à la fois productive et respectueuse de l’environnement. Les surfaces agroforestières ont ainsi acquis le statut de terres agricoles. Depuis 2010, les parcelles agroforestières sont éligibles aux DPU (Droits à Paiement Unique), elles entrent dans le calcul de la SET (Surface Equivalente Topographique) dans le cadre de la BCAE (Bonnes Conditions Agricoles et Environnementales) qui conditionne les aides de la PAC. Par ailleurs, la mesure 222 du PDRH (Plan de Développement Rural Hexagonal) 2007-2013, activée en 2009, permet de subventionner l’installation de parcelles agroforestières. Dans le document “Objectif terres 2020 : pour un nouveau modèle agricole français” du Ministère de l’Alimentation, de l’Agriculture et de la Pêche, qui présente les défis à relever pour l’agriculture du XXI^e siècle, l’agroforesterie est mentionnée à plusieurs reprises³. Des dynamiques similaires sont en cours en Amérique du Nord, comme en témoigne le plan stratégique pour l’agroforesterie de l’USDA (United States Department of Agriculture) pour la période 2010-2015⁴.

Une série d’enquêtes réalisées entre 2003 et 2004 auprès de plus de 250 agriculteurs dans 14 régions d’Europe a montré que 20 % d’entre eux étaient intéressés par la mise en place d’un projet agroforestier sur leur exploitation (Graves et al., 2008). Pour les personnes interrogées, la principale motivation pour développer un projet agroforestier serait sa rentabilité (27 %), suivie de près par les préoccupations environnementales (22 %). Les principales craintes exprimées sont la diminution du rendement des cultures (18 %), suivie des problèmes liés à la complexité du travail (17 %) et à la mécanisation (15 %). Nous disposons aujourd’hui de très peu de recul pour répondre à ces craintes. En France, Liagre (2008) estime à environ 2000 hectares la surface plantée en agroforesterie “moderne” (alignement d’arbres avec culture intercalaire mécanisée) en 2008. Sur ces 2000 hectares, à peine 350 ont été plantés il y a plus de 15 ans. Les résultats disponibles sur le fonctionnement et sur la productivité de ces systèmes sont ponctuels et le plus souvent limités aux premières années suivant la plantation des arbres (Dupraz & Newman, 1997; Jose et al., 2004; Thevathasan & Gordon, 2004; Jose et al., 2008).

3. <http://terres2020.agriculture.gouv.fr/>

4. USDA Agroforestry Strategic Framework, Fiscal Year 2011–2016 : Enriching our lives with trees that work http://www.usda.gov/documents/AFStratFrame_FINAL-1r_6-3-11.pdf

L'installation et la conduite d'un système agroforestier offrent un large éventail de choix au gestionnaire : choix des espèces, densité de plantation, organisation spatiale de la parcelle, entretien et formation des arbres, itinéraire technique des cultures, etc... Si ces choix sont en partie guidés par des considérations techniques, liées à la mécanisation des cultures par exemple, ils offrent aussi en théorie la possibilité de manipuler les interactions entre arbres et cultures.

Mesurer la productivité d'une association : le Land Equivalent Ratio

L'indice le plus couramment utilisé pour évaluer la productivité globale des cultures associées est le Land Equivalent Ratio (LER, Mead & Willey, 1980; Vandermeer, 1989), qui est défini comme la somme des rendements relatifs des espèces associées. Dans le cas d'un système agroforestier, le LER s'écrit :

$$\text{LER} = y_C + y_A = Y_{C,AF}/Y_{C,TA} + Y_{A,AF}/Y_{A,TF}$$

où $Y_{C,TA}$ et $Y_{C,AF}$ sont les rendements de la culture dans le témoin agricole (TA) et dans la parcelle agroforestière (AF), et $Y_{A,TF}$ et $Y_{A,AF}$ sont les rendements des arbres dans le témoin forestier (TF) et dans la parcelle agroforestière. Le LER est un indice qui mesure l'efficacité de l'utilisation de l'espace, il s'interprète comme la surface qu'il faudrait cultiver avec un assolement des cultures pures (TA et TF) pour produire autant (et dans les mêmes proportions) que ce qui est produit par un hectare de plantation agroforestière. Une association est donc considérée intéressante d'un point de vue productif si son LER est supérieur à 1, c'est à dire si l'association permet de produire plus, par unité de surface, que les cultures pures correspondantes.

Un système agroforestier associe deux espèces avec des durées de cycle très différentes : les cultures intercalaires fournissent un produit annuel, alors que les arbres sont généralement récoltés après plusieurs dizaines d'années. On distingue alors un LER annuel et un LER intégré (Dupraz, 1999), calculés à partir des rendements relatifs annuels ou intégrés. Pour les arbres, le rendement relatif intégré de l'année i est simplement calculé à partir des volumes de bois sur pied à la fin de l'année i , alors que le rendement relatif annuel est calculé à partir des incréments annuels de volume de bois de l'année i . Pour les cultures, le rendement relatif annuel est calculé à partir des rendements de l'année i , et le rendement relatif intégré est calculé à partir des cumuls de rendement annuels depuis la plantation des arbres. Pour une évaluation globale des systèmes agroforestiers par comparaison aux cultures pures correspondantes, c'est le LER intégré qu'il est pertinent de prendre en compte.

En raison de sa signification intuitive en termes d'efficacité d'utilisation de l'espace, le LER est largement utilisé pour communiquer sur les systèmes agroforestiers auprès des agriculteurs et des politiques (Dupraz & Liagre, 2008; Rivest et al., 2010b). Mesurer

le LER d'un système agroforestier est cependant une entreprise coûteuse, elle demande un suivi sur le cycle complet des arbres, 10 à 15 années pour des arbres à croissance très rapide comme les peupliers ou les paulownias, plusieurs dizaines d'années pour les feuillus précieux à croissance plus lente (noyers, merisiers, ...), ainsi que la mise en place et le suivi de parcelles témoin pour quantifier la productivité des cultures pures (témoins agricole et forestier) (Dupraz, 1999). Pour cette raison, il n'existe quasiment aucune mesure directe du LER de systèmes agroforestiers tempérés. Pour une association peuplier - blé dur en climat méditerranéen, suivie de la plantation à la récolte des arbres (13 ans), Dupraz et al. (2010) ont mesuré un LER de 1.33. Ce résultat est surprenant, l'agroforesterie permettrait un gain de productivité de plus de 30 % par rapport à un assolement de surfaces cultivées et boisées. Cette valeur est de loin supérieure à celles rapportées pour les cultures associées annuelles (Vandermeer, 1989; Malézieux et al., 2008). Comment expliquer un tel résultat ? Comment s'élabore-t-il dans le temps ? Est-il généralisable à d'autres combinaisons d'espèces ou à d'autres contextes pédoclimatiques ? Enfin, comment concevoir et gérer des systèmes agroforestiers pour en maximiser la productivité ? La réponse à ces questions implique la compréhension des interactions entre arbres et cultures, et des conséquences de ces interactions sur la productivité de chacune des espèces.

Compétition, complémentarité et facilitation

Pour expliquer les gains de productivité dans des associations végétales, on fait généralement appel aux notions de complémentarité (Loreau, 1998; Tilman et al., 1997) et de facilitation (Bruno et al., 2003; Brooker et al., 2008) entre espèces. D'un point de vue théorique, ces notions sont assez simples à comprendre.

La complémentarité s'explique par le concept de niche écologique (Vandermeer, 1989) : deux espèces sont dites complémentaires si leur niches écologiques ne se recouvrent pas totalement, ou autrement dit si elles n'ont pas les mêmes besoins (nature des ressources utilisées, localisation spatiale et temporelle). On peut distinguer une complémentarité passive, si les niches fondamentales des espèces sont différentes, et une complémentarité active, résultant de la plasticité des espèces (niches réalisées). Les décalages de phénologie entre espèces ou l'utilisation de sources différentes d'azote sont des exemples de complémentarité passive. La ségrégation spatiale des systèmes racinaires des arbres et des cultures observée dans certains systèmes agroforestiers (Mulia & Dupraz, 2006) est un exemple de complémentarité active. Lorsque des espèces sont complémentaires pour l'utilisation d'une ressource limitante, l'association permet d'utiliser plus efficacement cette ressource que les cultures pures correspondantes.

La facilitation correspond au cas où une des deux espèces modifie d'une manière positive l'environnement perçu par l'autre espèce. Les exemples les plus fréquemment cités de facilitation sont le cas des plantes "nurse" en milieu fortement contraint, qui protègent les stades juvéniles des plantes voisines, et les plantes fixatrices d'azote dont

l'azote fixé peut bénéficier au système dans son ensemble (Bruno et al., 2003; Brooker et al., 2008).

Compétition, complémentarité et facilitation sont cependant des notions très générales, difficiles à dissocier expérimentalement, et plus difficile encore à relier explicitement avec des mécanismes d'interactions. Ong (1995) a proposé de décomposer la différence de rendement des cultures entre témoin agricole et système agroforestier (cultures en couloir) selon l'équation $I = F + C$ où I est l'interaction totale C et F sont les effets de compétition et de facilitation, et de concevoir des protocoles expérimentaux permettant de quantifier ces différents termes. Cette équation a été complexifiée par Rao et al. (1998) pour séparer les effets liés à la fertilité, aux compétitions pour les ressources, au microclimat, aux ravageurs, etc. Ce cadre théorique, bien que séduisant par sa généralité, s'est révélé peu opérationnel à cause des interactions entre processus qui rendent difficile, voire impossible la mesure expérimentale des différents termes (Garcia-Barrios & Ong, 2004). Les interactions entre arbres et cultures sont multiples, dynamiques, et spatialement hétérogènes (Anderson & Sinclair, 1993; Ong & Huxley, 1996; Jose et al., 2004; Garcia-Barrios & Ong, 2004). La croissance et le rendement d'une plante sont généralement limités simultanément par plusieurs facteurs (Kho, 2000b; Nijland et al., 2008), dont les importances relatives sont dépendantes du contexte pédoclimatique, et sont susceptibles d'évoluer dans le temps et d'être modifiées par la présence de plantes voisines (Kho, 2000a; Kho et al., 2001). S'il est possible de déterminer *a priori* si une modification par une plante de l'environnement perçu par une plante voisine a un potentiel plutôt compétitif (ombrage, extraction d'eau du sol) ou plutôt facilitatif (protection microclimatique) sur la croissance et/ou le rendement de celle-ci, la réalisation de ce potentiel et ses conséquences sur le rendement final seront dépendantes du contexte. Ainsi, Lott et al. (2009) ont montré qu'un ombrage artificiel de 50% peut n'avoir aucun effet sur la productivité du Maïs une année sèche, et un effet négatif très fort une année humide. De même Gea-Izquierdo et al. (2009) ont montré que l'effet de chênes verts sur la croissance des pâturages dans des systèmes sylvopastoraux méditerranéens peut passer du positif au neutre et au négatif au cours d'une même saison de croissance.

Pour une réelle compréhension du déterminisme de la productivité des systèmes agroforestiers, et afin d'identifier des leviers pour leur optimisation, il est nécessaire de développer des approches mécanistes qui considèrent explicitement la nature et la multiplicité des interactions. Le titre de l'article de Cannell et al. (1996) est révélateur de cette prise de conscience : "the central hypothesis of agroforestry : the trees must acquire resources that the crop would not otherwise acquire". De même, Ong et al. (1996) dressent une revue des connaissances théoriques sur le partage et la conversion des ressources en eau et en lumière, provenant principalement de la littérature sur les cultures associées, et appellent à leur mobilisation pour l'étude des systèmes agroforestiers. Plus généralement, Maestre et al. (2009) estiment que pour réellement faire avancer le débat sur l'évolution des intensités des phénomènes de compétition et facilitation le long de gradients de stress environnementaux, il sera nécessaire de considérer explicitement la nature des stress et des interactions compétitives et facilitatives.

L'importance du temps et de l'espace

Temps long et temps rond

Sur le temps long, un système agroforestier est en perpétuelle transition entre un état initial à la plantation où les arbres ont une influence négligeable sur le rendement des cultures et un état où, selon la densité de plantation, le contexte pédoclimatique et les espèces choisies, les compétitions qu'ils exercent peuvent devenir trop importantes pour continuer à cultiver de façon rentable les bandes intercalaires. Au niveau aérien, cette transition est caractérisée par la croissance des houppiers. Leurs ombres s'allongent, se densifient et se superposent. Ils ont une influence croissante sur la répartition des pluies (interception, écoulement le long du tronc) et sur le microclimat (vent, température, humidité). De même, les racines des arbres colonisent progressivement le sol. Les prélèvements d'eau et de nutriments, localisés au voisinage des arbres en début de rotation, se généralisent ensuite à l'ensemble de la parcelle. Les arbres contribuent de manière croissante aux cycles de l'eau, du carbone (litières aériennes et souterraines) et des éléments minéraux. L'évolution d'un système agroforestier sur le temps long est en grande partie déterminée par des choix initiaux de conception comme la densité finale visée pour le peuplement d'arbres, la densité initiale de plantation et le régime d'éclaircies, ou le choix des espèces. En cours de rotation, le gestionnaire pourra manipuler cette évolution par des opérations ciblées : adaptation du régime d'éclaircie, élagages, cernages racinaires, sous-solages, etc.

Le temps rond est celui des cultures, semées et récoltées chaque année. C'est aussi le temps de l'alternance des saisons et des cycles phénologiques des arbres. Les régions tempérées sont caractérisées par une forte saisonnalité de la température, de la trajectoire du soleil, de la durée du jour et dans certains cas de la pluviométrie. Sur le temps rond, l'évolution du système et des interactions entre espèces est rythmée par la succession des stades phénologiques, par les événements climatiques, et par les interventions agricoles (travail du sol, fertilisations, irrigations). Le choix d'espèces avec des phénologies contrastées permet d'assurer une complémentarité pour l'utilisation de la lumière. Ainsi, plusieurs études montrent qu'avec des arbres à feuilles caduques, le rendement relatif des cultures d'hiver est plus élevé que celui des cultures d'été (Yin & He, 1997; Chaudhry, 2003; Thevathasan & Gordon, 2004). La complémentarité pour l'eau dépend non seulement de la phénologie des espèces qui détermine la temporalité de leurs besoins, mais aussi de la profondeur et de la réserve utile du sol, du régime pluviométrique et de la distribution spatiale des racines, qui déterminent la dynamique et la distribution spatiale de la teneur en eau du sol. Pour des espèces avec des cycles synchrones ou en grande partie superposés, et si la réserve du sol et la pluviométrie ne sont pas suffisantes, la compétition pour l'eau peut limiter fortement la croissance des arbres (Burgess et al., 2005) et/ou des cultures (Gillespie et al., 2000; Miller & Pallardy, 2001; Kidanu et al., 2004). Ong et al. (1996) estiment que dans les tropiques secs où le cycle des cultures est limité à la saison des pluies, la capacité des arbres à valoriser le stock d'eau résiduel du

sol et les pluies de contre saison est l'explication principale du gain de productivité par rapport aux cultures pures. Si ces ressources résiduelles ne sont pas suffisantes, la croissance des arbres peut être fortement pénalisée comme l'ont montré Williams & Gordon (1995) pour une association de noyers noirs avec une céréale d'hiver aux Etats-Unis.

Espaces aérien et souterrain

Les systèmes agroforestiers sont caractérisés par une strate arborée discontinue. Au niveau aérien, cette discontinuité génère une hétérogénéité de la répartition du rayonnement disponible pour les cultures (Chirko et al., 1996; Li et al., 2008; Ding & Su, 2010). Cette répartition dépend de la distribution angulaire du rayonnement incident ainsi que de la géométrie et des propriétés optiques du couvert (Monteith, 1975; Bonhomme, 1993). Sur le temps rond, le partage de la lumière évolue en fonction du jour de l'année - qui détermine la trajectoire du soleil - et des dynamiques de surface foliaire des deux espèces. Sur le temps long, ce sont la densité de plantation des arbres, leur disposition sur la parcelle et la forme et les dimensions de leur houppier qui sont déterminants.

De même, au niveau souterrain, le développement du système racinaire des arbres génère une hétérogénéité spatiale des conditions subies par les racines des cultures (Gillespie et al., 2000; Miller & Pallardy, 2001). Réciproquement, les arbres sont enracinés dans un sol horizontalement hétérogène, alternant lignes d'arbres avec des bandes intercalaires travaillées, cultivées, et fertilisées. Verticalement, la distribution des teneurs en eau du sol est hautement dynamique. Elle est le résultat de l'infiltration des pluies, de l'évaporation du sol, des extractions par les plantes, et éventuellement d'échanges avec une nappe d'eau souterraine. De même, la distribution verticale des teneurs en azote évolue en fonction des apports par les pluies et les fertilisations, des flux d'eau dans le sol qui entraînent les nitrates et des processus microbiens (minéralisation, humification, ...). Les plantes ont des systèmes racinaires fortement plastiques, capables de se développer préférentiellement dans les zones de sol riches en eau et/ou en nutriments (Hodge, 2010; Mulia, 2005). Ainsi, (Mulia & Dupraz, 2006) ont mis en évidence que les arbres agroforestiers pouvaient avoir des profils d'enracinement en fonction de la profondeur radicalement différents des arbres forestiers. La plasticité racinaire des arbres est probablement d'une importance cruciale pour l'établissement de complémentarités entre espèces pour l'utilisation des ressources souterraines (Schroth, 1998; van Noordwijk et al., 1996, 2004).

Modéliser les systèmes agroforestiers

La modélisation mécaniste, c'est à dire qui s'attache à représenter explicitement les processus, est reconnue comme un outil permettant d'intégrer des connaissances et d'appréhender la complexité de systèmes complexes (de Angelis & Mooij, 2003; Oreske, 2003; Aumann, 2007). Les modèles de culture sont largement utilisés dans la recherche agrono-

mique pour explorer *in silico* des questions complexes comme par exemple les stratégies d'irrigations (e.g. DeJonge et al., 2007; Soler et al., 2007; Debaeke & Aboudrare, 2004), les interactions entre génotype et environnement (e.g. Asseng et al., 2002; Debaeke, 2004; Chenu et al., 2009; Semenov et al., 2009) ou la réponse des systèmes de culture aux changements climatiques (e.g. Asseng et al., 2004; Meza & Silva, 2009; Lhomme et al., 2009; Liu et al., 2010).

Dans le contexte des systèmes agroforestiers, la modélisation apparaît d'autant plus nécessaire que les expérimentations sont rares car lourdes à réaliser. Le développement de modèles mécanistes est unanimement considéré comme un point clef pour intégrer des connaissances souvent site- et climat-spécifiques, pour améliorer la compréhension des interactions arbres/cultures, et pour concevoir des systèmes agroforestiers productifs (Muetzelfeldt & Sinclair, 1993; Muetzelfeldt, 1995; van Noordwijk, 1996; Ellis et al., 2004).

La majorité des travaux de modélisation en agroforesterie se sont focalisés sur l'influence des arbres sur le rendement des cultures. Ces travaux mobilisent des modèles de cultures existants, et en modifient les entrées pour rendre compte de certains effets des arbres. Ainsi, les modèles CROPGRO pour le coton et STICS pour le blé dur ont été utilisés par Zamora et al. (2009) et Dufour et al. (submitted) en réduisant simplement le rayonnement incident en entrée pour prendre en compte l'ombrage des arbres. Afin d'étudier l'effet des haies brise-vent sur la productivité des cultures adjacentes, les travaux de (Qi et al., 2001) avec CROPGRO et de (Easterling et al., 1997) avec EPIC intègrent des modifications microclimatiques (modifications de la vitesse du vent, bilan énergétique). Le modèle WIMISA intègre aussi la compétition souterraine pour l'eau entre arbres et cultures (Mayus et al., 1998). Ces différents modèles fonctionnent généralement sur une seule saison de culture, et ne modélisent pas explicitement la croissance des arbres. Ils ne peuvent donc pas être utilisés pour prédire la productivité totale du système.

Yield-SAFE (van der Werf et al., 2007) est un modèle biophysique simple, monodimensionnel, qui permet de simuler la productivité de systèmes agroforestiers tempérés de la plantation à la récolte des arbres, en réponse à la disponibilité de deux ressources : l'eau et la lumière. Il a été conçu pour un couplage avec des modèles technico-économiques (Graves et al., 2007, 2011) afin d'étudier la faisabilité économique des systèmes agroforestiers. Le modèle ALMANACH, initialement conçu pour simuler les interactions entre cultures et adventices, a été étendu récemment à la simulation de systèmes agroforestier (Johnson et al., 2009) pour l'intégration dans un modèle hydrologique de bassin versant. Il simule en une dimension les compétitions pour la lumière, l'eau et les nutriments. Huth et al. (2002) ont proposé une adaptation du modèle de culture APSIM pour simuler la croissance d'une haie brise-vent et ses interactions (compétition pour l'eau et la lumière, microclimat) avec une parcelle adjacente. Ce modèle est en deux dimensions, ce qui lui permet de rendre compte des gradients d'interaction en fonction de la distance à la haie, mais pas de simuler des alignements d'arbres espacés. Le modèle HyPAR (Mobbs et al., 1998) résulte du couplage, prenant en compte les compétitions pour l'eau et la

lumière, entre un modèle forestier (Hybrid, Friend et al., 1997) et un modèle de culture (PARCH, modèle de soja). Il a été utilisé pour prédire la productivité potentielle de systèmes agroforestier selon un large gradient d'aridité (Cannell et al., 1998).

Enfin, WaNuLCAS (Van Noordwijk & Lusiana, 1998) est un modèle générique permettant de simuler la plupart des systèmes agroforestiers tropicaux. Il est le seul modèle actuellement disponible à intégrer les compétitions pour l'eau, la lumière et l'azote sur l'ensemble de la révolution agroforestière. L'interface arbres-cultures est simulée en divisant les espaces aérien et souterrain en zones d'influences. WaNuLCAS a été utilisé avec succès pour la simulation de nombreux systèmes agroforestiers tropicaux (e.g. Muthuri et al., 2004; Walker et al., 2007; Santos Martin & van Noordwijk, 2009).

Les acteurs du projet européen SAFE (Dupraz et al., 2005) se sont donné pour objectif de développer un modèle permettant de simuler les principaux processus impliqués dans le fonctionnement de systèmes agroforestiers tempérés. Ce modèle, appelé Hi-sAFé, a pour cahier des charges (1) de décrire en trois dimensions et au pas de temps journalier les principaux processus relatifs au partage de la lumière, de l'eau et de l'azote, (2) de rendre compte des principales réponses plastiques des plantes à la disponibilité des ressources, en particulier la plasticité racinaire des arbres, (3) d'intégrer ces processus sur l'ensemble de la révolution agroforestière, et (4) de pouvoir simuler les principales options de conception et de gestion de ces systèmes. C'est le premier modèle de simulation de systèmes agroforestiers en 3D. Ce choix crucial a été fait pour rendre compte de l'hétérogénéité induite par la disposition des arbres en agroforesterie, et afin de pouvoir optimiser cette disposition. Une observation simple permet de comprendre pourquoi les interactions arbres-cultures conduisent à une hétérogénéité qui impose une représentation en 3D. Avec des lignes d'arbres non orientées nord-sud, nous avons, sous nos latitudes tempérées, de fortes différences d'éclairement des cultures en fonction de leur position par rapport aux arbres. En croisant ce gradient avec celui, souterrain, généré par l'enracinement des arbres, on fait d'une part nécessairement disparaître la symétrie bilatérale, et d'autre part apparaître des gradients obliques impossibles à représenter dans une simplification en 2D. C'est une telle symétrie bilatérale qui est sous-entendue dans les choix du modèle WaNuLCas, par exemple. L'interaction entre compétitions souterraines et aériennes est susceptible de générer des motifs complexes, que seule une représentation 3-D permettra d'explicitier. C'est ce raisonnement qui a été tenu par les concepteurs du modèle Hi-sAFé en 2002.

Objectifs de la thèse et démarche adoptée

Ce travail de thèse est consacré à l'étude de la productivité des systèmes agroforestiers tempérés associant des alignements d'arbres à vocation de production de bois avec des cultures intercalaires. Cette productivité résulte de l'intégration, de la plantation à la récolte des arbres, des processus déterminant la croissance et l'élaboration du rendement des deux espèces en interaction. Ces processus sont multiples, dynamiques et spatialisés.

Le modèle Hi-sAFe est un modèle biophysique de fonctionnement des systèmes agroforestiers tempérés. Il a été conçu sous l'hypothèse que le partage des ressources (lumière, eau et azote) au sein d'un système agroforestier est le déterminant majeur de sa productivité. Il propose un couplage en 3-D et au pas de temps journalier, par des modules de répartition de ces trois ressources, entre un modèle de culture et un modèle d'arbre. Ce travail de thèse s'inscrit dans la continuité de cette démarche de modélisation.

Objectifs

Nous proposons d'utiliser le modèle Hi-sAFe pour répondre à deux objectifs :

1. Un objectif cognitif : améliorer notre compréhension du fonctionnement des mélanges arbres-cultures, identifier les mécanismes responsables de leurs performances, et les leviers de contrôle possible pour le gestionnaire.
2. Un objectif appliqué : proposer un outil d'analyse et d'optimisation pour la conception et la conduite des systèmes agroforestiers tempérés.

Préalables méthodologiques (Partie I)

Pour répondre à ces objectifs, un premier préalable est la finalisation d'une première version fonctionnelle du modèle Hi-sAFe. Il s'agit de disposer d'un modèle (1) qui fonctionne et qui soit conforme à son cahier des charges, (2) qui puisse simuler la révolution complète d'un système agroforestier, de la plantation à la récolte des arbres, ainsi que les témoins agricole et forestier correspondants, et (3) dont les modalités d'utilisation soient compatibles avec son utilisation souhaitée ici, à savoir qu'il soit possible d'exécuter automatiquement un grand nombre de simulations en faisant varier les entrées du modèle, et d'avoir accès en sortie à l'ensemble des variables d'état qui nous intéressent, au pas de temps souhaité. Le **chapitre 1** présente un bref historique de Hi-sAFe, les principaux développements effectués pendant ce travail de thèse, et une documentation actualisée du modèle.

Un second préalable est de se donner un moyen d'analyser les sorties de Hi-sAFe. Nous avons pour objectif de comprendre le déterminisme de la productivité simulée et de l'élaboration du LER. Cela nécessite d'identifier, parmi les processus simulés, ceux qui sont responsables des différences de rendement entre le système agroforestier et les témoins agricole et forestier, de les hiérarchiser en termes d'importance, et de comprendre la manière dont leur intégration dans le temps détermine les rendements finaux. Dans le **chapitre 2**, nous proposons une méthode originale d'analyse des sorties du modèle. Cette méthode permet de décomposer le rendement relatif de chaque espèce en un produit de termes, dans lequel chaque terme peut être interprété comme la contribution d'un processus au déterminisme du rendement relatif.

Réponse au premier objectif (Partie II)

Nous proposons de répondre à notre premier objectif en appliquant le modèle Hi-sAFe à un cas d'étude : une parcelle associant noyers hybrides et blé dur mise en place en 1995 par l'INRA. Le **chapitre 3** présente la parcelle expérimentale, ainsi que les données d'entrées et les paramètres utilisés pour simuler le fonctionnement de ce système agroforestier. Le **chapitre 4** est consacré à une analyse détaillée du fonctionnement du système agroforestier virtuel ainsi défini et à sa comparaison avec les témoins agricole et forestier correspondants. Cette analyse a pour objectif de comprendre la manière dont les processus simulés s'intègrent dans le temps et dans l'espace pour déterminer la productivité de chaque espèce et *in fine* le LER du système. Le fonctionnement du système simulé sera discuté autant que possible au regard des données expérimentales disponibles et de la bibliographie.

Réponse au second objectif (Partie III)

En réponse à notre second objectif, nous proposons deux exemples d'expérimentations virtuelles permettant d'explorer les liens entre des choix de conception et la productivité du système. Le premier exemple est centré sur des aspects temporels, tandis que le second s'intéresse à des aspects spatiaux. Le **chapitre 5** est consacré à l'analyse de la relation entre les traits phénologiques des espèces associées et la productivité du système. Le **chapitre 6** explore les conséquences de choix relatifs à la densité de plantation des arbres et à leur agencement sur la parcelle.

Partie I :
Développements méthodologiques

Chapitre 1

Hi-sAFe, un modèle biophysique de système agroforestier

1.1 Présentation générale et apports de la thèse

1.1.1 Genèse de Hi-sAFe et présentation générale

Hi-sAFe est un modèle biophysique du fonctionnement de systèmes agroforestiers tempérés, associant arbres et grandes cultures. Il a été développé dans le cadre du projet européen SAFE (Silvoarable Agroforestry For Europe, Dupraz et al., 2005). Contrairement aux autres modèles du projet SAFE, Yield-SAFE (van der Werf et al., 2007) et Farm-SAFE (Graves et al., 2011), qui sont tournés vers l'application et ont un objectif prédictif, Hi-sAFe est un outil d'exploration des interactions arbres-cultures visant à l'appréhension de propriétés émergentes des systèmes agroforestiers¹. Il a pour objectif d'aborder des questions théoriques, relatives aux phénomènes de facilitation et de complémentarité entre espèces, aussi bien que pratiques, relatives au choix des espèces, à l'optimisation du design (densité et motif de plantation, orientation des lignes d'arbres, largeur des allées cultivées), ou à l'adoption de mesures de gestions spécifiques (régimes d'élagages des arbres, cernages racinaires, fertilisation des cultures).

Les choix de modélisation effectués pour Hi-sAFe reposent sur les hypothèses suivantes : (1) la productivité des systèmes agroforestiers résulte de l'intégration des dynamiques d'utilisation de ressources spatialement hétérogènes par les arbres et les cultures, (2) les phénomènes de plasticité (opportunisme racinaire, plasticité de l'allocation aé-

1. La séparation entre Yield-SAFE (modèle biophysique simple) et Hi-sAFe (modèle biophysique complexe) s'est faite assez tard dans le projet SAFE. Il est apparu que le paramétrage et les analyses d'incertitudes et de sensibilité, étapes nécessaires à l'utilisation des résultats du modèle biophysique par le modèle technico économique Farm-SAFE ne seraient pas réalisables dans les temps avec le modèle biophysique complexe Hi-sAFe. Il a alors été décidé de développer un modèle plus simple (Yield-SAFE) pour répondre à ces objectifs, et de conserver le modèle complexe pour aborder des questions de recherches plus théoriques. Sage décision...

rien/souterrain) et les décalages phénologiques entre espèces pour l'acquisition des ressources sont des aspects cruciaux de l'interaction arbres/cultures, (3) l'hétérogénéité intra-parcellaire est en grande partie générée par le design du système lui-même, elle doit être considérée en trois dimensions, à une échelle de l'ordre du mètre, et (4) l'échelle de temps pertinente pour décrire les mécanismes est le jour, et leur intégration doit être réalisée sur plusieurs années (idéalement la durée de rotation des arbres) pour mettre en évidence des effets de mémoire du système.

La première étape de conception de Hi-sAFe a consisté à la revue des modèles d'interactions arbres-cultures existants (Dupraz, 2002), et à la définition de la stratégie de développement suivante (Lecomte et al., 2002) :

1. L'implémentation du modèle Hi-sAFe est intégrée dans la plateforme de modélisation Capsis (Computer-Aided Projection for Strategies In Silviculture, de Coligny et al., 2003), écrite en Java. Ce choix permet de bénéficier du "noyau" de Capsis (gestion de la mémoire vive, interface graphique, import/export de fichiers, et formalisation générique d'un peuplement d'arbres spatialisé et de son évolution).
2. Les cultures intercalaires sont modélisées avec le modèle STICS (Brisson et al., 1998, version 5, traduit en C par Poupa, 2003), qui est paramétré et validé pour les principales grandes cultures européennes. L'objectif est de "toucher" le moins possible au code de STICS pour pouvoir bénéficier des évolutions futures de ce modèle. STICS étant un modèle non spatialisé, une pseudo-3D est reproduite par l'exécution de plusieurs instances de STICS, qui correspondent à autant de positions sur la scène simulée.
3. Un modèle d'arbre est écrit spécifiquement pour Hi-sAFe. Son fonctionnement aérien est largement inspiré du modèle HyPAR (Mobbs et al., 1998). Le système racinaire de l'arbre doit être spatialement explicite, afin de reproduire la variabilité spatiale des interactions souterraines entre arbres et cultures.
4. Des modules spécifiques sont écrits pour modéliser les interactions aériennes (répartition du rayonnement et de la transpiration, microclimat) et souterraines (compétition pour l'eau et pour l'azote). Hi-sAFe est un modèle très ambitieux par ses choix de spatialisation (3D aérien et souterrain) et de pas temps (journalier, sur plusieurs années). Pour conserver un temps de calcul et un nombre de paramètres raisonnables, ces modules doivent être simples, basés sur des formalismes bien établis et peu coûteux en temps de calcul. Ils doivent néanmoins reproduire les principales caractéristiques connues des interactions arbres/cultures.

Le développement de Hi-sAFe a été réalisé par trois groupes de travail du projet SAFE : (1) un groupe de travail chargé de la modélisation des processus aériens, (2) un groupe de travail chargé de la modélisation des processus souterrains, et (3) un groupe de travail chargé de développer le modèle dans son ensemble.

Ce travail de thèse a débuté environ deux ans après la fin officielle du projet SAFE. À ce moment, l'essentiel du développement de Hi-sAFe a été réalisé, mais le modèle a été peu utilisé.

1.1.2 Apports de la thèse aux formalismes de Hi-sAFe

Les principaux choix de modélisation et la majeure partie du développement de Hi-sAFe ont été faits dans le projet SAFE. L'objet de ce travail de thèse n'était pas de revenir sur ces choix, mais de poursuivre la démarche de modélisation jusqu'à l'exploration du fonctionnement d'un système agroforestier virtuel tel que formalisé par Hi-sAFe. Cependant, un travail préalable de vérification de la cohérence de l'ensemble du modèle a été réalisé. Le modèle ayant été peu utilisé auparavant (et jamais pour des simulations longues), ce travail a conduit à la mise en évidence d'erreurs de code ou d'incohérences dans les formalismes, qui nous ont amenés à poursuivre le développement de Hi-sAFe. L'inventaire des modifications effectuées dans le code pendant cette phase du travail serait fastidieux et dépourvu d'intérêt, d'autant que nombre d'entre elles concernent de simples (mais pas toujours évidentes à détecter) erreurs de code. La figure 1.1.1 présente un schéma de la boucle journalière de Hi-sAFe, et indique l'importance des modifications apportées dans le code du modèle. À l'exception du calcul de la demande évaporative des arbres, qui a été simplifié, aucune des modifications apportées ne modifie les hypothèses du modèle en termes de fonctionnement des systèmes agroforestiers. La section 1.2 propose une documentation succincte du modèle Hi-sAFe, dans laquelle les principales modifications effectuées pendant cette thèse seront discutées dans les notes de bas de page.

1.1.3 Développement d'outils informatiques pour l'utilisation intensive de Hi-sAFe

Hi-sAFe a été initialement développé dans l'optique d'une utilisation via l'interface graphique de la plateforme Capsis. Cette interface graphique, conviviale et intuitive, permet une prise en main rapide du modèle et une visualisation simple des sorties. Ce mode d'utilisation du modèle s'est cependant révélé inapproprié pour l'utilisation que nous souhaitions en faire dans le cadre de ce travail, essentiellement pour les raisons suivantes :

1. Dimensions de la structure de données de Hi-sAFe. Pour visualiser des sorties via l'interface graphique, l'ensemble de la structure de données du modèle doit être chargée dans la mémoire vive de l'ordinateur. Avec un pas de temps journalier et des données spatialisées, la structure de données de Hi-sAFe sature très rapidement la mémoire vive (pour une simulation agroforestière classique sur 40 ans, avec des arbres espacés de 13 m par 9 m, on arrive à plusieurs dizaines de giga-octets). Une solution offerte par la plateforme Capsis consiste à ne garder les données en mémoire qu'avec une certaine fréquence, afin de libérer de la mémoire vive. Cette solution permet de réaliser des simulations longues. Nous pensons cependant que pour analyser et comprendre le fonctionnement d'un système agroforestier virtuel simulé par Hi-sAFe, il est indispensable d'avoir accès à l'ensemble des variables d'intérêt du modèle, et au pas de temps de fonctionnement du modèle. Nous avons

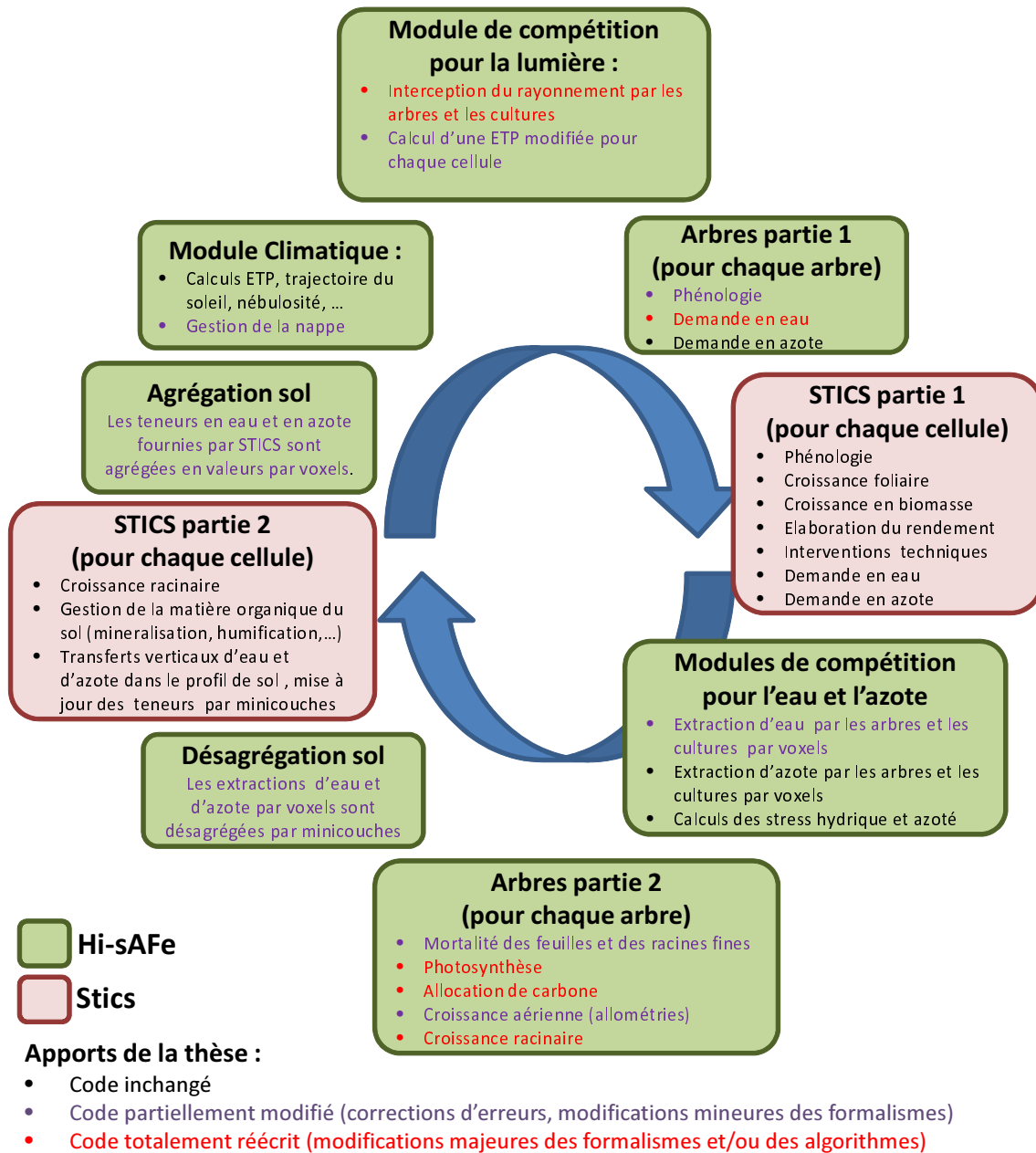


Figure 1.1.1: Schéma de la boucle journalière de Hi-sAFe, et apports de la thèse aux formalismes du modèle.

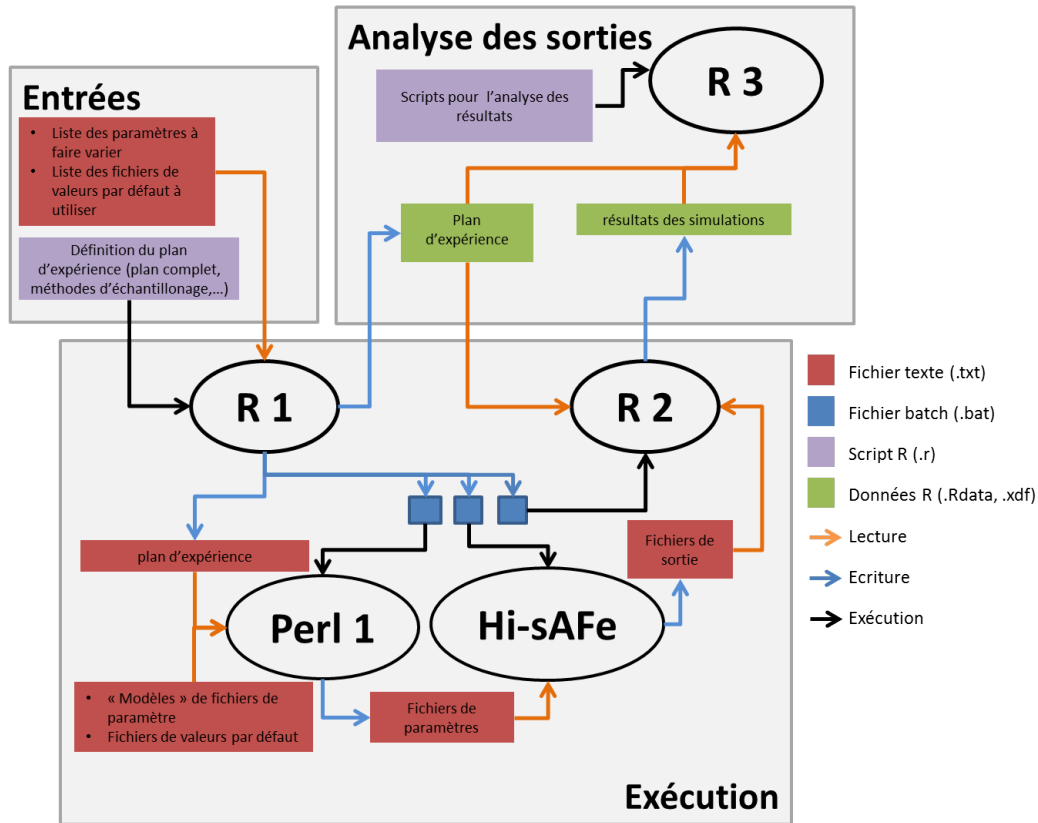


Figure 1.1.2: Schéma de la procédure d'automatisation de Hi-sAFe. **R 1**, **R 2** et **R 3** sont des ensembles de scripts et de méthodes en langage R. **Perl 1** est un script en langage Perl (<http://www.perl.org/>). **R 1** permet de concevoir un plan d'expérience, et de générer (1) un fichier de description du plan d'expérience utilisable par **Perl 1**, (2) un fichier exécutable pour appeler **Perl 1**, (3) un fichier exécutable permettant d'appeler Hi-sAFe (possibilité de réaliser des simulations en parallèle si plusieurs processeurs disponibles), (4) un fichier exécutable pour appeler **R 2**, et (5) une structure de données R (.Rdata) contenant les informations relatives au plan d'expérience. **Perl 1** (écrit par Sébastien Roux) permet de générer l'ensemble des fichiers de paramètres nécessaires à l'exécution de Hi-sAFe à partir du plan d'expérience et des fichiers de paramètres par défaut. **R 2** importe l'ensemble des fichiers de sortie de Hi-sAFe, et convertit les données dans un format rapidement exploitable par R : format classique Rdata pour les petits fichiers, ou format Xdf (développé par Revolution Analytics, <http://www.revolutionanalytics.com/>) pour les gros fichiers (jusqu'à plusieurs dizaines de giga-octets). **R 3** propose un ensemble de méthodes R pour l'analyse des sorties de Hi-sAFe.

donc écrit (avec l'aide de François de Coligny) une méthode d'export des données en cours de simulation. Ainsi, les données journalières sont stockées au fur et à mesure sur le disque dur, et supprimées de la mémoire vive. Les fichiers de sortie générés par cette méthode devront être exploités à l'aide d'autres logiciels.

2. Lourdeur de l'utilisation de l'interface graphique. Via l'interface graphique, l'utilisateur doit tout d'abord spécifier les fichiers de paramètres décrivant la scène agroforestière à simuler et son initialisation. Ensuite, il peut faire "évoluer" la scène, une évolution correspondant au maximum à une année de simulation. Pour chaque évolution, il faut spécifier la nature de la culture intercalaire, son itinéraire technique, et fournir un fichier climatique. La réalisation d'une simulation sur plusieurs dizaines d'années est extrêmement lente, d'autant plus qu'il faut attendre plusieurs minutes entre chaque évolution. Pour réaliser des expérimentations virtuelles avec *Hi-sAFe*, il nous a paru indispensable de pouvoir lancer automatiquement plusieurs simulations de plusieurs dizaines d'années, sans intervention de l'utilisateur en cours de simulation. Deux étapes ont été nécessaires pour réaliser cela : (1) le développement d'un mode batch simple d'utilisation pour exécuter *Hi-sAFe* depuis l'invite de commande (amélioration du mode batch existant, qui nécessitait l'écriture d'un script en Java et sa compilation avant chaque simulation), et (2) le développement d'une procédure d'automatisation de *Hi-sAFe*, que nous avons choisi d'écrire en langage R (<http://www.r-project.org/>) et en dehors de Cap-sis. Le fonctionnement de cette procédure d'automatisation est explicité dans la figure 1.1.2.

1.2 Documentation de *Hi-sAFe*

Hi-sAFe effectue le couplage en trois dimensions et au pas de temps journalier entre un modèle d'arbre (*sAFe-Tree*) et un modèle de culture (*STICS*, Brisson et al. (1998)), via des modules d'interactions entre arbres et cultures. Le modèle d'arbre est un modèle individu centré, spatialement explicite. Il est décrit en détail dans la section 1.2.2. Le modèle *STICS* simule l'évolution de l'ensemble sol-plante pour un peuplement homogène, c'est un modèle à une seule dimension (la verticale, z). Pour pouvoir simuler un sol et une culture horizontalement hétérogènes, *Hi-sAFe* exécute plusieurs instances de *STICS*, chacune correspondant à une position dans le plan (x, y). Dans *Hi-sAFe*, *STICS* simule : (1) le développement, la croissance, et l'élaboration du rendement des cultures, (2) les interventions techniques sur les cultures (travail du sol, fertilisations, récolte,...), (3) les flux verticaux d'eau et d'azote dans le sol, et (4) le devenir des résidus et de la matière organique dans le sol. Les formalismes utilisés pour simuler ces processus sont présentés en détail dans (Brisson et al., 2009)², et ne seront pas décrits ici. La répartition entre

2. Voir aussi la notice de *STICS* 5.0 : concept et formalismes (Brisson & Mary, 2002) disponible sur le site de *STICS* : http://www.avignon.inra.fr/agroclim_stics/content/download/3052/31674/

plantes des trois ressources principales - l'eau, la lumière, et l'azote - sont simulées en trois dimensions par trois modules spécifiques : sAFe-Light (section 1.2.3), sAFe-Water (section 1.2.4.2) et sAFe-Nitrogen (section 1.2.5.1).

L'objectif de cette section est de fournir une documentation succincte de Hi-sAFe, présentant dans leurs grandes lignes l'ensemble des formalismes du modèle. La justification des choix de formalismes et l'explicitation de l'ensemble des principes biophysiques sous-jacents dépassent la cadre de cette thèse.

1.2.1 Les entrées du modèle

1.2.1.1 Définition de la scène simulée et initialisations

La scène simulée par Hi-sAFe est un rectangle divisé en cellules carrées (fig. 1.2.1). La cellule est l'unité de discrétisation aérienne de l'espace. Le sol situé sous chaque cellule est divisé en voxels (Mulia et al., 2010), unité de discrétisation souterraine. La résolution spatiale du modèle, à la fois horizontale (largeur des cellules) et verticale (épaisseur des voxels), relève en théorie de choix de l'utilisateur. Cependant, de nombreux formalismes du modèle sont probablement très sensibles à ces choix, et cette sensibilité n'a pas été étudiée en détail. Nous considérerons toujours par la suite des cellules de 1 m de côté, et des voxels de 20 cm d'épaisseur.

Les informations nécessaires pour décrire la scène sont les suivantes :

- Les informations de position de la scène : latitude et longitude.
- Les informations concernant le design du système : choix des espèces associées, espacement entre arbres sur et entre les rangs, orientation des lignes d'arbres, largeur des allées cultivées. Bien que Hi-sAFe ait été développé dans l'objectif de pouvoir gérer des peuplements d'arbres irréguliers, ainsi que des rotations de différentes cultures, nous nous limiterons au cas simple tel que présenté sur la figure 1.2.1, avec un peuplement d'arbres identiques, en lignes espacées régulièrement, virtuellement infini (symétrie torique), et avec une même culture intercalaire répétée d'une année sur l'autre.
- Un descriptif du sol. Il est possible de définir jusqu'à 5 couches de sol avec des propriétés différentes. Les données à renseigner pour chaque couche concernent les proportions d'argile, sable et limon dans la terre fine, la proportion volumique de cailloux, et la teneur en matière organique. Les propriétés hydrodynamiques du sol sont déduites de ces informations par les équations de pédo-transfert proposées par Wösten et al. (1999). Afin de pouvoir diviser les couches en voxels de 20 cm d'épaisseur, il est recommandé de définir des couches dont l'épaisseur est un multiple de 20 cm.

Pour l'initialisation de la scène, les teneurs en eau et en azote minéral des couches pédologiques doivent être renseignées. L'initialisation des arbres sera explicitée dans la section 1.2.2.5.

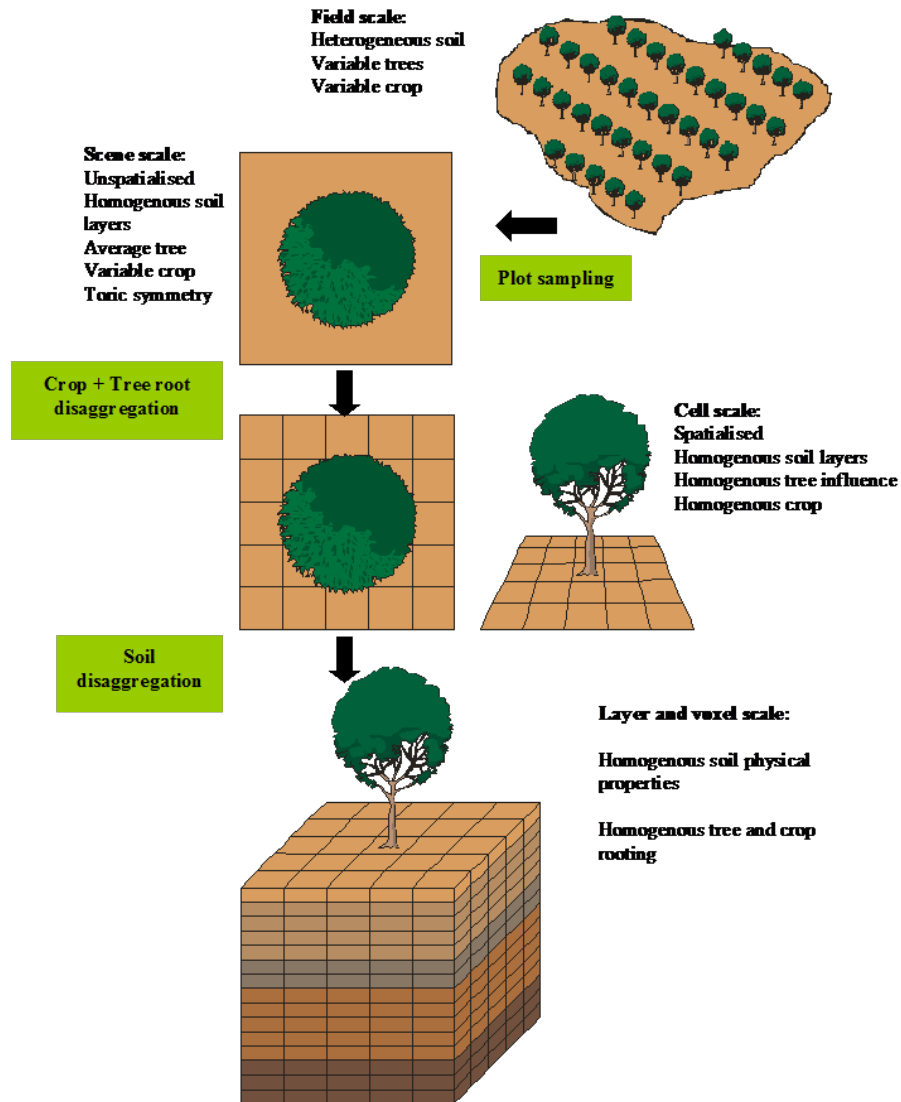


Figure 1.2.1: Du système agroforestier réel à la scène simulée : (1) la symétrie torique permet, en représentant un seul arbre (arbre moyen), de simuler un couvert régulier et infini d'arbres identiques. (2) la scène est discrétisée en cellules (dimensions horizontales) puis en voxels (dimension verticale).

1.2.1.2 Données climatiques

Hi-sAFe utilise des entrées climatiques au pas de temps journalier. Les données requises sont les données classiques fournies par les stations météorologiques : températures minimale et maximale de l'air ($^{\circ}\text{C}$), rayonnement global ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-1}$), précipitations (mm), humidités relatives minimale et maximale de l'air (%), et vitesse du vent mesurée à 2 m ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Dans les cas où une nappe d'eau souterraine est accessible aux plantes, la profondeur du toit de la nappe (m) est considérée comme un forçage climatique, et doit être renseignée au pas de temps journalier.

1.2.1.3 Fichiers de paramètres

Hi-sAFe utilise plusieurs fichiers de paramètres :

- Les fichiers de paramètres de STICS : le fichier de paramètres généraux et le fichier plante (voir Brisson & Mary (2002) pour les détails)
- Le fichier de description de l'itinéraire technique des cultures, qui définit la date et le type de travail du sol, le semis, les fertilisations, et la récolte (équivalent du fichier technique de STICS).
- Le fichier de paramètres de la culture pour les modules spécifiques à Hi-sAFe (modules d'extraction d'eau et d'azote).
- Le fichier de paramètres d'espèce pour les arbres simulés.

1.2.2 Le modèle d'arbre : sAFe-Tree

sAFe-Tree a été développé avec l'objectif de modéliser au pas de temps journalier le fonctionnement d'un arbre en réponse à trois ressources : la lumière, l'eau, et l'azote. La modélisation du cycle de l'azote et de la sensibilité des arbres à la disponibilité de l'azote n'étant pas encore au point, nous travaillerons ici avec une version simplifiée du modèle dans laquelle la croissance des arbres n'est pas affectée par la disponibilité de l'azote. Les formalismes de sAFe-Tree concernant l'azote ne seront pas développés dans cette section. Le modèle sAFe-Tree a été initialement développé par Grégoire Vincent (allométries aériennes, fonctionnement carboné et azoté), Christian Dupraz (phénologie, fonctionnement racinaire) et Rachmat Mulia (fonctionnement racinaire). De nombreuses modifications de ce modèle ont été effectuées pendant ce travail de thèse.

1.2.2.1 Phénologie

La phénologie de l'arbre est décrite par 5 stades :

- S0 : la dormance est levée, en attente de débourrement. Le jour de levée de dormance (passage de S4 à S0) est un paramètre de l'espèce d'arbre (D_0).
- S1 : période d'expansion foliaire. Le débourrement, passage de S0 à S1, est déclenché

le jour D si

$$\sum_{j=D_0}^D (T - T_0) \geq S_T \quad (1.2.1)$$

où T (°C) est la température moyenne du jour D , et T_0 (°C) et S_T (°jours) sont des paramètres. La dynamique d'expansion foliaire est gérée par les algorithmes d'allocation du carbone, qui seront présentés plus loin. La durée d'expansion foliaire (D_{LE} , jours) est un paramètre, lorsque cette durée est écoulée, l'arbre passe du stade S1 au stade S2.

- S2 : expansion foliaire terminée, chute des feuilles non initiée.
- S3 : période de chute des feuilles. Le début de la chute des feuilles (passage de S2 à S3) peut être déclenché par deux phénomènes différents. Soit par le froid, si la température moyenne journalière descend en deçà de T_{LF} , soit par la sénescence physiologique qui est activée D_V jours après le débourrement. La dynamique de chute des feuilles est modélisée par une sigmoïde décroissante, sa durée est fixée par un paramètre³.
- S4 : chute des feuilles terminée, dormance de l'arbre.

1.2.2.2 Fonctionnement aérien

Géométrie aérienne : les relations d'allométrie

Les houppiers des arbres sont représentés par des ellipsoïdes, définis par la position du centre et trois rayons (figure 1.2.2). La partie aérienne des arbres est supposée respecter un certain nombre de lois d'allométrie :

1. Une allométrie entre hauteur de l'arbre (H , m) et diamètre du tronc à 1 m 30 (DBH , m) : $H = a_{h/dbh} DBH^{b_{h/dbh}}$.
2. Une allométrie entre volume (V_t , m³) et dimensions (hauteur et DBH) du tronc :

$$V_t = e^{a_{v/h,dbh}} DBH^{b_{v/h,dbh}} H^{c_{v/h,dbh}} \quad (1.2.2)$$

3. Une allométrie entre diamètre du tronc à la base du houppier (DCB , m) et aire projetée au sol du houppier (A , m²) :

$$A = a_{a/dcb} DCB^{b_{a/dcb}} \quad (1.2.3)$$

3. **Modifications effectuées** : utilisation d'une durée d'expansion foliaire à la place d'une date fixe de fin d'expansion foliaire, et introduction d'un nouveau facteur de déclenchement de la chute des feuilles - la sénescence physiologique - intervenant un temps donné après le débourrement. Ces modifications ont été introduites suite à deux constatations effectuées sur les noyer hybrides de Restinclières : (1) les arbres les plus précoces pour le débourrement sont aussi les plus précoces pour la chute des feuilles, phénomène non représenté si la chute des feuilles n'est déclenchée que par la température, et (2) il n'y a pas de corrélation entre précocité et croissance parmi les arbres échantillonnés, alors que l'utilisation d'une date fixe de fin d'expansion foliaire conduisait à la simulation d'une telle corrélation.

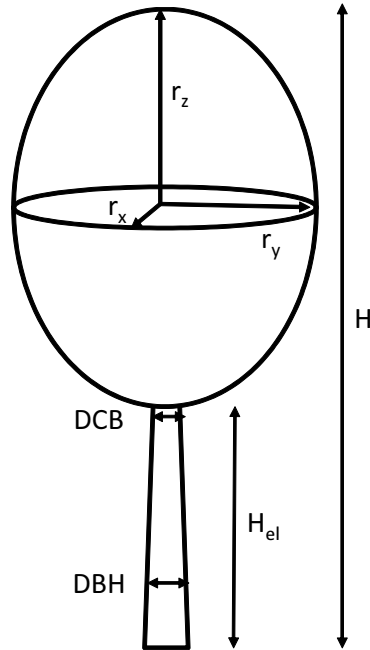


Figure 1.2.2: Représentation aérienne des arbres. H : hauteur (m). H_{el} : hauteur élaguée (m). DBH : diamètre du tronc à hauteur de poitrine (m). DCB : diamètre du tronc à la base de houppier (ou hauteur élaguée) (m). r_z : rayon vertical du houppier (m, $r_z = (H - H_{el})/2$). r_x et r_y : rayons horizontaux du houppier.

Le diamètre à la base du houppier est déduit de la hauteur d'élagage et de la relation d'allométrie entre hauteur et diamètre, supposée conservée le long du tronc⁴. En absence de contraintes, les deux rayons horizontaux de l'ellipsoïde sont égaux ($r_x = r_y = \sqrt{A/\pi}$). Si l'un des deux rayons est contraint par la collision avec un autre arbre, le second rayon est calculé de façon à maintenir la relation entre A et DCB . Si les deux rayons sont contraints, la relation d'allométrie entre DCB et A est levée et la croissance horizontale du houppier est terminée.

4. Une allométrie entre volume du houppier (V_c , m³) et surface foliaire (L_a , m²) :

$$L_a = a_{l/v} V_c^{b_{l/v}} \quad (1.2.4)$$

Pour le calcul du volume de houppier, le diamètre vertical utilisé est la différence entre la hauteur totale et la hauteur élaguée⁵.

4. **Modification effectuée** : introduction de la notion de DCB dans cette relation d'allométrie à la place du DBH . L'utilisation du DCB permet d'avoir une section horizontale du houppier réactive à l'élagage : à hauteur et diamètre identiques, un arbre élagué sur la moitié de sa hauteur aura un houppier moins large qu'un arbre non élagué.

5. **Modification effectuée** : introduction de cette allométrie pour remplacer la densité de surface foliaire fixe utilisée précédemment. La densité de surface foliaire fixe conduisait soit à des surfaces

5. Le volume de branches est supposé proportionnel au volume du houppier : $B = a_{b/v} V_c$.
6. La souche de l'arbre, bien que souterraine, est simulée comme un organe aérien. Une relation de proportionnalité stricte relie le volume de la souche au volume du tronc : $V_s = a_{s/t} V_t$.⁶
7. La hauteur d'élagage est imposée par l'utilisateur via la méthode d'élagage (section 1.2.2.6).

Productivité primaire nette et réserves de carbone

La productivité primaire nette (que nous appellerons photosynthèse par abus de langage) est modélisée de manière très simple avec un formalisme de type LUE (light use efficiency, Monteith, 1977). Le gain de carbone net du jour j est donné par : $\Delta C_j = LUE_j W_{stress,j} PAR_j$, où $W_{stress,j}$ est le stress hydrique, PAR_j est la quantité de rayonnement photosynthétiquement actif intercepté (MJ), et LUE_j est l'efficacité potentielle de la photosynthèse pour le jour j . Le stress hydrique est calculé comme le ratio de la transpiration réelle, calculée par le module d'extraction d'eau (section 1.2.4.2), sur la transpiration potentielle, dont le calcul sera explicité en section 1.2.4.1. Conformément au formalisme proposé par Lacoïnte et al. (1995) et utilisé par Le Dizès et al. (1997), qui permet de rendre compte de la maturation puis du vieillissement physiologique des feuilles, l'efficacité potentielle de la photosynthèse évolue dans le temps selon l'équation $LUE_j = LUE_{max}(1 - c_{lue}(t_{max} - t_j)^2)$. La différence $t - t_{max}$ représente l'écart entre le jour j et le jour où l'efficacité de la photosynthèse est maximale, soit $A_{LUE_{max}}$ jours après le débournement. Les termes LUE_{max} et c_{lue} et $A_{LUE_{max}}$ sont des paramètres⁷. Notons que pour des raisons de simplicité ni la photo-respiration, ni la respiration d'entretien, ni la respiration associée à la croissance ne sont modélisées explicitement. Le terme ΔC_j est donc un incrément net de carbone structurel, et LUE_{max} est un paramètre prenant en compte les pertes de carbone par respiration.

foliaires très faibles pour les petits arbres, soit très élevées pour les grands arbres (en appliquant les paramètres du noyer hybride donnés en annexe A.1, deux arbres de 3 et 50 cm de DBH ont des volumes de houppiers de 7 et 5450 m³). Les mesures effectuées en 2007 et 2008 pour le paramétrage du module sAFe-Light (annexe B) plaident pour une décroissance de la densité de surface foliaire avec l'augmentation du volume de houppier.

6. **Modification effectuée** : introduction du compartiment souche. Les compartiments racinaires de sAFe-Tree ont un rôle purement fonctionnel, d'absorption d'eau et d'azote pour les racines fines, de support des racines fines pour les racines de structure (voir section 1.2.2.3). En conditions de bonne alimentation en eau et en azote, l'équilibre fonctionnel entre biomasses de feuilles et de racines fines (voir section 1.2.2.4) conduit à la simulation de biomasses racinaires très faibles, irréalistes au regard des autres fonctions assurées par les racines (rôle biomécanique notamment). L'introduction du compartiment "souche" permet de maintenir une fraction raisonnable de carbone souterrain, même dans ces conditions.

7. **Modification effectuée** : introduction du formalisme d'évolution de la LUE en fonction de la phénologie.

sAFe-Tree ne modélise pas explicitement les phénomènes de stockage et de remobilisation de réserves carbonées. Il est cependant indispensable de définir un compartiment de réserves de carbone, que nous noterons C_{NSC} , mobilisables pour la mise en place des feuilles lors du débourrement. La dimension maximale de ce compartiment est proportionnelle à la quantité de carbone dans les compartiments ligneux : $C_{NSC}^* = 2p_{NSC}C_{ligneux}$ où p_{NSC} est un paramètre, et $C_{ligneux}$ est la quantité de carbone dans les compartiments ligneux (branches, tronc, souche et racines de structure). Le fonctionnement du compartiment de réserves est modélisé de façon très simple :

- Si $C_{feuilles}$ est inférieur à $(1 - a_{NSC})C_{feuilles}^*$, où $C_{feuilles}^*$ est calculé à partir de l'allométrie entre volume de houppier et surface foliaire et a_{NSC} est un paramètre, l'arbre est autorisé à mobiliser son pool de réserves pour alimenter sa croissance. Le compartiment de réserves agit alors comme une source de carbone, sa variation journalière est donnée par

$$\Delta C_{NSC} = -\min(b_{NSC}C_{NSC}, c_{NSC}C_{feuilles}^*) \quad (1.2.5)$$

où b_{NSC} et c_{NSC} sont des paramètres.

- Sinon, le compartiment de réserves agit comme un puits de carbone prioritaire, qui mobilise une proportion du carbone issu de la photosynthèse variant de 0 lorsque $C_{NSC} = C_{NSC}^*$ à 1 lorsque $C_{NSC} = 0$.

La quantité de carbone allouée à la croissance est égale à la productivité primaire nette, à laquelle se retranche la variation (positive ou négative) du compartiment de réserves. Le carbone de l'arbre, outre le carbone de réserves, est divisé en 6 compartiments : les feuilles, les branches, le tronc, la souche, les racines de structure et les racines fines. La teneur en carbone est supposée identique pour l'ensemble des organes, et fixée à 50% pondéral de la biomasse sèche. L'allocation de carbone entre compartiments est simulée en deux étapes (fig. 1.2.3). Une première méthode, basée sur le principe de l'équilibre fonctionnel (section 1.2.2.4), permet de gérer l'allocation du carbone total entre compartiments aérien et souterrain. Ensuite, des méthodes spécifiques sont appelées pour gérer les allocations intra-aérienne, basée sur les relations d'allométrie (section 1.2.2.2), et intra-souterraine, basée sur le principe du modèle "pipe-stem" (section 1.2.2.3).

Allocation du carbone entre compartiments aériens et croissance aérienne

Le carbone aérien est divisé en quatre compartiments : le tronc, la souche, les branches et les feuilles. Pour le tronc, la souche et les branches, la relation entre quantité de carbone et volume de bois est définie par la densité du bois (ρ_{wood}). La relation entre dimension du compartiment feuilles et surface foliaire est fixée par le ratio biomasse sur surface des feuilles (LMA), supposé fixe.

L'allocation du carbone entre compartiments aériens est faite de manière à permettre une croissance de l'arbre conforme aux relations d'allométries définies dans la section 1.2.2.2. Allocation et croissance sont cependant soumises à certaines règles supplémentaires : (1) l'allocation vers les feuilles, la croissance en hauteur et la croissance horizon-

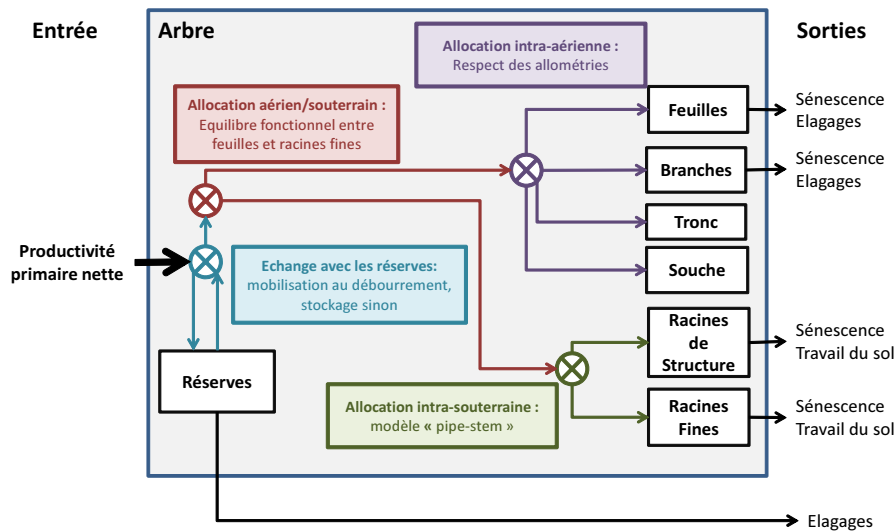


Figure 1.2.3: Représentation schématique des flux de carbone dans un arbre simulé par sAFe-Tree.

taille du houppier ne se font que pendant la période d'expansion foliaire, (2) la croissance horizontale du houppier est limitée à 1 cm par jour, et (3) la croissance horizontale du houppier dans une direction donnée s'arrête lorsque les houppiers d'arbres voisins se rejoignent.

L'algorithme d'allocation fonctionne de la manière suivante :

1. On fixe la force de puits du compartiment tronc égale à la quantité totale de carbone alloué aux compartiments aériens. Si la hauteur de l'arbre est inférieure à la hauteur attendue selon l'allométrie hauteur/diamètre, on ajoute à cette force de puits la quantité de carbone nécessaire pour rétablir l'allométrie. Cette situation est courante en début de saison, car la croissance du tronc ne s'est faite qu'en diamètre à la fin de la saison précédente.
2. Pour chaque compartiment, on calcule une dimension cible qui permettrait de respecter l'ensemble des allométries. La force de puits de chaque compartiment est calculée comme à l'écart entre taille cible et taille actuelle. Hors période d'expansion foliaire, la force de puits du compartiment feuilles est fixée à 0.
3. Le carbone disponible pour les compartiments aériens est partagé proportionnellement aux forces de puits.
4. À partir des nouvelles tailles des compartiments, les dimensions de l'arbre sont mises à jour en respectant les relations d'allométries.

1.2.2.3 Fonctionnement souterrain

Le système racinaire des arbres est représenté par deux compartiments : les racines de structure et les racines fines. La densité du bois des racines de structure est supposée

identique à celle du tronc, de la souche et des branches. La relation entre biomasse et longueur des racines fines est fixée par le paramètre de longueur spécifique des racines (SRL). Le réseau de racines fines est décrit par une densité de racines fines ($\text{m}\cdot\text{m}^{-3}$) dans chaque voxel colonisé. Son évolution est modélisée par un automate voxellaire, et c'est elle qui pilote le développement des racines de structure.

L'automate voxellaire

Les principes de l'automate voxellaire développé pour Hi-sAFe sont présentés dans Mulia et al. (2010)⁸. Ce formalisme permet de modéliser, avec très peu de paramètres, l'évolution en trois dimensions d'un système racinaire dans un sol hétérogène. L'automate racinaire fonctionne en deux étapes :

1. La prolifération : le carbone disponible est partagé entre les voxels déjà colonisés, afin d'y augmenter la densité de racines fines.
2. La colonisation : sous certaines conditions un voxel peut allouer une partie de son carbone à un voxel voisin ne contenant pas encore de racines du même arbre.

Règles de prolifération : allocation entre voxels

La proportion du carbone disponible allouée à un voxel i est donnée par la formule suivante :

$$p_i = \frac{\varepsilon_i^\varphi c_i^{-\rho}}{\sum_{\text{voxels}} \varepsilon_j^\varphi c_j^{-\rho}} \quad (1.2.6)$$

où ε_i est l'efficacité d'extraction de l'eau par les racines dans le voxel i le jour précédent, définie comme la quantité d'eau extraite par unité de longueur de racines fines⁹. L'exposant φ est un paramètre d'opportunité racinaire : s'il vaut 0, l'allocation entre voxels n'est pas affectée par les efficacités d'extraction d'eau ; s'il vaut 1, l'allocation est proportionnelle aux efficacités d'extraction de l'eau. Le terme c_i est le coût de revient, en carbone, d'une unité de densité racinaire supplémentaire dans le voxel i . Ce coût prend en compte la nécessité ou non, pour mettre en place ces nouvelles racines fines, d'allouer du carbone aux racines de structure reliant le voxel au collet de l'arbre. Le coût c_i augmente donc avec la distance des voxels au collet de l'arbre. Son calcul sera explicité dans la section 1.2.2.3. L'exposant ρ est un paramètre d'économie de carbone,

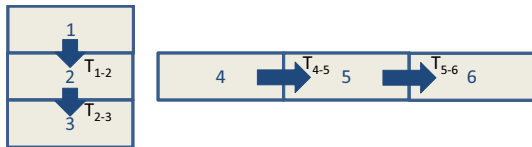
8. De nombreuses modifications ont été apportées par rapport au formalisme de Mulia et al., 2010. Les principes généraux de l'automate demeurent cependant les mêmes.

9. **Modification effectuée** : utilisation de l'efficacité d'extraction d'eau à la place de la quantité d'eau extraite. Cette modification a été introduite pour éviter la simulation de densités racinaires irréalistes au contact de la nappe. La quantité d'eau pouvant être extraite journalièrement dans un voxel (même dans la nappe) étant finie, l'efficacité d'extraction diminue lorsque la densité racinaire augmente, ce qui permet de limiter l'explosion des densités racinaires dans la nappe.

plus il a une valeur élevée, plus le système racinaire a tendance à se densifier proche de la souche de l'arbre¹⁰.

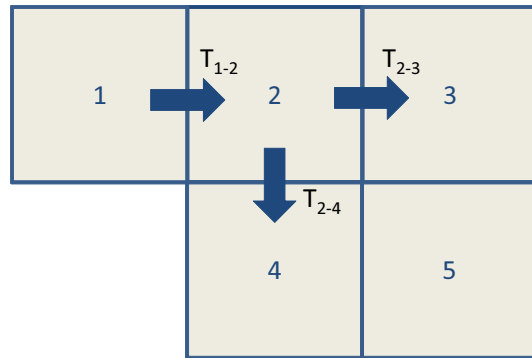
Colonisation de nouveaux voxels

a
Vue de côté, voxels de 20 cm de haut et 1 m de large.



En conditions d'allocation constante et uniforme du carbone entre voxels, l'attente entre T_{4-5} et T_{5-6} doit être 5 fois plus longue que l'attente entre T_{1-2} et T_{2-3} .

b
Vue de dessus, voxels de 1 m de côté



La distance entre les centres des voxels 1 et 3 est égale à 2 m. La distance entre les centres des voxels 1 et 4 est égale à $\sqrt{2} \simeq 1.4$ m. En conditions d'allocation constante et uniforme du carbone entre voxels, l'attente entre T_{1-2} et T_{2-3} doit être $2/\sqrt{2}$ fois plus longue que l'attente entre T_{1-2} et T_{2-4} .

Figure 1.2.4: Prise en compte de la forme non cubique des voxels : spécifications pour l'automate racinaire

La colonisation du sol par le système racinaire se fait de proche en proche : un voxel i contenant des racines peut, à partir d'un certain temps, coloniser un voxel voisin j qui ne contient pas encore de racines. Par voxels voisins, nous entendons ici voxels ayant une face commune : la colonisation n'est pas autorisée par les arêtes et les angles. Le voxel i est alors dit "voxel parent" du voxel j . Tout voxel colonisé a un et un seul parent, hormis le premier voxel immédiatement sous le tronc de l'arbre, qui n'a pas de parent. Un voxel peut avoir au maximum 5 enfants. L'historique de colonisation du sol par les racines fines est mémorisé sous la forme de liens topologiques entre les centres de gravités des voxels. Ainsi, pour chaque voxel, il existe un unique chemin permettant de remonter à la

10. **Modification effectuée :** utilisation du coût c_i à la place de la distance au collet. Cette modification permet de ne pas pénaliser la mise en place de racines fines loin de l'arbre si des racines de structures sont déjà présentes, ce qui est particulièrement important lors du débourement. Cette modification a été rendue possible par l'introduction d'une relation fonctionnelle entre racines fines et racines de structures (voir section 1.2.2.3)

souche de l'arbre. Ces liens seront utilisés pour modéliser les racines de structures (voir section 1.2.2.3).

La variable utilisée pour déclencher la colonisation depuis un voxel i vers ses voisins est le cumul de carbone investi dans le voxel pour faire des racines fines¹¹ : C_i . Les voxels modélisés par Hi-sAFe étant loin d'être cubiques (20 cm d'épaisseur pour 1 m de côté par défaut), l'utilisation d'une seule valeur pour déclencher la colonisation conduirait à une progression horizontale plus rapide que la progression en profondeur (voir figure 1.2.4a). Une valeur unique conduirait aussi à une progression privilégiée du système racinaire le long des axes de la scène, au détriment des diagonales (voir figure 1.2.4b).

Considérons un voxel i venant d'être colonisé par un voxel p . Afin de gérer correctement les deux situations exposées dans la figure 1.2.4, nous avons choisi de définir un seuil de colonisation pour chaque enfant potentiel e du voxel i , proportionnel à la distance $L_{p,e}$ entre les centres de gravités des voxels p et e . La colonisation du voxel e par le voxel i se fait lorsque C_i devient supérieur à $\alpha L_{p,e}$, où α est un paramètre déterminant la vitesse globale de progression du système racinaire. Certaines espèces ont un système racinaire se développant préférentiellement vers l'horizontale (plagiotropisme). Ce phénomène est modélisé augmentant les seuils de colonisation pour les voisins verticaux et en les diminuant pour les horizontaux¹².

Interactions avec la nappe

Le système racinaire est autorisé à proliférer dans les voxels au contact de la nappe, mais pas dans les voxels dont le voxel parent est dans la nappe. De même, la colonisation est autorisée dans la nappe depuis des voxels situés à l'extérieur de la nappe, mais pas depuis des voxels situés dans la nappe. Ces deux principes permettent d'éviter un investissement massif de racines en profondeur dans la nappe, où la durée de vie racinaire est faible¹³.

Mortalité des racines fines

La mortalité des racines fines est modélisée dans chaque voxel par une loi de décroissance exponentielle : à chaque pas de temps la proportion de racines fines qui meurent est donnée par $\log(2)/t_{1/2}$, où $t_{1/2}$ est la demi-vie des racines. Le modèle autorise à définir une demi-vie des racines différente dans les voxels saturés, pour rendre compte de la mortalité accélérée des racines dans une nappe asphyxiante.

11. **Modification effectuée** : dans le formalisme proposé par Mulia et al. (2010), la variable utilisée pour déclencher la colonisation de nouveaux voxels est la densité racinaire. L'utilisation du cumul de carbone investi dans le voxel permet de déclencher la colonisation depuis un voxel colonisé depuis longtemps, même si la densité racinaire y reste faible.

12. **Modification effectuée** : utilisation de plusieurs seuils de colonisations, afin de gérer la forme non cubique des voxels

13. **Modification effectuée** : introduction de ces règles

Relation entre racines fines et racines de structure¹⁴

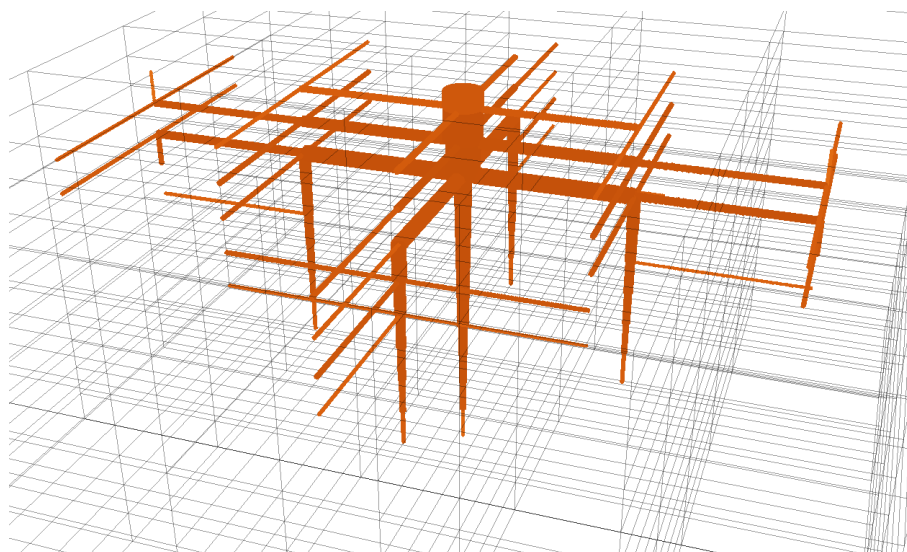


Figure 1.2.5: Représentation des racines de structures telles que simulées par Hi-sAFe. Une racine de structure est un cylindre reliant les centres de gravité de deux voxels. La section d’une racine de structure est fonction de la quantité totale de racines fines qui dépendent d’elle pour leur connexion à la souche.

Les racines de structure sont considérées comme des liens fonctionnels entre les racines fines situées dans un voxel et le tronc de l’arbre. La topologie des racines de structure reproduit l’historique de colonisation du sol par les racines fines. Chaque tronçon de racine de structure est modélisé par un cylindre reliant les centres de gravité d’un voxel et de son voxel parent, et dont le diamètre est fonction de la longueur totale des racines fines qui en dépendent, conformément au modèle “pipe-stem” (voir fig. 1.2.5).

L’allocation du carbone entre racines fines et racines de structure fonctionne de la manière suivante :

- On appelle une première fois l’automate racinaire en considérant que l’ensemble du carbone disponible pour les compartiments souterrains est alloué aux racines fines, mais sans mettre à jour le système racinaire. Cet appel permet de calculer un “état cible” pour le système de racines fines. La force de puits du compartiment racines fines est égale à la quantité de carbone disponible pour les compartiments souterrains.
- Sur la base de cet “état cible”, on calcule une force de puits pour le compartiment racines de structure. Cette force de puits est calculée comme la somme

14. **Modification effectuée :** cette relation entre racines fines et racines de structure avait été imaginée par Meine Van Noordwijk (sous une forme non spatialement explicite, en utilisant la distance moyenne entre racines fines et collet), mais n’avait pas été introduite dans le code.

des besoins individuels des tronçons de racines de structure. Pour chaque tronçon de racine entre un voxel i et son parent p , la biomasse cible est donnée par $B_{p,i}^* = \rho_{wood} D_{p,i} \alpha_{CR/FR} Q_i$ où ρ_{wood} est la densité du bois, $D_{p,i}$ est la distance entre les centres de gravités voxels p et i , $\alpha_{CR/FR}$ est la section requise en racines de structure pour alimenter une unité de longueur de racines fines (paramètre), et Q_i est la quantité totale de racines fines dans tous les voxels qui dépendent de ce tronçon. $Q_i = L_i + \sum_e Q_e$, où L_i est la longueur racinaire dans le voxel i et e sont les voxels enfants du voxel i .

- Le carbone est alloué entre racines fines et racines de structure proportionnellement aux forces de puits.
- L'automate racinaire est appelé une seconde fois avec la quantité de carbone effectivement allouée aux racines fines.
- Le carbone alloué aux racines de structures est réparti entre les tronçons proportionnellement à leur besoin.

Notons qu'avec ce formalisme, il est possible de remplacer des racines fines mortes dans un voxel sans avoir besoin d'allouer à nouveau du carbone aux racines de structure, ce qui est particulièrement important lors du débourrement des arbres.

Notons que le besoin en carbone pour les racines de structure est dépendant de la manière dont le carbone disponible pour les racines fines est alloué entre les voxels. L'automate racinaire est capable d'anticiper ce besoin et de le prendre en compte dans l'allocation via le calcul du coût de mise en place de nouvelles racines fines dans un voxel (voir section 1.2.2.3). En toute rigueur, le calcul des coûts est dépendant de l'allocation entre voxels, et l'automate racinaire devrait procéder par itération pour optimiser son allocation. Par soucis de simplicité et d'économie en temps de calcul, les coûts sont calculés une seule fois en début de procédure, sous l'hypothèse simplificatrice d'une allocation homogène du carbone entre voxels déjà colonisés.

L'immersion prolongée des racines de structure dans la nappe entraîne leur mortalité à partir d'un temps $t_{CR,sat}$. Lorsqu'un tronçon de racine de structure meurt, toutes les racines fines et racines de structure qui en dépendent meurent aussi. La mortalité des racines de structures peut aussi être déclenchée par des opérations de travail du sol ou de cernage racinaire.

1.2.2.4 Équilibre fonctionnel entre compartiments aériens et compartiments souterrains

L'allocation de carbone entre compartiments aériens et souterrains est basée sur la recherche d'un équilibre fonctionnel entre la biomasse de feuilles (qui interceptent la lumière) et la biomasse de racines fines (qui extraient l'eau et l'azote)¹⁵. Notons W_f

15. **Modification effectuée** : définition d'un nouvel algorithme pour l'allocation aérien souterrain. L'idée de base est la même, à savoir la recherche un optimum entre biomasses aérienne et souterraine, en fonction de la disponibilité des ressources. Dans l'ancien algorithme, la fraction de biomasse allouée aux compartiments aériens étaient simplement égale à la fraction de biomasse aérienne actuelle en absence

et W_{fr} les biomasses de feuilles et de racines fines, et $R = W_f/(W_f + W_{fr})$. On fait l'hypothèse que l'allocation journalière entre compartiments aériens et souterrains fait tendre R vers une valeur cible R^* .

Évolution de la valeur cible R^*

La valeur cible R^* évolue au cours du temps pour s'adapter aux besoins de l'arbre, sa variation maximale journalière est fixée par un paramètre, ΔR_{max} . Tant que l'arbre n'est pas limité par des ressources souterraines, il cherche à développer au maximum sa capacité d'interception du rayonnement, c'est à dire à augmenter R . En absence totale de stress, la valeur cible R^* dérive vers le haut, c'est à dire vers plus de feuilles : $R_j^* = R_{j-1}^* + k_d \Delta R_{max}$, où k_d est un paramètre permettant de gérer la vitesse de cette dérive. Au contraire, si l'arbre manque d'eau, il cherche à développer son système racinaire, et R^* diminue : $R_j^* = R_{j-1}^* - (1 - W_{stress,j}^{\phi_W}) \Delta R_{max}$, où $W_{stress,j}$ est le stress hydrique du jour j et ϕ_W est un paramètre de sensibilité au stress hydrique. Pour rester dans une gamme de variation raisonnable, R^* est autorisé à varier entre 0.15 et 0.85.

Allocation de carbone entre compartiments aériens et souterrains

L'allocation du jour j entre compartiments aériens et souterrains cherche à atteindre l'égalité $R_j = R_j^*$, soit :

$$W_{f,j}/(W_{f,j} + W_{fr,j}) = R_j^* \quad (1.2.7)$$

Notons C_j la quantité totale de carbone disponible pour l'allocation, λ_j la proportion de ce carbone allouée aux compartiments aériens, et $\varepsilon_{a,j}$ et $\varepsilon_{s,j}$ la proportion de carbone aérien allouée aux feuilles et la proportion de carbone souterrain allouée aux racines fines. On peut alors écrire $W_{f,j} = W_{f,j-1} + \varepsilon_{a,j} \lambda_j C_j$, et $W_{fr,j} = W_{fr,j-1} + \varepsilon_{s,j} (1 - \lambda_j) C_j$.

de stimulus, et légèrement supérieure en cas d'excès d'azote, ou inférieure en cas de stress hydrique ou azoté. Cet algorithme, plus simple que l'actuel, a été abandonné pour les raisons suivantes :

- La mortalité continue des racines fines entraînait une dérive vers le haut de la fraction de biomasse aérienne, peu visible sur des simulations courtes, mais très importante sur des simulations pluri-annuelles.
- Ce formalisme réagissait de manière incohérente à l'élagage (et aussi au cernage racinaire) : la suppression d'une partie de la biomasse aérienne par élagage (diminution de la fraction de biomasse aérienne) avait pour effet immédiat une allocation de carbone plus importante vers les racines.
- Il était peu réactif aux stress très intenses. En cas de stress intense, la photosynthèse est réduite, et la quantité de carbone allouée à la croissance est faible. En conséquence, l'allocation préférentielle de biomasse vers les racines les jours de stress avait peu d'impact sur la fraction de biomasse aérienne des jours suivants.
- Avec la version simplifiée de sAFe-Tree ne prenant pas en compte l'azote, ce formalisme ne permettait pas une allocation préférentielle vers les parties aériennes en absence de stress hydrique.

Le nouvel algorithme a été développé pour répondre à ces problèmes.

On montre alors que pour atteindre $R_j = R_j^*$, λ_j doit être :

$$\lambda_j = \frac{R_j^*(W_{f,j-1} + W_{fr,j-1} + \varepsilon_{s,j}C_j) - W_{f,j-1}}{C_j(R_j^*(\varepsilon_{s,j} - \varepsilon_{a,j}) + \varepsilon_{a,j})} \quad (1.2.8)$$

Lorsque R_{j-1} est éloigné de R_j^* , λ_j tel que calculé par cette équation prend des valeurs hors de l'intervalle $[0, 1]$, ce qui est bien entendu impossible. Dans ces cas, on a une allocation exclusivement vers les organes aériens ($\lambda_j = 1$) ou exclusivement vers les organes souterrains ($\lambda_j = 0$). À ce stade de l'algorithme d'allocation, $\varepsilon_{a,j}$ et $\varepsilon_{s,j}$ ne sont pas encore connus, puisqu'ils seront calculés par les algorithmes gérant les allocations intra-aérienne et intra-souterraine, et leur valeurs seront dépendantes λ_j . Afin d'éviter une procédure itérative de calcul pour λ_j , $\varepsilon_{a,j}$ et $\varepsilon_{s,j}$, le calcul de λ_j est fait sous l'hypothèse que $\varepsilon_{a,j} = W_{f,j-1}/W_{a,j-1}$ et $\varepsilon_{s,j} = W_{fr,j-1}/W_{s,j-1}$ où $W_{a,j-1}$ et $W_{s,j-1}$ sont les biomasses totales aérienne et souterraine.

1.2.2.5 Initialisation

Dans le fichier de définition de la scène simulée, l'utilisateur doit fournir des informations pour l'initialisation de l'arbre. Pour la partie aérienne, il faut fournir : la hauteur totale de l'arbre (H), la hauteur de base du houppier (H_{EL}), et un rayon horizontal du houppier (r_h). Le DBH initial et le volume du tronc sont déduits de H par les relations d'allométrie (voir section 1.2.2.2). Les rayons du houppier sont donnés par $r_z = (H - H_{EL})/2$, et $r_x = r_y = r_h$. La biomasse de branches est déduite du volume du houppier. La biomasse de feuilles est initialisée à 0.

Pour la partie souterraine, on fait l'hypothèse que l'enracinement est limité horizontalement à la cellule de plantation. La profondeur initiale d'enracinement z_0 , ainsi que la valeur initiale de la valeur cible R_0^* (voir section 1.2.2.4) sont fournies par l'utilisateur. La biomasse initiale de racines fines est déduite de R_0^* et de la biomasse foliaire cible (déduite du volume du houppier par allométrie, voir section 1.2.2.2). Leur répartition entre voxels suit une loi exponentielle négative en fonction de la profondeur. Les racines de structure sont initialisées de manière à respecter la relation entre racines fines et racines de structure définie en section 1.2.2.3.

1.2.2.6 Interventions

Élagages

Les élagages sont imposés par l'utilisateur du modèle, ils sont définis par une date et une hauteur d'élagage. On considère que l'élagage réduit les diamètres horizontaux du houppier dans les mêmes proportions que le diamètre vertical (fig. 1.2.6). Les biomasses de branches et de feuilles sont supposées uniformément réparties dans le houppier, et leur réduction par élagage est proportionnelle à la réduction de volume du houppier.

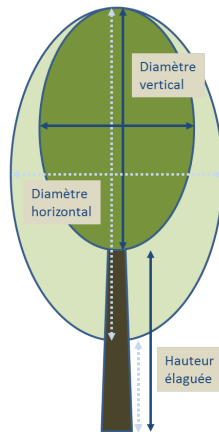


Figure 1.2.6: Modélisation de l'effet d'un élagage sur la géométrie du houppier. La nouvelle hauteur élaguée, valeur forcée par l'utilisateur, permet de calculer un nouveau diamètre vertical du houppier. Les diamètres horizontaux sont réduits dans les mêmes proportions que le diamètre vertical.

Travail du sol et cernage racinaire

Le travail du sol avant le semis des cultures intercalaires (défini dans l'itinéraire technique des cultures) a pour effet secondaire de supprimer toutes les racines d'arbres dans les voxels travaillés. Les racines de structure situées dans un voxel travaillé sont détruites, ce qui entraîne la mortalité de toutes les racines (fines ou de structure) qui en dépendent.

Il est possible de simuler un cernage racinaire parallèle aux lignes d'arbres. L'utilisateur définit une profondeur et une distance à la ligne d'arbres. Pour les racines de l'arbre, le cernage racinaire est équivalent à un travail du sol profond et localisé.

1.2.3 Module de compétition pour la lumière : sAFe-Light

sAFe-Light est une adaptation du modèle Mountain (Courbaud et al., 2003), basé sur le calcul du trajet optique de rayons de lumière dans une scène en 3D. sAFe-Light est capable de gérer des scènes en pente, mais la capacité d'autres composants de Hi-sAFe (le sol et les racines en particulier) à gérer la pente n'a pas encore été évaluée. Nous présentons donc dans cette partie une formulation simplifiée des formalismes de sAFe-Light, correspondant au cas particulier où la pente est nulle.

1.2.3.1 Représentation du rayonnement

Le rayonnement solaire journalier (RG) est une entrée climatique. Ce rayonnement solaire est divisé en rayonnement diffus et rayonnement direct, selon qu'il est transmis (unidirectionnel) ou diffusé par l'atmosphère (multi-directionnel). La fraction de

rayonnement diffus est donnée par la formule empirique d'Angström (Allen et al., 1998) $fD = 1.2 - 1.3.RG/ERG$, où ERG est le rayonnement extraterrestre (calculé à partir des formules astronomiques). La proportion de rayonnement photosynthétiquement actif dans le rayonnement solaire est supposée constante et est égale à 0.48, dans le diffus comme dans le direct.

La voûte céleste est discrétisée en un nombre fini de secteurs, identifiés par leur direction $\Omega = (\theta, \alpha)$ où θ est l'élévation (angle avec l'horizontale) et α l'azimut (angle avec l'axe x). La discrétisation utilisée est de type "méridiens-parallèles" : un secteur est défini par un intervalle d'élévation et un intervalle d'azimut, tous deux de largeur δ (à fixer par l'utilisateur). Notons qu'avec ce type de discrétisation, l'angle solide d'un secteur d'élévation θ (c'est à dire entre les élévations $\theta - \delta/2$ et $\theta + \delta/2$) est $2\delta \cos \theta \sin(\delta/2)$ stéradians : la finesse de la discrétisation augmente avec l'élévation.

Le rayonnement diffus est réparti entre ces secteurs selon la distribution SOC (Standard Overcast Sky), telle que définie par Moon & Spencer (1942) : l'irradiance du ciel pour une élévation θ est proportionnelle à $I(\theta) = 0.41(1 + 2 \cos \theta)/3$. La proportion de rayonnement diffus provenant d'un secteur de direction Ω est donc donnée par la formule $\delta/(2\pi) \int_{\theta-\delta/2}^{\theta+\delta/2} I(\theta) \sin \theta d\theta$.

Au pas de temps journalier, la position du soleil n'est pas définie par un point mais par une courbe : la trajectoire du soleil, qui est calculée avec les formules astronomiques à partir du jour julien et de la latitude. Afin de ne pas augmenter le nombre total de rayons à traiter par l'algorithme, dont dépend fortement le temps de calcul, nous avons choisi de distribuer le rayonnement direct aux mêmes secteurs de ciel que le rayonnement diffus. Le modèle calcule la position du soleil dans le ciel chaque demi-heure. Chaque position calculée est représentative d'une proportion du rayonnement direct journalier, que l'on suppose varier de manière sinusoïdale au cours de la journée. Ce rayonnement est affecté aux secteurs de ciel les plus proches, proportionnellement à leur intersection avec le disque d'angle solide $2\pi/n$ (où n est le nombre de secteurs de ciel) centré sur la position du soleil.¹⁶

1.2.3.2 Interception du rayonnement

La géométrie de la scène est représentée de façon très simple : les houppiers des arbres sont des ellipsoïdes avec une densité de surface foliaire (LAD, $m^2.m^{-3}$) et une densité de surface de branches (WAD, $m^2.m^{-3}$), les troncs sont représentés par des cônes opaques avec un diamètre égal à DBH à 1 m 30 au dessus du sol, et nul à la hauteur H (hauteur totale de l'arbre). L'interception du rayonnement par les cultures n'est pas calculée par

16. **Modification effectuée** : utilisation des rayons déjà calculés pour le rayonnement diffus pour décrire la répartition du rayonnement direct. Afin de limiter le temps de calcul, l'ancien formalisme utilisait un petit nombre de rayons (5 positions du soleil) pour simuler le rayonnement direct, ce qui conduisait à la simulation d'ombres directes discontinues. Le nouveau formalisme permet de répartir le rayonnement direct comme un algorithme fonctionnant au pas de temps semi-horaire, mais sans augmenter le nombre de rayons à calculer.

cet algorithme (nous y reviendrons par la suite). Un algorithme de symétrie torique est appliqué à la scène, et permet de simuler un couvert infini.

Pour chaque direction Ω , le modèle calcule la trajectoire d'un rayon arrivant au centre de chaque cellule de la scène. Dans le cas de petits arbres, dont les dimensions de houppier ne sont pas beaucoup plus grandes que les cellules de la scène, le modèle calcule plusieurs rayons par cellule. Une procédure d'optimisation permet, pour chaque rayon, de dresser une liste des arbres susceptibles d'intercepter ce rayon (voir Courbaud et al., 2003). Pour chaque arbre de la liste, l'algorithme calcule la longueur L (m) du trajet du rayon dans le houppier de l'arbre (voir Martens et al., 2000 pour le détail des calculs).

L'atténuation du rayonnement dans les houppiers des arbres suit la loi suivante :

$$\frac{I}{I_0} = \exp\left(-\left(0.5\mu\sqrt{\sigma}\text{LAD} + \text{WAD}\right)L\right) \quad (1.2.9)$$

où I/I_0 est la proportion de rayonnement transmis par le houppier, 0.5 correspond à l'hypothèse d'une distribution sphérique des angles d'orientation des feuilles, μ est un coefficient d'agrégation des feuilles, et σ est l'absorptance des feuilles pour la gamme de longueurs d'onde considérée. Si un rayon traverse le tronc d'un arbre¹⁷, son énergie est mise à 0. On fait l'hypothèse que le tronc et les branches d'un arbre donné ne font pas d'ombre à ses propres feuilles, et que le rayonnement réfléchi est négligeable. La proportion de rayonnement intercepté par les feuilles d'un arbre est donc donnée par $1 - \exp(-0.5\mu\sqrt{\sigma}\text{LAD}L)$.

Les résultats de l'interception rayon par rayon sont ensuite intégrés sur l'ensemble des directions et sur la scène, pour obtenir le rayonnement intercepté par chaque arbre et transmis sous les arbres pour chaque cellule. Le rayonnement intercepté par la culture sur chaque cellule est calculé avec le formalisme de STICS (simple loi de Beer), mais en remplaçant le rayonnement incident par le rayonnement transmis sous les arbres.

1.2.3.3 Appels à sAFe-Light : un compromis entre précision et temps de calcul

L'algorithme d'interception du rayonnement est un des algorithmes les plus lourds en temps de calcul de Hi-sAFe, en particulier en début de simulation quand les arbres sont petits et qu'il est donc nécessaire de calculer plusieurs rayons par cellule. Pour limiter le temps de calcul, cet algorithme n'est appelé que lorsque :

- La surface foliaire des arbres a varié de plus de 5 % (paramétrable) depuis le dernier appel.
- La déclinaison du soleil a varié de plus de 2 % (paramétrable) depuis le dernier appel.

Les proportions de rayonnement diffus et direct interceptées par chaque élément de la scène sont gardés en mémoire. Les jours où sAFe-Light n'est pas appelé, les quantités de

17. **Modification effectuée** : prise en compte des troncs. Cette modification améliore significativement les performances du modèle sAFe-Light, notamment pour reproduire les ombres hivernales (voir annexe B).

rayonnement intercepté sont mises à jour à partir de ces proportions, et des quantités de rayonnement diffus et direct incidents du jour.

1.2.4 Fonctionnement hydrique du système

Tous les transferts verticaux de l'eau dans le sol (pluies, infiltration, drainage, évaporation du sol) sont modélisés par STICS à l'échelle de la couche élémentaire (1cm). Les formalismes utilisés pour représenter ces flux sont présentés en détail dans Brisson et al. (2009). Les flux d'eau horizontaux ne sont pas modélisés. La recharge du sol lors des remontées de nappe (entrées climatiques) est simulée en forçant la teneur en eau des voxels saturés à la saturation.

Hi-sAFé modélise deux aspects de l'interaction entre plantes pour la ressource hydrique : (1) la demande évaporative des plantes, calculée à partir des conditions climatiques et des sorties du module de compétition pour la lumière, et (2) l'extraction d'eau par les plantes. L'interception d'eau de pluie par les arbres et les écoulements le long du tronc ne sont pas modélisés.

1.2.4.1 Demande en eau des plantes

Une modélisation mécaniste de la demande en eau des plantes impliquerait une modélisation explicite des modifications locales du microclimat, des flux d'énergie et des températures de surface dans une parcelle agroforestière. Cette modélisation, originellement prévue dans le projet SAFE, a été abandonnée car trop coûteuse en temps de calcul et difficile à paramétrer. Un formalisme très simple, basé sur un partage de l'ETP (évapotranspiration potentielle de référence) entre arbres et cultures a été adopté. L'ETP est partagée entre la strate arborée et l'ensemble sol-culture proportionnellement à la répartition du rayonnement calculée par le module de compétition pour la lumière.

La demande en eau de l'ensemble sol-culture est modélisée par STICS avec un formalisme de type $K_i \cdot ETP_i$ ($\text{mm} \cdot \text{m}^{-2}$), où le coefficient cultural (K) est une fonction du LAI de la culture, et l'évapotranspiration potentielle de référence (ETP_0) est calculée à partir des entrées climatiques (voir Brisson et al., 2009). Dans Hi-sAFé, l'effet de la strate arborée sur la demande évaporative du système sol-plante d'une cellule i de la scène est modélisé en appliquant à cette cellule une ETP modifiée, $ETP_i = f_i ETP_0$, où f_i est la proportion de rayonnement transmis par les arbres sur la cellule i . De même, la demande évaporative d'un arbre est calculée comme la proportion du rayonnement interceptée par cet arbre multipliée par ETP_0 et par la surface de la scène (pour convertir de $\text{mm} \cdot \text{m}^{-2}$ à $\text{mm} \cdot \text{arbre}^{-1}$)¹⁸.

18. Modification effectuée :

Un formalisme de complexité intermédiaire avait été proposé pour le calcul de la demande en eau des arbres. Ce formalisme, adapté du modèle BROOK90 (<http://home.roadrunner.com/~stfederer/brook/brook90.htm>), est basé sur l'application de la formule de Penman-Monteith. Il nécessite une modélisation explicite de la conductance stomatique et de la résistance aérodynamique du couvert. Le

1.2.4.2 Algorithme de compétition pour l'eau : sAFe-Water

L'algorithme de compétition pour l'eau de Hi-sAFe a été développé par Meine van Noordwijk, Betha Lusiana et Degi Harja (ICRAF). Pour une explication détaillée des principes bio-physiques sous-jacents, se reporter à de Willigen et al. (2000) et Heinen (2001).

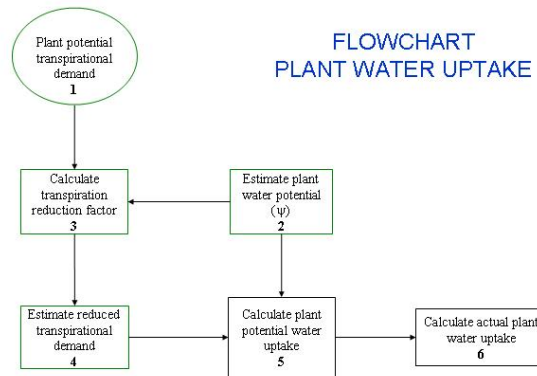


Figure 1.2.7: Principales étapes de l'algorithme d'extraction d'eau.

Les principales étapes du module de compétition pour l'eau sont résumées dans la figure 1.2.7. Dans la suite de cette section, nous détaillons les étapes 2 à 6. Les demandes en eau des plantes (étape 1) sont considérées comme des entrées du module.

Estimation du potentiel hydrique de chaque plante et réduction de la demande

L'évaporation d'eau à la surface des feuilles d'une plante provoque une diminution du potentiel hydrique foliaire (aspiration), jusqu'à atteindre une valeur suffisamment négative pour générer un flux d'eau du sol vers les feuilles compensant l'évaporation.

formalisme utilisé dans BROOK90 pour modéliser la résistance aérodynamique du couvert conduit à des valeurs extrêmes lorsqu'il est appliqué à de très petits ou de très grands arbres, avec pour conséquence des valeurs absurdes de demande en eau.

Suite à cette constatation, nous avons choisi d'adopter le formalisme présenté ici, plus simple et plus robuste, mais certainement moins réaliste. Ce formalisme a été inspiré par les travaux de Pereira et al. (2006), qui ont montré que pour des petits arbres irrigués en peuplement ouvert (arbres isolés ou en verger), la transpiration individuelle des arbres est très bien prédite par la formule $K \cdot ETP_0$, avec $K = L_a / 2.88$ où L_a est la surface foliaire et la valeur 2.88 correspond au LAI du gazon utilisé pour la définition de l' ETP_0 . Le formalisme proposé ici est équivalent à celui proposé par ces auteurs tant que la compétition pour la lumière entre arbres est négligeable. Lorsque la compétition entre arbre devient importante, on simule une réduction de la demande évaporative proportionnelle à la réduction de rayonnement interceptée due à la compétition.

Plus le sol est sec, plus le potentiel hydrique foliaire nécessaire au maintien d'un flux d'eau depuis le sol est négatif. Au delà d'un certain seuil, cette diminution du potentiel hydrique foliaire provoque une diminution physiologique de la conductance stomatique, ce qui a pour effet de limiter la transpiration, ainsi que l'efficacité de la photosynthèse. Théoriquement, le système atteint un état d'équilibre pour lequel le flux d'eau transpirée (demande) est égal au flux d'eau du sol vers les feuilles (offre), comme illustré sur la figure 1.2.8.

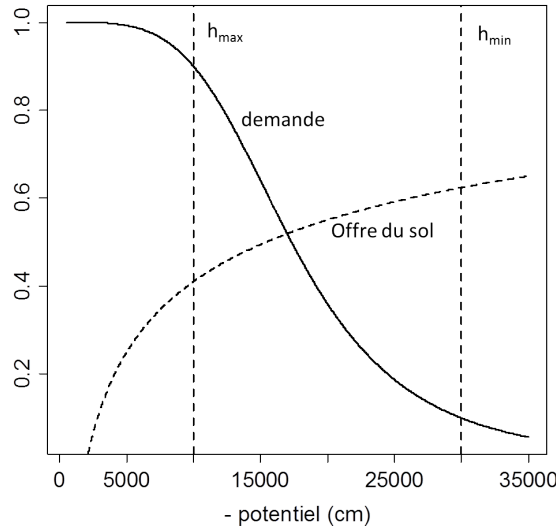


Figure 1.2.8: Représentation schématique de la relation entre potentiel hydrique du sol et réduction de la demande évaporative (trait plein). En pointillé : relation entre potentiel hydrique de la rhizosphère et offre du sol, pour un sol au potentiel hydrique $h_s = -2000$ cm. h_{min} et h_{max} sont des paramètres d'espèce.

L'offre du sol (flux d'eau possible du sol vers les feuilles) dépend de la différence de potentiel hydrique entre le sol et les feuilles, et de la conductivité hydraulique de l'ensemble sol-plante. La demande évaporative étant calculée à l'échelle de la plante entière, nous considérerons le potentiel hydrique homogène dans tout le système aérien de la plante, et nous intéresserons uniquement à la conductivité hydraulique entre le sol et le collet. Les plantes étant enracinées dans un sol hétérogène, il est nécessaire de définir un potentiel hydrique moyen du sol perçu par la plante, qui est calculé comme :

$$\hat{h}_s = - \left(\text{mean}_{ijk}((-h_{ijk})^{-b}, Lr_{ijk}) \right)^{-b} \quad (1.2.10)$$

où Lr_{ijk} est la longueur de racines fines dans le voxel ijk (m), h_{ijk} est le potentiel hydrique du sol (cm) dans le voxel ijk , $\text{mean}(a, w)$ est la moyenne des a pondérée par les w , et b est un paramètre (compris entre 0 exclu et 1 inclus). \hat{h}_s est une moyenne

harmonique lorsque $b = 1$ (valeur par défaut) et tend vers une moyenne arithmétique lorsque b tend vers 0. Le choix d'une moyenne harmonique (choix par défaut) permet de donner plus de poids aux voxels humides (h_{ijk} proche de 0) qu'aux voxels secs (h_{ijk} très négatif). Le potentiel hydrique foliaire requis pour que l'offre du sol soit égale à la demande évaporative de la plante est calculé comme $h_p = \hat{h}_s(1 + \beta) + h_{rad} + h_{long} + z$ où $\beta\hat{h}_s$ est le pouvoir tampon du sol (différence de potentiel requise pour générer un flux d'eau suffisant du sol vers la surface des racines), z est la profondeur moyenne du système racinaire, et h_{rad} et h_{long} sont les différences de potentiel requises pour les transports radial (de la surface des racines au xylème) et longitudinal (des racines situées dans un voxel au collet de la plante). Le terme h_{rad} est donné par : $h_{rad} = E_p / (k_r L_{tot})$, où E_p est la demande évaporative de la plante (cm^3), L_{tot} est la longueur totale de racines de la plante (cm), et k_r est la conductivité radiale des racines ($\text{cm.jour}^{-1} = \text{cm}^3$ d'eau par cm de longueur de racine, par cm de différence de potentiel hydrique et par jour). Les termes h_{long} et z ne sont pas considérés dans la version actuelle de l'algorithme¹⁹.

La relation entre potentiel hydrique de la plante et réduction de la demande évaporative (réduction de la conductance stomatique) est modélisée par la fonction de Campbell (voir figure 1.2.8). La réduction f (en proportion) de la demande est :

$$f = \frac{1}{1 + \left(\frac{h_p}{h_{1/2}}\right)^c} \text{ où } h_{1/2} = \left(\frac{1 - \alpha}{\alpha}\right)^c \text{ et } c = \frac{2 \log\left(\frac{\alpha}{1 - \alpha}\right)}{\log\left(\frac{h_{max}}{h_{min}}\right)} \quad (1.2.11)$$

où h_{min} , h_{max} et α sont des paramètres.

Le potentiel hydrique de la rhizosphère dans chaque voxel est calculé comme $h_r = h_p - h_{rad}$ où h_{rad} est calculé comme précédemment, mais avec la demande réduite.

Absorption potentielle par chaque plante et dans chaque voxel

Principe pour une seule plante

Considérons un voxel de volume V avec une teneur en eau $\theta(h_s)$ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) correspondant à un potentiel hydrique h_s . Dans le cas simple avec une seule plante P , avec une

19. **Modification effectuée** : Dans le cas particulier d'un système racinaire dense en surface et peu dense en profondeur dans un sol sec en surface et humide en profondeur, la version de l'algorithme incluant h_{long} et z conduit à des absorptions d'eau nulles. Les voxels humides de surface imposent une valeur élevée de \hat{h}_s , et la concentration des racines en surface conduit à des valeurs faibles pour h_{long} et z . Au final, la plante abaisse peu son potentiel hydrique, ce qui ne permet d'absorption d'eau ni en surface (sol relativement sec), ni en profondeur (pertes de charge h_{long} et z). Dans ce travail, nous avons choisi de négliger ces deux termes, afin d'éviter ce problème. Une solution possible pour réintroduire h_{long} et z , afin de simuler une absorption préférentielle en surface et proche de la base de la plante, serait d'inclure ces termes directement dans le calcul du potentiel hydrique moyen du sol : un voxel situé très loin de l'arbre ou très profond serait alors perçu comme plus sec qu'il ne l'est réellement. Cette solution n'a pas encore été testée.

densité racinaire D , un rayon de racines r (paramètre spécifique) et un potentiel rhizosphérique $h_p < h_s$, la quantité U (ml) d'eau absorbable par la plante P dans le voxel est donnée par $U = \min(U_T, U_A)$. U_A est la quantité d'eau libérée lorsque le sol s'assèche de h_s à h_p : $U_A = V(\theta(h_s) - \theta(h_p))$. U_A est une limitation par la quantité d'eau disponible. U_T est une limitation par la vitesse de diffusion de l'eau dans le sol, elle est calculée à partir des potentiels de flux matriciels : $U_T = DV\pi(\Delta\Phi)_{S-P}/f(D, r)$, où $(\Delta\Phi)_{S,P}$ est le potentiel de flux matriciel (cm².jour⁻¹) entre le sol et la plante, et $f(D, r)$ est un facteur géométrique. Par définition, $(\Delta\Phi)_{S,P}$ est l'intégrale, entre h_s et h_p , de la conductivité hydraulique du sol $K(h)$, donnée par les fonctions de pédotransfert. Le facteur $f(D, r)$ est calculé comme :

$$f(D, r) = \frac{\frac{1-3\rho^2}{4} + \rho^4 \frac{\log \rho}{\rho^2-1}}{2(\rho^2 - 1)} \quad (1.2.12)$$

où $\rho = 1/(r\sqrt{\pi D})$, avec r le rayon des racines.

Compétition entre plantes

Considérons le même voxel, mais colonisé par n plantes P_1, \dots, P_n , avec les densités racinaires D_1, \dots, D_n , les potentiels rhizosphériques $h_1 < \dots < h_i < h_s < h_{i-1} < \dots < h_n$ et les rayons de racines r_1, \dots, r_n . Les plantes P_{i+1} à P_n , qui ont un potentiel rhizosphérique supérieur au potentiel du sol, ne peuvent pas extraire d'eau dans le voxel. La plante P_i et les plantes P_1 à P_{i-1} sont en compétition pour l'extraction de l'eau entre h_s et h_i . En dessous de h_i , seules les plantes P_1 à P_{i-1} sont en compétition, et ainsi de suite jusqu'à l'intervalle entre h_1 et h_2 où seule la plante P_1 peut extraire de l'eau.

L'absorption potentielle d'eau par l'ensemble des plantes et sa répartition entre plantes est calculée pour chaque intervalle de potentiel hydrique. Dans l'intervalle $[h_k, h_{k+1}]$, les plantes P_1 à P_k sont en compétition. L'eau disponible dans cette gamme de potentiel est $U_{A,k} = \theta(h_{k+1}) - \theta(h_k)$. L'eau transportable $U_{T,k}$ est donnée par $U_{T,k} = \bar{D}_k V \pi (\Delta\Phi)_{k+1,k} / f(\bar{D}_k, \bar{r}_k)$, où \bar{D}_k est la somme des densités racinaires des plantes P_1 à P_k , et \bar{r}_k est un rayon moyen des racines :

$$\bar{r}_k = \left(\frac{\sum_{j=1}^k D_j \sqrt{r_j}}{\sum_{j=1}^k D_j} \right)^2 \quad (1.2.13)$$

L'eau absorbable dans l'intervalle de potentiel $[h_k, h_{k+1}]$ est répartie entre les plantes en compétition proportionnellement aux densités racinaires. L'absorption d'eau potentielle par la plante P_j ($j \leq k$) dans l'intervalle de potentiel $[h_k, h_{k+1}]$ est donc donnée par $U_{k,j} = \frac{D_j}{\bar{D}_k} \min(U_{A,k}, U_{T,k})$. L'extraction potentielle totale de la plante P_j dans le voxel est calculée comme la somme des extractions par intervalles de potentiels, de h_j à h_s .

Absorption effective

L'absorption potentielle totale d'une plante est la somme de ses extractions potentielles par voxel. Si cette absorption potentielle totale est supérieure à la demande réduite,

l'absorption effective dans chaque voxel est égale au ratio de l'absorption potentielle totale sur la demande réduite.

1.2.4.3 Communication entre STICS et Hi-sAFe

Les flux verticaux d'eau et d'azote dans le profil de sol sont simulés par STICS à l'échelle de la mini-couche (1 cm). Pour des raisons de temps de calcul, l'automate racinaire simulant les racines de l'arbre et les algorithmes d'extraction d'eau et d'azote ne fonctionnent pas à l'échelle de la mini-couche, mais à l'échelle du voxel (généralement 20 cm). La communication entre les deux modèles est assurée par des algorithmes d'agrégation et de désagrégation des données entre voxels et mini-couches. Dans le cas du passage des mini-couches aux voxels, les données simulées par STICS sont moyennées par voxel.

1.2.5 Fonctionnement azoté

Hi-sAFe a été conçu pour simuler explicitement l'ensemble du cycle de l'azote, et son impact sur la croissance des plantes. La validité de l'ensemble de ces processus n'ayant pas encore été établie, nous utiliserons dans ce travail une version simplifiée du modèle :

- Les flux verticaux d'azote dans le sol, la fertilisation et les apports par la pluie sont simulés par STICS (cf manuel de STICS).
- La gestion de l'humus, des résidus de cultures (minéralisation, humification, ...) et du devenir des engrais azotés sont simulés par STICS.
- Les litières aérienne (feuilles) et souterraine (racines) des arbres ne sont pas modélisées. Pour l'instant, elles constituent des pertes d'azote pour le système.
- La demande en azote des cultures est calculée par STICS.
- La demande en azote des arbres est calculée de manière à (1) maintenir une concentration optimale en azote pour chaque compartiment (concentrations fixées par des paramètres), et (2) disposer de réserves d'azote. La dimension cible pour le pool de réserves d'azote est fixée à une proportion donnée (paramètre) de la quantité d'azote totale dans les compartiments.
- Un algorithme spécifique a été écrit pour simuler l'extraction d'azote par les plantes.

1.2.5.1 Algorithme d'absorption d'azote par les plantes : sAFe-Nitrogen

L'algorithme d'extraction d'azote est basé sur les formalismes développés par Peter de Willigen et Meine van Noordwijk (voir de Willigen & van Noordwijk (1987); de Willigen & Van Noordwijk (1994); de Willigen & van Noordwijk (1995); de Willigen et al. (2000)). Cet algorithme décrit la diffusion de l'azote du sol vers les racines, en faisant l'hypothèse que la concentration intra-racinaire est maintenue nulle par les plantes ("zero-sink uptake"). Les différentes étapes de calcul sont les suivantes :

1. Calcul de la concentration en azote minéral de la solution du sol dans chaque voxel ijk (g.cm^{-3}) :

$$\text{Nconc}_{ijk} = \frac{\text{Nstock}_{ijk}}{(\theta_{ijk} + a_{ijk})V_{ijk}} \quad (1.2.14)$$

où Nstock_{ijk} est la quantité d'azote minéral dans le voxel (g), V_{ijk} est le volume du voxel (cm^3), θ_{ijk} est la teneur en eau (m^3m^{-3}) et a_{ijk} est une constante d'adsorption de l'azote, dépendante des proportions de NO_3 et NH_4 dans l'azote minéral total :

$$a_{ijk} = \frac{(a_{\text{NO}_3} + \theta_{ijk})(a_{\text{NH}_4} + \theta_{ijk})}{a_{\text{NO}_3} + \theta + p_{\text{NO}_3}(a_{\text{NH}_4} - a_{\text{NO}_3})} - \theta \quad (1.2.15)$$

où p_{NO_3} est la proportion de NO_3 dans l'azote minéral, et a_{NO_3} et a_{NH_4} sont les constantes d'adsorption du NO_3 et du NH_4 (paramètres)

2. Calcul du coefficient de diffusion de l'azote dans chaque voxel ijk ($K_{N,ijk}$, $\text{cm}^2.\text{jour}^{-1}$) en fonction de la teneur en eau θ_{ijk} et du coefficient de diffusion de l'azote dans l'eau ($K_{N,eau}$) :

$$K_{N,ijk} = K_{N,eau}\theta_{ijk} \max(\theta_{ijk}, d_1\theta_{ijk} + d_0) \quad (1.2.16)$$

où d_1 et d_0 sont des paramètres.

3. Calcul de la quantité d'azote absorbable dans chaque voxel ijk par l'ensemble des plantes enracinées (plantes 1 à n) dans le voxel :

$$U_{ijk,tot} = \min(\text{Nstock}_{ijk}, U_{T,ijk,tot}) \quad (1.2.17)$$

où $U_{T,ijk,tot}$, la quantité d'azote transportable du sol vers les racines est fonction de la densité racinaire totale ($\bar{D}_{ijk} = \sum_{p=1}^n D_{ijk,p}$), dans la concentration en azote (Nconc_{ijk}) et du coefficient de diffusion de l'azote ($K_{N,ijk}$) :

$$U_{T,ijk,tot} = \pi \text{Nconc}_{ijk} V_{ijk} K_{N,ijk} \bar{D}_{ijk} / f(\bar{D}_{ijk}, \bar{r}_{ijk}) \quad (1.2.18)$$

où $f(\bar{D}_{ijk}, \bar{r}_{ijk})$ est le même facteur géométrique que dans l'algorithme de compétition pour l'eau (voir l'équation 1.2.12), avec \bar{r}_{ijk} le rayon moyen des racines dans le voxel (voir équation 1.2.13).

4. Calcul de la quantité d'azote absorbable par chaque plante p dans chaque voxel ijk , sans prendre en compte la compétition entre plantes. $U_{ijk,p,seul}$ est calculé comme $U_{ijk,tot}$, mais avec la densité racinaire et le rayon des racines de la plante p seulement.
5. Calcul de la compétitivité relative $c_{ijk,p}$ de chaque plante p dans chaque voxel ijk . On fait l'hypothèse que la demande totale en azote de la plante est distribuée uniformément entre ses racines fines, ce qui permet de calculer une demande en azote (ou force de puits) par unité de longueur racinaire : S_p . La compétitivité relative de la plante p est donnée par $c_{ijk,p} = S_p D_{ijk,p} / \sum_{l=1}^n D_l D_{ijk,l}$.

6. Calcul de l'extraction potentielle par chaque plante p dans chaque voxel ijk , avec prise en compte de la compétition entre plantes :

$$U_{ijk,p} = \max \left(U_{ijk,tot} - \sum_{l \neq p} U_{ijk,l,seul} , \min(U_{ijk,p,seul}, c_{ijk,p} U_{ijk,tot}) \right) \quad (1.2.19)$$

7. Calcul de l'extraction réelle par chaque plante p dans chaque voxel ijk . Si l'extraction potentielle totale (somme sur les voxels) par la plante p est inférieure à la demande, alors l'extraction réelle est égale à l'extraction potentielle dans chaque voxel. Sinon, l'extraction réelle est réduite d'un même facteur dans tous les voxels, afin de s'ajuster à la demande.

Chapitre 2

La Décomposition du rendement relatif : une méthode d'analyse des déterminismes du rendement simulé

Préambule

Hi-sAFe est un modèle d'intégration des connaissances. Les mécanismes qui déterminent les interactions entre arbres et cultures et leurs conséquences sur le rendement y sont définis au pas de temps journalier, à une échelle de l'ordre du mètre carré. Les sorties finales qui nous intéressent ici, à savoir les rendements des arbres et des cultures intégrés sur l'ensemble de la rotation agroforestière ainsi que leurs valeurs relatives par rapport aux rendements simulés dans les témoins agricole et forestier, résultent de l'intégration spatiale (à la parcelle) et temporelle (sur plusieurs dizaines d'années) de ces mécanismes.

Dans ce travail, visant à comprendre le déterminisme des différences de rendement entre systèmes agroforestiers et témoins agricole et forestier, nous ne pouvons nous contenter d'une utilisation de type "boîte noire" du modèle, c'est à dire d'une simple étude de la réponse des sorties finales à des variations des entrées. A l'opposé, il est possible d'analyser en détail l'évolution au cours du temps de l'ensemble des variables d'état du système. Une telle analyse cependant, en plus d'être extrêmement lourde à réaliser, ne garantirait aucunement l'explicitation des liens entre processus au pas de temps journalier et valeurs finales. En effet, comment déterminer quantitativement un lien entre une différence de dynamiques de stress hydriques journaliers et une différence de rendements finaux par exemple ?

Dans ce chapitre, nous proposons un niveau d'analyse intermédiaire. Nous montrons qu'il est possible, à partir d'une analyse détaillée des formalismes impliqués dans le déterminisme du rendement, et sous certaines hypothèses concernant les formalismes du modèle - ces hypothèses étant vérifiées par Hi-sAFe -, de formaliser le lien entre les valeurs

des variables d'état au pas de temps journalier, et le rendement final. Le rendement relatif d'une espèce, ratio des rendements simulés dans deux situations différentes, peut alors être décomposé comme le produit de différents termes, qui peuvent être interprétés comme les contributions des différents processus impliqués dans le déterminisme du rendement.

Cette méthodologie étant adaptée à la plupart des modèles de cultures, nous avons choisi de la présenter ici dans un contexte plus large que celui de l'analyse de Hi-sAFé, en l'appliquant à deux modèles de complexités différentes : STICS (Brisson et al., 1998) et YIELD-SAFE (van der Werf et al., 2007).

En fin de chapitre, un paragraphe a été ajouté pour expliciter l'application de la méthode au rendement des arbres simulés par Hi-sAFé.

Article en préparation pour une re-soumission à *Environmental Modelling and Software*.

Relative Yield Decomposition: a generic method for understanding the behaviour of complex crop models

Grégoire TALBOT, Sébastien ROUX, Christian DUPRAZ, Anil GRAVES, Hélène MARROU, Jacques WERY

Abstract

Dynamic crop simulation models are widely used to investigate, through virtual experiments, the response of crop yield to changes in climate, management or crop genetic traits. In their search for widespread applicability, crop models include a large number of processes, to the detriment of their mathematical transparency. Crop yield responses to variation in model inputs are difficult to explain in terms of processes, because they result from the integration of many different processes interacting at the model time-step. We suggest that given clear understanding of model formulation, it is possible to open this “black-box” to understand the interplay of the different processes affecting the simulated crop yield. In this paper, we first present the principle of the proposed method that we call the relative yield decomposition, and then show how it applied using the results from two different models: Yield-SAFE and STICS. We show how the method can be used to successful identify and quantify the importance of the main processes responsible for crop yield variations in the two models. We demonstrate that such results are helpful in the analysis of virtual experiments, and discuss how they can also be used together with sensitivity analysis to understand which parameters and processes most influence model behaviour.

Notations

- Upper case letters refer to absolute variables, while lower case letters refer to relative variables. Relative variables are defined as the ratio of the absolute values for the scenario under analysis compared to the reference scenario: $x = X/X^*$ where superscript $*$ refers to the reference scenario.
- Letters with superscript t refer to values at the model time step t while letters without superscript refer either to values independent from time or values averaged or cumulated with time.
- $E_{i|1:(i-1)}$: effect of factor i knowing the effects of all factors from the first to the $(i-1)^{th}$.
- $w_{i|1:(i-1)}^t$: weights of the effects $E_{i|1:(i-1)}^t$ at the model time step in the calculation of the average effect $E_{i|1:(i-1)}$ at the analysis time step.
- D : density for agroforestry systems: proportion of cropped area for crops, tree density for trees.
- B : biomass
- C : incident light
- A : plant light capture efficiency
- I : light competition index
- L : light intercepted
- R : light use efficiency $R = B/L$
- W : water stress effect on light use efficiency
- N : nitrogen stress effect on light use efficiency
- P : effect of crop phenology on light use efficiency
- T : effect of extreme temperatures on light use efficiency
- S : effect of light saturation on light use efficiency
- Y : yield. Refers to grain biomass for crops, timber biomass for trees.
- H : harvest index
- M : effect of maintenance cost on harvest index for trees
- G : effect of the length of grain filling stage on harvest index
- U : effect of extreme temperatures on harvest index
- F : Effect of vigour at flowering stage on harvest index

2.1 Introduction

Dynamic crop simulation models are widely used to investigate the responses of cropping systems in virtual experiments, especially when analysing the gaps between actual and potential yields (Lobell et al., 2009). Crop models have been used to explore management options (e.g. DeJonge et al., 2007; Soler et al., 2007; Shili-Touzi et al., 2010), to assess the potential of cultivars with different phenotypic or genetic traits (e.g. Asseng et al., 2002; Debaeke, 2004; Chenu et al., 2009; Semenov et al., 2009), or to predict the

behavior of crop systems under climate change (e.g. Asseng et al., 2004; Meza & Silva, 2009; Lhomme et al., 2009; Liu et al., 2010).

Dynamic crop simulation models generally work on a time-step that is adapted to the mechanisms involved in crop growth (sub-daily to daily time-step), which we refer to here as the “model time-step”. The causal links between the forcing variables (climate, soils, management actions), and the state variables of the system (including crop growth) are defined on this time-step by the equations of the model. The evaluation of cropping systems is achieved through use of outputs calculated on a longer time-step (one year to several decades), which we refer to as the “analysis time-step”. On this time-step, a simple output, such as crop yield (Y), is a very complex function of the inputs and parameters of the model. Understanding the behaviour of this function is key both for model users and developers.

The most used approach to address this question consists in analysing the response of Y to variations in parameters and forcing variables. This is achieved through sensitivity analysis, meta-modelling or virtual experiments. This approach provides a statistical information about the relationship between the simulated crop yield and the model’s inputs, but hardly allows a process-based interpretation of the results. To provide a more comprehensive understanding of the behaviour of the model, some authors have analysed the sensitivity of Y together with others outputs (e.g. Ruget et al., 2002) or exploring the sensitivity to some a priori chosen parameters (Semenov et al., 2009). A second approach consists in comparing different model formulations so that the role of a given process in determining crop yield can then be identified by comparing the model output with and without the mechanism. Cox et al. (2006) and Crout et al. (2009) proposed such a methodology to simplify mechanistic models. Affholder et al. (2003) ran simulations with and without water and/or nitrogen stress with the crop model STICS (Brisson et al., 2009) to conduct a yield gap analysis.

We propose a new approach to understand the response of Y , by comparing two simulation runs of the model with relative yield: $y = Y_1/Y_2$. We suggest that it is then possible, given clear understanding of model formulation, to decompose y into several terms with precise meaning in relation to the model processes involved. This allows us to identify and quantify the mechanisms acting at the model time-step. Computation of these terms is possible if the values of the state variables of the model are available at the model time-step. This is usually the case with crop models.

In this paper, we describe this approach, that we call the “Relative Yield Decomposition” (RYD) method, and we illustrate how it can be used to provide new insight on the results of: (1) a long-term multi-annual simulation of an agroforestry system developed with the Yield-SAFE model (van der Werf et al., 2007), and; (2) short-term annual simulations developed with the STICS (Brisson et al., 2009) crop model. The first example deals with a mechanistically simple model for which the decomposition of f is relatively straight-forward. The second example illustrates how, with a proper analysis of the model formulation, the RYD applies to a more complex model. The general applicability of this approach is then discussed.

2.2 Material and methods

2.2.1 Principle of the relative yield decomposition (RYD)

2.2.1.1 Decomposition at the analysis time-step

We propose that crop simulation models can be assessed by defining a function to represent the simulated crop yield (Y) as a product:

$$Y = \prod_{i=1}^n E_i \text{ with } \forall i \in \{1, \dots, n\}, E_i \in \mathbb{R}^+ \quad (2.2.1)$$

Each term E_i relates to a mechanism or a group of mechanisms i included in the determinism of crop yield according to the formulation of the model. A simple example would be in a model where crop yield is written as $Y = LRH$ where L is the amount of light intercepted, R is the light use efficiency (LUE) and H is the harvest index. We choose a multiplicative form to express Y for two reasons. First, most crop models are written in a multiplicative form. Widely used concepts such as light use efficiency, harvest index, light capture efficiency, or environmental stresses are defined in a multiplicative framework (Brisson et al., 2006). Second, this function allows for easy decomposition of the relative yield, defined as $y = Y/Y^*$ where Y^* is the simulated yield of a reference scenario: $y = \prod_{i=1}^n e_i$, where $e_i = E_i/E_i^*$.

The number (n) of effects included in the decomposition is unspecified, but should comply with the formulation of the model. In a model where the LUE, used as a proxy of net photosynthesis, depends explicitly on several factors (water and nitrogen status, temperature, CO₂ concentration), one can either choose to keep a single effect “LUE” or can decompose it to several effects relating to each factor that affects the LUE.

Most crop models run at a time step that is shorter (usually daily) than the time step of analysis (usually yearly), and writing Y as in equation 2.2.1 usually requires an analysis of the model’s formulation at the model time-step. However, in some cases, an initial part of the decomposition of Y can be achieved at the analysis time-step. For example, in crop models like STICS (Brisson et al., 2009), AQUACROP (Steduto et al., 2009), CROPSYST (Stöckle et al., 2003) or EPIC (Williams et al., 1989) that use a harvest index, crop yield is calculated at the end of the simulation, as the product of crop biomass (B) multiplied by the harvest index (H). For these models, we can first decompose Y into the product BH , and then try to further decompose B and H to obtain terms more closely related to model’s processes.

2.2.1.2 Using understanding of model formulation at the model time-step

In this section, we propose a method for identifying how different processes occurring at the model time-step affect crop yield or a component of crop yield (e.g. biomass) at

the analysis time-step. This method applies to variable V in respect of the two following conditions:

Firstly, the value of V at the analysis time-step results from the sum of positive increments at the model time-step $(\Delta V)^t$. This condition is not very restrictive for crop models, it applies for example to the total crop biomass in most crop models.

Secondly, for all time-steps t of the model, the increment $(\Delta V)^t$ can be reformulated in the form:

$$(\Delta V)^t = \prod_{i=1}^q E_i^t \quad (2.2.2)$$

where q is the number of processes involved in determining $(\Delta V)^t$, and E_i^t are positive terms that can be computed from the model's parameters and from state and input variables at time-step t . It could be shown that a more general formulation, replacing the product of E_i^t by a positive and increasing function of all E_i^t , would be a sufficient assumption for the demonstration below. However, we kept the multiplicative formulation to simplify the notations, and because it is general enough for most crop models. A simple example of such a formulation would be a model where the daily biomass increment is given by $(\Delta B)^t = L^t R^t$ with L^t the amount of light intercepted and R^t the light use efficiency.

Under these conditions, the variable V at the analysis time-step can be written as:

$$V = \prod_{i=1}^q E_{i|1:(i-1)} \quad (2.2.3)$$

where $E_{i|1:(i-1)}$ is the term corresponding to the process i given the values of the terms from 1 to $(i-1)$, it is computed as:

$$E_{i|1:(i-1)} = \sum_{t=t_0}^{t_f} w_{i|1:(i-1)}^t E_i^t \quad (2.2.4)$$

For $i = 1$, w_i^t equals unity for all t , and E_1 is the sum of E_1^t . For $i \geq 2$, $E_{i|1:(i-1)}$ is a weighted mean of E_i^t , where the weight of the time-step t , $w_{i|1:(i-1)}^t$, is given by:

$$w_{i|1:(i-1)}^t = \frac{\prod_{j=1}^{i-1} E_j^t}{\sum_{\tau=t_0}^{t_f} \prod_{j=1}^{i-1} E_j^\tau} \quad (2.2.5)$$

Note that the multiplicative decomposition of the variable V proposed in Equation B.2.6 introduces a hierarchy of processes: the term relating to the process i explicitly depends on the dynamics of the processes from the first to the $(i-1)^{\text{th}}$ through the definition of $w_{i|1:(i-1)}^t$. As a consequence, several decompositions may be defined for a given model according to different choices for the hierarchy of the processes. As we will show, this choice determines the meaning of the terms of the decomposition. Returning to our example, if we consider that light interception occurs before light conversion into biomass, the final biomass can be written $B = E_L E_{R|L}$. The first term,

E_L , is computed as $E_L = \sum_{t=t_0}^{t_f} L^t$ and thus equals the amount of light intercepted, defined at the analysis time-step (L). The second term, relating to the LUE, is then computed as $E_{R|L} = \sum_{t=t_0}^{t_f} w_{R|L}^t R^t$ where $w_{R|L}^t = L^t / \sum_{\tau=t_0}^{t_f} L^\tau = L^t / L$. It is the average of the daily LUE weighted by the daily light intercepted (L^t). Note that the equation $B = LE_{R|L}$ implies that $E_{R|L} = B/L = R$ where R is the light use efficiency defined at the analysis time-step. This hierarchy of processes allows a decomposition of the biomass into meaningful terms at the analysis time-step, L and R . Switching the processes would lead to a decomposition that is more difficult to interpret, because it is an average of the light intercepted, weighted by the daily LUE.

2.2.1.3 Relative yield decomposition

The relative yield is defined as $y = Y/Y^*$ where Y^* refers to a reference scenario. From equation 2.2.1, we deduce a multiplicative decomposition of y :

$$y = \prod_{i=1}^p e_{i|1:(i-1)} \quad (2.2.6)$$

where $e_{i|1:(i-1)} = E_{i|1:(i-1)} / E_{1|1:(i-1)}^*$. In practice, we use the logarithmic form of this equation: $\log(y) = \sum_{i=1}^n \log(e_{i|1:(i-1)})$. This allows us to manipulate additive terms and ease interpretation. Thus, the definition of a neutral mechanism (without effect on relative yield) corresponds to the value $\log(e_i) = 0$, and a mechanism has a positive (negative) effect on relative yield if $\log(e_{i|1:(i-1)})$ is positive (negative).

2.2.2 Case study 1: analysing the simulation of an agroforestry system with Yield-SAFE

2.2.2.1 Case study presentation

Yield-SAFE is a daily time-step process-based dynamic model for predicting resource capture, growth, and production in agroforestry (AF) systems (van der Werf et al., 2007). We ran a 15-year simulation for a pure crop of durum wheat (PC; reference scenario for crops), pure poplar forestry (PF; reference scenario for trees), and a mixed poplar/durum-wheat agroforestry system. The model inputs included soil and weather data from an experimental agroforestry plot located near Vézénobres in France (see Mulia & Dupraz, 2006 and Graves et al., 2010 for details). Tree density was 136 tree.ha⁻¹ for the agroforestry system (4.5 m x 16 m spacing with a 2 m tree strip along the tree row) and 204 tree.ha⁻¹ for the forestry system (7 m x 7 m spacing). The uncropped area in the agroforestry system due to the tree strip was 12.5 % of total area and it was assumed that the intercrop area was not cropped during the last three years of the tree rotation as the trees were too large to allow profitable crop growth.

The overall productivity of agroforestry systems is usually measured by the land equivalent ratio (LER, see Mead & Willey, 1980), and is defined as the sum of the relative

yields for crops and trees in comparison with the yields of the same crops and trees over the same period in pure systems. It is worth distinguishing between the annual LER, calculated from annual yields (timber biomass increment for trees), and the integrated LER, calculated from cumulative yields over the whole simulation (Dupraz, 1999). The annual and integrated LER refer to two different analysis time-steps: the year and several years respectively.

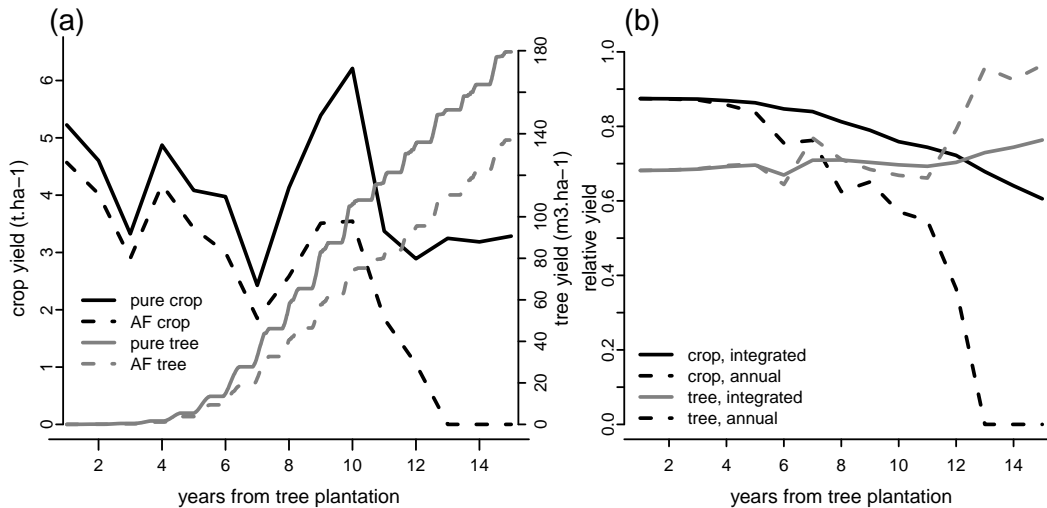


Figure 2.2.1: Simulated yields (a) and relative yields (b) in a poplar agroforestry plot according to the Yield-SAFE model. Crop yield refers to annual grain production, while tree yield (m^3 of timber wood per hectare) corresponds to a cumulated yield over years.

The integrated LER over 15 years was 1.37, resulting from relative yields of 0.61 for the crop component and 0.76 for the tree component. The temporal dynamics of yields and relative yields are shown in Figure 2.2.1. The integrated relative yield of the crop of 0.61 results from relative annual yields that decrease from 0.87 in year 1 to 0.36 in year 12 in comparison with the pure crop yields over the same period. The integrated relative yield of the trees starts from 0.68 in year 1, and is the relative “timber” biomass of the agroforestry system at planting. The relative yield then slowly increases from 0.68 to 0.70 over the first 12 years, and then quickly increases from 0.70 to 0.76 during the final three years of the rotation when the crop is no longer present. A better understanding of these dynamics requires linking the relative yields to the processes of the model.

2.2.2.2 Relative crop yield decomposition

The initial formulation of Yield-SAFE is presented in van der Werf et al. (2007). Here, we present a reformulation of the main processes involved in crop and tree yield, and show how the RYD method applies to this model.

In agroforestry systems, the tree line is often un-cropped, so that the first factor affecting crop yield is the proportion cropped area (D). When this effect is removed, crop yield decomposition can be calculated on a per cropped area basis. Yield-SAFE assumes a constant harvest index H (model parameter), applied to final crop biomass to compute crop yield. The final crop biomass is computed as the sum of daily biomass increments for all the model time-steps over the crop cycle: $B = \sum(\Delta B)^t$. The daily biomass increment is computed as $(\Delta B)^t = L^t R^t$ where L^t is the light intercepted and R^t is the light use efficiency. The intercepted light depends on the daily light input C^t , on the crop ability to intercept light A^t , which is a function of crop leaf area index (LAI), and on the fraction of light transmitted under trees I^t : $L^t = C^t A^t I^t$. The light use efficiency is given by a parameter R_{max} , affected by a water stress index W^t : $R^t = R_{max} W^t$. The daily biomass is finally written as $(\Delta B)^t = C^t A^t I^t R_{max} W^t$. Then, as described in section 2.2.1.2, the final crop biomass can be decomposed as:

$$B = R_{max} E_C E_{A|C} E_{I|(C,A)} E_{W|(C,A,I)} = R_{max} C A I W \quad (2.2.7)$$

The order for the processes was chosen to provide meaningful terms for the decomposition. Indeed, from Equations 2.2.4 and 2.2.5, we deduce that :

- $E_C = C$ is the total amount of incident light defined at the analysis time-step.
- $E_{A|C} = A$ is the mean of daily crop ability to intercept light A^t weighted by the daily incident light C^t : $A = \sum A^t C^t / \sum C^t$. A is the proportion of C that would have been intercepted by the crop in the absence of trees on the plot.
- $E_{I|(C,A)} = I$ is the mean of the daily light fraction available under trees I^t weighted by the potentially intercepted light without competition with trees $C^t A^t$. I can be interpreted as an integrated light competition index at the analysis time-step.
- $E_{W|(C,A,I)} = W$ is the mean of the daily water stress W^t weighted by the daily intercepted light $L^t = C^t A^t I^t$. Note that $R_{max} W = L/B = R$ is the light use efficiency defined at the analysis time-step.

On a total area basis, crop yield can finally be written as:

$$Y = D H R_{max} C A I W \quad (2.2.8)$$

Yield-SAFE aims to compare the crop yield of an agroforestry system (AF) to reference pure crop (PC) and pure forestry (PF) systems. In this context, both scenarios have the same weather input file, and $C = C^*$. Moreover, the terms H and R_{max} are given by the model's parameters and are identical for AF and PC. The relative crop yield y can thus be written as:

$$y = Y/Y^* = D A I W / (D^* A^* I^* W^*) = daiw \quad (2.2.9)$$

2.2.2.3 Tree yield decomposition

Tree yields in Yield-SAFE are fairly similar to crop yields in their formulation, and we look only at the differences. The factor D for trees represents tree density (number of

trees per area), and yield is further decomposed on an individual tree basis. The daily light intercepted by an individual tree is computed as $L^t = C^t (1 - \exp(-kf^t D)) / D$ where k is the extinction coefficient of tree leaf canopy (parameter) and f^t is the tree leaf area (m^2). Note that the product $f^t D$ is the tree stand leaf area index (LAI). The light interception in Yield-SAFE is not spatially explicit. As a consequence, when tree density tends toward 0, the light competition between tree leaves among the tree stand becomes null, and L^t tends toward $C^t k f^t$. Hence, we write as for crops, $L^t = C^t A^t I^t$ where $A^t = k f^t$ is the tree's ability to intercept light in the absence of competition between leaves, and $I^t = (1 - \exp(-kf^t D)) / (kf^t D)$ is a light competition index for leaves within the tree stand. The "gross" biomass production B can be decomposed as for crops (see Equation 2.2.7).

However, Yield-SAFE simulates a "net" biomass production N , to account for biomass losses due to maintenance or attrition. The "net" biomass increment at step t is computed as $(\Delta N)^t = (\Delta B)^t - aN^t$. This equation does not fulfil the conditions for a multiplicative decomposition as shown in Section 2.2.1.2. We thus work with the "gross" biomass production B , and consider that the cost of maintenance acts as a component of the harvest index. The tree harvest index relating to the net biomass is given by H_{max} . We however consider an harvest index relating to the "gross" biomass production: $H = H_{max} M$, where $M = 1 - \sum aN^t / \sum (\Delta B)^t$ is the proportion of accumulated biomass used for maintenance.

We can finally write the tree yield on an area basis as:

$$Y = DH_{max}MR_{max}CAIW \quad (2.2.10)$$

As for crops, the terms H_{max} , R_{max} and C are identical for the AF and the pure forestry (PF) systems. The relative tree yield can thus be decomposed as:

$$y = dmaiw \quad (2.2.11)$$

2.2.3 Case study 2: analysing a virtual experiment with the crop model STICS

2.2.3.1 Case study presentation

Dupraz et al. (2011) proposed the concept of agrivoltaic systems consisting in growing crops under solar panels. A first appraisal of such systems can be provided by exploring the behaviour of a crop model with reduced light availability. The crop model STICS was developed by INRA (France) and is a dynamic soil-crop simulation model which runs on a daily basis (Brisson et al., 2009). The effects of solar panels were modelled in STICS by: (1) reducing the solar radiation available for crops by a given proportion; (2) reducing by the same proportion the far infrared (FIR) exchange with the atmosphere (assuming that FIR exchanges between crops and panels are balanced), and; (3) calculating a modified potential evapotranspiration to account for these modifications.

We ran virtual experiments with STICS to simulate a durum wheat crop under three different scenarios. These were: (1) no panels (reference scenario, 0 % light reduction); (2) panels intercepting 25 % of the incident light, and; (3) panels intercepting 50 % of the incident light. Each scenario was tested over 15 years (from 1995 to 2009) using weather and soil data from Restinclières, France (see Mulia & Dupraz, 2006).

The simulated absolute and relative yields are shown in Figure 2.2.2. The absolute yields ranged from 3.1 to 10.3 t.ha⁻¹. The relative yields y ranged from 0.76 to 1.07 under P1, and from 0.53 to 0.97 under P2. In all cases, the simulated relative yield was higher than the relative light availability, indicating that some crop growth processes compensated for the reduced light availability and its impact on crop yields. A better understanding of these results requires identifying the processes involved in the crop yield response to shading.

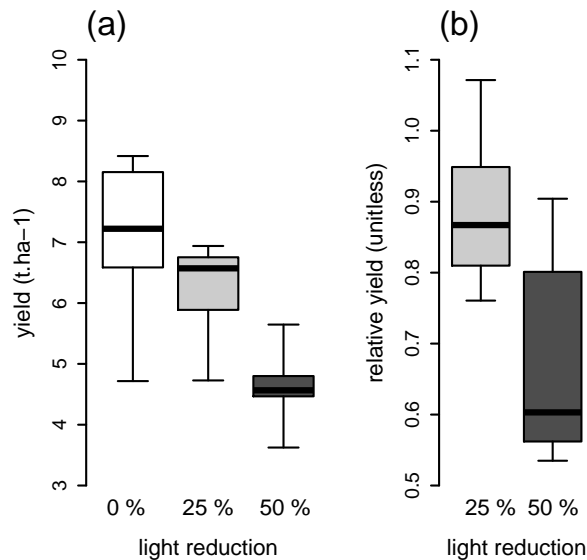


Figure 2.2.2: Simulated yields (a) and relative yields (b) with the crop model STICS. Within box variability comes from climate repetitions. Lower and upper boundaries for each box are the 25th and 75th percentiles. The line inside each box indicates the median. Whiskers mark the range of the values.

2.2.3.2 Crop biomass decomposition at the model time step

The model STICS is fully described in (Brisson et al., 2009). Here, we focus on the equations relevant to understanding the dynamics of biomass and yield elaboration and we show how the RYD can be applied.

The daily biomass increment can be written $(\Delta B)^t = R^t L^t$ where L^t is the amount of light intercepted and R^t is the LUE. As is the case for Yield-SAFE, $L^t = C^t A^t I^t$ where

C^t is the incident light above panels, A^t is a function of crop LAI and I^t accounts for the reduction of available light due to the photovoltaic panels. The light use efficiency R^t can be written as:

$$R^t = (\alpha^t - \beta L^t) T^t N^t W^t \quad (2.2.12)$$

where W^t is the stomatal water stress, N^t the nitrogen stress, T^t the thermal stress, α^t the maximum LUE, which depends on the phenological stage of the crop (set by several parameters), and β the slope of decreasing light use efficiency with increasing light interception. Defining the maximum LUE as $R_{max} = \max(\alpha^t)$, $P^t = \alpha^t / R_{max}$ and $S^t = 1 - \beta L^t / (P^t R_{max})$, Equation 2.2.12 can be written:

$$R^t = R_{max} P^t N^t W^t S^t T^t \quad (2.2.13)$$

The daily biomass increment is thus:

$$(\Delta B)^t = C^t A^t I^t R_{max} P^t N^t T^t S^t W^t \quad (2.2.14)$$

This formulation fulfils the conditions defined in Section 2.2.1.2, and the final biomass can thus be decomposed as in Equation B.2.6:

$$B = C A I R_{max} P N W S T \quad (2.2.15)$$

The order of action for the first three terms is the same as for the Yield-SAFE analysis, and for the same reasons. It is more difficult to rank the five processes reducing the radiation use efficiency. The computation of the averaged effects at the analysis time step requires ranking the processes. We ranked the processes as closely as possible to the way the model computes their behaviour. Since crop phenology is dependent on thermal time accumulation from the date of sowing, the term P takes precedence. Next, nitrogen (N) and water (W) stresses are imposed by soil nitrogen and water dynamics. Next in order is the light saturation of photosynthesis (S) which depends primarily on the daily light input, but also on the crop leaf area index (LAI). Finally, there is the effect of temperature (T), which depends primarily on weather data, although this can potentially be modified by the energy balance of the crop. We thus consider the order as written in Equation 2.2.15.

2.2.3.3 Crop yield decomposition at the analysis time step

The maximum harvest index H_{max} is a fixed variety parameter. H is reduced by a factor G if the length of the grain filling period τ (days) is insufficient. $G = \max(\mu\tau / H_{max}, 1)$, where μ is a parameter. Grain filling is sensitive to heat stress, because grain filling does not occur on day t if maximum crop temperature exceeds a threshold fixed by a parameter. In such cases, H is reduced by $\mu(B_t\tau_t - B_{t-1}\tau_{t-1})$ where B_t and τ_t are crop biomass, and time (days) since the beginning of grain filling. We define the effect of heat stress on grain filling (U) as the ratio of the computation of H , including the effect

of temperature over the potential H computed from τ . The harvest index is limited by another constraint, the maximum individual grain weight, which is set by parameter ω_{gm} . If $HB/\nu > \omega_{gm}$, where ν is the grain number, then H is recomputed as $H = \omega_{gm}\nu$. The grain number ν depends on crop vigour at flowering. This flowering effect is defined as the ratio F between the new and the old value of H . Thus, the harvest index can be finally decomposed as:

$$H = H_{max}GUF \quad (2.2.16)$$

2.2.3.4 Final yield decomposition

By combining Equations 2.2.15 and 2.2.16, crop yield decomposition can be written as:

$$Y = [CAI][R_{max}PNWST][H_{max}GUF] \quad (2.2.17)$$

Where C , A and I is the light intercepted by the crop, R_{max} , P , N , W , S and T describe the light use efficiency, and H_{max} , G , U and F describe the harvest index. In our case study comparing shaded crops and a reference crop control, we compared crops with the same parameters so that $R_{max} = R_{max}^*$ and $H_{max} = H_{max}^*$ and used the same weather file so that $C = C^*$. As a consequence, the crop relative yield can be written:

$$y = airh = ai[pnwst][guf] \quad (2.2.18)$$

This formulation, which does not decompose the relative LUE (r) and the relative harvest index (h) is referred to as the first order decomposition of the relative crop yield. The second order decomposition further explores what processes are responsible for r and h .

2.3 Results

2.3.1 Understanding the simulation results of an agroforestry system

2.3.1.1 Crop annual relative yield decomposition

In the simulated AF system, the crop component was cultivated only until year 12, because of yield reductions caused by the tree component. Figure 2.3.1 shows the decomposition of the annual relative yield during the first twelve years using Equation 2.2.9. Given use of a logarithmic scale, the relative yield (y) is obtained by summing the curves corresponding to the different terms of the RYD. In the initial years, yield losses were exclusively due to the density effect (d), that is, to the un-cropped tree strip area of the system. From the fourth year onwards, light competition from the trees (i) had an increasingly severe impact on reducing crop growth, becoming greater than the effect d from year 7 onwards. In the late part of the rotation, the negative w effect indicates that the AF crop was reduced more than the PC reference by water stress, leading to

lower light use efficiency. In years 11 and 12, there was a negative a effect, resulting from decreased LAI of the AF crop in comparison with the PC reference. However, overall, it is clear that the relative crop yield is mostly explained by the density (d) and light competition (i) effects.

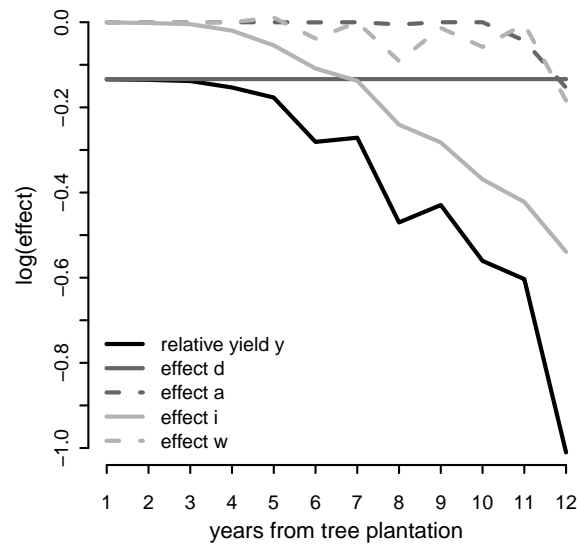


Figure 2.3.1: Crop annual relative yield decomposition in several effects: d : density effect, a : effect of ability to intercept light, i : light competition (from trees) effect, w : water stress effect on light use efficiency

2.3.1.2 Trees relative yield decomposition

Figure 2.3.2 shows the annual (a) and integrated (b) RYD of the tree component as presented in Equation 2.2.11. The main component affecting relative tree yield was relative tree density (d) since there were fewer trees in the AF system. The final relative yield was greater than d indicating greater per tree yield in AF because of compensation effects. Most notably, there was a positive effect on yields due to the reduced light competition (i) between the trees in AF, which started in the fourth year and increased in significance over the whole tree rotation. The relative ability of AF trees to intercept light (a) was slightly positive because individual AF trees developed greater leaf area than individual PF trees. The effect of a was to provide a positive feedback, amplifying the difference between AF and PF trees. These two effects explain the steady increase in the integrated relative yield. By contrast, the water stress effect w was negative during the first 12 years, indicating that AF trees suffered more from water stress than PF trees, except in year 7. Thus, the negative w effect reduced the relative yield increase of the AF trees. However, because of the elimination of crops from year 12 in the AF

system, w became positive from that point onwards, resulting in a large increase in the relative yield of the AF trees. The m effect was close to 0 during the 12 first years of the rotation, indicating that AF and PF trees allocate almost the same proportion of biomass to maintenance, and became positive during the three last years of the rotation. A process-based explanation for the dynamics of m would require further decomposition, and is not presented here.

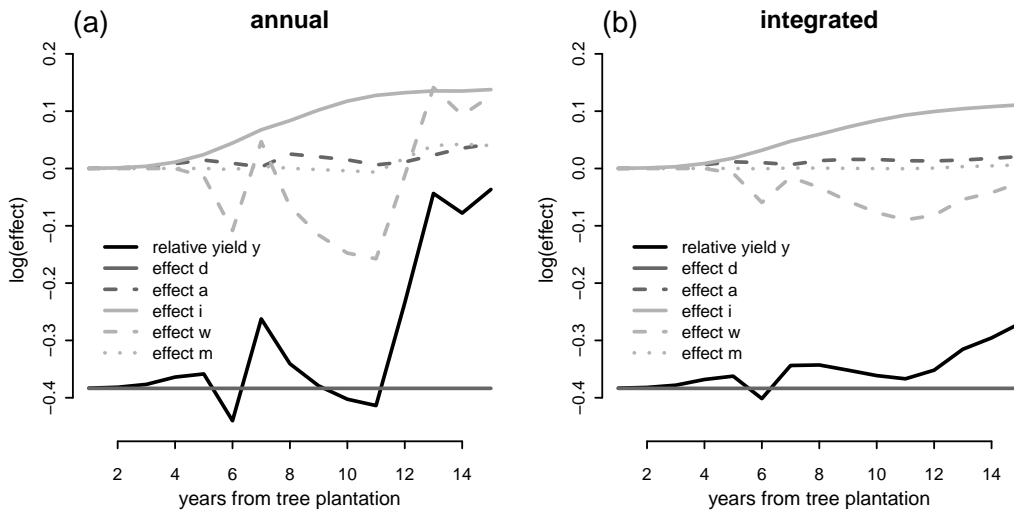


Figure 2.3.2: The annual (a) and integrated (b) relative yield of trees can be decomposed in several effects: d : density effect, a : effect of ability to intercept light, i : light competition (among trees) effect, w : water stress effect on light use efficiency, m : effect of the cost of biomass maintenance

2.3.2 Identifying compensations in the simulation of shaded crops with STICS

2.3.2.1 First order yield decomposition

The relative crop yield decomposition shows that crop yield was most affected by light competition (effect i) from panels, which was imposed by the design of the system (Fig. 2.3.3b). This negative effect was counter-balanced by two positive effects, ability to light interception (a) and light use efficiency (r) and amplified by a negative effect on harvest index (h). Both h and r effects are further decomposed in the following sections. The positive effect a indicates that shaded crops are potentially able to intercept a larger proportion of the total incident light over the year. Interestingly, this difference did not result from higher maximum values for LAI, but from delayed leaf senescence in the late season due to reduced water and nitrogen stresses (results not shown).

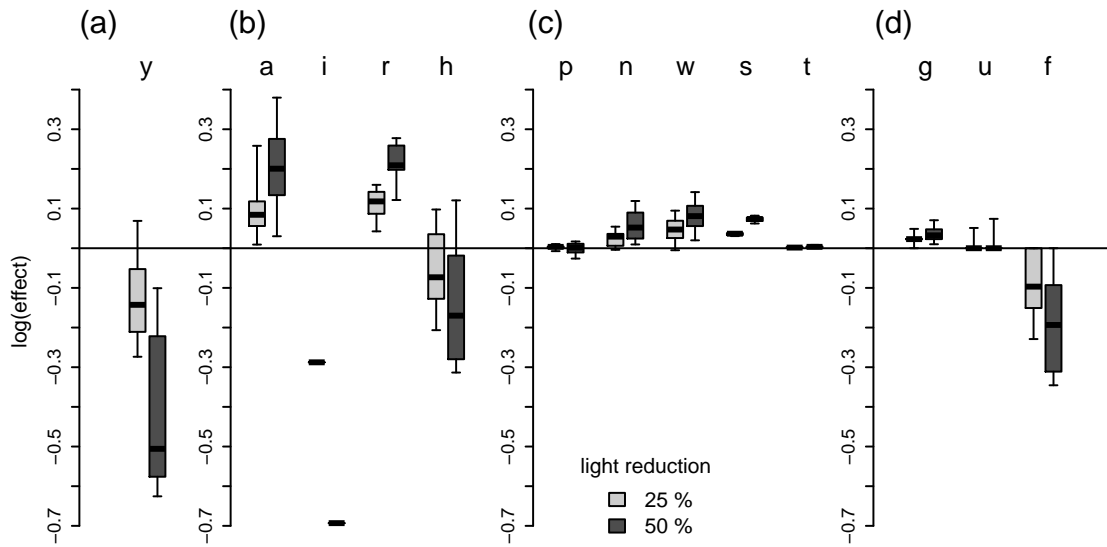


Figure 2.3.3: Relative yield decomposition for the results from STICS. (a): relative yield y . (b): first order decomposition of y into effects a (relative ability to intercept light), i (relative light competition index, dictated by solar panels), r (relative light use efficiency) and h (relative harvest index). (c): second order decomposition of the relative light use efficiency (r) into p (phenological effect on light use efficiency), n (nitrogen stress effect), w (water stress effect), s (light saturation effect) and t (extreme temperatures effect). (d): second order decomposition of the relative harvest index (h) into g (length of grain filling stage effect), u (extreme temperatures effect) and f (effect of vigour at flowering stage). Within box variability comes from climate repetitions. Lower and upper boundaries for each box are the 25th and 75th percentiles. The line inside each box indicates the median. Whiskers mark the range of the values.

2.3.2.2 Second order decomposition of the relative light use efficiency

The relative light use efficiency can be further decomposed into five terms (Fig. 2.3.3c). It is mostly explained by three effects: n , w and s . The positive values for n indicated that the shaded crop suffers less from nitrogen stress than the control crop. The positive effect w indicated reduced water stress for the shaded crop. The positive effect s indicated lower light saturation for photosynthesis. Contrary to effects n and w which were highly dependent on climate variability, s had a positive effect on relative light use efficiency in all the simulations.

2.3.2.3 Second order decomposition of the relative harvest index

The high variability of the relative harvest index (Fig. 2.3.3b) is explained by the negative and highly variable flowering effect f (Fig. 2.3.3d). The shade under solar panels had a negative effect on crop vigour at flowering, with consequences for grain number and thus harvest index. This effect was partly counter-balanced by an increase

in length of the grain filling period (positive g), and, in some simulations, a reduced heat stress effect (positive u).

2.4 Discussion

The RYD method was successful in identifying the key processes responsible for modelled system behaviour. It can be argued that with crop models, the user can investigate all the state variables at the model time-step and identify the processes responsible for the differences between different model runs. However, this is rarely feasible and the RYD approach circumvents the need for very difficult and inconclusive comparisons of the model simulations at all the different time-steps. Feed-forward effects in particular can be difficult to identify in this way, but are clearly shown by the RYD method. When comparing two simulations from a dynamic crop model, differences in a given mechanism at a given time-step impact the other mechanisms during the following time-steps, and the response of an output to any change in input results from the interaction between all processes and their cumulative effect over time. The virtual experiment conducted with STICS showed that the crop yield response to a single signal, the reduction of light availability induced by solar panels, varies greatly from year to year depending on the climate. The RYD showed that the crop yield response to light availability resulted from several processes occurring together, and involved modification to the dynamics of leaf area, light use efficiency and harvest index. RYD allowed quantification of the effect of these processes on crop yield. RYD can identify unexpected effects, helping to expand understanding of how crop growth mechanisms impact at the model time-step. An example of this was in the case of greater than anticipated ability for light interception (effect a) by shaded crops, caused by changing leaf area dynamics, where the impact of delayed leaf senescence was found to be a key compensatory process.

If a model is under development or evaluation, such results can highlight processes requiring more attention and eventually help to determine whether there is need for finer or coarser modelling. For example, the RYD method allowed us to identify the importance of the light saturation curve of photosynthesis for the yield of crops simulated with STICS. Contrary to other crop models such as SUCROS (see Van Ittersum et al., 2003) or CROPGRO (Boote et al., 1998) that model light saturation at the leaf area scale, STICS uses a coarser approach and models light saturation at the plot scale, using a general parameter that is not species specific. Our conclusion was that the model should be improved because this is crucial for the simulation of shaded crops. Similarly, we identified water stress to be a major process for the relative yield of the tree component in the agroforestry system simulated with Yield-SAFE. This resulted from the simplified description of the soil water dynamics in the Yield-SAFE model, where a single soil reservoir is used. As a consequence, small trees never experienced water stress, and large trees always experienced an unrealistic level of water stress. This suggests that the model is over-simplified in this respect and unable to provide a fair

representation of water stress dynamics and consequences on relative tree growth in actual agroforestry systems. In this case, analysis using the RYD suggested that the model could benefit from greater complexity in its description of soil water dynamics.

Sensitivity analysis is appropriate for identifying the parameters or inputs of a model requiring further attention. Ruget et al. (2002) performed a sensitivity analysis of the STICS model in two steps, first by analysing the sensitivity of model components to their internal parameters, and then by analysing the sensitivity of the whole model to the behaviour of these components. The RYD provides different information, identifying and ranking which processes are responsible for the sensitivity of the model to a given input in a given simulation run.

The RYD requires an order to be defined for these processes. The order impacts on how the terms relating to a process at the model time-step are averaged at the analysis time-step, through the weights defined in Equation 2.2.5. In most cases, there is a “logical” order that results from the model’s formulation, leading to meaningful weighted averages. For example, in our two case studies, the average (R) of daily light use efficiencies (R^t) is weighted by the daily light intercepted, and thus equals light use efficiency at the analysis time-step. But in some cases, ordering the mechanisms is more difficult, as we found for the five mechanisms reducing light use efficiency in STICS. However, in this example, we found that the order had only minor impacts on the findings, as using different orders led to the same conclusions (results not shown). Nevertheless, it is important to bear in mind that several decompositions might be developed for the same model, and interpretation of mechanism effects could be conditioned by this choice.

Applying the RYD requires to build a synthesis of the mechanisms involved in determining crop yield, and sometimes calls for a reformulation of existing model. In this paper, we described how this could be achieved for STICS and Yield-SAFE. For many other crop models, such as CROPSYST (Stöckle et al., 2003), LINTUL3 (Shibu et al., 2010), EPIC (Williams et al., 1989) or AQUACROP (Steduto et al., 2009), applying the RYD would also be relatively straight-forward, because the model formulations coincide with the requirements for RYD analysis. For some models however, use of the RYD would be more difficult. Models from the SUCROS family (Van Ittersum et al., 2003) simulate daily photosynthesis from the integration of instantaneous rates, computed at three points of the day, for three canopy depths. In CROPGRO (Boote et al., 1998), crop yield results from the simulation of several cohorts of seeds with their own phenology, abortion rate, and grain filling. We have however succeeded in applying the RYD to these models, and this is described in Appendix 2.6 for the CROPGRO, SUCROS, APSIM (McCown et al., 1996) and CERES (Ritchie & Otter, 1985) crop models. For such complex crop models, this first step of the RYD is useful in itself, since it does at least allow the user to get an integrated view of the determinants of simulated crop yields, as opposed to using the crop model as a “black box”.

Simplifying complex models is an alternative option for evaluating them and has been advocated by several authors (Crout et al., 2009). The scrutinize-simplify-synthesize (s3) approach (Van Nes & Scheffer, 2005) is attractive. Model mechanisms are progressively

suppressed in an “all-or-none” approach. This may be efficient for defining the right level of model complexity required, but is not effective if the system under study cannot be simplified. This occurs when a large number of processes are intricately interacting, with no clear dominance by a reduced number of processes, or when the dominant processes in the system change with time. This is the case with the simulation of agroforestry systems, where the processes involved changes according to the changing size of the trees. In this situation, it is preferable to analyse the model with its full complexity, and this is facilitated by the RYD method.

2.5 Conclusion

Crop models are subject to the complexity paradox described by Oreske (2003), which states that “the more we strive for realism by incorporating as many as possible of the different processes and parameters that we believe to be operating in the system, the more difficult it is for us to know if our tests of the model are meaningful”. In particular, the relationships between inputs and outputs become difficult to understand, even for model developers. Despite this, many authors have claimed that “mechanistically rich” models are essential tools, enabling us to synthesize our knowledge and to understand interactions in a mechanistically rich world (Logan, 1994; Aumann, 2007; de Angelis & Mooij, 2003). The RYD method provides new insight of crop models by allowing us to compare different simulation runs and identify the processes involved that generate differences in behaviour and outputs. However, while the RYD method is a useful tool in explaining how crop models behave, it cannot prove that a model is correct. But, the RYD method can be used by researchers to design new experiments to test if the processes identified as important in model simulations are also responsible for output behaviour in the real world. RYD analysis is very effective in identifying which variables should be monitored in a real world experiment, and at what time steps they should be monitored. For example, the RYD method helped to draw our attention to processes (such as the nitrogen stress of shaded crops) that we would not have identified as important in explaining the growth of our real world experimental crops. We propose therefore that the RYD method is a new tool for the experiment-model-experiment loop that is usually advocated. Robinson & Froese (2004) for example, has flipped the burden of proof back to the model, by assuming, as the null hypothesis, that the model is not acceptable. However, the traditional approach to hypothesis testing in models is often inappropriate for complex model validation (Loehle, 1997). We have provided here a method that can help to identify unexpected processes and interactions (in time and space) that are responsible for system behaviour, and that can be evaluated by additional field experiments. Such an integrated approach is essential in advancing our understanding of crop system, and preventing unhealthy and excessive faith of the modellers in their models (Grimm, 1994).

2.6 Appendix : Application of the RYD to other crop models

2.6.1 The CERES family crop models (CERES-wheat, Apsim-wheat):

We present here a reformulation of the formalisms of CERES-wheat, which are detailed in http://nowlin.css.msu.edu/wheat_book/. Crop yield can first be decomposed into three components: the number of plants (input of the model), the number of kernels per plant, and the individual kernel weight : $Y = N_{plants}N_{grains/plant}W_g$. The individual kernel weight is computed from a daily increment during the grain filling stage $W_g = \sum_{t=t_1}^{t_2} \Delta W_g^t$, and $\Delta W_g^t = k_1 \cdot f(T) \cdot f(C)$ where k_1 is a genetic parameter, $f(T)$ is a function of temperature ranging into $[0, 1]$, and $f(C)$ is a function accounting for the grain filling rate reduction when carbohydrates reserves from stem and daily assimilates are not sufficient to supply grain filling. W_g fullfills the conditions enunciated in section 2.2.1.2 and can thus be decomposed as $W_g = W_{max}T.C$ where $W_{max} = k_1(t_2 - t_1)$, and T and C are the integrated effects of temperature and carbon lack. The number of kernels per plant is computed as $k_2 B_{stem}$ with k_2 a genetic constant, and B_{stem} the stem biomass at the beginning of grain filling. The daily increment of stem biomass can be expressed as a function of incident light, proportion of light intercepted, maximal light use efficiency, water stress, leaf ageing and allocation to stem (depends on phenology), and B_{stem} can be further decomposed into several effects.

2.6.2 The SUCROS family crop models (WOFOST)

A detailed description of the formalisms of WOFOST is available in <http://supit.net/main.php?q=aXR1bV9pZD02Mw==>. The simulated crop yield results from the daily accumulation of dry matter into storage organs: $\Delta Y^t = K^t \Delta B^t \cdot S^t$ where ΔB^t is the net biomass increment, K^t accounts for growth respiration, and S^t is allocation to storage organs, and depends on crop phenology. The net biomass increment writes $\Delta B^t = \Delta G^t M^t$, where M^t accounts for maintenance respiration, and ΔG^t is the gross biomass increment. The gross biomass increment results from the integration of instantaneous rates computed at three moments of the day for three depths in the canopy. The maximal assimilation rate per unit leaf area and per unit time A is computed as a function of daily temperature, water stress and crop phenology: $A^t = A_{max} P^t T^t W^t$. The actual assimilation rate is computed at several times in the day and several heights in the cover, for both sunlit and shaded leaves, as a function of A and of the intercepted light. The daily gross biomass increment is then integrated to the whole day and the whole cover. As a result, $\Delta G^t = A_{max} P^t T^t W^t L^t$ where L^t is an integrated reducer accounting for the lack of light at the day time step and the cover scale. L^t is a complex function of incident light and cover geometry. Finally, we can write $\Delta Y^t = A_{max} P^t T^t W^t M^t K^t S^t$,

and apply the methodology from section 2.2.1.2.

2.6.3 The CROPGRO crop model

In CROPGRO (Boote et al. (1998)), the crop yield results from a daily dry matter accumulation in seeds. This daily accumulation can be decomposed as the product of the number of growing seeds (N_g^t) by the actual seed growth rate (G_a) : $\Delta Y^t = N_g^t G_a^t$. The potential daily seed growth rate is determined by a cultivar parameter (k) reduced by a temperature (T_g), a photoperiod (P_g) and a water stress (W_g) effect : $G_p^t = k T_g^t P_g^t W_g^t$. The actual growth rate accounts for limitations by carbon or nitrogen supply: $G_a^t = G_p^t C_g^t N_g^t$. The number of growing seed at a given day depends on the total number of initiated seeds N_i^t , and on the proportion of seeds neither aborted nor mature. The total number of initiated seeds on a given day results from a daily increment during the days before, and we verified that it fullfills the conditions for a further decomposition (section 2.2.1.2). The RYD also applies to CROPGRO, while it is a bit more complicated than for other models, because one term of the decomposition at the model time step is expressed in its turn as the result of a daily increment.

2.7 Application au modèle sAFe-Tree

Le rendement des arbres, exprimé par en tonnes par hectare, dépend du rendement par arbre et de la densité de plantation : $Y = Y_{ind} D$. Le rendement par arbre, assimilé à la biomasse de tronc, est égal au produit de la biomasse produite depuis le début de la simulation et de la fraction de cette biomasse allouée au tronc (équivalent d'un indice de récolte) : $Y_{ind} = HB$.

2.7.1 Décomposition de la biomasse

La biomasse totale produite (qui inclue la biomasse morte), est une somme d'incrément journaliers positifs :

$$B = B^0 + \sum_{t=0}^{t_f} \Delta B^t \quad (2.7.1)$$

avec B^0 la biomasse initiale (qui devient très vite négligeable), et ΔB^t l'incrément de biomasse du jour t , qui peut être décomposé comme :

$$\Delta B^t = L^t R^t = [C^t A^t I^t] [LUE_{max} P^t W^t N^t] \quad (2.7.2)$$

où L^t est la quantité de rayonnement intercepté, et R^t est l'efficience de conversion de la lumière (LUE). L^t est le produit du rayonnement incident C^t , de la capacité d'interception de l'arbre A^t , et d'un indice de compétition pour la lumière entre arbres I^t . Les termes A^t et I^t sont calculés par sAFe-Light (cf section 1.2.3), A^t est une

fonction de la géométrie de l'arbre (dimensions, surface foliaire, surface de branches) et de la distribution angulaire du rayonnement¹, I^t est une fonction de la géométrie de l'arbre considéré, de celle de ses voisins, et de la distribution du rayonnement.

L'efficacité de conversion de la lumière est égale au produit de l'efficacité maximale (LUE_{max} , paramètre) et de trois termes réducteurs (voir section 1.2.2.2) : (1) un terme P^t qui dépend de la phénologie de l'arbre, (2) un indice de stress hydrique W^t , et (3) un indice de stress azote N^t (dans cette thèse, on travaillera sur une version non limitée par l'azote de sAFe-Tree, on a donc $N^t = 1$).

L'expression de la biomasse B est conforme aux conditions énoncées en section 2.2.1.2. On peut donc écrire au pas de temps d'analyse

$$B = LR = [CAI][LUE_{max}PW] \quad (2.7.3)$$

où

- L est la somme des rayonnements interceptés journaliers ($L = \sum_{t=t_0}^{t_f} L^t$), qui se décompose comme le produit de :
 - C , la somme des rayonnements incidents journaliers : $C = \sum_{t=t_0}^{t_f} C^t$;
 - A , la moyenne des potentiels d'interception journaliers A^t pondérée par les C^t ;
 - et I , l'indice moyen de compétition pour la lumière, moyenne des I^t pondérée par les $C^t A^t$.
- R est l'efficacité moyenne d'utilisation du rayonnement, calculée comme la moyenne des efficacités journalières R^t pondérée par les L^t . Elle se décompose comme le produit de l'efficacité maximale LUE_{max} par les réducteurs :
 - P , effet moyen de la phénologie, calculé comme la moyenne des P^t pondérée par les L^t ;
 - et W , effet moyen des stress hydriques, calculé comme la moyenne des W^t pondérée par les $L^t P^t$.

2.7.2 Décomposition de l'indice de récolte

L'indice de récolte H est la fraction de la biomasse produite qui a été allouée au tronc. Nous avons choisi de la décomposer en deux termes : la fraction de biomasse allouée aux compartiments aériens (H_a), et la fraction de biomasse aérienne allouée au tronc (H_s).

2.7.3 Décomposition du rendement relatif

Le rendement absolu des arbres dans un système donné se décompose comme :

$$Y = DCAILUE_{max}PWH_aH_s \quad (2.7.4)$$

1. A^t est une mesure de l'arbre, il résulte de l'intégration de nombreux processus déterminant la capacité interceptrice du feuillage. Il est possible de le décomposer à son tour en une série de termes relatifs à la biomasse totale produite, à la fraction de biomasse allouée aux feuilles, et à la géométrie du feuillage (qui détermine un indice de compétition entre feuilles d'un même arbre pour l'accès à la lumière). Cette décomposition ne sera pas développée dans ce travail.

Dans le cadre de ce travail, nous serons intéressés par la comparaison du rendement des arbres en agroforesterie avec le rendement du témoin agricole, pour un même climat et la même espèce d'arbre. Les termes C et LUE_{max} sont donc identiques pour la simulation d'intérêt et la simulation de référence. Le rendement relatif, $y = Y_{AF}/Y_{TF}$ sera décomposé comme suit :

$$y = dy_{ind} = dlrh = d[ai][pw][h_a h_s] \quad (2.7.5)$$

Partie II :
Instanciación du modèle Hi-sAFé pour
simuler une parcelle expérimentale de
référence

Chapitre 3

L'association noyer hybride/blé dur de Restinclières : données d'entrée et paramétrage

Ce chapitre a pour objectif de présenter l'ensemble des données d'entrée et des paramètres utilisés pour simuler une association noyer hybride/blé dur située au domaine expérimental de Restinclières, ainsi que les témoins agricoles et forestiers correspondants. Sauf mention contraire, toutes les simulations effectuées dans cette thèse utiliseront les données d'entrée présentées ici. Pour plus de détails sur ces données et paramètres, le lecteur se reportera à l'annexe A.

3.1 Présentation du site et données d'entrée

3.1.1 Conception et gestion de la parcelle agroforestière

La parcelle de référence utilisée dans ce travail est la parcelle A3 du domaine expérimental de Restinclières, situé à 15 km au nord de Montpellier, France (4° 10' E, 43° 43' N). Une plantation agroforestière y a été installée en 1995. Des noyers hybrides NG 23 x RA (*Juglans regia* x *Juglans nigra*) ont été plantés en alignements nord-sud, avec un espacement de 4 m sur les lignes et de 13 m entre les lignes, soit une densité de 192 tiges.ha⁻¹. Une éclaircie des arbres a été réalisée en 2004, ramenant la densité à environ 100 tiges.ha⁻¹. Les noyers conservés mesuraient à cette date 7.3 m de haut pour 13.7 cm de diamètre en moyenne, contre 5.7 m de haut et 9.8 cm de diamètre pour les arbres abattus. Comme Hi-sAFé ne permet pas pour l'instant de simuler simplement des éclaircies, nous ferons l'hypothèse que la compétition entre arbres avant 2004 était négligeable et simulerons dès la plantation un peuplement à la densité finale. Le design retenu pour

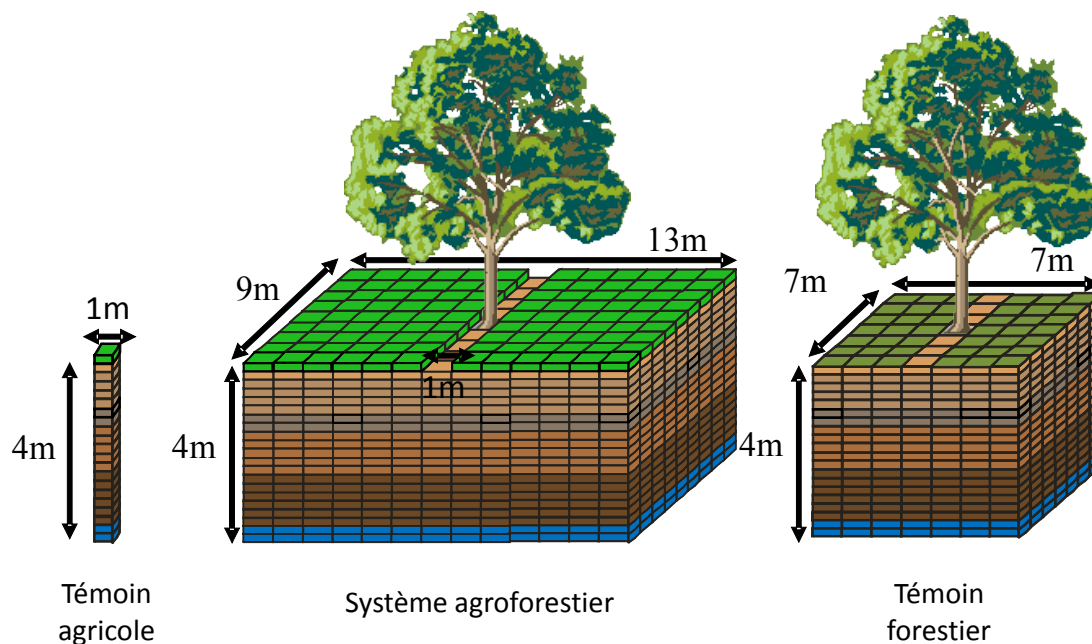


Figure 3.1.1: Représentation conceptuelle de la scène agroforestière simulée, et des témoins agricole et forestier correspondants. Les modules de répartition des ressources utilisent des algorithmes incluant une symétrie torique, qui permet de simuler un couvert infini de scènes identiques à partir d'une scène avec un arbres.

la simulation est une plantation à 13 m par 9 m¹, soit une densité de 85 tiges.ha⁻¹. La scène simulée est représentée sur la figure 3.1.1. Les noyers ont été élagués régulièrement, avec un objectif de 4 m pour la hauteur de bille. Nous simulerons un régime d'élagage similaire, avec un élagage tous les 4 ans à partir de 2002 (date à laquelle les noyers font environ 10 cm de diamètre). La procédure d'élagage utilisée par la simulation est la suivante : à chaque élagage, les arbres sont élagués jusqu'à 30 % de leur hauteur totale, jusqu'à atteindre une hauteur élaguée de 4 m.

La culture intercalaire pratiquée dans la parcelle est une rotation quadriennale à base de blé dur, avec du colza en tête d'assolement. Le colza a un rôle phytosanitaire important, car il permet de diminuer les risques de piétin-échaudage sur la céréale. Le modèle Hi-sAFé ne simule pas les maladies, et la simulation d'une rotation blé-colza était difficile pour des raisons techniques. Nous simulerons donc simplement une monoculture de blé dur, ce qui, du point de vue de la compétition avec les arbres, n'introduira pas un biais gênant, les cycles, productivité en biomasse, et profondeur d'enracinement du blé et du colza étant proches. Les cultures sont implantées à partir de 50 cm des lignes d'arbres,

1. Pour positionner l'arbre simulé au centre de la scène, il est nécessaire de définir une scène avec un nombre impair de cellules. C'est pourquoi nous simulerons des espacements de 13 m par 9 m au lieu des 13 m par 8 m de la parcelle réelle.

ce qui fait une largeur des allées cultivées de 12 m. L'itinéraire technique simulé est classique pour le blé dur : semis le 4 novembre à une densité de 300 grains.m⁻², fertilisation azotée de 160 KgN.ha⁻¹ sous forme d'ammonitrate, fractionnée en trois apports : début février (30 KgN.ha⁻¹), début mars (80 KgN.ha⁻¹) et début avril (50 KgN.ha⁻¹).

3.1.2 Données pédo-climatiques

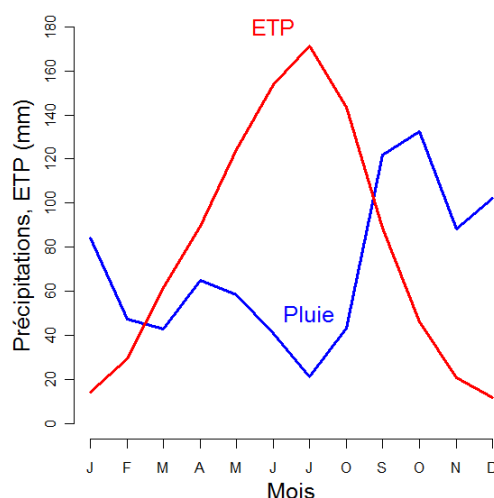


Figure 3.1.2: Précipitations et évapotranspiration potentielle (ETP) mensuelles à Restinclières (période 1991-2009)

Le climat de Restinclières est de type méditerranéen sub-humide, avec une température moyenne annuelle de 13.9 °C et une pluviométrie annuelle de 847 mm (années 1991 à 2009). Le climat est caractérisé par une sécheresse estivale régulière, avec une évapotranspiration mensuelle supérieure à la pluviométrie de mars à août, suivie de pluies d'automne abondantes (fig. 3.1.2). On observe également une forte variabilité inter-annuelle des pluies, le cumul annuel des pluies a varié de 562 mm à 1670 mm sur la période considérée. Nous disposons des données météo journalières classiques (températures minimale et maximale, humidités relatives minimale et maximale, pluies, rayonnement global, vitesse du vent) pour la période 1991-2009. Afin de réaliser des simulations sur l'ensemble du cycle des arbres, cette série climatique a été prolongée au-delà de 2009 en tirant aléatoirement, avec remise, des années climatiques dans la série 1991-2009.

La parcelle A3 est une parcelle en bord de rivière permanente (le Lez), avec une nappe alluviale peu profonde. Le sol est un fluvisol profond, contenant très peu de cailloux (moins de 10 %) (voir Mulia & Dupraz, 2006). La profondeur du toit de la nappe a été mesurée régulièrement de 2002 à 2009 (fig. 3.1.3), elle oscille entre 1 m et

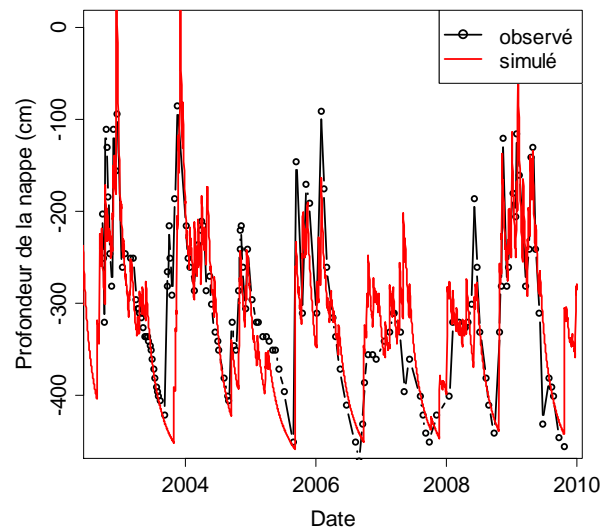


Figure 3.1.3: Ajustement d'un modèle empirique reproduisant la dynamique de profondeur de la nappe dans la parcelle A3 de Restinclières.

4 m. Afin de reconstituer une dynamique de nappe hors de la période de mesure, nous avons construit un modèle empirique de variation de hauteur de nappe, indépendant du bilan hydrique local, et basé uniquement sur l'historique des pluies et de l'ETP (voir l'annexe A.6 pour une description détaillée). Ce modèle a été ajusté sur les données de 2002-2009, il reproduit très bien la dynamique de hauteur de nappe observée pendant cette période (fig. 3.1.3), avec une RMSE (Root Mean Squared Error) de 58 cm et un R^2 de 0.61. La qualité de cet ajustement valide l'hypothèse d'un niveau de nappe imposé par des mécanismes extérieurs à la parcelle. Le niveau de nappe peut donc bien être considéré comme un forçage climatique, au même titre que la chronique météorologique. L'indépendance entre bilan hydrique local et fluctuations de la nappe devra cependant être réévaluée dans quelques années, lorsque les arbres seront plus développés, et auront donc potentiellement plus d'influence sur la dynamique de la nappe.

3.1.3 Simulation des témoins agricole et forestier

Le dispositif de Restinclières comprend des parcelles témoins agricoles et forestières (figure 3.1.4). Pour le dispositif noyer hybride, nous avons 4 parcelles. On trouve des parcelles agroforestières sur les parcelles A1, A2 et A3, des parcelles forestières sur les parcelles A2 et A4, et un témoin agricole sur la parcelle A2. C'est la parcelle A3 qui a concentré historiquement les mesures sur les noyers, car c'est celle qui a les croissances les plus rapides. Ainsi, nous ne disposons par exemple de mesures d'enracinement des noyers agroforestiers que dans cette parcelle. C'est pour cette raison que nos simulations

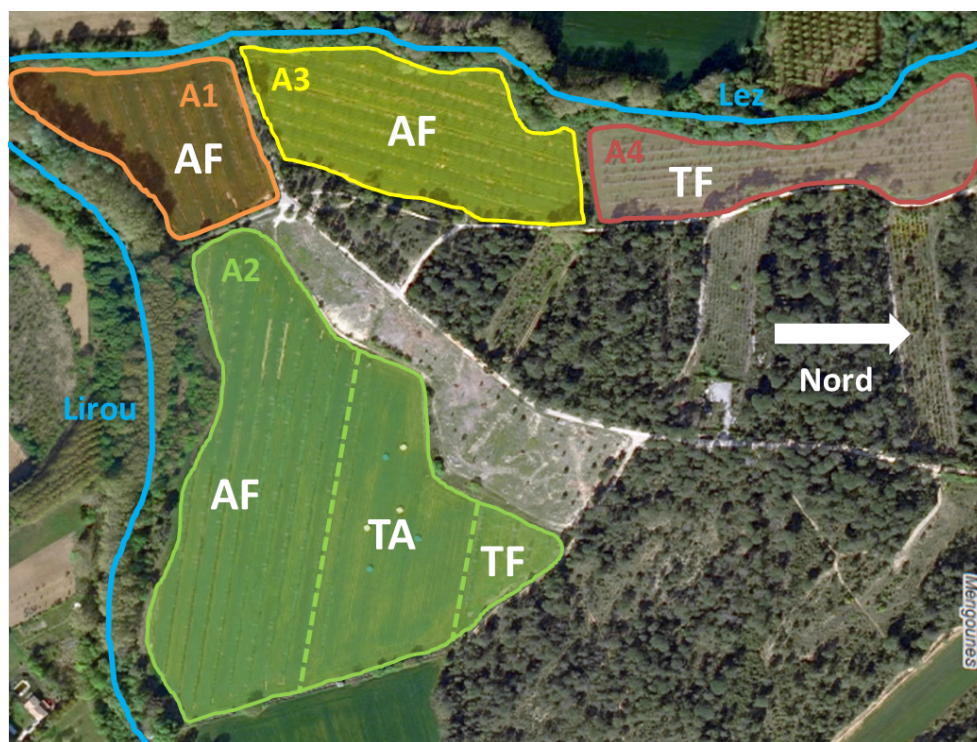


Figure 3.1.4: Plan du dispositif expérimental noyer hybrides - blé dur de Restinclières. A1, A2, A3, A4 : noms des parcelles. AF : agroforesterie, TA : témoin agricole, TF : témoin forestier. Lez : rivière permanente. Lirou : rivière temporaire.

utiliseront cette parcelle comme situation agroforestière de référence.

3.1.3.1 Quel témoin agricole expérimental pour la parcelle A3 ?

La seule vraie parcelle agricole est située dans la parcelle A2, mais cette parcelle est nettement moins fertile que la parcelle A3. C'est notamment dû à une position topographique plus haute, et à une distance à la rivière permanente (Le Lez) beaucoup plus grande (figure 3.1.4). La rivière qui borde la parcelle A2 est en effet le Lirou, qui est à sec une grande partie de l'année. C'est pourquoi les rendements mesurés sur la parcelle A2 sont systématiquement plus faibles que ceux mesurés sur la parcelle A3, en l'absence d'arbres (ou lorsque les arbres étaient petits). Elle ne pourra donc pas servir de témoin agricole expérimental pour la parcelle A3. Lors des premières années, les mesures de rendement au centre des allées de la parcelle A3 étaient considérées comme représentatives d'une parcelle sans arbre, mais cette hypothèse est rapidement devenue indéfendable avec la croissance des arbres. En 2011, une quinzaine d'arbres ont été supprimés sous la ligne électrique qui traverse la parcelle A3, créant ainsi une zone témoin au sein même de la parcelle. Mais nous devons admettre ne pas disposer d'un témoin agricole expérimental satisfaisant à comparer à la parcelle A3.

3.1.3.2 Quelle témoin forestier expérimental pour la parcelle A3 ?

La partie forestière de la parcelle A2 ne peut pas être retenue comme témoin forestier de la parcelle A3, pour les mêmes raisons que pour le témoin agricole. Mais heureusement, un témoin forestier a été mis en place sur la parcelle mitoyenne A4 (figure 3.1.4), planté exactement en même temps, avec les mêmes plants, et les mêmes techniques de plantation que la parcelle A3. Les analyses de sol ne montrent pas de différences de texture de sol, de pH ou de teneur en matière organique entre les deux parcelles. Dans la parcelle A4, les noyers hybrides sont plantés à 7 m par 7 m, soit une densité de 204 arbres.ha⁻¹, avec des aulnes de Corse (*Alnus cordata*) intercalés sur les lignes. Il a été montré que l'utilisation d'aulnes comme arbres d'accompagnement permet d'améliorer la croissance des noyers hybrides plantés à faible densité, d'augmenter leur élancement (rapport hauteur sur diamètre), et de limiter les besoins de taille de formation Gavaland et al. (2006). La végétation spontanée a été maîtrisée par deux disquages par an les premières années, et surtout par gyrobroyage ensuite. Le régime d'élagage pratiqué est le même que dans la parcelle agroforestière.

Dès les premières années après la plantation, une forte différence de croissance a été mesurée entre arbres forestiers (TF A4) et agroforestiers (AF A3) (voir fig. 3.1.5). Fin 1998, les noyers du TF A4 font 1.5 m de haut pour 1.4 cm de DBH en moyenne, contre 2.8 m et 3.3 cm pour l'AF A3. De nombreux travaux ont été réalisés sur ce dispositif pour tenter de comprendre le déterminisme de ces différences surprenantes (Dupraz, 1998-2008).

Dans la parcelle AF, deux sous-traitements avaient été mis en place : une agroforesterie intensive (distance arbre-culture = 50 cm) et une agroforesterie extensive (distance arbres-culture = 2 m). Ces traitements ont été maintenus jusqu'en 2002, et ont eu un effet faible, mais significatif sur la croissance des arbres : les arbres disposant d'une ligne de 4 m de large non cultivée (traitement extensif) ont poussé plus vite que ceux disposant d'une ligne de 1 m de large (traitement intensif, fig. 3.1.5). Ce résultat suggère que les cultures intercalaires exercent une compétition plus intense sur les arbres que la végétation spontanée présente sur les lignes d'arbres. Par ailleurs, des relevés floristiques ont montré que la flore adventice était similaire en début de rotation entre les parcelles A3 et A4. Il est donc peu probable que la croissance faible observée dans le TF résulte d'une compétition intense par la végétation spontanée.

En 1999, un essai de fertilisation azotée (blocs factoriels avec trois répétitions) a été mis en place dans la parcelle A4, pour évaluer si les différences de croissance observées entre AF et TF pouvaient résulter de la fertilisation des cultures dans l'AF. Cette fertilisation n'a eu qu'un très faible impact sur la croissance des noyers forestiers (Dupraz, 1998-2008).

Il est par ailleurs peu probable que la compétition entre noyers ou entre noyers et aulnes puisse expliquer la moindre croissance des arbres forestiers à ce stade initial du peuplement. En effet, avec un tel mécanisme, les différences de croissance se seraient mis en place progressivement et se seraient amplifiées d'année en année, et ce n'est pas ce

qu'on observe.

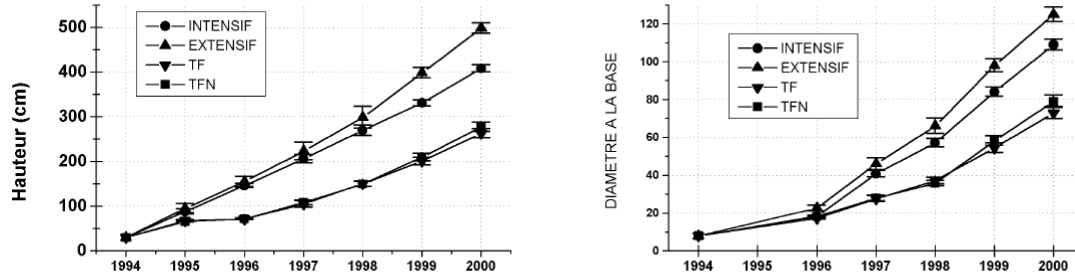


Figure 3.1.5: Dynamique de croissance en hauteur et diamètre des arbres agroforestiers (AF A3) et forestiers (TF A4) de Restinclières (figure reprise du rapport PIRAT 2000, Dupraz, 1998-2008). Les traitements “intensif” et “extensif” correspondent à différentes largeurs (respectivement 1 m et 4 m) de la ligne d’arbres dans la parcelle agroforestière A3. Les traitements TF et TFN correspondent à un essai de fertilisation azotée conduit à partir de 1999 dans le témoin forestier.

Si les parcelles A3 et A4 ont des sols semblables, les mesures de hauteurs de nappe effectuées depuis 2002 montrent une forte différence entre parcelles. En effet, le niveau de la nappe est en général 1 m plus haut dans la parcelle A4 que dans la parcelle A3. Les deux hivers suivant la plantation des arbres, les hivers 1995-1996 et 1996-1997, ont été particulièrement pluvieux, avec des cumuls de précipitation entre septembre et avril de 1326 mm et 960 mm respectivement. Avec notre modèle de dynamique de hauteur de nappe, calibré sur les parcelles A3 et A4 sur la période 2002-2009, il a été possible de reconstituer les variations de hauteur de nappe dans les deux parcelles pendant ces deux hivers. D’après ce modèle, dans la parcelle A4, la nappe serait restée pendant 136 jours au-dessus de 1 m de profondeur et 70 jours au-dessus de 50 cm pendant l’hiver 1995-1996, contre 39 et 21 jours dans la parcelle A3. Pendant l’hiver 1996-1997, ces durées auraient été de 94 et 67 jours dans la parcelle A4, contre 45 et 10 jours dans la parcelle A3. Ces résultats nous ont amené à proposer une nouvelle hypothèse pour expliquer la différence de croissance entre arbres agroforestiers et forestiers : l’engorgement prolongé du sol dans la parcelle A4 durant les deux hivers suivant la mise en place des arbres a entraîné la mortalité d’une grande partie du système racinaire des arbres forestiers, avec un impact délétère sur la croissance des années suivantes.

En raison de ces différences de hauteur de nappe, la parcelle A4 ne peut pas être considérée comme un véritable témoin forestier expérimental pour la parcelle A3. Ces difficultés soulignent la complexité de la mise en place d’expérimentations agroforestières de longue durée : on doit d’une part mettre en place des parcelles de grande dimension, pour éviter d’avoir des effets de bordure trop marqués, et cependant contrôler l’hétérogénéité des conditions pédoclimatiques, qui doivent être les plus uniformes possibles entre les parcelles. Comme un dispositif en bloc factoriels classiques est impossible à gérer en

pratique pour des agriculteurs, et nécessiterait des surfaces immenses d'expérimentation, le compromis adopté à Restinclières semblait au départ satisfaisant. Le recul apporté par 15 années de suivi et d'observations montre qu'un facteur pédoclimatique que nous ignorions (la profondeur de la nappe alluviale) est venu largement perturber le dispositif. Cette nappe s'est même avérée plus superficielle dans une parcelle amont (A4) que dans une parcelle aval (A3), ce qui est totalement contre intuitif. Nous devons donc reconnaître que nous ne disposons pas de témoins expérimentaux agricoles ou forestiers avec qui comparer la parcelle de référence A3. Nous allons donc simuler des témoins agricoles et forestiers virtuels : ceux qui auraient été installés dans les conditions pédoclimatiques de la parcelle A3.

3.1.3.3 Définition des témoins agricole et forestier virtuels

Le témoin agricole sera simulé par une scène de 1 m² (figure 3.1.1), sans arbre, avec les mêmes données d'entrée et les mêmes paramètres que pour la parcelle agroforestière. Pour le témoin forestier, nous retiendrons le design de la plantation de la parcelle A4, c'est à dire une plantation à 7 m par 7 m (figure 3.1.1), mais avec la dynamique de nappe de la parcelle A3. Ce choix permet de s'affranchir, dans les simulations, du biais expérimental induit par les différences de régime de nappe entre parcelles, et de focaliser notre approche sur la différence entre un témoin forestier et une parcelle agroforestière. Les mesures effectuées sur la parcelle A4 ne pourront pas, par conséquent, être utilisées comme référence expérimentale pour le témoin forestier simulé. La procédure d'élagage de la parcelle forestière est identique à celle appliquée dans la parcelle agroforestière. Les aulnes ne seront pas pris en compte, et la végétation spontanée sera simulée par une nouvelle espèce pour laquelle nous avons mis au point un jeu de paramètres dans STICS. Cette espèce fictive a été définie de manière à reproduire les caractéristiques suivantes (1) un démarrage rapide de la végétation dès les premières pluies conséquentes de fin d'été ou d'automne, avec une couverture rapide du sol, (2) un enracinement superficiel (40 cm), et (3) une sénescence rapides au printemps, dès que la ressource hydrique devient limitante. Le paramétrage de cette végétation spontanée a été réalisé par essai/erreur à partir des paramètres de l'espèce blé dur de STICS. En culture pure, c'est à dire sans influence des arbres, et dans les conditions climatiques de Restinclières, elle lève entre début septembre et fin octobre, son LAI maximal est compris entre 3 et 4 m².m⁻², elle produit entre 8 et 10 tonnes de biomasse par hectare, et transpire entre 100 et 150 mm d'eau. La définition de cette espèce et son "itinéraire technique" sont explicités dans l'annexe A.

Dans une démarche de calibration et de validation du modèle Hi-sAFé, il aurait été possible d'utiliser les données expérimentales des parcelles A2 et A4 : le modèle doit en théorie être apte à reproduire le comportement des arbres et des cultures dans des conditions pédoclimatiques (et notamment de dynamique de nappe) différentes. Nous avons choisi ici de nous concentrer sur l'analyse comparée d'un système agroforestier avec des parcelles témoin, c'est à dire à conditions pédoclimatiques identiques, en l'occurrence

celles de la parcelle A3.

3.2 Paramètres spécifiques pour le noyer hybride et le blé dur

Outre les données climatiques, la description de la parcelle (sol, structure du peuplement) et de sa gestion (élagage des arbres, itinéraire technique des cultures), Hi-sAFe utilise en entrée des paramètres relatifs aux espèces simulées. La variété de blé dur semée à Restinclières est la variété Claudio. Nous utiliserons le paramétrage par défaut de STICS pour la variété Allur, variété la plus proche de Claudio, avec quelques modifications des paramètres relatifs à la phénologie, au déterminisme du nombre de grains, et à la surface interceptrice des épis (voir Annexe A). Pour les paramètres du blé dur relatifs à l'absorption d'eau, nous utiliserons les valeurs obtenues par Delacour (2006). Ces paramètres ont été optimisés pour simuler des dynamiques de stress hydrique en culture pure semblables à celles simulées avec les formalismes d'absorption d'eau de STICS.

La définition d'une espèce d'arbre dans Hi-sAFe demande de renseigner 56 paramètres, dont 3 sont utilisés par le module de compétition pour la lumière sAFe-Light, 6 par le module de compétition pour l'eau sAFe-Water, et 47 par le module arbre sAFe-Tree. Les paramètres de sAFe-Light pour le noyer hybride ont été estimés par l'analyse combinée de mesures de la géométrie des arbres (dimensions, surface foliaire) et de photographies hémisphériques (voir Talbot & Dupraz, in press, annexe B). Pour le module sAFe-Water, ne disposant pas de mesures spécifiques pour le noyer hybride, nous utiliserons le paramétrage par défaut proposé par les concepteurs du module.

Les 47 paramètres du module arbres se répartissent de la manière suivante :

- 7 paramètres relatifs à la phénologie. Ces paramètres ont été estimés à partir des mesures effectuées à Restinclières entre 2002 et 2009. Les noyers hybrides sont très hétérogènes du point de vue de leur phénologie, avec plus de un mois d'écart pour la date de débourrement entre les plus précoces et les plus tardifs. Nous avons simulé un noyer intermédiaire, ni précoce, ni tardif.
- 13 paramètres déterminent la géométrie aérienne des arbres, et les dimensions relatives des compartiments aériens. Ces paramètres ont été estimés à partir de mesures sur les noyers hybrides des parcelles expérimentales de Restinclières, Castries (Hérault) et Notre Dame de Londres (Hérault), ainsi que de mesures de l'inventaire forestier national (IFN) sur noyer noir (*Juglans nigra*) pour avoir des arbres de grande taille. En effet, il n'existe pas de plantations de noyers hybrides en Europe suffisamment âgées (plus de 40 ans) pour avoir des arbres de grande taille, et le noyer noir, un des deux parents de l'hybride, a un comportement très proche de celui-ci.
- 7 paramètres relatifs à l'efficacité de la photosynthèse et à la gestion des réserves de carbone. La simulation des réserves de carbone ne prétend pas au réalisme, elle

permet uniquement de disposer de carbone lors du débourrement des arbres pour la mise en place des feuilles. On distingue chez le noyer deux phases distinctes d'expansion foliaire : la mise en place rapide de rameaux courts à croissance déterminée, et le développement des rameaux longs. Les 4 paramètres permettant de simuler le pool de réserves ont été fixés à des valeurs permettant de reproduire une phase de croissance rapide de la surface foliaire, correspondant à la mise en place des rameaux courts, durant environ 3 semaines. 3 paramètres sont utilisés pour simuler l'efficacité de conversion de la lumière (LUE) : une valeur maximale LUE_{max} qui sera obtenue par calibration (section 3.2.1), et deux paramètres décrivant l'évolution saisonnière de la LUE, pour lesquels nous utiliserons les valeurs proposées par Lacointe et al. (1995).

- 6 paramètres relatifs au fonctionnement azoté de l'arbre. La version de sAFe-Tree utilisée dans ce travail ne modélise pas le comportement des arbres en réponse à la disponibilité de l'azote, mais tient compte du prélèvement d'azote par les arbres. Ces paramètres concernent les teneurs en azote optimales des différents compartiments, ainsi que les fractions d'azote remobilisées lors de la senescence des feuilles et des racines fines. Ils ont été fixés à des valeurs permettant de simuler une consommation d'azote réaliste par les arbres (Kramer & Kozlowski, 1979).
- 9 paramètres relatifs au fonctionnement du système racinaire. La longueur spécifique des racines de noyer a été mesurée par Mulia & Dupraz (2006). Les durées de demi-vies des racines fines et de structure dans la zone saturée ont été fixées à des valeurs classiques, mais qui restent très arbitraires à ce stade. Les autres paramètres seront obtenus par calibration (section 3.2.1).
- 5 paramètres relatif à l'allocation entre compartiments aériens et souterrains. Hormis les bornes inférieure et supérieure autorisées pour la variation du R^* (valeur cible pour le ratio entre la quantité de feuilles et la quantité de racines fines) qui ont été fixées à 0.15 et 0.85, ces paramètres seront obtenus par calibration (section 3.2.1).

3.2.1 Calibration de sAFe-Tree pour le noyer hybride

3.2.1.1 Plan d'échantillonnage

Les paramètres retenus pour la calibration de sAFe-Tree pour le noyer hybride, ainsi que les bornes de variation retenues pour ces paramètres sont présentés dans le tableau 3.1. Le temps de calcul de Hi-sAFe (environ 1 heure 30 pour une simulation agroforestière de 15 ans, de 1996 à 2010) et la lourdeur de l'analyse des sorties de simulations (plusieurs millions de données représentant des centaines de mégaoctets pour les sorties concernant les racines des arbres) ne permettaient pas d'adopter une procédure itérative pour la calibration de sAFe-Tree. Nous avons donc opté pour une autre stratégie : définir un échantillon de points dans l'espace à 9 dimensions défini par les bornes de variation des 9 paramètres, et sélectionner les meilleures simulations par comparaison avec les données

Table 3.1: Choix des paramètres et de leurs bornes de variation pour la calibration du module arbre. Se reporter au chapitre 1 pour plus d'informations sur le rôle de ces paramètres.

paramètre	unité	description	borne inférieure	borne supérieure
$\alpha_{CR/FR}$	$\text{m}^2.\text{m}^{-1}$	section de racine de structure nécessaire par unité de longueur de racines fines	1e-7	2e-7
LUE_{max}	KgC.MJ^{-1}	valeur maximale de l'efficience de conversion de la lumière	0.6	0.7
Φ_W	-	sensibilité au stress hydrique de l'allocation aérien/souterrain	0.5	2
ΔR_{max}	-	variation maximale journalière de la valeur cible R^*	2e-3	4e-3
k_d	jour^{-1}	vitesse de dérive vers le haut de R^* en absence de stress (en proportion de ΔR_{max})	0.1	0.3
$t_{1/2}$	jours	demi vie des racines fines hors saturation	80	300
α	m.m^{-3}	seuil de colonisation pour l'automate racinaire	600	1200
φ	-	coefficient d'opportunisme racinaire	0.1	0.3
ρ	-	coefficient d'économie racinaire	0.5	1.5

expérimentales de la parcelle A3 de Restinclières.

Il a été montré que dans des espaces de grande dimension (dimension 9 ici), les procédures de tirages aléatoires donnaient de très mauvais échantillonnages de l'espace, en laissant de grandes zones vides (Saltelli & Scott, 2000). Il est donc nécessaire d'utiliser des méthodes spécifiques d'échantillonnage, qui remplissent bien l'espace (Space Filling Design). Nous avons opté pour un hypercube latin (Latin Hypercube Sampling), qui permet de garantir une distribution uniforme des valeurs prises par chaque paramètre dans son intervalle de variation. Nous avons sélectionné un hypercube latin de 760 points dans l'espace des paramètres, avec la méthode OptimumLHS de la librairie LHS² de R, qui permet de choisir un hypercube latin remplissant au mieux l'espace (critère de S-optimality, maximisation de la distance entre points). Une simulation a été réalisée en chaque point de ce plan d'expérience.

Table 3.2: Application de critères basés sur l'expansion latérale du système racinaire pour sélectionner des simulations

Date de mesure	Critères	Simulations conservées
		760
Avril 2002	présence de racines à 4 m des arbres dans l'allée. Absence de racines à 6 m	399
Août 2004	présence de racines à 4 m des arbres dans l'allée. Absence de racines à 6 m	397
Octobre 2004	présence de racines à 4 m des arbres dans l'allée. Absence de racines à 6 m	397
Novembre 2007	présence de racines à 6 m des arbres dans l'allée	397
Mai 2008	présence de racines à 6 m des arbres dans l'allée	397
Novembre 2009	présence de racines à 6 m des arbres dans l'allée, y compris en diagonale : toute la scène est colonisée	234

3.2.1.2 Sélection de jeux de paramètres optimaux

La sélection des jeux de paramètres a été réalisée avec deux séries de critères. La première série de critères concerne la dynamique d'expansion latérale du système racinaire des arbres. Entre 2002 et 2009, des carottages racinaires ont été réalisés à plusieurs reprises pour caractériser l'enracinement des arbres agroforestiers (mesures de Mulia & Dupraz (2006), ainsi que des mesures plus récentes). A partir de ces données, nous avons défini les critères présentés dans le tableau 3.2. Ces critères nous ont permis d'éliminer 69 % des 760 jeux de paramètres initiaux. Notons qu'après application du critère correspondant aux mesures d'avril 2002, les critères correspondant aux mesures réalisées de 2004 à 2008 ne sont pas discriminants.

La seconde série de critères est basée sur la dynamique de diamètre à hauteur de poitrine (DBH) des arbres. Deux critères ont été définis : la RMSE (Root Mean Square Error) entre diamètres observés (une valeur moyenne sur la parcelle, chaque hiver de 1996 à 2009) et simulés, et la RMSE entre incréments annuels de diamètre observés et simulés. Pour chaque critère, seules les 10 % de simulations ayant les valeurs de RMSE les plus faibles (premier décile) ont été retenues (voir figures 3.2.1 et 3.2.2). Notons qu'aucune des simulations retenues ne reproduit le détail de la dynamique de diamètre mesurée de manière satisfaisante, nous reviendrons sur ce point dans le prochain chapitre (chapitre 4).

La combinaison des critères relatifs au système racinaire avec les critères relatifs au diamètre permet de ne garder que 5 simulations. Ces 5 simulations correspondent à 5 jeux

2. <http://cran.r-project.org/web/packages/lhs/>

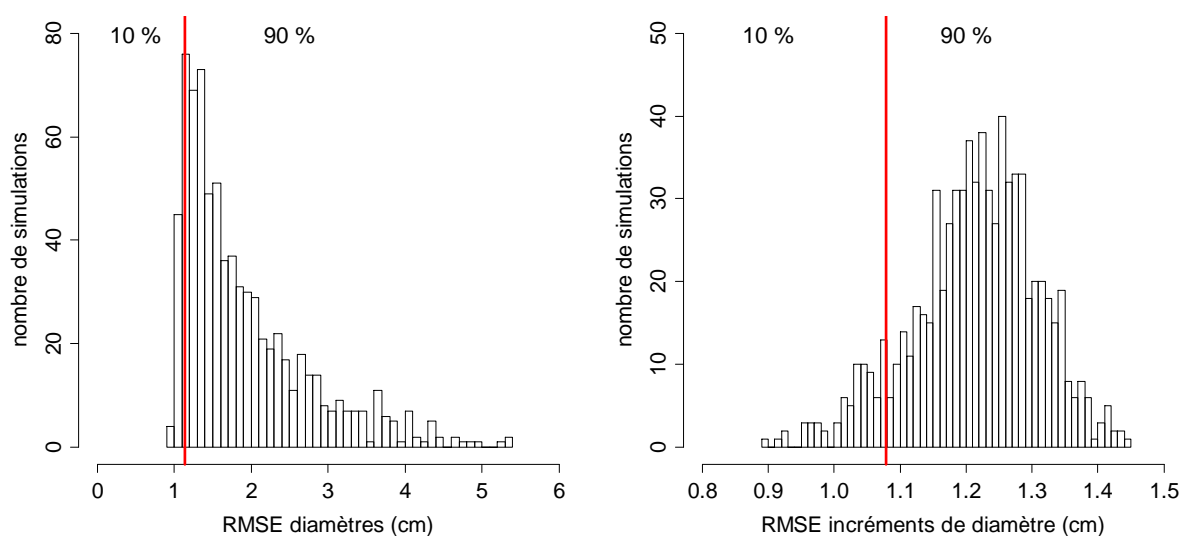


Figure 3.2.1: Histogrammes de RMSE entre valeurs simulées et observées pour les diamètres et les incréments de diamètre. La ligne rouge indique le seuil du premier décile.

de paramètres qui ne sont pas départageables avec les critères retenus : ils conduisent à la simulation de dynamiques de croissance en diamètre similaires (figure 3.2.2) et de dynamiques d'expansion racinaire compatibles avec nos mesures.

3.2.1.3 Description des jeux de paramètres retenus

La figure 3.2.3 permet de situer ces 5 jeux de paramètres dans l'espace de variation de départ (tableau 3.1). L'utilisation des critères racinaires a opéré une sélection sur les paramètres α (seuil de colonisation racinaire) et $t_{1/2}$ (demi-vie des racines fines), dont les faibles valeurs permettent de simuler une colonisation rapide du sol par le système

Table 3.3: Valeurs simulées à la fin de l'année 2009 pour quelques variables caractéristiques. R^* : valeur cible pour le ratio $C_L/(C_L + C_{FR})$ où C_L et C_{FR} sont les biomasses de feuilles et de racines fines; C_{FR} : biomasse de racines fines (Kg C); C_{CR} : biomasse des racines de structure; cumul PPN : cumul productivité primaire nette (Kg C) depuis la plantation.

Jeu de paramètre	n° 168	n° 398	n° 474	n° 488	n° 747
DBH (cm)	22.6	22.5	22.6	22.5	22.1
R^*	0.65	0.72	0.68	0.63	0.66
C_{FR} (kg C)	3.5	2.5	3	3.8	3.4
C_{CR} (kg C)	14	12.5	9.4	13.4	12
LUE (gC.MJ ⁻¹)	0.73	0.69	0.70	0.73	0.73
cumul PPN (kg C)	242	230	229	240	232

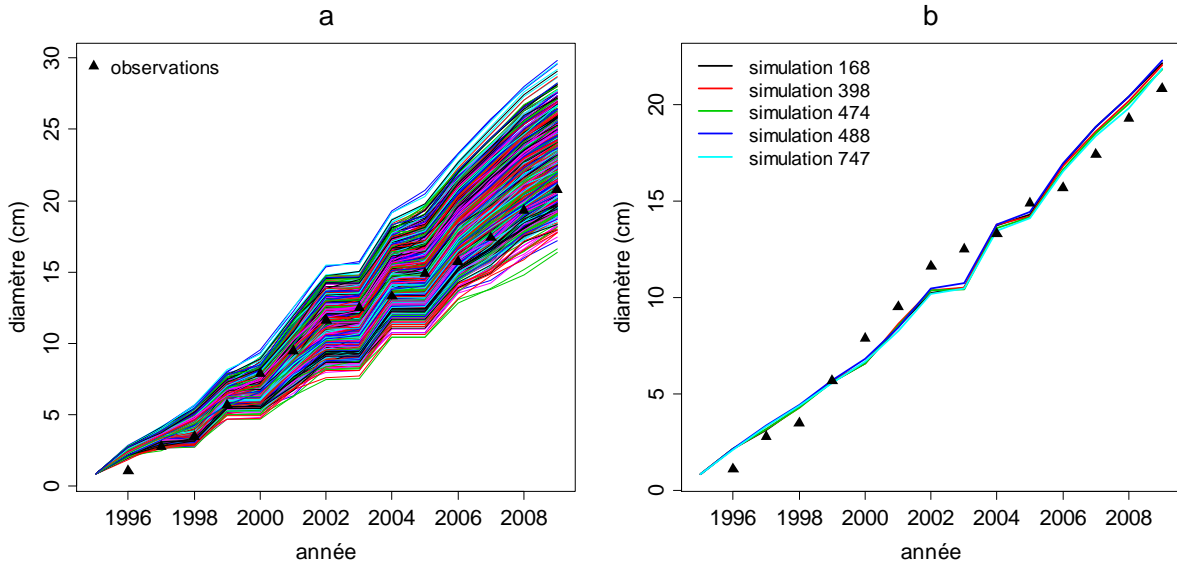


Figure 3.2.2: Dynamiques de diamètre observées et simulées pour l'ensemble des simulations (a) et pour les 5 jeux de paramètres retenus (b)

racinaire. Les critères relatifs au diamètre ont sélectionné de faibles valeurs de LUE_{max} . Les jeux de paramètres retenus diffèrent essentiellement par les valeurs prises par les 6 paramètres restants, relatifs à la réaction des arbres au stress hydrique en termes d'allocation aérien/souterrain (k_d , Φ_W et ΔR_{max}), à la relation entre racines fines et racines de structure ($\alpha_{CR/FR}$) et à l'opportunité racinaire (φ et ρ).

Nous avons vu dans le chapitre 1 que la géométrie aérienne des arbres simulés par Hi-sAFe est déduite du DBH par des relations d'allométrie, dont nous avons gardé les paramètres constants dans cet exercice de calibration. La croissance en diamètre ayant été utilisée comme critère de sélection, les 5 arbres simulés pour les 5 jeux de paramètres retenus ont des diamètres très proches (tableau 3.3) et sont similaires d'un point de vue aérien, même si l'arbre 747 est légèrement plus petit que les 4 autres. Par contre, ces arbres diffèrent d'un point de vue souterrain. Les arbres 168, 488 ont une allocation aérien/souterrain plus réactive au stress hydrique que les arbres 398 et 474 (figure 3.2.3, paramètres Φ_W et ΔR_{max}), ce qui les conduit à mettre en place plus de racines fines (tableau 3.3) et permet ainsi un meilleur accès à la ressource hydrique. En conséquence, ces arbres ont une efficacité de conversion du rayonnement (LUE) et donc une productivité primaire nette (PPN) légèrement augmentées (tableau 3.3). Cette augmentation de la PPN compense l'investissement racinaire, et les arbres 168 et 488 ont des croissances aériennes semblables aux arbres 398 et 474. L'arbre 747 a un comportement proche de celui des arbres 168 et 488 d'un point de vue allocation aérien/souterrain, mais une croissance aérienne légèrement plus faible.

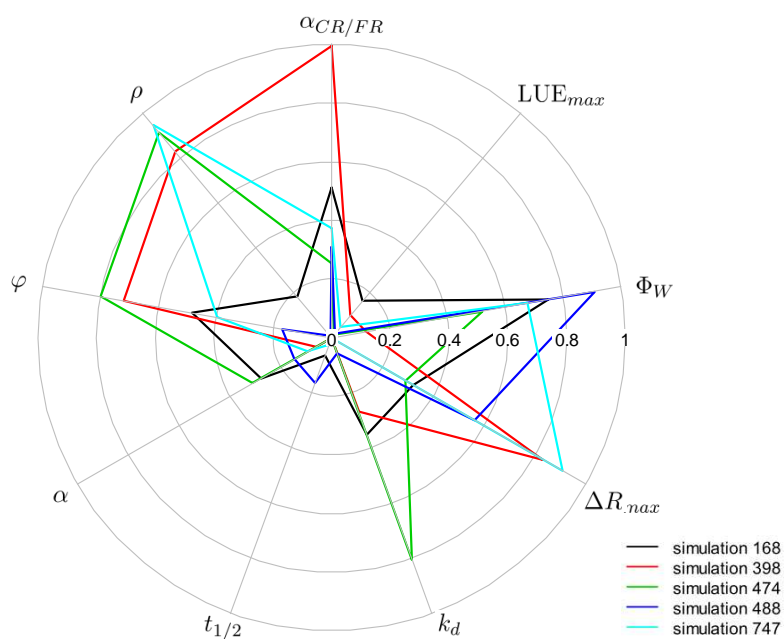


Figure 3.2.3: Position des 5 jeux de paramètres retenus dans l'espace de variation des paramètres. Chaque rayon du diagramme correspond à un paramètre, et les valeurs extrêmes 0 et 1 correspondent aux bornes inférieure et supérieure de l'intervalle de variation de ce paramètre (voir tableau 3.1).

3.2.1.4 Conclusion

La majorité des paramètres explorés dans cette procédure de calibration concernent la réaction aux stress hydriques et le fonctionnement racinaire des noyers. Nous verrons dans le chapitre 4 que dans le contexte pédoclimatique de Restinclières, les noyers simulés par Hi-sAFe sont très peu contraints par la ressource hydrique. Cette information permet d'expliquer l'incapacité de la procédure de calibration proposée ici à restreindre notre incertitude sur les valeurs de ces paramètres, qui ont peu d'influence sur la croissance globale des arbres puisque l'eau n'est pas limitante.

Le modèle sAFe-Tree peut être considéré comme sur-paramétré, dans le sens où les données dont nous disposons sont insuffisantes pour départager les 5 jeux de paramètres restants. Il faut par ailleurs garder à l'esprit que ces jeux de paramètres ne sont qu'une partie des possibles, puisque le plan d'échantillonnage réalisé est loin d'être exhaustif. Pour progresser sur le paramétrage de ces aspects de sAFe-Tree, il sera nécessaire d'utiliser des données issues de parcelles avec des conditions pédoclimatiques plus contraignantes. Une calibration effectuée à la fois sur la parcelle A3 de Restinclières (stress hydrique mineur) et sur des parcelles où le stress hydrique est majeur (sites expérimentaux de Castries et Notre Dame de Londres par exemple) devrait être envisagée à l'avenir. En attendant, nous déconseillons vivement l'utilisation du modèle pour explorer le comportement de noyers dans un contexte où la ressource hydrique est fortement limitante.

Pour cette raison, toutes les expérimentations virtuelles présentées dans la partie 4.5 seront réalisées dans le contexte pédoclimatique de Restinclières, c'est à dire dans des conditions où nos incertitudes sur le paramétrage du modèle semblent avoir peu d'influence sur le fonctionnement du système. A titre de contrôle, chaque simulation réalisée sera répétée avec deux jeux de paramètres choisis pour être les plus contrastés : les jeux de paramètres 168 et 398.

Chapitre 4

Analyse du fonctionnement d'un système agroforestier virtuel

4.1 Introduction

Nous avons présenté dans le chapitre 1 l'ensemble des formalismes du modèle Hi-sAFé, et dans le chapitre 3 l'ensemble des données d'entrée et paramètres permettant d'instancier ce modèle. L'ensemble de ces formalismes, données et paramètres définissent un système agroforestier virtuel, qui a été conçu pour représenter un système agroforestier réel : l'association noyer hybride - blé dur située sur la parcelle A3 du domaine expérimental de Restinclières.

Notre connaissance du fonctionnement du système réel est très limitée et souvent hypothétique. Sa mesure est difficile, ne peut être que partielle, périodique, entachée d'un certain niveau d'erreur lié aux échantillonnages, et limitée au passé. A l'inverse, le système agroforestier virtuel a un fonctionnement a priori parfaitement connu, du moins au pas de temps où sont définis les processus et à l'erreur numérique ou de codage près, et il est intégralement mesurable avec exactitude, y compris vers le futur (Krohs, 2006). Ces caractéristiques en font un outil d'exploration et d'analyse puissant, dont on espère qu'il pourra nous apporter des informations sur le fonctionnement du système réel, ou sur la manière d'aborder ce système par la métrologie ou l'expérimentation.

On distingue généralement deux niveaux d'évaluation des modèles : la vérification et la validation (Bellocchi et al., 2010). La vérification d'un modèle consiste à vérifier que son fonctionnement est conforme au modèle conceptuel du modélisateur. Le travail de vérification permet de déceler des erreurs informatiques, algorithmiques, ou mathématiques. La validation consiste à évaluer l'adéquation entre le modèle et le système réel, en comparant des données simulées avec des données observées. A partir du moment où il est "vérifié", un modèle peut être considéré comme un outil de recherche opérationnel, dans le sens où il permet d'intégrer des connaissances, d'explorer des hypothèses, d'identifier des lacunes dans les connaissances, ou d'orienter des observations et des ex-

périmentations (Oreske, 2003). La validation est un processus long, au cours duquel le modélisateur se forge une opinion sur le degré de similitude entre le modèle et le système réel, sur la capacité du modèle à reproduire des phénomènes observés et à prédire des phénomènes non observés. Certains auteurs préfèrent ne pas utiliser le terme “validation” (Oreskes & Belitz, 2001; Aumann, 2007), qui porte à penser qu'un modèle peut être bon ou mauvais, vrai ou faux, et recommandent l'utilisation de termes plus neutres, comme “évaluation”.

Ce chapitre présente l'analyse détaillée d'un système agroforestier virtuel, conçu pour représenter l'association noyer hybride - blé dur de la parcelle A3 du domaine de Restinclières, et sa comparaison avec les témoins agricole et forestier virtuels correspondants. Cette analyse a un double objectif :

1. Un objectif d'évaluation du modèle. L'analyse détaillée d'une simulation permettra (1) d'évaluer la cohérence globale du fonctionnement du modèle et de ses composantes, c'est à dire de vérifier que les ordres de grandeur des variables d'état simulées sont réalistes ou que les relations de cause à effet sont logiques par exemple, (2) de s'assurer que le système simulé fonctionne conformément aux hypothèses formulées lors de la conception du modèle, et (3) de comparer lorsque c'est possible des variables simulées avec les données expérimentales dont nous disposons ou des valeurs issues de la littérature. Les deux premiers points relèvent de la vérification du modèle, alors que le troisième peut être considéré comme une première étape du processus de “validation”.
2. Un objectif de compréhension et d'exploration : l'analyse du partage des ressources et la compréhension des déterminismes du rendement dans une simulation de référence peuvent permettre (1) de nous aider à comprendre certains aspects du fonctionnement réel du système, (2) d'identifier des propriétés intéressantes du système qui pourraient être explorées par expérimentation virtuelle ou qui devraient être vérifiées expérimentalement, et (3) d'acquérir une expertise sur le fonctionnement du modèle qui sera utile pour la compréhension des résultats d'autres simulations, que nous ne pourrions pas toutes analyser exhaustivement (partie 4.5).

L'organisation spatiale de la parcelle simulée, le choix des témoins forestier et agricole correspondants, ainsi que l'ensemble des données d'entrées et paramètres sont présentés dans le chapitre 3. La simulation présentée dans ce chapitre correspond au jeu de paramètre 168 retenu par la procédure de calibration de sAFe-Tree (voir section 3.2.1). Afin de simuler le fonctionnement du système sur le cycle complet des arbres, de l'ordre de 40 ans pour des noyers sur cette parcelle afin d'atteindre un diamètre suffisant pour une valorisation commerciale, la série climatique réelle a été prolongée jusqu'à 2035 (les noyers ont été plantés en 1995), par des tirages aléatoires avec remise d'années dans la série réelle 1991-2009.

Nous proposons une analyse du fonctionnement du système agroforestier virtuel structurée en trois parties. Dans un premier temps, nous nous intéresserons au partage de la lumière entre espèces, et à son évolution en lien avec la croissance aérienne des arbres.

Nous nous concentrerons ensuite sur le partage de la ressource hydrique, en lien avec le fonctionnement racinaire des noyers. Nous analyserons finalement le déterminisme des rendements et rendements relatifs des deux espèces, et enfin de la productivité globale du système, mesurée par son LER.

4.2 Croissance aérienne des noyers et partage de la lumière

La lumière est une ressource pour laquelle la compétition entre arbres et cultures est asymétrique, dans le sens où la lumière disponible pour les cultures est complètement déterminée par la transmittance du peuplement d'arbres. On s'attend donc à ce que l'évolution du partage de la lumière entre espèces, au cours de la rotation agroforestière, soit déterminée par l'évolution de la dimension des arbres et de la géométrie des houppiers. Pour cette raison, nous commencerons cette partie par l'analyse du développement aérien des noyers, avant de nous intéresser à l'interception du rayonnement par les noyers, et finalement à l'utilisation globale du rayonnement par le système agroforestier.

4.2.1 Développement aérien des noyers

4.2.1.1 Valeurs simulées

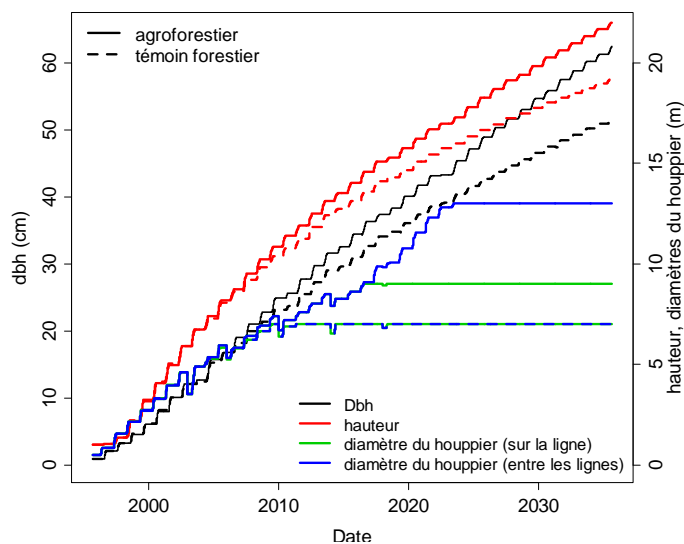


Figure 4.2.1: Croissance aérienne simulée d'un arbre en parcelle forestière et d'un arbre en parcelle agroforestière. Les plateaux atteints pour les diamètres de houppier correspondent aux espacements entre arbres sur et entre les lignes (7 m par 7 m pour le TF, 13 m par 9 m pour l'AF).

Les dynamiques simulées pour la croissance en hauteur et en diamètre des arbres en situation agroforestière (AF) et forestière (TF) sont très proches pendant les 10 premières années (voir figure 4.2.1). A partir de 2007 (12 ans), on commence à observer une différence entre les deux systèmes : les arbres agroforestiers se développent plus vite que les arbres forestiers. Après 40 ans de simulation les arbres AF font 22 m de haut pour 62.5 cm de diamètre, contre 19 m de haut pour 52 cm de diamètre pour les arbres TF. Dans le témoin forestier, où les arbres sont plantés à 7 m par 7 m, les houppiers se touchent dès 2009, ce qui met fin à leur expansion latérale. En AF, les houppiers se rejoignent sur le rang (9 m entre arbres) en 2016, ce qui entraîne une accélération de leur développement au dessus des allées cultivées. En 2023, c'est à dire 28 ans après le début de la simulation, les houppiers des arbres agroforestiers se rejoignent entre lignes voisines (13 m entre arbres), le couvert est alors complètement refermé. De ces dynamiques de croissance des houppiers résultent des dynamiques de surface foliaire semblables en début de simulation (1996-2010), et divergeant à partir de 2010 lorsque les houppiers des arbres forestiers arrêtent leur croissance horizontale (figure 4.2.2). Les points d'inflexion dans les dynamiques de surface foliaire (2010 en TF, 2023 en AF) correspondent aux années d'arrêt de croissance horizontale des houppiers. En fin de simulation, la surface foliaire individuelle des arbres agroforestiers (380 m²) est presque égale au double de celle des arbres forestiers (200 m²). Le LAI (Leaf Area Index) du peuplement est alors égal à 4.1 m².m⁻² en TF contre 3.2 m².m⁻² en AF.

4.2.1.2 Comparaison des croissances en diamètre mesurées et simulées

La dynamique de croissance en diamètre pendant les 15 premières années a été utilisée comme critère pour la calibration du modèle (section 3.2.1, figure 3.2.2). Nous avons vu lors de cette calibration que le détail de la dynamique de diamètre des arbres n'était pas reproduit fidèlement par le modèle. La figure 4.2.3 présente les incréments de diamètre simulés et observés. Pour la phase de calibration, nous avons utilisés les valeurs mesurées en fin d'année (courbe verte) et les valeurs simulées au 31/12 (courbe noire). Les incréments de diamètre simulés expriment une plus grande variabilité interannuelle que les incréments de diamètre mesurés, et ils ont une dynamique en opposition de phase. En revanche, si l'on considère les incréments annuels de valeur moyenne sur l'année (courbe rouge) pour la variable simulée, on obtient une dynamique d'incréments de diamètres beaucoup plus satisfaisante. Cette apparente contradiction entre valeurs moyennes et valeurs en fin d'année peut s'expliquer de la manière suivante. Hi-sAFe ne modélise pas explicitement la gestion des réserves de carbone. Au printemps, tout le carbone disponible est alloué à la mise en place des feuilles et des racines, et à la croissance du houppier. La croissance en diamètre se fait majoritairement après la période d'expansion foliaire, c'est à dire pendant les mois d'août, septembre et octobre, et elle dépend exclusivement des assimilats de l'année en cours. En réalité, la croissance en diamètre des arbres se fait en majeure partie au printemps et en début d'été (e.g. Skomarkova et al., 2006), c'est à dire en partie sur les réserves de l'année précédente.

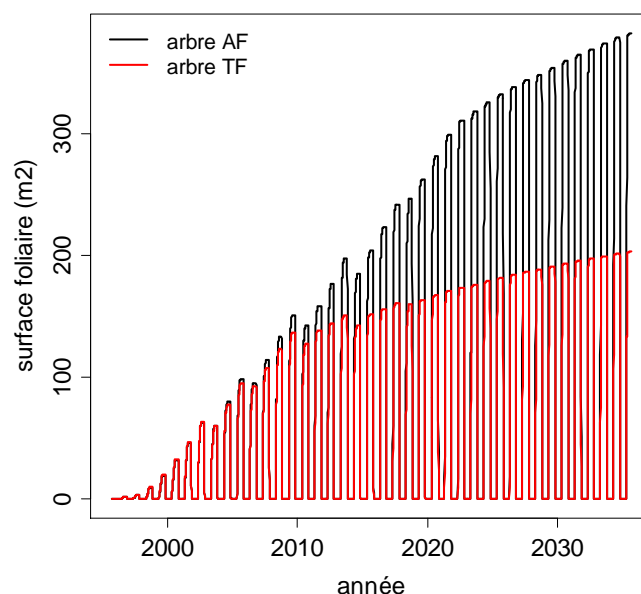


Figure 4.2.2: Evolution simulée de la surface foliaire des noyers forestiers (TF) et agroforestiers (AF). Les oscillations de surface foliaire correspondent aux variations saisonnières. Les diminutions de surface foliaire entre deux années successives sont le résultat des élagages.

De 1996 à 2000, le modèle a tendance à sous-estimer les incréments de diamètre, et ne rend pas compte correctement de leur variabilité interannuelle. De 2001 à 2009 au contraire, les incréments de diamètre ont tendance à être surestimés, et la variabilité interannuelle est très bien reproduite par le modèle. La tendance générale à la sous-estimation puis à la surestimation des incréments de diamètres résulte probablement de la difficulté à définir des relations d'allométrie entre diamètre du tronc et biomasse des différents compartiments qui soient valables pour de très petits arbres. Par exemple, la relation entre DBH et hauteur n'a réellement de sens que pour des arbres suffisamment hauts. De même, la distinction entre branches et tronc, ou la relation de proportionnalité entre biomasse de branche et volume du houppier ne sont peut-être pas valables pour les très petits arbres. Il est possible de poser plusieurs hypothèses pour expliquer la mauvaise simulation de la variabilité interannuelle pendant les premières années. En particulier, il est possible que la contrainte hydrique subie par les jeunes arbres soit sous-estimée, soit par une sous-estimation de la demande évaporative, soit par une surestimation du volume de sol colonisé par les systèmes racinaires. En conclusion, le modèle Hi-sAFe n'est pas capable, en l'état du moins, de rendre compte de la dynamique interannuelle de croissance des noyers pendant leur phase d'installation.

Les valeurs de diamètres simulés à 40 ans, de l'ordre de 50 à 60 cm, sont dans les

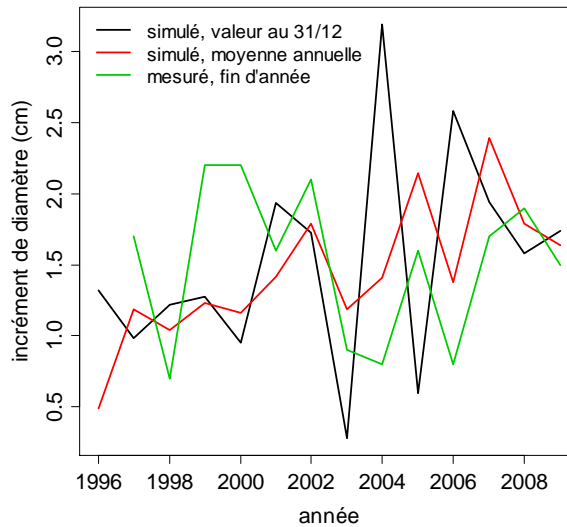


Figure 4.2.3: Incréments de diamètre du tronc à 1.3 m de hauteur simulés, et mesurés dans la parcelle A3 de Restinclières, de 1996 à 2009.

ordres de grandeur reportés par Becquey (1997) pour les noyers à bois plantés dans de très bonnes conditions pédoclimatique, ce qui est le cas de Restinclières.

Dans le modèle Hi-sAFé, la hauteur des arbres, les dimensions des houppiers et la surface foliaire sont directement reliés au diamètre par les relations d'allométrie, qui ont été paramétrées sur les noyers de Restinclières. Ces variables caractérisant le développement aérien pendant ces 15 premières années ne peuvent donc pas être utilisées pour juger de la qualité du modèle. Nous ne disposons pas de mesures ni n'avons trouvé de références dans la littérature permettant d'évaluer la plausibilité des autres variables caractéristiques du développement aérien (dimensions du houppier, surface foliaire) pour des noyers de grande taille.

Le modèle prédit une fermeture du couvert agroforestier des noyers à 28 ans environ, pour des arbres ayant alors un diamètre de l'ordre de 40 cm. L'évolution des techniques de valorisation du bois permet aujourd'hui de vendre très correctement des grumes de cette dimension. Le gestionnaire aura alors le choix de récolter les arbres, ou de les laisser grossir, mais avec une culture intercalaire peu productive.

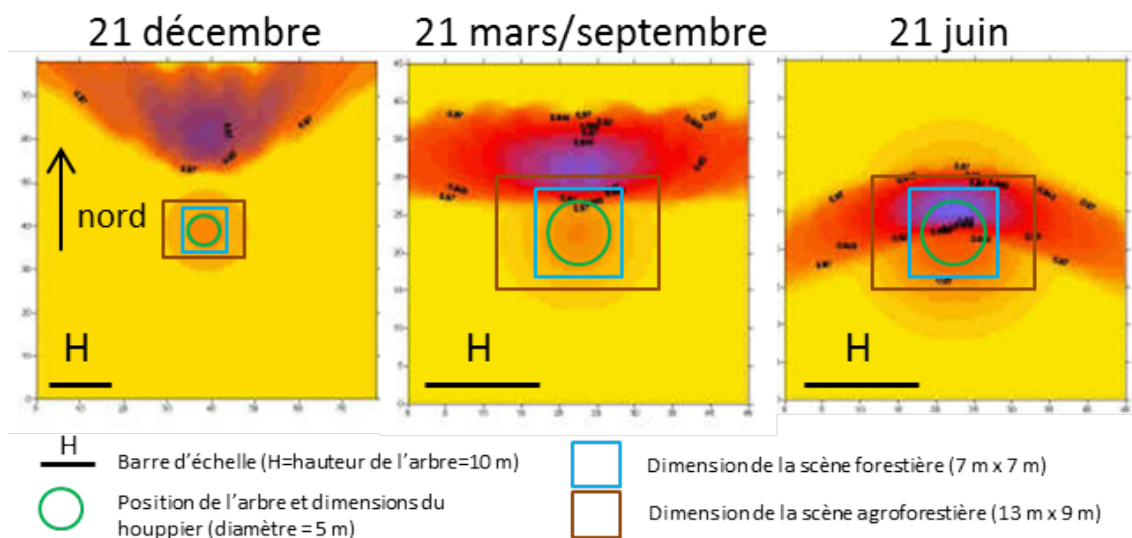


Figure 4.2.4: Ombre journalière simulée d'un arbre isolé. Exemple d'un arbre ellipsoïde de 10 m de haut élagué à 2,5 m, avec un houppier de 5 m de diamètre, et une surface foliaire constante au cours de l'année. Le calcul de l'ombrage a été fait au solstice d'hiver (21 décembre), au solstice d'été (21 juin), et aux équinoxes (21 mars et 21 septembre), à une latitude de 43°N. L'ombre du tronc n'est pas représentée sur ces cartes. Attention, la carte du 21 décembre n'est pas à la même échelle que les deux autres car l'ombre est projetée beaucoup plus loin

4.2.2 Une forte complémentarité temporelle pour l'utilisation du rayonnement

4.2.2.1 L'interception du rayonnement par les arbres

La forme de la distribution au sol du rayonnement autour d'un arbre n'est pas intuitive. C'est une fonction de la géométrie de l'arbre (dimensions, surface foliaire) et de la distribution angulaire du rayonnement incident (répartition entre rayonnement diffus et direct, trajectoire du soleil). Pour le rayonnement diffus, l'ombre d'un arbre ellipsoïde a une forme concentrique, centrée sur l'arbre. Sous nos latitudes, la forme et les dimensions de l'ombre directe d'un arbre sont très variables au cours de l'année (fig. 4.2.4).

La quantité de rayonnement intercepté par un arbre isolé (potentiel d'interception) au cours d'une saison de croissance est obtenue par intégration de ces cartes journalières, en tenant compte de la dynamique de surface foliaire. La figure 4.2.5a présente l'évolution de ce potentiel d'interception, et de la quantité de lumière réellement interceptée en peuplement pour les arbres agroforestiers et forestiers. La différence entre ces deux valeurs est un indicateur de la compétition entre arbres pour l'accès à la lumière. L'intensité de la compétition entre arbres peut être appréhendée par comparaison des quantités d'ombre à l'intérieur et à l'extérieur de la scène sur les cartes de la figure 4.2.4. La dif-

férence de potentiel d'interception entre AF et TF (figure 4.2.5a) est une conséquence des dynamiques de croissance du houppier et de développement de la surface foliaire. A cette différence vient s'ajouter une différence d'intensité de la compétition pour la lumière, que l'on peut quantifier par un indice de compétition pour la lumière, défini comme le ratio de la lumière interceptée sur le potentiel d'interception. Ainsi, on observe dès la 4^{ème} année de simulation (1999) une différence entre les deux parcelles : les arbres forestiers, plantés à moindre espacement, se font plus de compétition que les arbres agroforestiers (figure 4.2.5a). Cette différence s'accroît jusqu'en 2010, puis s'estompe progressivement par la suite : l'espacement plus important entre les arbres agroforestiers est compensé progressivement par le développement de houppiers plus volumineux.

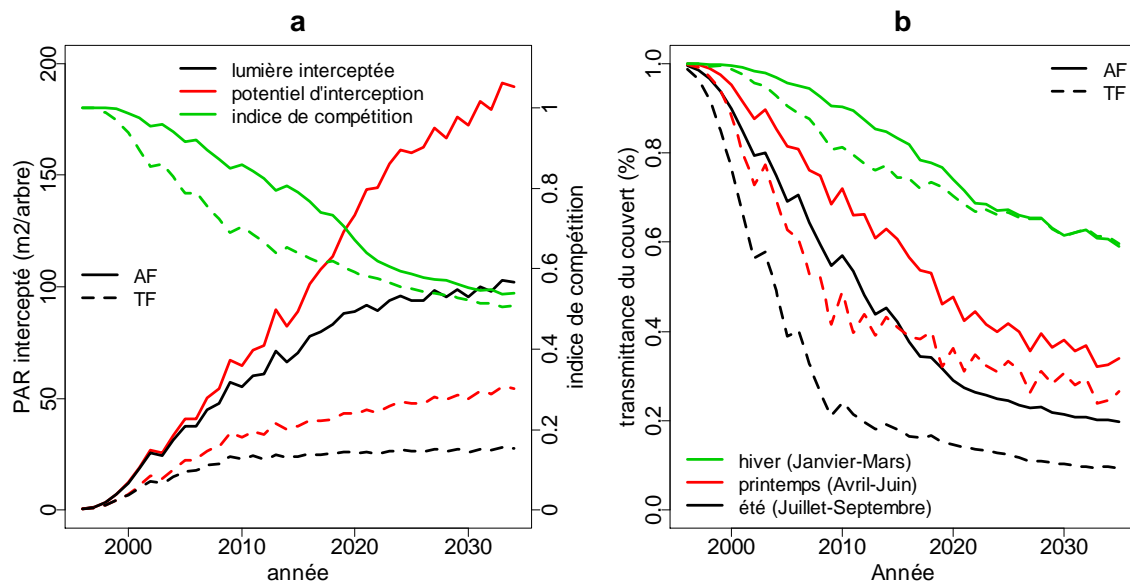


Figure 4.2.5: Evolution de l'interception du rayonnement par les arbres en AF et en TF. **a** : moyennes annuelles pour les quantités de rayonnement interceptées, le potentiel d'interception par arbre, et l'indice de compétition pour la lumière entre arbres. Le rayonnement intercepté et le potentiel d'interception sont exprimés en $m^2 \cdot arbre^{-1}$, où $1 m^2$ correspond au rayonnement annuel incident sur une surface plane de $1 m^2$. Le potentiel d'interception est la lumière qui aurait été interceptée si l'arbre avait été isolé, c'est à dire sans compétition entre arbres. L'indice de compétition pour la lumière est défini comme le ratio entre lumière interceptée et potentiel d'interception. **b** : évolution de la transmittance (proportion de rayonnement transmis) moyenne du couvert au niveau du sol en hiver, au printemps et en été.

Les quantités de rayonnement qui sont interceptées par les arbres et transmises sous les arbres, c'est à dire disponibles pour les cultures intercalaires, dépendent non seulement de la taille des arbres et de leur disposition sur la parcelle, mais aussi de leur phénologie (débourrement, expansion foliaire, chute des feuilles). En hiver, seuls les troncs et les branches des arbres interceptent de la lumière. L'ombrage qui en résulte est très faible

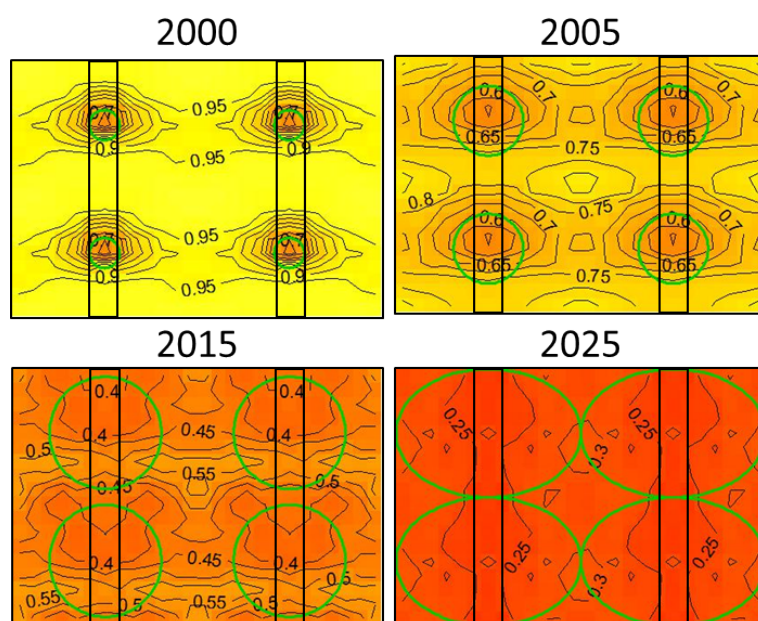


Figure 4.2.6: Cartes de répartition de la proportion simulée de rayonnement transmis au sol dans la parcelle agroforestière au solstice d'été (21 juin). Les ellipses vertes représentent les houppiers des arbres.

(<10 %) pendant les 15 premières années, mais arrive à atteindre des valeurs de l'ordre de 40 % en fin de simulation (figure 4.2.5b). L'élévation du soleil étant faible, les ombres d'arbres voisins se superposent, produisant un ombrage très homogène de la parcelle (résultat non représenté). En été, lorsque les feuilles des arbres sont pleinement développées, la proportion de rayonnement intercepté est beaucoup plus importante. Elle atteint 20 % dès 2003, 50 % en 2012, et jusqu'à 80 % en fin de simulation (figure 4.2.5b). Les ombrages les plus intenses sont atteints à l'automne avant la chute des feuilles, quand les ombres s'allongent et se superposent (figures 4.2.4 et 4.2.8a). Tant que les arbres sont petits, leurs ombres estivales sont disjointes ou peu superposées, ce qui produit un ombrage hétérogène de la parcelle (figure 4.2.6). Cette hétérogénéité s'estompe au fur et à mesure que les arbres grandissent et que leurs ombres se superposent, pour disparaître totalement en fin de simulation.

4.2.2.2 Phénologie des espèces et partage de la ressource

Dans cette simulation, le blé dur est semé le 4 novembre (chapitre 3). Il fleurit entre le 11 et le 30 mai selon les années et atteint sa maturité entre le 21 juin et le 7 juillet (figure 4.2.7). Le noyer est une espèce à débourrement tardif : la date de débourrement simulée varie entre le 24 avril et le 3 mai selon les années, et la chute des feuilles commence entre le 7 et le 30 octobre et se termine entre le 21 octobre et le 13 novembre. Pendant la majeure partie de son cycle (novembre à avril), le blé dur est donc soumis à

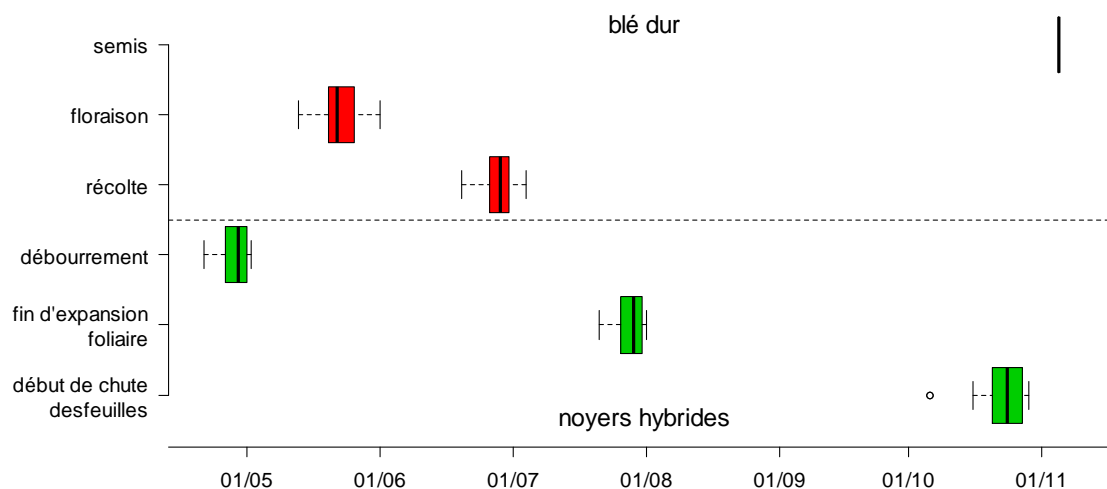


Figure 4.2.7: Dates simulées des stades phénologiques clés des deux espèces : semis, floraison et récolte (maturité physiologique) pour le blé dur ; débourement, fin d'expansion foliaire et début de chute des feuilles pour le noyer hybride. Les centres et les bords des boîtes correspondent aux valeurs médianes et aux premiers et troisièmes quartiles, les moustaches indiquent les valeurs extrêmes.

l'ombre peu intense (figure 4.2.5b) des branches et des troncs des arbres. Pendant cette partie du cycle, la quantité de rayonnement intercepté par le blé dur est proche de son potentiel d'interception (voir figure 4.2.2a pour l'exemple de l'année 2010). Comme pour les arbres, le potentiel d'interception est défini comme la quantité de lumière qui aurait pu être interceptée en absence de compétition pour la lumière par les arbres. Pour le blé, nous entendons par compétition pour la lumière la compétition exercée par les arbres uniquement, la compétition intra-spécifique n'étant pas considérée puisque le blé n'est pas modélisé à l'échelle de l'individu mais du peuplement. Les mois de mai et juin sont une période de transition entre l'ombrage peu intense de l'hiver et l'ombrage très intense de l'été (figure 4.2.5b), le blé dur est soumis pendant cette période à une compétition de plus en plus intense pour la lumière (figure 4.2.8a). Ces deux mois correspondent aussi à des étapes sensibles de l'élaboration du rendement du blé : fin de l'anthèse, floraison, remplissage des grains et maturation. Les conséquences de cet ombrage sur le rendement du blé seront discutées en détail dans le chapitre 5.

Les phénologies contrastées du blé et des noyers permettent une excellente complémentarité temporelle pour l'utilisation de la lumière, avec une période de compétition intense restreinte aux mois de mai et juin uniquement. Ainsi, le système agroforestier utilise une plus grande proportion du rayonnement annuel incident que les deux témoins, agricole et forestier (figure 4.2.8b). D'après les simulations, le témoin agricole n'utilise en moyenne que 30 % du rayonnement annuel incident : les rayonnements d'été et d'automne ne sont pas utilisés. Le témoin forestier utilise entre 50 et 60 % du rayonnement incident en fin de simulation, mais en début de rotation les petits arbres interceptent

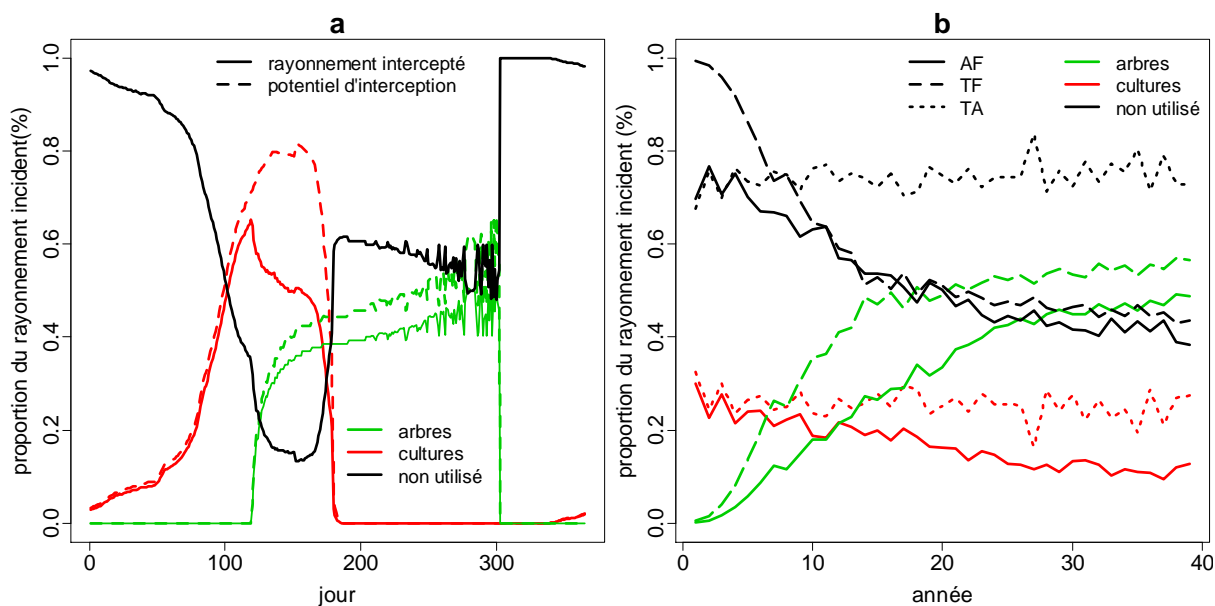


Figure 4.2.8: Répartition simulée du rayonnement dans le système agroforestier noyer/blé. a : répartition journalière du rayonnement pendant l'année 2010. b : évolution de la répartition annuelle du rayonnement, et comparaison avec les témoins agricole (TA) et forestier (TF).

très peu de rayonnement. Le système agroforestier utilise presque autant de lumière que le TA les premières années, et plus que deux autres systèmes pendant toute la fin du cycle. Il est possible de définir un coefficient relatif d'utilisation de la lumière :

$$\text{LER}_L = l_{\text{blé}} + l_{\text{noyer}} = L_{AF,\text{blé}}/L_{TA,\text{blé}} + L_{AF,\text{noyer}}/L_{TF,\text{noyer}} \quad (4.2.1)$$

La valeur de LER_L permet de comparer l'utilisation du rayonnement par le système agroforestier à un assolement des deux cultures pures, c'est une mesure de la complémentarité pour la lumière. Dans cette simulation, $l_{\text{blé}} = 0.66$ et $l_{\text{noyer}} = 0.73$: sur une rotation de 40 ans, chaque hectare du système agroforestier simulé intercepte autant de rayonnement que 0.66 ha de monoculture de blé et 0.73 ha de monoculture de noyers. Le LER d'utilisation de la lumière est donc égal à 1.39, autrement dit, l'association agroforestière permet d'augmenter de 39 % l'utilisation du rayonnement incident par rapport à un assolement des deux cultures pures.

4.2.2.3 Discussion

Nous avons montré par comparaison avec des photographies hémisphériques que le module de répartition de la lumière simulait correctement le rayonnement transmis au sol sous des noyers de petite dimension (Talbot & Dupraz, in press, cf annexe B). Ce module est par ailleurs basé sur le principe du lancer de rayons sur des arbres représentés par des formes géométriques simples, utilisé avec succès par de nombreux modèles (eg.

Bartelink, 1998; Martens et al., 2000; Courbaud et al., 2003). Il faut cependant noter que ces modèles sont sensibles au coefficient d'extinction (densité de surface foliaire), et à la manière de définir les formes géométriques pour représenter les houppiers.

Les paramètres des relations d'allométrie, qui permettent de déduire les dimensions du houppier du DBH et la surface foliaire du volume du houppier (section 1.2.2.2), ainsi que le paramètre de densité de surface de branches (WAD, $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$), qui détermine la transmittance hivernale du couvert (section 1.2.3), ont été estimés à partir de mesures sur des noyers hybrides de petite et moyenne dimension (jusqu'à 20 cm de diamètre). Il est possible que ces paramètres soient inadaptés pour des arbres plus grands, comme ceux simulés en fin de rotation, ce qui induirait des biais sur les prédictions de rayonnements intercepté et transmis par les arbres.

4.3 Croissance racinaire des arbres et utilisation de l'eau

Au même titre que l'évolution du partage de la lumière entre espèces est conditionnée par le développement aérien des arbres, on s'attend à ce que l'évolution du partage de l'eau soit influencée par leur développement souterrain. Pour cette raison, nous commencerons cette partie consacrée au bilan hydrique du système agroforestier simulé par une étude de la dynamique sur le long terme (plusieurs années) de la colonisation du sol par les systèmes racinaires des arbres. Nous nous intéresserons ensuite à la distribution spatiale des racines fines, et à sa dynamique à court terme (intra-annuelle), en relation avec la disponibilité de la ressource hydrique. Enfin, nous procéderons à une analyse des différents termes du bilan hydrique du système agroforestier, en comparaison avec les témoins agricole et forestier correspondants.

4.3.1 Dynamique d'expansion des systèmes racinaires

Rappelons que dans la version que nous avons utilisé de sAFe-Tree, la croissance racinaire est pilotée par la ressource hydrique uniquement, et contrainte par des considérations d'économie de carbone liées à la mise en place des racines de structures (voir chapitre 1). Le modèle ne tient donc pas compte de la dynamique d'acquisition des nutriments, ni de son influence sur le développement racinaire.

Pendant les 4 premières années de simulation, le système racinaire des arbres forestiers a une croissance libre, avec une forme en demi-sphère légèrement aplatie¹, l'expansion latérale étant un petit peu plus rapide que la croissance en profondeur (figure 4.3.1). Dès la 5ème année, les systèmes racinaires des arbres voisins (à la fois en x et en y) se rejoignent : leur expansion latérale est terminée. La profondeur du système racinaire des arbres forestiers entame des cycles à partir de 2001 : brusques montées suivies de redescentes progressives. Ces cycles correspondent à des "élagages souterrains" par asphyxie

1. La légère différence entre les vitesses d'expansion latérale selon les axes x et y s'explique par le fait que l'on simule un sol nu sur la ligne d'arbre, et une végétation spontanée sur le reste de la scène.

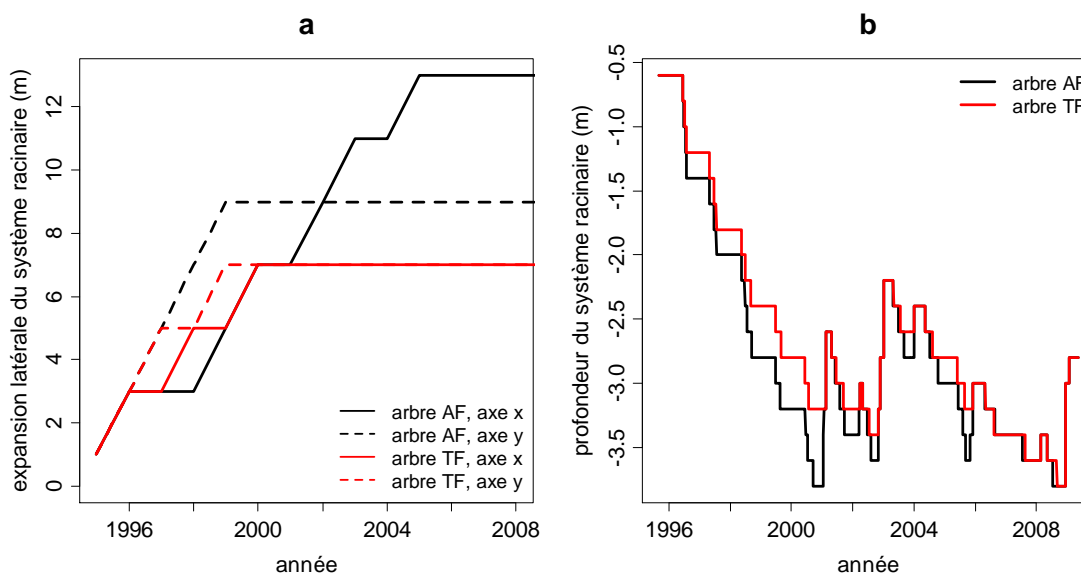


Figure 4.3.1: Croissance simulée des systèmes racinaires. **a** : expansion horizontale maximale du système racinaire en fonction du temps, selon les axes x (dans l'allée) et y (sous la ligne d'arbres). **b** : profondeur maximale d'enracinement en fonction du temps.

des horizons profonds saturés par la nappe alluviale durant les hivers très pluvieux, et à la recolonisation du sol profond les années suivantes. La topologie simulée des racines de structure fournit une représentation de l'historique de colonisation du sol par le système racinaire. Le système racinaire simulé des arbres forestiers comporte 5 pivots reflétant la colonisation verticale de la cellule de plantation de l'arbre et de ses cellules voisines (figure 4.3.2). Le reste de la scène a été colonisé horizontalement à partir de ces pivots.

La colonisation du sol par les arbres agroforestiers est radicalement différente. La croissance en profondeur est légèrement plus rapide qu'en TF (figure 4.3.1b), mais a une dynamique similaire. L'expansion latérale est accélérée sous la ligne d'arbre (figure 4.3.1a, axe y) et ralentie sous la zone cultivée (axe x). Les systèmes racinaires d'arbres voisins se rejoignent très rapidement sur la ligne d'arbres (4 ans). Ils ne se rejoignent sous la culture qu'au bout de 9 ans. Le système racinaire des arbres agroforestiers ne comporte que 3 pivots (contre 5 en TF) situés tous les trois sous la ligne d'arbres (figure 4.3.2) : cette différence peut s'expliquer par la présence des cultures intercalaires (travail du sol en surface, consommation d'eau) empêchant la formation de pivots secondaires dans l'allée cultivée. Comme pour les arbres forestiers, la colonisation du reste de la scène s'est effectuée horizontalement à partir des pivots. Il est intéressant de noter que sur la ligne d'arbres, la colonisation du sol est plus rapide en surface qu'en profondeur. Au contraire, sous la zone cultivée, c'est en profondeur que la colonisation est la plus rapide. L'observation de la topologie racinaire après 12 années de croissance illustre très bien le fonctionnement souterrain d'un arbre agroforestier tel que simulé par Hi-sAFé

(figure 4.3.3). Un réseau de racines de structure horizontales s'est développé sous la ligne d'arbres en surface et dans l'inter-rang sous la zone d'exploration de la culture (entre 1 m 50 et 2 m). Au voisinage immédiat de la ligne d'arbres, la zone d'exploration de la culture a été colonisée horizontalement depuis la ligne d'arbres. Au milieu de l'allée, le réseau racinaire développé sous la culture a émis des racines remontantes à l'intérieur de la zone d'exploration racinaire des cultures. En profondeur, le système racinaire est régulièrement élagué par les remontées de nappe hivernales. Lorsque la nappe redescend, des pivots secondaires sont émis depuis la zone non élaguée par la nappe, permettant une recolonisation rapide (uniquement verticale) des horizons profonds.

Rappelons à titre de précaution que si les topologies racinaires simulées par Hi-sAFé sont intéressantes d'un point de vue conceptuel (elles permettent une formalisation de l'allocation entre racines fines et racines de structures) et analytique (elles permettent l'analyse a posteriori de l'historique de colonisation du sol par les racines fines), elles ne prétendent aucunement reproduire de manière réaliste l'architecture complexe de systèmes racinaires réels.

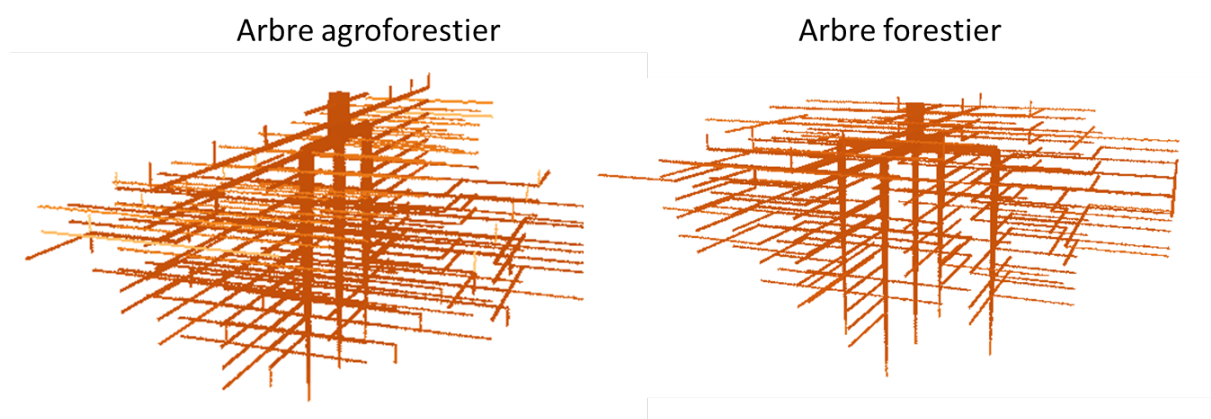


Figure 4.3.2: Topologie simulée pour les racines de structures de noyers agroforestier et forestier après 6 années de croissance

4.3.2 Dynamique et répartition verticale des racines fines

4.3.2.1 Des profils racinaires simulés très réactifs au régime hydrique

Les profils de densité racinaire simulés sont extrêmement dynamiques, et s'adaptent rapidement aux variations de teneur en eau du sol. Nous allons illustrer cette réactivité en prenant l'exemple de deux années consécutives avec des régimes pluviométriques très différents : les années 2008 et 2009.

L'automne et l'hiver 2007-2008 sont particulièrement secs, avec seulement 430 mm de pluie entre septembre 2007 et avril 2008. Les pluies de septembre 2007 (50 mm mi-septembre, 100 mm fin septembre) ne permettent une recharge du sol que dans les 50

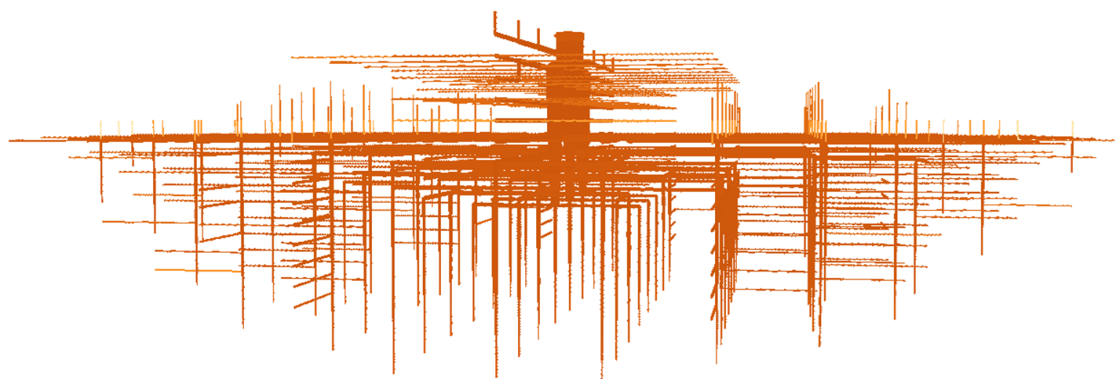


Figure 4.3.3: Topologie simulée pour les racines de structure d'un arbre agroforestier après 12 ans de croissance

premiers centimètres (fig. 4.3.4). Entre octobre 2007 et avril 2008, on relève essentiellement de petits épisodes pluvieux, rapidement évaporés par le sol ou transpirés par les cultures, à l'exception d'un épisode de 70 mm fin janvier, qui permet une recharge du sol jusqu'à 1 m de profondeur. Cet hiver-là, la nappe alluviale du Lez ne remonte que jusqu'à 3 m de profondeur après les pluies de fin janvier, et le sol reste sec entre 1.5 m et 3 m de profondeur. Les pluies de mai et juin 2008 (200 mm) permettent une bonne alimentation hydrique des cultures intercalaires (le potentiel hydrique des horizons de surface reste élevé), mais ne suffisent pas à recharger le sol profond. Lors du débourrement, les arbres agroforestiers n'ont pas de racines en surface (elles ont été détruites par le travail du sol), les horizons entre 40 cm et 1 m ont été en grande partie asséchés par les cultures intercalaires, et les horizons entre 1 m et 3 m sont restés sec depuis l'été précédent. Les arbres agroforestiers sont contraints d'utiliser l'eau disponible en profondeur, entre 3 et 4 m, ce qui explique le profil racinaire simulé à la fin du mois de mai (fig. 4.3.5). Après l'assèchement de cette zone profonde, le potentiel hydrique des arbres agroforestiers diminue (stress hydrique léger), ce qui permet une extraction de l'eau résiduelle dans les horizons entre 1 m 20 et 3 m (fig. 4.3.4), et explique le profil simulé fin septembre. Dans le témoin forestier, la moindre consommation d'eau par la végétation spontanée permet une recharge hivernale du sol jusqu'à 1 m de profondeur. En conséquence, les arbres forestiers mettent en place un profil racinaire bimodal, avec une concentration des racines fines au-dessus de 1.5 m et en dessous de 3 m.

L'hiver 2008-2009 est radicalement différent, avec plus de 1000 mm de pluie enregistrés entre octobre 2008 et avril 2009. Ces fortes pluies permettent une recharge complète du sol (fig. 4.3.4), elles entraînent par ailleurs une remontée de la nappe alluviale, conduisant à l'asphyxie totale de toutes les racines (fines et de structure) situées en dessous de 2.7 m (fig. 4.3.1b), et à une mortalité accrue des racines fines entre 1 m et 2.7 m. Les mois de mai à septembre 2009 sont extrêmement secs, avec à peine 60 mm en 5 mois. Au débourrement des arbres, après les 180 mm de pluie du mois d'avril, le sol est presque

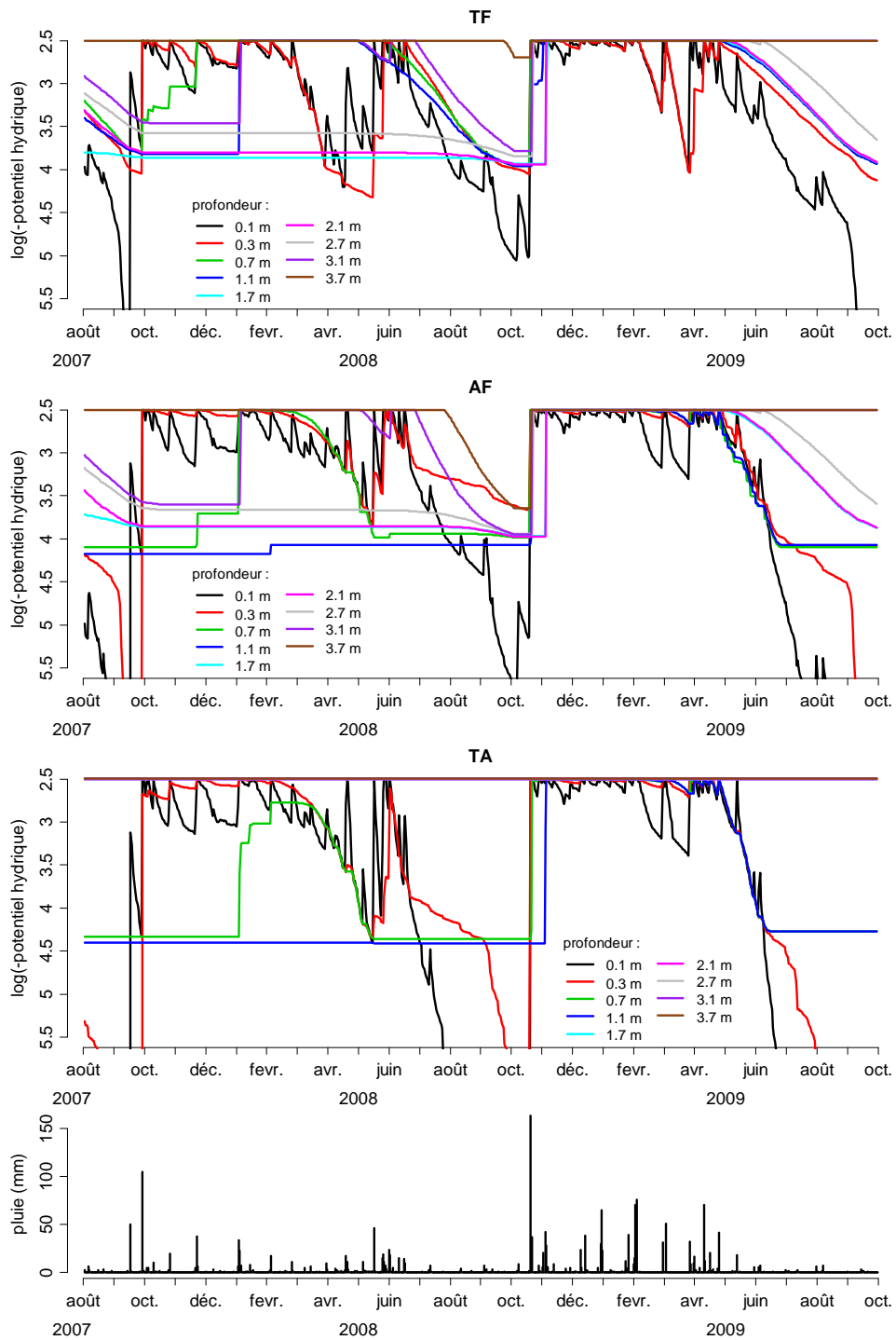


Figure 4.3.4: Evolution simulée de l'état hydrique du sol entre août 2007 et septembre 2009, dans les parcelles forestière, agricole et agroforestière (dans l'allée cultivée).

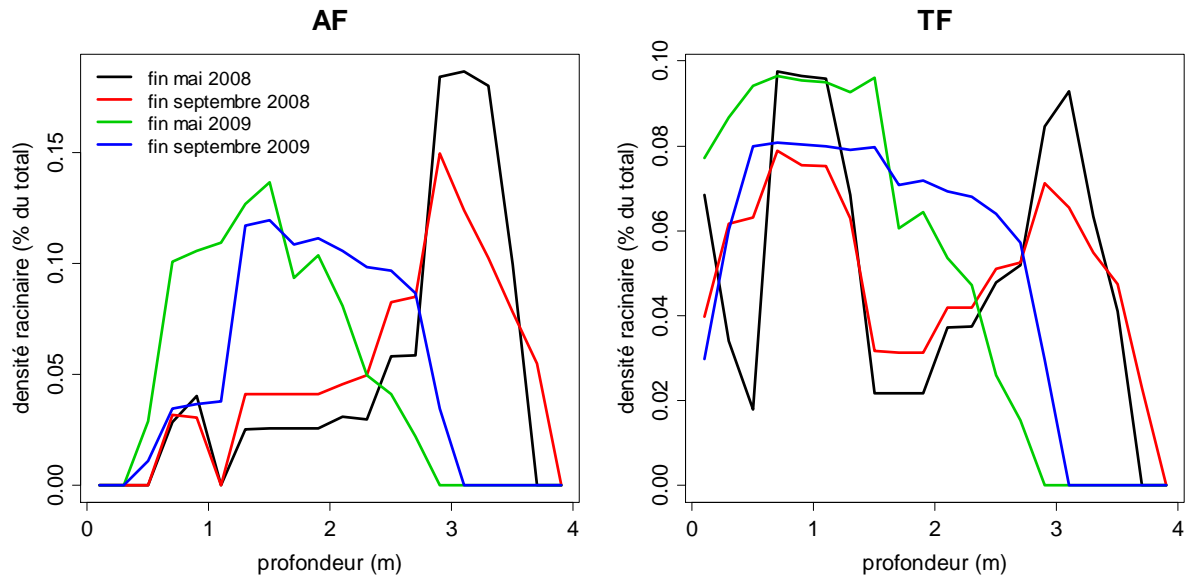


Figure 4.3.5: Profils racinaires simulés à différentes dates sous la zone cultivée en agroforesterie (à 4 m de la ligne d'arbres) et dans le témoin forestier (à 3 m de la ligne d'arbres).

à la capacité au champ, même dans la zone d'exploration des cultures. Fin mai 2009, la majorité des racines d'arbre est concentrée entre 40 cm et 2 m de profondeur. L'absence de racines fines en surface s'explique par le travail du sol, qui a détruit l'ensemble des racines jusqu'à 40 cm de profondeur au mois de novembre précédent. L'assèchement progressif du sol, accéléré par la présence des cultures, induit une déformation progressive du profil racinaire au cours du printemps et de l'été 2009. A la fin septembre, la majorité des racines fines est située entre 1.2 m et 3 m. Cette année-là, les arbres forestiers ont un système racinaire concentré en surface au printemps, et se développant progressivement en profondeur au cours de l'été.

La capacité de certains arbres à adapter la distribution spatiale de leur racines fines en fonction de la disponibilité de la ressource hydrique a clairement été démontrée par des expérimentations en conditions contrôlées (Mulia, 2005; Coutts, 1982). La modélisation explicite de ce phénomène, proposé comme explication des différences de profils racinaires mesurées entre arbres forestiers et agroforestiers par Mulia & Dupraz (2006), était une des ambitions du modèle Hi-sAFe. Nous montrons ici que cet objectif est atteint : Hi-sAFe simule bien le phénomène d'opportunisme racinaire, et ses conséquences sur la forme des profils racinaires.

L'amplitude et la vitesse de la réponse des systèmes racinaires simulés à l'hétérogénéité spatiale de la disponibilité en eau dépendent principalement de deux paramètres du modèle : le coefficient d'opportunisme racinaire (φ), qui détermine la capacité de l'arbre à allouer préférentiellement ses racines dans les zones riches en eau, et la demi-vie des racines fines ($t_{1/2}$), qui détermine le taux de renouvellement racinaire. Ces deux

paramètres ont été fixés par calibration du modèle (section 3.2.1), ce qui signifie qu'ils ne sont pas connus avec précision.

4.3.2.2 Comparaison entre profils racinaires mesurés et simulés

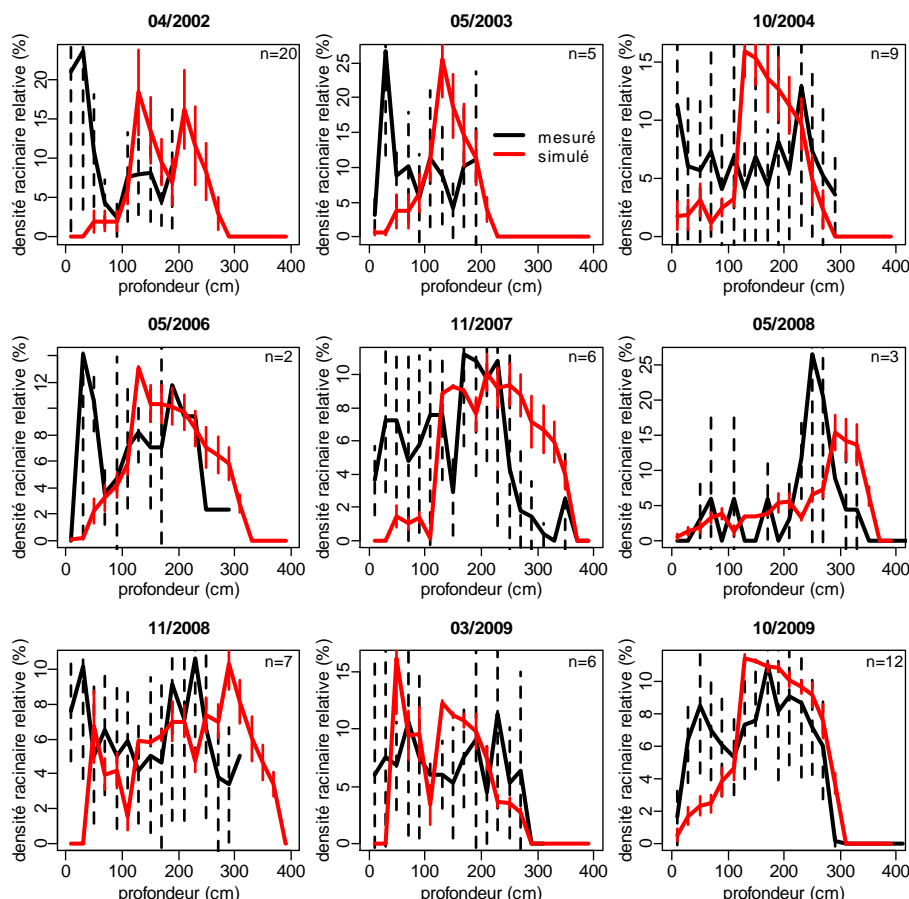


Figure 4.3.6: Profils d'enracinement mesurés et simulés sous les allées cultivées agroforestières, à différentes dates. Les profils mesurés sont des moyennes sur toutes les carottes de sol disponibles à une date donnée, à l'exclusion des prélèvements sur les lignes d'arbres. Selon les dates de mesures, le nombre de prélèvement (indiqué par n) est variable, et les répétitions correspondent à des arbres différents et/ou différentes positions dans l'allée. Pour les profils simulés, nous avons calculé des moyennes sur un transect perpendiculaire aux lignes d'arbres, avec une "carotte virtuelle" tous les mètres, sauf sur la ligne d'arbre (soit $n = 12$). Les barres d'erreur correspondent aux intervalles de confiance à 95%.

Les figures 4.3.6 et 4.3.7 présentent, à différentes dates pour lesquelles nous disposons de mesures, la comparaison entre profils racinaires simulés dans les parcelles agroforestière et forestière, et mesurés par carottages racinaires dans les parcelles agroforestière (AF, parcelle A3) et forestière (TF, parcelle A4) de Restinclières. La première information à retenir de ces graphiques est la forte incertitude (barres d'erreur) sur les mesures de

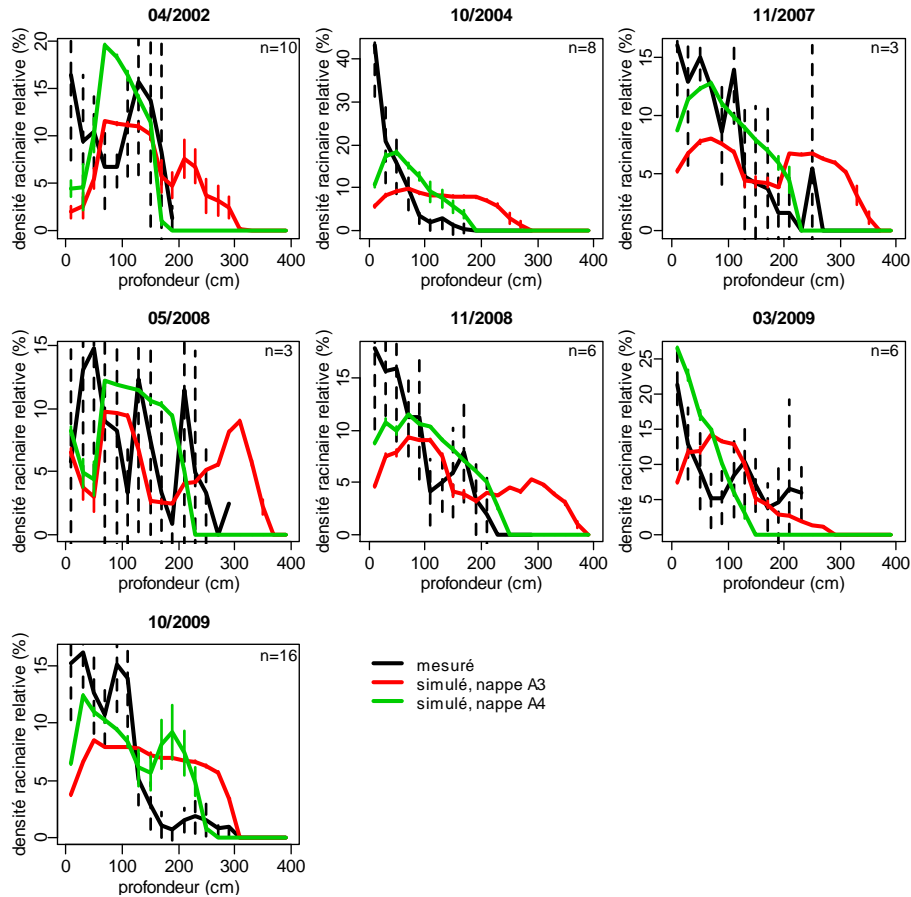


Figure 4.3.7: Profils d'enracinement mesurés et simulés en témoin forestier, à différentes dates. Les profils mesurés sont des moyennes sur toutes les carottes de sol disponibles à une date donnée. Selon les dates de mesures, le nombre de prélèvement (indiqué par n) est variable, et les répétitions correspondent à des arbres différents et/ou différentes positions dans l'allée. Pour les profils simulés, nous avons calculé des moyennes sur un transect perpendiculaire aux lignes d'arbres, avec une "carotte virtuelle" tous les mètres, soit $n = 7$. Les barres d'erreur correspondent aux intervalles de confiance à 95%. Deux simulations sont comparées ici : une simulation avec la dynamique de nappe de la parcelle A3 (parcelle agroforestière), et une avec la dynamique de nappe de la parcelle A4 (témoin forestier expérimental).

densité racinaire. Cette incertitude est liée à une forte hétérogénéité spatiale, à la petite dimension des carottes de sol (les carottes prélevées font 10 cm de diamètre et il est très fréquent de n'observer aucune racine dans une section de carotte), et au faible nombre de répétitions (explicable par le travail considérable que demande cette opération, et donc le coût élevé de la mesure).

La proportion de racines fines dans les horizons de surface (0-60 cm) est systématiquement sous-estimée par le modèle, dans l'AF (figure 4.3.6) comme dans le TF (figure 4.3.7). Cet écart peut s'expliquer par la non-prise en compte de la dynamique d'acquisition de l'azote par le modèle d'opportuniste racinaire, qui est piloté uniquement par la disponibilité de la ressource hydrique. Dans une expérience avec des noyers hybrides cultivés en pots avec un arrosage ou une fertilisation localisée, Mulia (2005) a en effet mis en évidence que les systèmes racinaires des noyers se développent préférentiellement non seulement dans les zones de sol riches en eau, mais aussi dans les zones riches en nutriments. On peut penser que la mise en place de fortes densités racinaires en surface est une adaptation permettant l'absorption des éléments nutritifs libérés par la minéralisation des litières. Notons qu'il est possible que cette mauvaise simulation des densités racinaires de surface conduise à une sous-estimation de la consommation d'eau dans les horizons superficiels, et donc de la compétition pour l'eau entre arbres et cultures.

Dans le témoin forestier virtuel utilisant les données pédoclimatiques de la parcelle A3, la proportion de racines située en profondeur est nettement plus forte que dans les mesures sur la parcelle A4. (figure 4.3.7). Il est très intéressant d'observer qu'en utilisant la dynamique réelle de nappe de la parcelle A4, mesures et prédictions sont beaucoup plus proches. C'est une forme de validation du modèle qui doit être soulignée. Ce résultat suggère que les différences de profils racinaires mesurés entre AF et TF à Restinclières ne résultent pas seulement de la présence d'une culture intercalaire, comme proposé par Mulia & Dupraz (2006), mais aussi de la différence de profondeur de nappe entre les deux parcelles. Il confirme aussi que la parcelle A4 de Restinclières ne peut être considérée comme un témoin forestier rigoureux pour la parcelle agroforestière A3 compte tenu de son régime hydrique différent en profondeur.

La présence de fortes densités racinaires en profondeur sous les cultures en agroforesterie est bien reproduite par le modèle (figure 4.3.6), même si l'amplitude et la profondeur de ces pics racinaires ne sont pas reproduites de manière exacte. La capacité des arbres agroforestiers à développer leur système en profondeur et donc à utiliser une ressource hydrique non accessible aux cultures est bien reproduite par le modèle. Etant donnée la simplicité des formalismes utilisés pour représenter les flux d'eau dans le sol² et la

2. Le formalisme "en cascade" de STICS reproduit bien l'évolution saisonnière de la réserve en eau du sol, mais il est inadapté pour la simulation fine de profils de teneur en eau au pas de temps journalier (Nadine Brisson, com. pers.). En particulier, la circulation d'eau dans la macroporosité du sol et les remontées capillaires ne sont pas modélisées dans ce travail. Le ruissellement est modélisé par des formules empiriques approximatives. Enfin, les inondations de la parcelle, certes rares, ne sont pas connues du modèle, ni les flux de ruissellement entrant venant des versants et qui peuvent parfois représenter des quantités d'eau non négligeables.

croissance des systèmes racinaires, ces performances du modèle sont très encourageantes.

4.3.2.3 Quantités de racines et turn-over racinaire

Les valeurs simulées pour les densités racinaires sont comprises entre 0 et 500 m.m⁻³. Ces valeurs sont d'un ordre de grandeur inférieur à celui mesuré par carottages racinaires sur le terrain, qui peuvent atteindre jusqu'à 9 km.m⁻³ (Mulia & Dupraz, 2006). Avec le paramétrage retenu pour la durée de demi-vie des racines fines ($t_{1/2} = 95$ jours dans cette simulation, 30 jours dans la nappe), le turn-over simulé pour les racines fines (ratio de la quantité de racines renouvelées chaque année sur la quantité totale de racines) varie de 1.5 à 2 an⁻¹ selon les années, en fonction de l'amplitude et de la durée des remontées de nappe. Dans leur méta-analyse sur les mesures de turn-over racinaire, Gill & Jackson (2000) rapportent des valeurs bien plus faibles, de l'ordre de 0.8 an⁻¹ pour les racines fines de forêts tempérées.

Ces apparentes contradictions peuvent s'expliquer par le fait que racines fines simulées et observées correspondent à deux concepts différents. Les racines fines mesurées sont des racines dont le diamètre est inférieur à 2 mm. Au sein même des racines de diamètre inférieur à 1 mm, Wells & Eissenstat (2001) ont mis en évidence chez le pommier une diversité de morphologies et de durées de vie. Ces auteurs ont observé des racines de diamètre compris entre 0.5 et 1 mm, lignifiées et avec une durée de vie importante, et à partir desquelles se développent de nouvelles racines fines, c'est à dire qui ont un rôle fonctionnel proche de celui des racines de structure de Hi-sAFe. Les racines fines simulées par Hi-sAFe sont des racines fines absorbantes. Elles ne représentent qu'une sous population des racines de moins de 2 mm, ce qui peut expliquer la différence d'ordre de grandeur entre densités racinaires simulées et observées. Les estimations de durée de vie (et donc de turn-over) racinaire sont très dépendantes de la définition des racines fines, de la méthode utilisée, de l'espèce considérée et du contexte pédo-climatique. Dans leur revue sur la dynamique des racines fines de peupliers, Block et al. (2006) rapportent des estimations de durée de vie des racines fines variables selon les études, les classes de diamètre considérées, les méthodes de mesures, la profondeur et l'état hydrique du sol, et allant de 30 à 300 jours, ce qui fait un turn-over de 1 à 12 an⁻¹. Nous avons fait le choix dans Hi-sAFe d'une représentation simple du système racinaire, avec un seul type de racines fines dont la durée de vie ne dépend que de la présence ou non de la nappe. Au regard des connaissances actuelles, le turn-over simulé par Hi-sAFe est réaliste, mais doit être considéré avec précaution. Comme les valeurs absolues de densités de racines sont très dépendantes de la définition adoptée pour ces racines, nous avons surtout raisonné en profils de densités, exprimés en % du total des racines, ce qui permet de comparer les formes d'enracinement. Cette hypothèse est raisonnable, mais sous-entend que la proportion de racines absorbantes dans le pool des racines de diamètre inférieur à 2 mm est constante, ce qui n'est probablement pas le cas.

4.3.3 Fonctionnement hydrique du système

4.3.3.1 Témoin agricole

En témoin agricole, la culture consomme (transpiration) en moyenne 215 mm (de 100 mm à 280 mm), ce qui représente 27 % de la pluviométrie annuelle moyenne. 73 % de la pluie incidente sur une parcelle cultivée en blé dur est donc ruisselée (de 60 mm à 185 mm, 110 mm en moyenne), évaporée par le sol (de 250 à 400 mm, 325 mm en moyenne) ou drainée (de 0 à 510 mm, 145 mm en moyenne). A l'échelle de la parcelle, à laquelle nous travaillons, ces flux sont considérés comme des pertes pour le système.

De novembre à mars, l'ETP est généralement inférieure à 1 mm, et prend ponctuellement des valeurs allant jusqu'à 2 mm. Etant donnée la faible surface foliaire du blé, l'évaporation du sol est la composante principale de l'évapotranspiration durant cette période (fig. 4.3.9). La consommation d'eau par le blé est concentrée sur les mois d'avril, mai et juin, avec des transpirations allant jusqu'à 6 mm.jour⁻¹, alors que la couverture du sol par le blé limite fortement l'évaporation du sol durant cette période. Les années 2010 et 2033 (fig. 4.3.9), la transpiration du blé est fortement réduite au mois de juin, traduisant un stress hydrique. Le blé transpire en moyenne 25 mm (de 10 à 50 mm) de novembre à mars, et 190 mm (de 90 à 250 mm) de avril à juin. L'évaporation du sol est répartie comme suit au cours du cycle : 85 mm (de 55 à 110 mm) de novembre à mars, 95 mm (de 55 à 140 mm) de avril à juin, et 150 mm (de 105 à 210 mm) de juillet à octobre. Les pertes d'eau par drainage sont concentrées sur la période de novembre à mars.

4.3.3.2 Témoin forestier

Le témoin forestier peut être considéré comme un peuplement fermé à partir de 2010 environ. Pour l'analyse du bilan hydrique du système, nous distinguerons le peuplement juvénile ouvert (1996 à 2010) du peuplement adulte (2010 à 2035).

Dans le peuplement adulte, les arbres consomment en moyenne 360 mm d'eau par an (de 295 à 395 mm), soit 45 % de la pluviométrie annuelle (fig. 4.3.8). La transpiration des arbres est maximale durant les mois de juin, juillet et août, avec des consommations de l'ordre de 2 à 4 mm.jour⁻¹ (fig. 4.3.9). La diminution de la transpiration pendant les mois de septembre et octobre s'explique par un raccourcissement de la durée du jour. La végétation spontanée consomme 80 mm d'eau (de 40 mm à 145 mm), principalement entre novembre et avril. L'évaporation du sol est fortement réduite par rapport au TA, avec en moyenne 200 mm par an (de 150 à 245 mm). Cette moindre évaporation du sol peut s'expliquer par (1) une couverture rapide du sol par la végétation spontanée en automne, et (2) un ombrage intense par les arbres pendant toute la période estivale. Le drainage est légèrement réduit dans le témoin forestier adulte par rapport au témoin agricole. L'enracinement profond (cf figure 4.3.1) des arbres permet une entrée d'eau supplémentaire dans le système, par utilisation de l'eau de la nappe. On peut distinguer deux modalités d'utilisation de l'eau en provenance de la nappe : (1) une utilisation

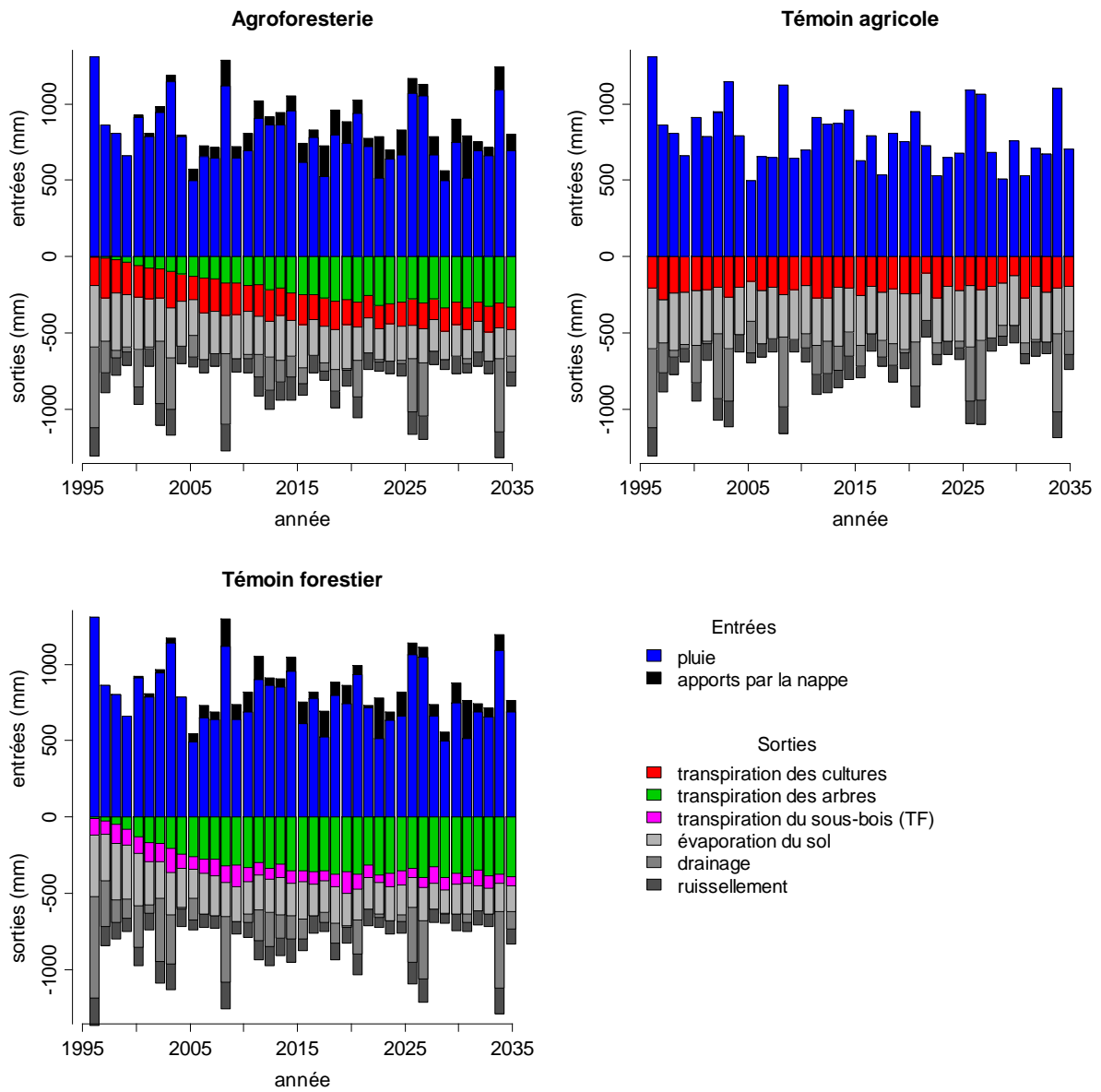


Figure 4.3.8: Décomposition annuelle du bilan hydrique simulé en AF, TA et TF.

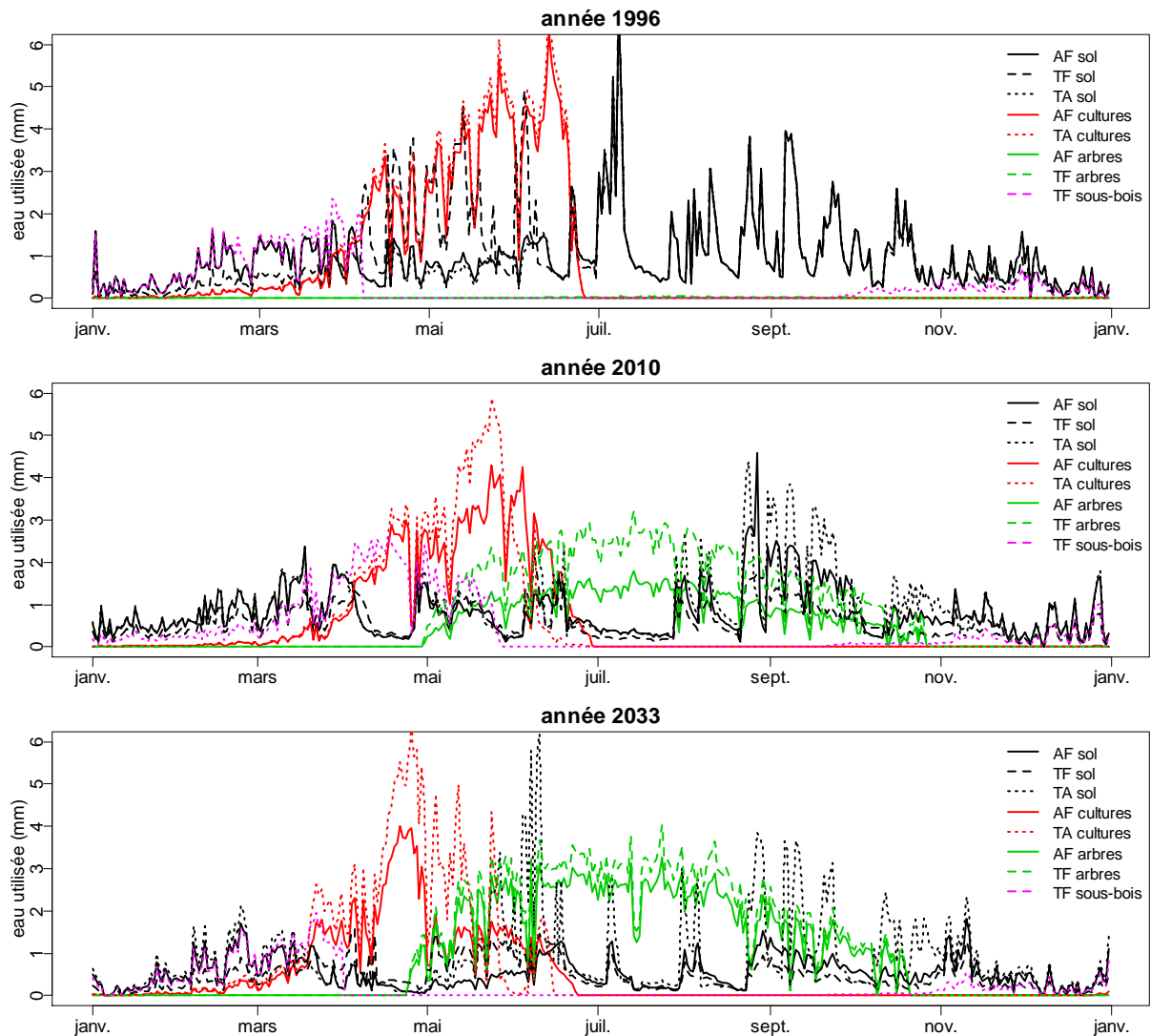


Figure 4.3.9: Dynamique intra-annuelle simulée de la consommation d'eau par les plantes et de l'évaporation du sol dans les parcelles agroforestière (AF), forestière (TF) et agricole (TA) en AF, TA et TF.

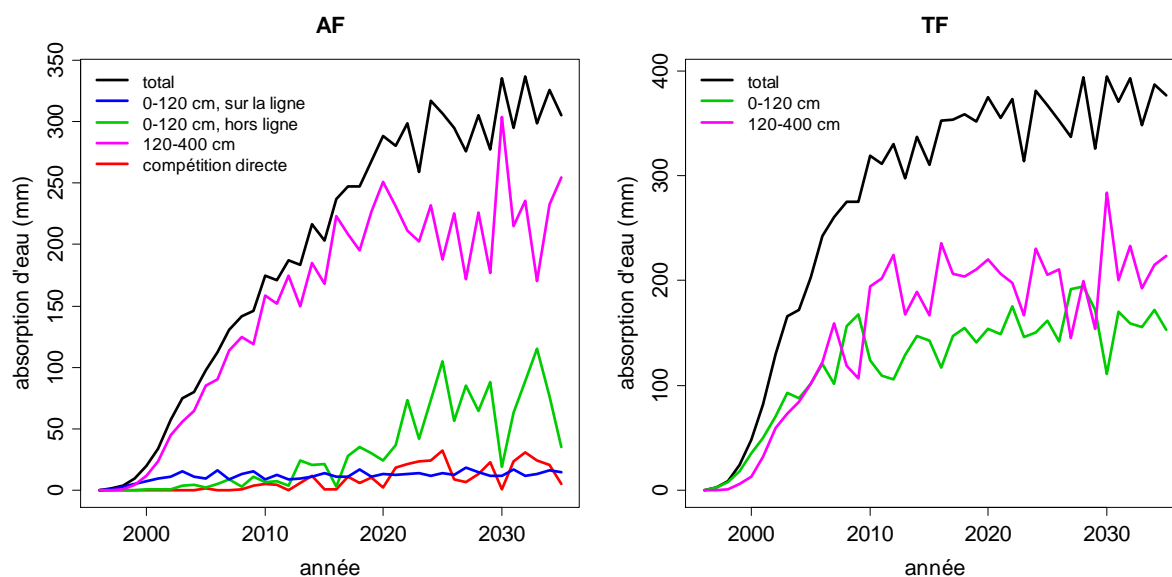


Figure 4.3.10: Répartition spatiale de l'origine de l'eau transpirée par les arbres agroforestiers et forestiers. La limite à 120 cm correspond à la profondeur maximale d'enracinement de blé dur. La "compétition directe" est définie comme la quantité d'eau extraite par les arbres dans des voxels contenant des racines des cultures.

directe par absorption d'eau dans les voxels saturés par la nappe (jusqu'à 40 mm par an), et (2) une utilisation indirecte par absorption d'eau dans des voxels non saturés, rechargés ensuite lors des remontées de nappe (entre 50 et 250 mm par an). L'importance de ce mécanisme a été mise en évidence par le modèle. Pourtant, cet apport de la nappe lié à ses fluctuations n'est pratiquement jamais cité dans la bibliographie. Entre 2010 et 2035, environ 40 % de la consommation en eau annuelle des arbres forestiers provient des horizons de surface (0-120 cm, voir fig. 4.3.10), contre 60 % en provenance des horizons profonds.

Pendant les premières années de simulation, la consommation d'eau par les arbres est une composante négligeable du bilan hydrique (fig. 4.3.8). En 1996 par exemple, les arbres forestiers transpirent environ 200 litres d'eau chacun sur l'ensemble de la saison, ce qui représente 4 mm seulement à l'échelle du peuplement. Pendant cette phase d'installation des arbres, les pertes d'eau par évaporation du sol sont aussi importantes que dans le TA, et les pertes d'eau par drainage plus importantes que dans le TA.

4.3.3.3 Système agroforestier

Pendant les premières années de simulation, les arbres agroforestiers ont un impact mineur sur le bilan hydrique du système, qui est très proche de celui du témoin agricole (fig. 4.3.8 et 4.3.9). La consommation d'eau par les arbres agroforestiers augmente progressivement jusqu'à la fermeture du couvert aux environs de 2020, date à partir de

laquelle elle se stabilise autour de 300 mm par an (de 250 à 340 mm). Sous le couvert fermé, la transpiration de la culture est réduite à 150 mm par an (de 130 à 180 mm), et l'évaporation du sol à 210 mm par an (de 175 à 240 mm). L'utilisation d'eau en provenance de la nappe et la réduction du drainage sont du même ordre de grandeur que dans le témoin forestier.

La réduction de l'évaporation du sol et de la transpiration du blé par l'ombrage des arbres (fig. 4.3.9) permet de limiter l'assèchement des horizons de surface au printemps (fig. 4.3.4), et de limiter les risques de stress hydrique pour le blé. Ce phénomène est bien visible pour les années 2010 et 2033 (fig 4.3.9) : la transpiration du blé est réduite en AF par rapport au TA, sauf au mois de juin où l'on observe une inversion des deux courbes.

Pendant les 20 premières années, on simule une complémentarité spatiale presque parfaite pour l'utilisation de l'eau : plus de 90 % de l'eau consommée par les arbres est extraite en dessous de la zone explorée par les cultures ou le long de la ligne d'arbres (fig. 4.3.10). Cette complémentarité s'explique par la dynamique de colonisation du sol par les systèmes racinaires (voir fig. 4.3.2). Les arbres agroforestiers émettent ensuite des racines qui remontent depuis les horizons profonds vers les horizons de surface dans la zone cultivée (fig. 4.3.3). La fraction de l'eau transpirée provenant de ces horizons de surface augmente progressivement (fig. 4.3.10) pour prendre des valeurs fluctuant entre 10 et 40 % en fin de simulation. La compétition directe des noyers sur le blé reste néanmoins limitée, la majeure partie de cette absorption de surface ayant lieu après la récolte du blé (fig. 4.3.10).

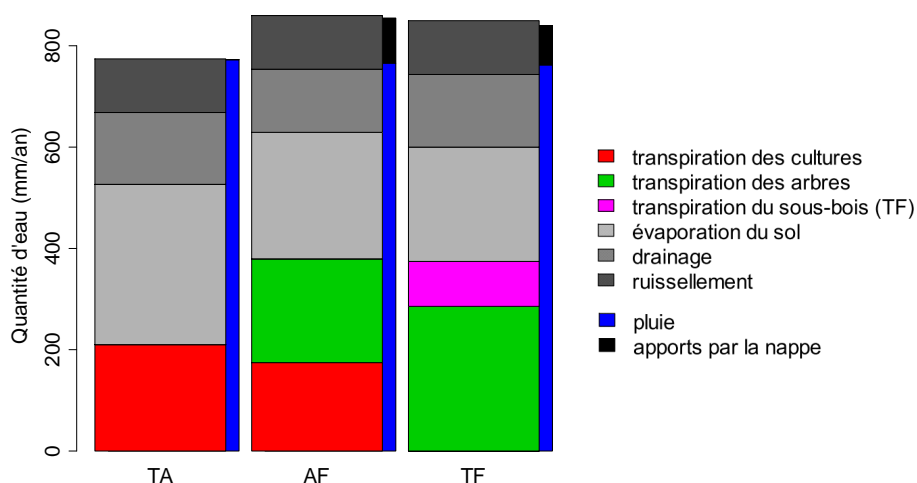


Figure 4.3.11: Bilan hydrique des trois systèmes (AF, TA, TF) intégré sur 40 ans.

Au bilan (figure 4.3.11) , sur l'ensemble de la rotation simulée (40 ans), la consom-

mation d'eau par le blé agroforestier est réduite de 16 % par rapport au TA, et celle des noyers est réduite de 29 % par rapport au TF. La consommation totale en eau du système agroforestier s'élève à 390 mm, soit une augmentation de 81 % par rapport au TA (215 mm.an⁻¹) et de 34 % par rapport au TF (290 mm.an⁻¹). Cette consommation représente 49 % de la pluviométrie totale en AF, contre 37 % pour le TF et 27 % pour le TA. Comme pour la ressource lumineuse, il est possible de définir un coefficient relatif d'utilisation de la ressource en eau :

$$\text{LER}_W = t_{\text{blé}} + t_{\text{noyer}} = T_{AF,\text{blé}}/T_{TA,\text{blé}} + T_{AF,\text{noyer}}/T_{TF,\text{noyer}} \quad (4.3.1)$$

où le symbole T représente la quantité d'eau transpirée. Dans cette simulation, on a $t_{\text{blé}} = 0.84$ et $t_{\text{noyer}} = 0.71$, le LER_W est donc égal à 1.55. Cette valeur indique une forte complémentarité entre les espèces pour l'accès à la ressource hydrique. Contrairement à la complémentarité pour la lumière, la complémentarité pour l'eau est une complémentarité partiellement active, car elle résulte de la plasticité racinaire des plantes associées : l'assèchement des horizons de surface par le blé dur conduit les noyers à puiser une plus grande quantité d'eau dans les horizons profonds, inaccessibles aux cultures. Dans la situation modélisée ici, on peut penser que ce phénomène est favorisé par les décalages phénologiques entre espèces, le régime pluviométrique et la présence d'une ressource hydrique abondante en profondeur. En effet, l'assèchement des couches de surface par le blé dur commence bien avant le débourrement des noyers, ce qui permet d'avoir une forte différence de teneurs en eau entre horizons de surface et horizons profonds dès le débourrement, favorisant la mise en place de racines fines en profondeur. La faible pluviométrie estivale permet de conserver un sol relativement sec en surface (figure 4.3.4), ce qui limite le développement des racines d'arbres dans la zone d'exploration des cultures (entre 0 et 120 cm). Le contre-exemple du printemps 2009 est révélateur de la sensibilité de la complémentarité spatiale au régime des pluies : en raison des fortes pluies des mois de mars et avril 2009, il n'y a aucun gradient de teneur en eau en fonction de la profondeur lors du débourrement des arbres (fig. 4.3.4), qui allouent alors une part significative de leur racines fines en surface (fig. 4.3.5).

En fin de simulation, le modèle simule certaines années une consommation d'eau non négligeable (jusqu'à 100 mm) par les arbres dans les horizons de surface après la récolte du blé (4.3.10, courbe verte). Les fortes pluies d'automne et d'hiver permettent presque systématiquement une recharge du premier mètre de sol, et cette consommation d'eau de surface par les arbres en été n'a aucune répercussion sur le rendement du blé de l'année suivante. On peut toutefois supposer que si un hiver aussi sec que l'hiver 2007-2008 (voir fig. 4.3.4) se produisait en fin de cycle, la consommation d'eau en surface par les arbres aux mois de septembre et octobre pourrait provoquer un stress hydrique précoce du blé dur.

4.3.3.4 Discussion

Demandes en eau et transpiration des arbres et des cultures

En l'absence de mesures directes de transpiration des arbres ou des cultures, il est difficile de valider ou d'invalider ces termes du bilan hydrique simulé. Les ordres de grandeur de transpiration des jeunes arbres sont parfaitement cohérents avec les informations trouvées dans la littérature pour des arbres isolés ou en verger (Green & McNaughton, 1997; Sinoquet et al., 2001; Pereira et al., 2006). Sinoquet et al. (2001) ont mesuré la transpiration sur plusieurs branches d'un noyer de 144 m² de surface foliaire (ce qui correspond à nos arbres simulés en 2010 environ) dans une plantation à 100 arbres.ha⁻¹. Pour une journée ensoleillée de plein été, ils reportent des transpirations comprises entre 1 et 2 g.min⁻¹ et par m² de feuilles, selon l'heure de la journée et la position des branches. En intégrant ces valeurs, on obtient des transpirations de l'ordre de 100 à 200 litres par jour et par arbre, soit 1 à 2 mm par jour à l'échelle du peuplement, ce qui correspond à nos valeurs simulées dans la parcelle agroforestière (85 arbres.ha⁻¹) pour l'année 2010 (figure 4.3.9). De même, les ordres de grandeur de transpiration par le couvert arboré fermé, de l'ordre de 3 à 4 mm.jour⁻¹ pour des journées ensoleillées d'été, sont en accord avec les valeurs rapportées par (Vertessy et al., 1997) et (Davi et al., 2005) par exemple.

Hi-sAFé prévoit une forte réduction de l'évaporation du sol et de la demande en eau des cultures par rapport au témoin agricole. Des réductions significatives de l'évaporation du sol ont été documentées pour des cultures en couloir au Kenya (Jackson & Wallace, 1999; Keen, 2008), et pour des systèmes agroforestiers associant café et arbres d'ombrage au Mexique (Lin, 2010) par exemple. Yunying & Dalmacio (1991) ont mis en évidence une réduction importante de la transpiration du blé dans des systèmes agroforestiers à base de paulownia. De même, l'effet protecteur de haies brise vent a été documenté dans de nombreuses situations (voir Nuberg, 1998 pour une revue). Ces effets sont modélisés de manière très simple dans Hi-sAFé, alors qu'ils résultent de phénomènes complexes (Brenner, 1996; Cleugh, 1998). En effet, la présence d'arbres dans une parcelle (agroforesterie) ou en bordure de parcelle (haies) a des conséquences à la fois sur les composantes radiative et convective de la demande évaporative du sol et des cultures. A proximité immédiate des arbres (jusqu'à 2 ou 3 fois la hauteur), l'ombre portée des arbres diminue la composante radiative de la demande évaporative. Les modifications de la composante convective sont plus difficiles à appréhender, et ont été étudiées sur des haies principalement. Une des principales fonctions des haies est la réduction de la vitesse du vent, qui contrairement à la réduction du rayonnement, cantonnée au voisinage immédiat de la haie, peut être mesurée jusqu'à 25 ou 30 fois la hauteur des arbres (Brandle et al., 2004). La réduction de la vitesse du vent a tendance à réduire la demande évaporative, mais elle peut aussi conduire à une augmentation de la température de l'air, et donc indirectement du déficit de pression de vapeur et de la demande évaporative (Cleugh, 1998). Enfin, la transpiration des arbres tend à augmenter l'humidité de l'air, et donc à diminuer le déficit de pression de vapeur (Wallace, 1996). Les modifications du microcli-

mat induites par des haies et leurs conséquences sur les cultures voisines ont fait l'objet de nombreux travaux de modélisation (Easterling et al., 1997; Mayus et al., 1998; Qi et al., 2001; Huth et al., 2002; Mize et al., 2008), mais aucun modèle n'a été développé, à notre connaissance, pour décrire ces phénomènes dans des systèmes agroforestiers, dans lesquels l'organisation du couvert est fondamentalement différente.

Le formalisme adopté pour Hi-sAFé considère que la demande évaporative totale de la parcelle (arbres, cultures et sol) est donnée par l'évapotranspiration de référence, et que cette demande est répartie entre composantes comme le rayonnement solaire. A l'échelle du système agroforestier, cela revient à considérer que la structure du couvert n'a pas d'influence sur la demande évaporative totale. Du point de vue des cultures, cela revient à considérer que la présence des arbres a des effets similaires sur les composantes convective et radiative de la demande évaporative. Les conséquences de ces simplifications demandent à être évaluées, soit par des mesures directes de l'évaporation du sol et de la transpiration des arbres et des cultures, soit par comparaison avec un modèle plus explicite sur ces aspects.

Complémentarité pour l'utilisation de l'eau

Dans la simulation présentée ici, on observe une complémentarité presque parfaite pour la ressource en eau entre le blé dur et les noyers hybrides. La présence de racines fines de noyers en profondeur dans le système agroforestier de Restinclières a clairement été démontrée par Mulia & Dupraz (2006). La capacité de différentes espèces d'arbres à extraire de l'eau en provenance des horizons profonds lorsque les horizons de surface sont secs a été mise en évidence à l'aide de marqueurs isotopiques dans de nombreuses situations (e.g. Asbjornsen et al. (2008); Eggemeyer et al. (2009)). La capacité des noyers agroforestiers à valoriser l'eau de la nappe et des horizons profonds en été, lorsque les horizons de surface sont secs, principale explication de la complémentarité simulée, est à notre avis indiscutable.

Il faut toutefois rappeler que le modèle a tendance à sous-estimer la proportion de racines fines des arbres situées dans les horizons de surface, probablement à cause de la non prise en compte de la disponibilité des éléments minéraux dans la modélisation de l'opportunisme racinaire. De plus, la résistance longitudinale des racines aux flux d'eau, ainsi que la composante gravitationnelle du potentiel hydrique, ne sont pas prises en compte dans la modélisation de l'absorption d'eau par les arbres. A potentiel hydrique du sol homogène, l'absorption d'eau par les arbres se fait donc, d'après le modèle, indifféremment proche ou loin du collet, en surface ou en profondeur. Pour ces deux raisons, il est possible que nous sous-estimions la contribution des arbres à l'assèchement des horizons de surface après un événement pluvieux, lorsque les potentiels hydriques du sol dans les horizons de surface et dans les horizons profonds sont similaires, ce qui conduirait à une sous-estimation de la compétition pour l'eau dans les horizons de surface. La période de compétition directe entre les noyers et le blé dur étant restreinte dans le temps aux mois de mai et juin, pendant lesquels les précipitations sont peu abon-

dantes (12 % de la pluviométrie annuelle en moyenne), ce phénomène a probablement une importance quantitative limitée en ce qui concerne le bilan hydrique du système et la complémentarité pour l'eau. Nous verrons cependant dans la section 4.4.2 que le blé dur est fréquemment sujet au stress hydrique à la fin de son cycle. Une faible erreur sur la contribution des noyers à l'assèchement des horizons de surface au printemps peut donc potentiellement conduire à un biais significatif sur la simulation du rendement du blé dur agroforestier.

4.3.4 Fonctionnement azoté

Dans la version actuelle de Hi-sAFé, l'influence des arbres sur le cycle de l'azote dans le système agroforestier n'est prise en compte que via leur consommation d'azote minéral. L'ensemble du cycle de l'azote, mis à part cette consommation par les arbres, est simulé par le modèle STICS. Le module sAFé-Tree a été paramétré de manière à ne pas réagir à la contrainte azotée : la LUE et l'allocation aérien/souterrain ne sont pas affectées par le manque d'azote, et l'automate racinaire ne se développe pas préférentiellement dans les zones de sol où l'azote est disponible. Les paramètres concernant les teneurs en azote optimales de différents compartiments ont été fixées de manière à reproduire une consommation d'azote réaliste par les noyers, et à partir d'analyses de tissus (feuilles) effectuées sur nos parcelles ou publiées (bois, racines) en bibliographie.

Dans cette simulation, les arbres agroforestiers consomment 800 Kg d'azote par hectare sur l'ensemble de la simulation, soit 20 Kg par hectare et par an en moyenne. La restitution des litières n'étant pas modélisée, ces 800 Kg sont une sortie nette pour le système sol-culture. Pendant les 15 premières années, l'absorption d'azote par les arbres se fait essentiellement sur la ligne d'arbres et sous la zone d'exploration des cultures. Ensuite, une fraction croissante puis majoritaire de l'absorption se fait dans la zone de sol explorée par les cultures, après la récolte. A partir de 10 ans, l'absorption d'azote par les noyers n'est pas suffisante pour maintenir une concentration optimale dans les différents compartiments. Cela signifie soit que nous sous-estimons la consommation d'azote des noyers de Restinclières, soit qu'ils sont en déficit azoté. A partir de la dynamique de biomasse simulée (dimensions des compartiments, turn-over racinaire et foliaire, élagages), il est possible de calculer approximativement quelle aurait été la consommation azotée des arbres s'ils avaient systématiquement satisfait leur demande. On obtient par ce calcul une consommation totale de 2600 Kg.ha⁻¹ sur 40 ans, dont 1600 auraient été restitués par les litières au sens large (feuilles : 1100, racines fines : 420, branches : 100, racines de structure : 10) et 1000 immobilisés dans la biomasse. Ce résultat suggère que l'écart entre consommation simulée et consommation optimale (2600-800=1800) est du même ordre de grandeur que ce qui aurait été restitué par les litières si cette restitution avait été modélisée (1600). Les sorties d'azote du système sol-culture imputables aux noyers sont donc d'un ordre de grandeur acceptable. Les dynamiques inter- et intra-annuelles de l'effet net des arbres sur la disponibilité en azote pour les cultures ne sont cependant probablement pas bien simulées.

Nous verrons dans la section 4.4.2 que le stress azoté simulé pour les cultures agroforestières est systématiquement plus faible que pour les cultures en témoin agricole, ce qui signifie que la consommation d'azote par les arbres, dans cette simulation, est une composante négligeable de l'interaction arbres-cultures. Pour cette raison, nous n'analyserons pas plus en détail le cycle de l'azote, mais garderons à l'esprit que la compétition pour l'azote exercée par les arbres sur les cultures est peut être sous-estimée par le modèle.

4.4 Rendements des noyers, du blé et de la parcelle agroforestière

4.4.1 L'élaboration du rendement relatif par arbre

4.4.1.1 Analyse de la décomposition du rendement relatif

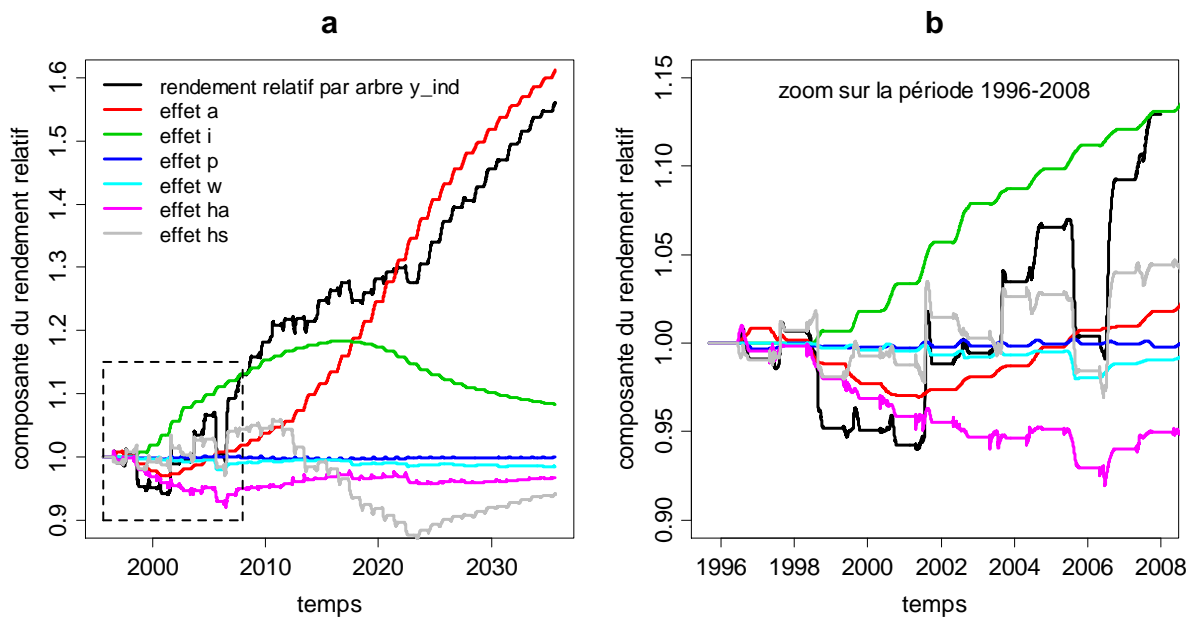


Figure 4.4.1: Evolution inter-annuelle du rendement relatif par arbre (y_{ind}) et de ses composantes, intégré sur l'ensemble de la simulation (a) ou sur la période 1996-2008 seulement (b). A chaque pas de temps, y est donné par le produit de ses 6 composantes. a : capacité d'interception, i : compétition lumineuse, p : effet de la phénologie sur la LUE, w : effet du stress hydrique sur la LUE, ha : effet de l'allocation aérien/souterrain, hs : effet de l'allocation intra-aérien.

Pour simplifier les analyses, nous assimilerons le rendement des arbres au volume de tronc simulé. En fin de simulation, c'est à dire après 40 ans de croissance, le volume de

tronc par arbre atteint 2.2 m³ en AF contre 1.4 m³ en TF . Le rendement relatif par arbre (ou individuel) est défini comme le ratio entre ces deux valeurs : $y_{ind} = Y_{ind,AF}/Y_{ind,TF}$. Sa valeur finale est égale à 2.2/1.4 = 1.56. A l'initialisation, y_{ind} est égal à 1 : les arbres agroforestiers et forestiers sont identiques. Pendant les premières années, y_{ind} diminue légèrement (figure 4.4.1), il augmente ensuite pour redevenir supérieur à 1 à partir de 2003 et atteindre finalement 1.56 en fin de simulation .

Nous avons proposé dans le chapitre 2 une méthode (RYD, pour Relative Yield Decomposition) permettant de décomposer le rendement relatif simulé en plusieurs facteurs relatifs aux processus impliqués dans son déterminisme. L'application de cette méthode au rendement relatif par arbre mène à la décomposition suivante (voir section 2.7 pour le détail des calculs) :

$$y_{ind} = lrh = [ai][pw][h_a h_s] \quad (4.4.1)$$

Les termes a et i sont des termes relatifs à l'interception du rayonnement ($l = ai$) : a est une mesure de la différence de capacité d'interception du rayonnement (fonction de la surface foliaire et de la géométrie du houppier) entre arbres AF et TF, et i est une mesure de la différence d'intensité de la compétition pour la lumière entre arbres entre les deux parcelles. Les termes p et w sont des effets relatifs à l'influence de la phénologie des arbres et des stress hydriques sur l'efficacité de conversion du rayonnement ($r = pw$). Enfin, les termes h_a et h_s caractérisent les différences entre arbres AF et TF en ce qui concerne la proportion de carbone alloué à la croissance aérienne relativement à la croissance souterraine (h_s) et la proportion de carbone aérien alloué au tronc relativement aux branches et aux feuilles (h_a). Le produit $h = h_a h_s$ est le ratio des indices de récolte (fraction de carbone allouée au tronc) entre arbres AF et TF.

La diminution de y_{ind} en début de simulation s'explique principalement par les effets ha et a négatifs³ (figure 4.4.1b). L'effet h_a négatif indique une allocation plus importante vers les compartiments racinaires en AF qu'en TF, qui peut s'expliquer par : (1) le travail du sol, qui détruit les racines de surface dans les allées cultivées, et oblige les arbres agroforestiers à renouveler une plus grande partie de leurs racines, et (2) l'assèchement du sol par les cultures, qui incite à développer un système racinaire plus profond donc plus coûteux en racines de structure, et augmente l'intensité des stress hydriques, favorisant ainsi l'allocation vers les racines. L'effet a négatif reflète le développement d'une capacité d'interception du rayonnement moins importante par les arbres AF que par les arbres TF. Cet effet résulte de l'allocation préférentielle vers les racines (h_a), qui pénalise la croissance aérienne et donc la mise en place de surface foliaire : a est un effet de rétroaction positive⁴.

3. Dans une décomposition multiplicative, la valeur neutre est le 1, et une valeur inférieure (supérieure) à 1 diminue (augmente) le résultat du produit. Par abus de langage, nous qualifierons de "nuls", "positifs" ou "négatifs" les termes égaux, supérieurs ou inférieurs à 1.

4. Rétroaction positive est la traduction du terme anglo-saxon "feedforward". Contrairement au "feedback", qui a une tendance à amortir un phénomène, un "feedforward" a un effet amplificateur.

Dès 2000, on observe un effet i positif, traduisant une moindre compétition pour la lumière entre arbres dans le système agroforestier que dans le système forestier. Cet effet s'explique simplement par une densité de plantation plus faible dans le système agroforestier que dans le témoin forestier. A partir de 2002, il devient suffisamment important pour compenser h_a , et inverser la tendance décroissante et auto-amplificatrice de a . Il atteint son maximum en 2016, et diminue ensuite, indiquant que la compétition entre arbres est devenue presque aussi intense dans le système agroforestier que dans le système forestier. A partir de 2020, l'effet a devient la composante majeure du rendement relatif par arbre. Cet effet a positif s'explique par l'effet i positif, par l'arrêt de croissance horizontale des houppiers dans le TF, et par des rétroactions positives (l'effet a s'auto-amplifie).

Les effets p et w , effets du vieillissement des feuilles et du stress hydrique sur l'efficacité de conversion du rayonnement (LUE), sont très faibles : les LUE sont très semblables pour les deux systèmes. Dans cet exemple de simulation avec un sol profond et la présence d'une nappe, les stress hydriques des arbres sont peu intenses et peu durables, et ont donc peu d'influence sur la LUE moyenne. Les stress hydriques légèrement plus intenses en AF qu'en TF ont un effet direct sur la LUE (w) à peine visible, mais ont des répercussions plus importantes sur le rendement via l'effet h_a .

Le terme h_s renseigne sur la proportion du carbone aérien qui est alloué au tronc ou, autrement dit, qui n'est pas alloué aux branches ou aux feuilles. Pour comprendre son évolution, il faut considérer trois aspects : (1) le ratio entre volume de houppier (dont dépendent les biomasses de feuilles et de branches) et volume de tronc diminue lorsque les arbres grandissent, (2) le retour aux allométries après un élagage entraîne un investissement massif de carbone vers les branches, alors que (3) l'arrêt de croissance horizontale des houppiers favorise l'allocation vers le tronc. La tendance légèrement négative puis légèrement positive de h_s pendant les 15 premières années résulte du premier phénomène : les arbres AF sont légèrement plus petits puis légèrement plus grands que les TF. Les variations brusques de h_s en 2002 et 2006 sont les conséquences d'élagages : plus les arbres ont grandi depuis le dernier élagage, plus ils subissent un élagage violent. Ensuite, h_s décroît fortement jusqu'en 2020, traduisant la mise en place d'un volume de houppier beaucoup plus important en AF, et se stabilise après l'arrêt de croissance horizontale des houppiers (figure 4.2.1).

4.4.1.2 Discussion

Au bilan, les principales différences simulées entre les arbres agroforestiers et forestiers résultent de la différence d'espacement entre arbres : les arbres agroforestiers, plus espacés, se font moins de compétition pour la lumière, ($i > 1$) et mettent en place des houppiers plus volumineux ($a > 1$), mais plus coûteux en biomasse de branches ($h_s < 1$). Ces résultats sont cohérents, qualitativement du moins, avec les observations reportées dans la littérature. Dans des plantations forestières, il a en effet été montré qu'une diminution de la densité de plantation permet de réduire l'intensité de la compétition pour la

lumière entre arbres Henskens et al. (2001). Ainsi, la croissance individuelle des arbres est plus rapide que dans un peuplement à forte densité (Huang & Xu, 1999; Chaudhry, 2003; Henskens et al., 2001, 2008; Guner et al., 2010). Les arbres sont en revanche moins élancés, plus branchus, développent un houppier plus volumineux (Cabanettes et al., 1998; Gavaland et al., 2006; Hein & Spiecker, 2008), et allouent en conséquence une proportion plus importante de leur carbone aérien vers les branches et les feuilles, au détriment du tronc (Henskens et al., 2001). Ces effets dus à la densité de plantation des arbres peuvent se manifester plus ou moins rapidement selon les densités et les designs des traitements comparés, et selon la vitesse de croissance des arbres. Henskens et al. (2001) ont étudié la croissance d'eucalyptus plantés à 2 x 4 m (1250 tiges.ha⁻¹), à 2.5 x 10 m (400 tiges.ha⁻¹) et à 10 x 10 m (100 tiges.ha⁻¹). Cinq ans après la plantation, le volume moyen des tronc était supérieur de 50 % et 110 % dans les traitements à 400 et 100 tiges.ha⁻¹ par rapport au traitement à 1250 tiges.ha⁻¹. Pour des noyer hybrides plantés à 3 x 3.5 m (952 tiges.ha⁻¹) ou à 9 x 10.5 m (102 tiges.ha⁻¹), Gavaland et al. (2006) ont relevé des croissances en hauteur similaires entre les deux traitements, mais les arbres plantés à faible densité faisaient 12 cm de diamètre au bout de 10 ans, contre 9 cm à forte densité.

Dans le modèle, l'amplitude de ces phénomènes est en grande partie déterminée par les relations d'allométrie entre diamètre du tronc à la base du houppier et section horizontale du houppier, et entre volume du houppier et biomasse de branches (section 1.2.2.2). Ces relations ont été paramétrées à partir de mesures effectuées sur de jeunes arbres (section 3.2), et il est possible qu'elles ne soient pas vérifiées pour des arbres plus âgés (Niklas, 1995). De même, l'effet de la densité sur la vitesse de croissance résulte en grande partie des différences de surface foliaire (effet a), qui sont déterminées par la relation entre volume du houppier et surface foliaire, elle aussi paramétrée sur de jeunes arbres. Enfin, il a été montré que les arbres espacés étaient généralement moins élancés que les arbres en peuplements denses (Cabanettes et al., 1998; Gavaland et al., 2006), et ce phénomène n'est pas reproduit par le modèle, qui impose une relation d'allométrie fixe entre hauteur et DBH. Pour affiner la modélisation de ces effets relatifs à l'espacement entre arbres, qui semblent déterminants pour le fonctionnement des arbres agroforestiers, nous recommandons une réévaluation des relations d'allométrie aériennes du noyer, sur un jeu de paramètres couvrant une large gamme de dimensions d'arbres, isolés et en peuplement.

La présence des cultures intercalaires (dont l'itinéraire technique comprend un travail du sol) a un effet négatif sur le rendement simulé des arbres en début de rotation, principalement via une augmentation de l'allocation racinaire ($h_a < 1$). Cet effet n'est plus visible en fin de rotation, les effets liés à la densité de plantation étant d'une amplitude beaucoup plus importante. Sur le terrain, l'effet de la présence de cultures intercalaires sur la croissance de jeunes arbres est très dépendant du contexte pédo-climatique, des espèces cultivées, de l'itinéraire technique des cultures, et de la nature de la couverture du sol dans le témoin forestier (voir Van Sambeek & Garrett (2004) pour une revue sur le noyer noir). Par exemple, Burgess et al. (2005) ont mis en évidence

un effet négatif de cultures d'hiver sur la croissance de peupliers hybrides en Angleterre, effet attribué par les auteurs à la compétition pour l'eau, alors que Rivest et al. (2010a) ont au contraire mis en évidence un effet fortement positif d'une culture de soja sur la croissance de peupliers hybrides au Canada, qu'ils expliquent par une amélioration du statut azoté des arbres. Il est donc difficile d'évaluer la plausibilité de nos résultats par comparaison avec la littérature. Sur la parcelle expérimentale de Restinclières, une comparaison a été réalisée entre une association dite extensive dans laquelle les cultures sont implantées à partir de 2 m des arbres, ce qui fait une bande non cultivée de 4 m de large, et une association dite intensive dans laquelle les cultures sont implantées à partir de 50 cm des arbres. Dès 1998, les noyers de l'association extensive avaient un diamètre légèrement supérieur à ceux de l'association intensive (Dupraz, 1998-2008). Cette différence de diamètre a atteint 2 cm de diamètre en 2001, et s'est ensuite stabilisée jusqu'à aujourd'hui. Nos simulations sont cohérentes avec cette observation, qui suggère que dans le contexte de Restinclières, le blé dur exerce sur les noyers une compétition pour l'eau plus intense que la végétation spontanée. Le sol étant profond et alimenté régulièrement par une nappe alluviale, les noyers développent rapidement un système racinaire profond leur donnant accès à une ressource en eau alternative, et échappent ainsi à la compétition. Par conséquent, l'effet des cultures sur la croissance des arbres est limité aux premières années.

L'influence de la fertilisation des cultures intercalaires sur le statut azoté des arbres n'est pas prise en compte par le modèle. Des mesures effectuées en 1998 ont cependant montré que la teneur en azote foliaire des arbres agroforestiers de la parcelle A3 était plus élevée que celle des arbres forestiers de la parcelle A4 voisine. Un essai de fertilisation de certains arbres du TF a été mis en place à partir de 1999 (Dupraz, 1998-2008), avec un apport de 200 g d'azote par arbre et par an. Cette fertilisation a eu un impact très faible sur la croissance pendant plusieurs années, indiquant que les noyers n'étaient pas en déficit azoté sévère. En 2009, soit 10 ans après, les noyers fertilisés faisaient 15.3 cm de diamètre en moyenne, contre 13.6 pour les arbres non fertilisés. D'après ces résultats, nous ne faisons probablement pas une grosse erreur sur la croissance initiale des noyers de Restinclières en ne modélisant pas l'influence de l'azote, mais il est possible que la fertilisation des cultures ait un impact non négligeable à long terme sur le rendement des arbres agroforestiers de Restinclières.

4.4.2 Rendements annuels du blé dur : valeurs absolues, relatives, et déterminisme

4.4.2.1 Rendements simulés dans le témoin agricole

Le rendement simulé du blé dur en témoin agricole (TA) est très variable d'une année sur l'autre (figure 4.4.2a) : il varie entre 3.6 et 8.9 t.ha⁻¹, avec une moyenne de 6.8 t.ha⁻¹. Cette variabilité met en évidence une forte dépendance du rendement simulé au climat de l'année. Sur la série de 40 ans, on simule 5 années avec un rendement inférieur à

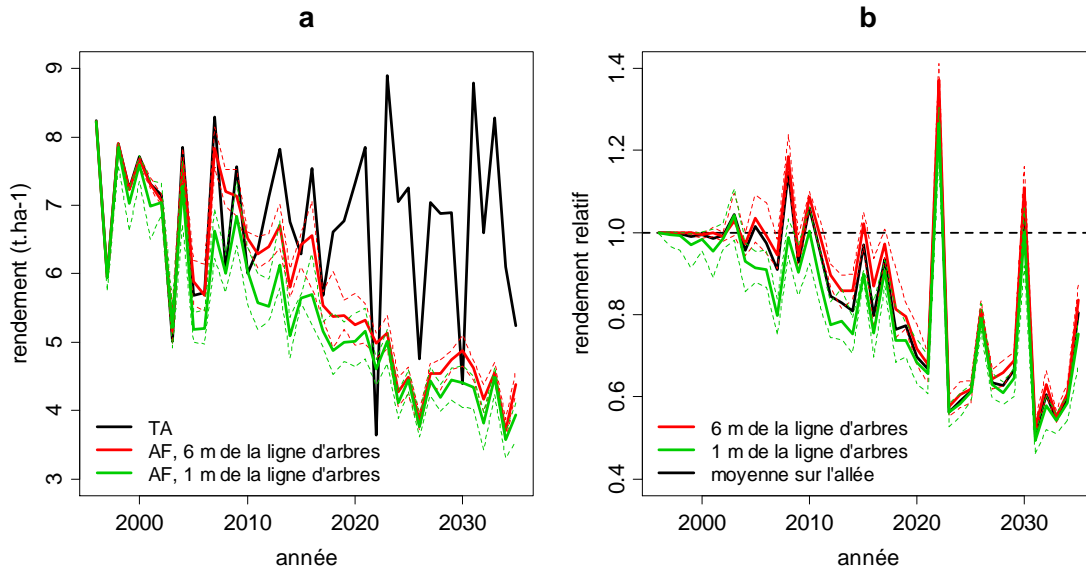


Figure 4.4.2: **a** : Rendement absolu du blé dur simulés à Restinclières dans le témoin agricole (TA), et dans le système agroforestier (AF) en bordure d'allée cultivée (à 1 m des arbres) et au centre de l'allée cultivée (à 6 m des arbres). Les traits pleins indiquent les valeurs moyennes pour une distance donnée à la ligne d'arbre, les pointillés indiquent les valeurs minimale et maximale (variabilité spatiale au sein de l'allée cultivée). **b** : rendements relatifs simulés au centre et en bordure des allées cultivées, et rendement relatif moyen sur l'allée.

5.5 t.ha⁻¹ : les années 2003, 2022, 2026, 2030 et 2035. Une analyse détaillée du comportement des cultures ces années-là permet d'identifier les mécanismes responsables des pertes de rendement. Les années 2003 et 2035 correspondent à des situations avec des stress hydriques intenses pendant le remplissage des grains, qui ont peu d'impact sur la production totale de biomasse, mais qui, combinés à de fortes températures de l'air, conduisent à des stress thermiques inhibant le remplissage des grains. Les années 2022 et 2030 correspondent au contraire à des situations avec des stress hydriques précoces, avant la floraison. Ces stress hydriques précoces réduisent l'efficacité de conversion du rayonnement (LUE) et induisent une sénescence foliaire prématurée, avec pour conséquence une réduction de la biomasse totale ainsi que du nombre de grains, qui est déterminé dans STICS par la vitesse de croissance en biomasse pendant les 30 jours qui précèdent la floraison (Brisson et al., 1998). L'année 2022, avec le rendement le plus faible, correspond à la coïncidence des deux phénomènes : stress hydriques précoces et stress thermiques en fin de cycle.

4.4.2.2 Rendements absolus et relatifs simulés en agroforesterie

Le rendement du blé dur en agroforesterie (AF) est presque inchangé par rapport au TA durant les premières années de simulation (figure 4.4.2a), sauf à proximité immédiate des arbres (valeur minimale à 1 m des arbres) où il est légèrement réduit. Il décroît ensuite progressivement de 2005 à 2020, pour atteindre des valeurs comprises entre 3.5 et 5 t.ha⁻¹, autour desquelles il se stabilise au cours des 15 dernières années. Les rendements relatifs annuels correspondants (figure 4.4.2b) sont proches de 1 les premières années, et décroissent ensuite jusqu'à des valeurs de l'ordre de 0.5. La variabilité inter-annuelle du rendement, semblable à celle du TA en début de rotation, est fortement réduite en fin de rotation (figure 4.4.2a). En particulier, le rendement agroforestier est peu (voire pas) affecté les années où il est fortement réduit en TA, conduisant à des valeurs de rendements relatifs élevées, parfois même supérieures à 1 (figure 4.4.2b). On peut souligner que le rendement relatif du blé agroforestier reste donc à un niveau élevé même quand les arbres agroforestiers couvrent entièrement la parcelle (après 2020).

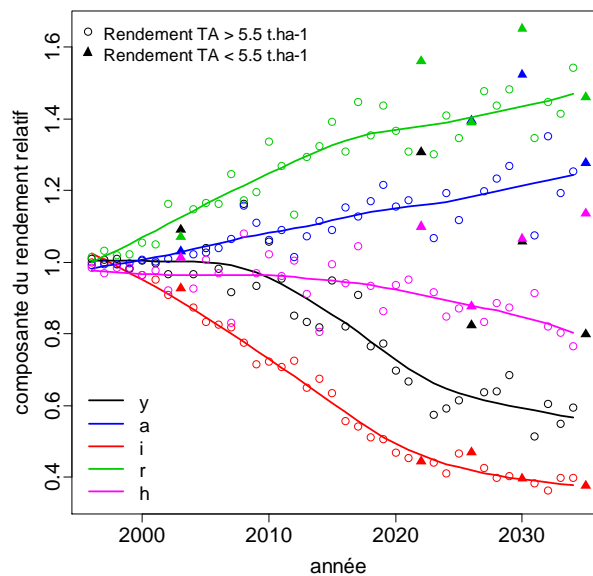


Figure 4.4.3: Décomposition de premier ordre du rendement relatif annuel simulé pour le blé dur. Le rendement relatif annuel par unité de surface, y , se décompose comme le produit de 4 termes. a : effet lié à la capacité d'interception du rayonnement (surface foliaire). i : indice de compétition pour la lumière. r : effet lié à l'efficacité de conversion du rayonnement. h : effet lié à l'indice de récolte. Les courbes ont été obtenues par splines de lissage (5 degrés de liberté), en excluant les valeurs correspondant à des années à rendement très faible en témoin agricole ($Y_{i,TA} < 5.5 \text{ t.ha}^{-1}$).

Comme nous l'avons fait pour les noyers, il est possible de décomposer le rendement relatif simulé pour le blé dur, afin d'en comprendre le déterminisme. Le blé dur étant semé et récolté chaque année, nous nous intéresserons ici à la décomposition du rendement

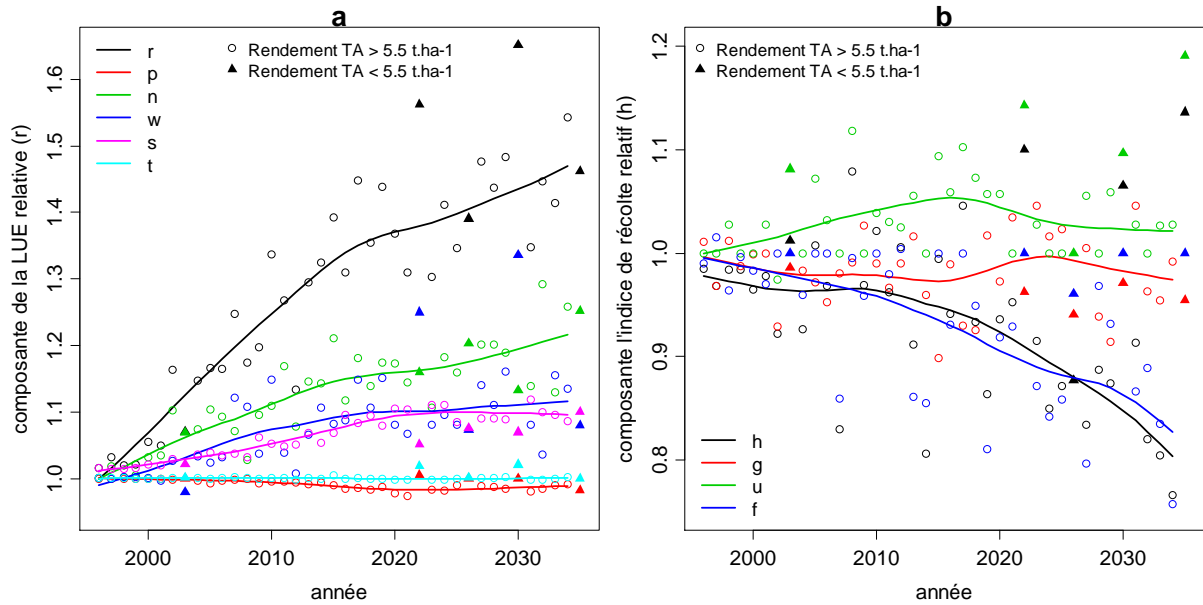


Figure 4.4.4: Décompositions de second ordre du rendement relatif du blé dur. **a** : décomposition de la LUE relative (r) en 5 effets relatifs aux influence du stade phénologique de la culture (p), des stress azotés (n) et hydriques (w), de la température (t) et de la saturation de la photosynthèse (s). **b** : décomposition de l'indice de récolte relatif (h) en trois effets relatifs à la durée de remplissage des grains (g), aux stress thermiques (u) et au nombre de grains (f). Les courbes ont été obtenues par splines de lissage (5 degrés de liberté), en excluant les valeurs correspondant à des années à rendement très faible en témoin agricole ($Y_{i,TA} < 5.5 \text{ t.ha}^{-1}$).

relatif annuel, et non du rendement relatif intégré. Le rendement relatif annuel de l'année i simulé par STICS peut être décomposé comme suit (rappel de l'équation 2.2.18) :

$$y_i = airh = ai[pnwst][guf] \quad (4.4.2)$$

Une présentation des principaux formalismes de STICS impliqués dans le déterminisme du rendement, la démonstration de cette équation, ainsi qu'une discussion sur la signification de différents termes de la décomposition sont proposés dans le chapitre 2. La figure 4.4.3 présente l'évolution au cours de la simulation du rendement relatif annuel (y) et de ses principales composantes (a , i , r et h). La figure 4.4.4 présente une décomposition supplémentaire de la LUE relative (r) et de l'indice de récolte relatif (h).

Malgré la forte complémentarité temporelle entre noyers hybrides et blé dur pour l'utilisation de la lumière en raison de leurs phénologies complémentaires, la composante explicative principale du rendement relatif du blé dur est la compétition pour la lumière exercée par les arbres (effet i , figure 4.4.3). En fin de simulation, l'effet i vaut environ 0.4, ce qui signifie qu'en moyenne sur le cycle du blé dur, la présence des noyers réduit de 60 % la lumière disponible pour le blé dur. Rappelons que cette valeur moyenne est le résultat de l'intégration d'une dynamique intra-cycle marquée, avec un ombrage modéré

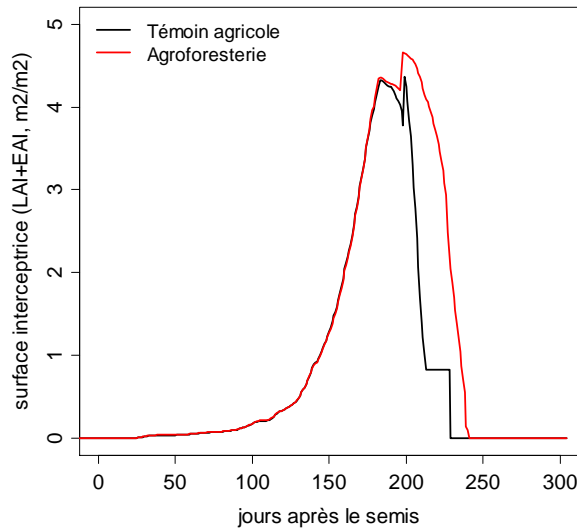


Figure 4.4.5: Exemple de dynamique de surface verte interceptrice pour les blé dur en AF et en TA (année 2028). LAI : indice de surface foliaire. EAI : surface interceptrice des épis. La variable EAI est modélisée par STICS comme étant proportionnelle au nombre de grains. La brusque augmentation de la somme LAI + EAI vers le jour 200 correspond à la mise en place de l'EAI, c'est à dire à la floraison.

en début de cycle, avant le débourrement des arbres, et intense (jusqu'à 80 %) en fin de cycle (figure 4.2.5b). En plus de son effet direct sur la production de biomasse (effet i), cette compétition pour la lumière, a un effet négatif indirect sur le nombre de grains (effet f , figure 4.4.4b). Cet effet se répercute sur le rendement par une diminution de l'indice de récolte ($h < 1$)⁵. Ces effets négatifs de la compétition pour la lumière sont partiellement compensés par plusieurs mécanismes conduisant à une augmentation de l'efficacité de conversion du rayonnement ($r > 1$) et à une augmentation de la capacité interceptrice du couvert ($a > 1$) (figure 4.4.3). L'effet r s'explique principalement par une réduction des stress hydriques ($w > 1$) et azotés ($n > 1$), et par une moindre saturation de la photosynthèse ($s > 1$) (figure 4.4.4a). L'augmentation de capacité interceptrice du couvert ($a > 1$) ne correspond pas à une augmentation du LAI maximal, mais à un ralentissement de la sénescence foliaire en fin de cycle (figure 4.4.5), conséquence de la réduction des stress.

Les années où le rendement simulé en témoin agricole est faible sont identifiées par des

5. La variabilité de f pourrait faire penser à une faible corrélation entre compétition pour la lumière (i) et nombre de grains. Ce n'est pas la cas : le nombre de grains est bien corrélé à i , mais il ne se répercute pas systématiquement sur le rendement (effet f). En effet, STICS ne simule un impact du nombre de grains sur le rendement que dans les situations où le produit de la biomasse totale et de l'indice de récolte, calculé à partir de la durée de remplissage des grains et du stress thermique, est plus élevé que le produit du nombre de grains et du poids des grains maximal (paramètre variétal).

triangles pleins sur les figures 4.4.3 et 4.4.4. Les fortes valeurs des rendements relatifs correspondants s'expliquent par un évitement partiel des stress hydriques, qui se répercute sur la LUE (effet w , années 2022 et 2030) et/ou la vitesse de sénescence foliaire (effet a , années 2026 et 2030) et/ou les stress thermiques pendant le remplissage des grains (effet u , année 2003, 2022, 2030 et 2035).

4.4.2.3 Discussion

Rendements mesurés dans la parcelle A3 de Restinclières

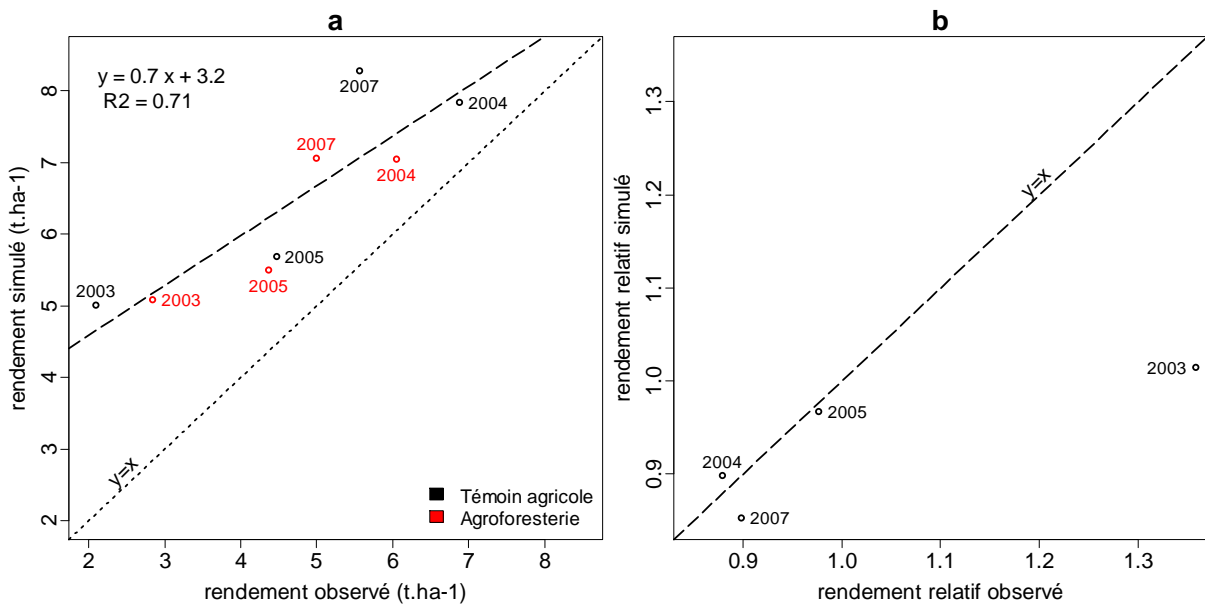


Figure 4.4.6: a : Comparaison des rendements simulés et observés en témoin agricole et en agroforesterie à Restinclières (parcelle A3) entre 2003 et 2007. b : Comparaison des rendements relatifs simulés et observés

La figure 4.4.6 reporte les rendements simulés et observés à Restinclières pour le témoin agricole (parcelle A2) et la parcelle agroforestière A3 entre 2003 et 2007. Le modèle STICS ne prenant pas en compte les contraintes biotiques (mauvaises herbes, ravageurs) que subissent les parcelles expérimentales, et qui réduisent les rendements, la sur-estimation systématique des rendements par le modèle n'est pas étonnante. La variabilité inter-annuelle du rendement est globalement reproduite par le modèle, comme en témoigne la bonne relation positive ($R^2 = 0.71$) entre rendements simulés et rendements observés. L'équation de la droite de régression (figure 4.4.6a), avec une ordonnée à l'origine positive et une pente inférieure à 1, indique que les sur-estimations du rendement sont plus importantes pour les faibles rendements que pour les forts rendements. Pour les années 2004, 2005 et 2007, l'effet des arbres sur le rendement des cultures est faible (le rendement relatif est compris entre 0.9 et 1), et correctement reproduit par le modèle.

En 2003, nous avons mesuré des rendements très faibles (inférieurs à 3 t.ha⁻¹) dans les deux situations (TA et AF), et un rendement relatif très supérieur à 1. Ni les valeurs très faibles de rendement absolu, ni la valeur élevée de rendement relatif ne sont reproduites correctement par le modèle pour l'année 2003. Nous avons vu précédemment que d'après le modèle, le blé dur en TA a subi des stress thermiques pendant le remplissage des grains. Il est possible que les conséquences de ces stress thermiques sur le rendement en TA ainsi que l'effet positif des jeunes arbres sur le microclimat soient sous-estimées par le modèle. Il est aussi possible que ces discordances entre mesures et modèle résultent d'autres mécanismes, non considérées par le modèle, ou de biais expérimentaux. Une réelle évaluation des performances du modèle pour rendre compte des modifications de rendement du blé dur en AF demanderait un jeu de données plus conséquent. Par ailleurs, nous ne disposons d'aucune mesure dans des systèmes noyers âgés-blé dur, d'où la difficulté à qualifier le réalisme des rendements relatifs en fin de simulation.

Rendements relatifs du blé agroforestier dans la littérature

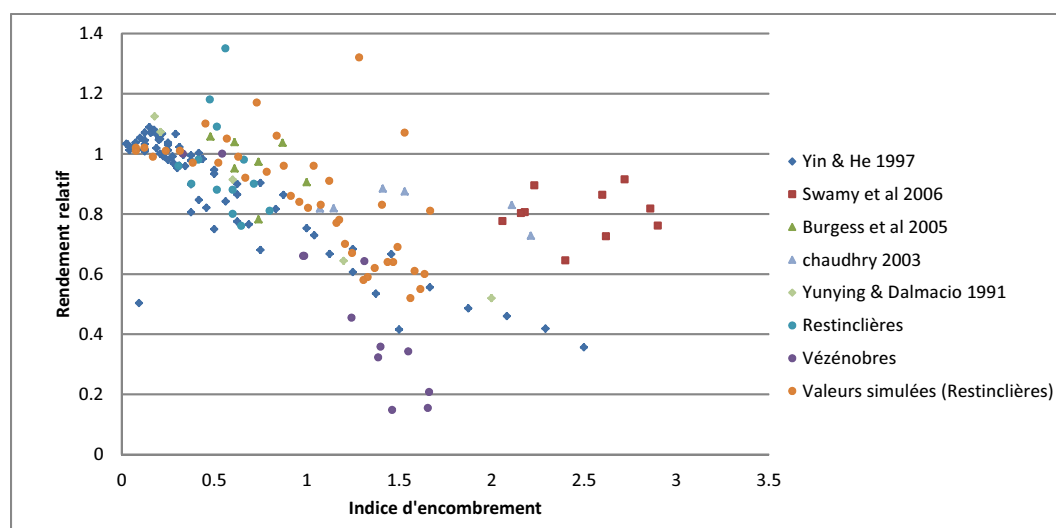


Figure 4.4.7: Relation entre indice d'encombrement de la parcelle et rendement relatif du blé par unité de surface cultivée. L'indice d'encombrement est défini comme le ratio entre hauteur des arbres et largeur des allées. Yin & He (1997) : blé tendre sous paulownia (phénologie semblable à celle du noyer), Chine. Swamy et al. (2006) : blé tendre sous peuplier, Inde. Burgess et al. (2005) : blé tendre sous peuplier, Angleterre. Chaudhry (2003) : blé tendre sous peupliers, Pakistan. Vézénobres : blé dur sous peupliers, France (Dupraz et al., 2010).

Nous n'avons trouvé aucune mesure de rendement du blé dur en agroforesterie dans la littérature, mais de nombreuses études ont été menées sur le blé tendre. Nous disposons par ailleurs de mesures du rendement relatif de blé dur dans des parcelles agroforestières à base de peupliers, situées à Vézénobres (Gard, France, Dupraz et al. 2010). Le premier

constat est que les conséquences de l'agroforesterie sur le rendement du blé sont très variables d'une étude à l'autre. La figure 4.4.7 propose une synthèse des valeurs de rendements relatifs mesurés sur nos parcelles expérimentales (Restinclières et Vézénobres), trouvés dans la littérature, et obtenus dans notre simulation, en fonction d'un indice d'encombrement de la parcelle, défini comme le ratio entre hauteur des arbres et largeur des allées. Pour comprendre la variabilité des relations entre indice d'encombrement et rendement relatif, il faut considérer le contexte pédoclimatique des différentes études, la phénologie relative des espèces associées, ainsi que les itinéraires techniques des cultures.

Les études de Swamy et al. (2006) et Chaudhry (2003) correspondent à des associations peuplier - blé tendre irriguées, dans des conditions climatiques avec un printemps extrêmement chaud, les moyennes mensuelles de température maximale journalière sont de l'ordre de 35 °C pour le mois d'avril et de plus de 40 °C pour le mois de mai (la maturité du blé tendre sous ces climats est atteinte début mai). Dans ce contexte particulier, les auteurs rapportent des rendements relatifs compris entre 0.6 et 1, y compris dans des conditions extrêmement ombragées. Dans l'étude de Swamy et al. (2006) par exemple, le LAI du peuplement d'arbres est compris entre 1.6 et 4.2 m.m⁻². Les cultures étant irriguées et fertilisées, il est peu probable que ces rendements relatifs résultent d'une simple interaction entre ressources limitantes, dans laquelle l'ombre des arbres conduirait à une réduction des stress hydrique ou azoté. On peut penser que ces valeurs élevées de rendements relatifs résultent plutôt d'une réduction des stress thermiques, très fréquents sous ces climats.

Dans les parcelles expérimentales de Vézénobres mises en oeuvre par l'UMR System (Dupraz et al., 2010), les rendements relatifs du blé dur associé à des peupliers sont beaucoup plus faibles, traduisant une compétition intense exercée par les peupliers, aérienne et probablement souterraine. Les rendements relatifs simulés à Restinclières (noyer - blé dur) sont bien supérieurs, à indice d'encombrement égal, à ceux mesurés à Vézénobres. Ces différences peuvent s'expliquer par un débourrement des peupliers beaucoup plus précoce (mi mars) que celui des noyers (mi avril à début mai).

Les données de Restinclières pour l'association noyer - blé dur, ainsi que les mesures de Burgess et al. (2005) pour des associations peuplier - blé tendre en Angleterre (climat océaniques, données issues de trois sites différents), sont limitées à des indices d'encombrement faibles (inférieurs à 1). La compétition exercée par les arbres n'est pas encore très intense, et les valeurs de rendements relatifs sont pour la plupart comprises entre 0.8 et 1, avec quelques valeurs supérieures à 1. Dans les deux cas, la faible gamme d'indices d'encombrements explorée ne permet pas de mettre en évidence de relation significative entre indice d'encombrement et rendement relatif.

Les travaux de Yunying & Dalmacio (1991), Yin & He (1997) correspondent à des associations paulownia - blé tendre, dans un climat de mousson avec des hivers froids et secs et des printemps chauds et secs. Dans ces associations, le blé tendre est irrigué, ce qui le met a priori à l'abri des stress hydriques printaniers. Le paulownia est un arbre avec une phénologie tardive, comme le noyer, et ces systèmes sont semblables à notre association noyer hybride - blé dur du point de vue de la complémentarité temporelle.

Nos valeurs de rendements relatifs simulés pour les années sans stress hydrique dans le témoin agricole sont très proches, à indice d'encombrement égal, des valeurs rapportées par ces auteurs.

Les valeurs particulièrement élevées de rendements relatifs prédites par le modèle pour certaines années ne sont analogues à aucune des mesures présentées ici. Ces valeurs correspondent en effet à des situations avec une forte contrainte hydrique, ce qui ne permet pas de comparaison avec les systèmes irrigués, une forte complémentarité temporelle entre espèces, ce qui ne permet pas la comparaison avec les associations peuplier - blé, et un indice d'encombrement élevé, qui n'a pas encore été atteint à Restinclières. Il n'est donc pas possible, pour l'instant du moins, de conclure sur la plausibilité de ces valeurs.

Déterminisme du rendement relatif

Dans cette simulation, le modèle ne prédit aucune compétition pour l'eau significative des arbres sur les cultures. Nous avons vu dans la section 4.3.3 qu'il est possible que HisAFe sous estime la contribution des noyers à l'assèchement des horizons de surface au printemps, et donc leur compétition potentielle sur le blé. De même, le modèle ne prédit aucun effet de compétition des arbres sur la disponibilité en azote pour les cultures, mais avec une modélisation du cycle de l'azote très simplifiée. A notre connaissance, aucune étude menée sur des systèmes agroforestiers associant du blé d'hiver à des arbres à feuilles caduques n'a identifié la compétition souterraine exercée par les arbres comme étant un facteur déterminant du rendement des cultures.

Les principales différences simulées entre TA et AF, en ce qui concerne l'environnement perçu par le blé dur, sont une réduction de la lumière disponible et une réduction de la demande évaporative. Les incertitudes concernant l'amplitude simulée de ces modifications ont été discutées dans les sections 4.2.2 et 4.3.3. La réaction du blé dur à ces modifications, mesurée ici par le rendement relatif, est simulée par le modèle STICS. Si ce modèle a été utilisé dans de nombreuses études, et sa capacité prédictive établie en conditions agronomiques "classiques" (Brisson et al., 2002), il faut garder à l'esprit que STICS n'a pas été conçu ni paramétré pour simuler des cultures en conditions de fort déficit lumineux. Les rendements relatifs simulés, et *a fortiori* leur déterminisme, doivent donc être considérés avec précautions. Par comparaison avec des données issues de la littérature, nous avons montré dans la section 4.4.2.3 que les rendements relatifs simulés sont optimistes, mais réalistes. L'analyse du déterminisme de ces rendements relatifs simulés met en évidence des phénomènes intéressants, mais questionne la validité de STICS pour la simulation de certains processus comme par exemple :

- La croissance foliaire. Dans STICS, la croissance foliaire est pilotée par la température. Un formalisme permet de limiter la croissance foliaire en cas de déficit sévère de biomasse, mais nous n'observons pas dans nos simulations de différence de dynamique de croissance du LAI entre TA et AF, ce qui signifie que les réductions de rayonnement simulées ne sont pas suffisantes (ou que les compensations sont trop importantes) pour activer ce formalisme. Li et al. (2008) ont mesuré un

LAI du blé réduit d'un facteur 2 dans un système blé-paulownia dans lequel la transmittance hivernale (avant débourrement des paulownias) est de l'ordre de 80 %. Mu et al. (2010), dans une expérience avec ombrage artificiel, ont montré une légère diminution du LAI en conditions ombragées, mais cette diminution était compensée par une organisation spatiale différente du feuillage, permettant d'augmenter la proportion de rayonnement intercepté par le couvert. Dans un système agrivoltaïque associant blé dur et panneaux photovoltaïques, Marrou (communication personnelle) a mesuré une légère augmentation du LAI sous 35 % d'ombrage et pas d'effet significatif sous 50 % d'ombrage comparé aux cultures en plein soleil.

- La saturation du processus de photosynthèse. Ce mécanisme est souvent évoqué comme un mécanisme de compensation possible pour des plantes en C3 dans des conditions agroforestières (Jose et al., 2004). A notre connaissance, il n'existe pas de démonstration expérimentale claire que ce mécanisme soit effectif, probablement car il est difficile de le mesurer indépendamment d'autres facteurs. STICS modélise ce phénomène d'une manière très simple à l'échelle du couvert : l'incrément journalier de biomasse est une fonction saturante de la quantité de rayonnement intercepté, indépendamment de la surface foliaire interceptrice.
- Le remplissage des grains. Le système agroforestier noyer blé est caractérisé par une ombre peu intense pendant le début du cycle du blé, avant le débourrement des arbres, et très intense en fin de cycle. Par conséquent, la fraction de la biomasse totale qui a été assimilée pendant le remplissage des grains est a priori plus faible que dans le témoin agricole. Wang et al. (2003) ont montré qu'un ombrage pendant le remplissage des grains peut avoir un effet négatif sur l'indice de récolte, ce qui suggère que la diminution de la photosynthèse n'est pas compensée par une augmentation de la remobilisation. STICS calcule l'indice de récolte avec une simple fonction linéaire de la durée de remplissage des grains, ce qui signifie qu'il ne fait pas la distinction entre remobilisation et nouveaux assimilats. Il est donc possible qu'il sous estime l'impact d'un ombrage tardif sur le rendement.

Pour une discussion plus détaillée sur la capacité de STICS à rendre compte du rendement des cultures ombragées, le lecteur pourra se reporter au chapitre 1.2.2.1.

4.4.3 Productivité globale du système : le LER

4.4.3.1 Le LER simulé

Pour analyser le déterminisme du rendement relatif du blé, nous nous sommes intéressés au rendement annuel dans les allées agroforestières, c'est à dire par unité de surface cultivée. Pour le calcul du LER_y , il faut considérer le cumul sur la durée de la rotation (40 ans) du rendement parcelle, c'est à dire en tenant compte des zones non cultivées sur les lignes d'arbres. Dans cette simulation, le témoin agricole a produit $272 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ de blé dur en 40 ans, soit une moyenne de $6.8 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$. La parcelle agroforestière a produit au total $212 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, soit $5.3 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ en moyenne. Le rendement relatif du blé

dur agroforestier, intégré sur 40 ans, est donc $y_C = 212/272 = 0.78$.

De même, pour les noyers, le rendement à la parcelle dépend de la croissance individuelle des arbres et de la densité de plantation. Dans cette simulation, le volume de tronc par arbre atteint 2.2 m^3 en AF contre 1.4 m^3 en TF à 40 ans, ce qui fait un rendement à l'hectare de $188 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ en AF (soit $4.7 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$) contre $288 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ en TF ($7.2 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$). Le rendement relatif est donc $y_T = 188/288 = 0.65$.

Le LER_y du système agroforestier simulé, défini comme la somme des rendements relatifs du blé et des noyers, est donc $\text{LER}_y = y_C + y_T = 0.78 + 0.65 = 1.43$. Cela signifie qu'une parcelle agroforestière de 1 ha produit autant de bois qu'une parcelle de 0.65 ha de plantation de noyers et autant de grain qu'une parcelle de 0.78 ha de culture de blé, soit 1.43 ha d'assolement blé pur - noyer pur.

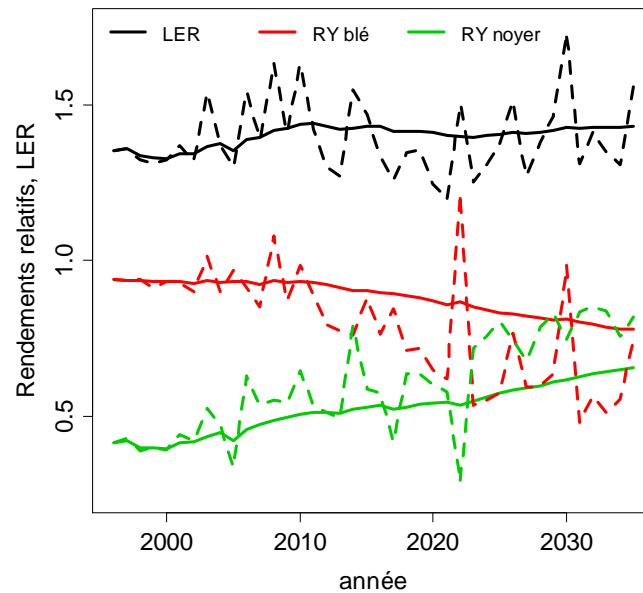


Figure 4.4.8: LER simulé et décomposition entre rendements relatifs du blé et du noyer. Valeurs annuelles (pointillés) et intégrées (traits pleins)

Dans cette simulation, la densité relative de plantation des arbres (d_T) est égale à 0.42 et la proportion de surface cultivée (d_C) est égale à 0.92. La somme des densités relatives, que nous noterons ici LER_d , est égale à 1.34 (tableau 4.1). Cette valeur peut être interprétée comme un coefficient d'intensification du système (Malézieux et al. (2008)) : elle vaudrait 1 dans le cas d'une association substitutive et 2 pour une association additive. Lors de l'initialisation du système, les rendements relatifs des arbres et des cultures sont égaux à leur densités relatives ($y_C = d_C$ et $y_T = d_T$) et le LER_y est égal à LER_d (fig. 4.4.8). Ces valeurs initiales peuvent être utilisées comme valeurs de référence : si rien de spécial ne se passait dans le système agroforestier, c'est à dire s'il n'y avait pas d'in-

Table 4.1: Valeurs simulées pour les différents LER.

	Arbres	Cultures	Somme (LER)
Densité relative (d)	0.42	0.92	1.34
Interception de lumière relative (l)	0.73	0.66	1.39
Consommation d'eau relative (w)	0.71	0.84	1.55
Biomasse relative (b)	0.72	0.82	1.54
Rendement relatif (y)	0.65	0.78	1.43

teractions interspécifiques et si les interactions intraspécifiques étaient inchangées par rapport aux témoins, alors les rendements relatifs et le LER_y devraient se maintenir à ces valeurs. Au contraire, tout écart à ces valeurs de référence indique un fonctionnement particulier du système agroforestier ayant des conséquences sur le rendement des arbres et/ou des cultures. Au cours de la simulation, y_T augmente progressivement de 0.42 à 0.65 (fig. 4.4.8), indiquant un rendement par arbre nettement plus important en AF qu'en TF, alors que y_C diminue de 0.92 à 0.78, indiquant un rendement du blé diminué dans les allées agroforestières. Les causes des variations de y_C et y_T ont été explicitées en détail dans les sections précédentes (sections 4.4.1 et 4.4.2). L'augmentation de y_T étant légèrement plus rapide que la diminution de y_C , le LER_y est croissant et sa valeur finale est 1.43.

4.4.3.2 LER et partage des ressources

Les valeurs de LER_y supérieures à 1 sont classiquement attribuées à une meilleure valorisation des ressources limitantes du milieu (Vandermeer, 1989; Malézieux et al., 2008). Une meilleure valorisation peut passer par une augmentation de la quantité de ressources utilisée ou par une meilleure efficacité de la conversion de ces ressources en produits exploitables.

Partage de la lumière

Grâce à leur position dominante, les noyers bénéficient d'un accès privilégié à la lumière par rapport au blé, et peuvent potentiellement exercer sur celui-ci une compétition sévère. En début de rotation, la quantité de rayonnement interceptée par les petits arbres est négligeable à l'échelle de la parcelle (section 4.2.2). On observe alors une complémentarité presque parfaite entre arbres et cultures pour la ressource lumière, qui résulte simplement de la très faible utilisation de la ressource par les arbres. Quand les arbres grandissent, le décalage phénologique entre les espèces permet de conserver un fort degré de complémentarité. Malgré cette complémentarité, l'ombre portée des troncs et des branches en hiver ainsi que la compétition pendant la saison de croissance commune entre les deux espèces (mai et juin) réduisent l'interception de lumière relative par la culture agroforestière (l_C) à 0.66, pour une densité relative (d_C , proportion

de surface cultivée) de 0.92 (tableau 4.1). Au contraire, grâce à leur faible densité de plantation par rapport au TF, les arbres agroforestiers interceptent beaucoup plus de rayonnement ($l_T = 0.73$) que ce que nous aurions pu attendre au regard de leur densité relative ($d_T = 0.42$).

Partage de l'eau

Si les arbres ont un accès privilégié à la lumière, on peut au contraire considérer que grâce à son avance phénologique, le blé dur a un accès privilégié à la ressource hydrique. En effet, étant donnée la faible pluviométrie estivale, la satisfaction des besoins en eau des noyers repose largement sur le stock d'eau restant dans le sol après la récolte du blé. En début de simulation, les noyers explorent un volume de sol limité et n'ont pas encore accès aux horizons profonds non asséchés par le blé, on observe alors des stress hydriques plus prononcés dans la parcelle agroforestière que dans le témoin forestier. Ce phénomène est de courte durée, car les noyers mettent rapidement en place un système racinaire profond, leur permettant d'accéder à la réserve en eau du sol en deçà de la zone d'exploration des cultures et à la nappe alluviale. On parle alors de complémentarité spatiale, qui est dans ce cas une complémentarité active, car elle résulte de la plasticité du système racinaire des noyers. D'après cette simulation, nous sommes à Restinclières dans un contexte où l'eau n'est pas une ressource limitante pour la croissance des noyers, ni dans le témoin forestier ni en association avec du blé dur. Les noyers agroforestiers ont une consommation d'eau relative (w_T) et une production de biomasse relative (b_T) égales à la quantité relative de lumière interceptée (tableau 4.1) : l'efficacité de conversion en biomasse des deux ressources considérées ici est inchangée par rapport au témoin forestier. La moindre consommation d'eau par le blé agroforestier que par le blé en témoin agricole ($w_C = 0.84$) ne s'explique pas par de la compétition pour l'eau entre espèces, mais par une réduction de la demande évaporative liée à l'ombre des arbres. Cette réduction de la demande évaporative permet de retarder l'apparition et de limiter l'intensité des stress hydriques, et donc d'améliorer l'efficacité de la conversion de la lumière en biomasse ($b_C > l_C$, tableau 4.1). La production de biomasse relative (b_C) est presque identique à la quantité relative d'eau transpirée, indiquant une efficacité de conversion de l'eau (WUE) identique en AF et en TA.

De la biomasse au rendement

Pour les deux espèces associées, le rendement relatif (y) est plus faible que la biomasse relative (b) (tableau 4.1), indiquant un indice de récolte diminué en agroforesterie. Pour les noyers, cette diminution de l'indice de récolte résulte principalement des investissements de biomasse nécessaires pour le développement de houppiers volumineux et de systèmes racinaires profonds, qui sont en grande partie la clef du succès des arbres agroforestiers. Pour le blé dur, la diminution de l'indice de récolte s'explique par une réduction du nombre de grains, due à l'ombre des noyers pendant les semaines qui précèdent la

floraison.

4.4.3.3 Discussion

Il n'existe aucune mesure du LER_y intégré d'un système agroforestier blé noyer. La seule mesure existante du LER_y d'un système agroforestier sur le cycle complet des arbres a été réalisée par Dupraz et al. (2010) sur une association peuplier - blé dur. Pour différents clones de peupliers et différentes orientations des lignes d'arbres, ces auteurs rapportent un LER_y moyen de 1.33 pour une rotation agroforestière de 13 ans. Dans ce système, les arbres sont plantés à 16 m x 4.5 m, contre 7 m x 7 m dans le témoin forestier, soit une densité relative (d_T) de 0.68, la largeur des allées cultivées est de 14 m, soit une proportion de surface cultivée (d_C) égale à 0.88, ce qui fait un LER_d de 1.56. Ce système est donc plus "intensif", c'est à dire plus proche d'une association additive que notre système simulé, dont le LER_d est 1.34. Le rendement relatif des cultures, intégré sur 13 ans est $y_C = 0.50$, celui des arbres est $y_T = 0.83$. Comme dans notre système, le rendement relatif des arbres est plus élevé que leur densité relative de plantation, traduisant une croissance par arbre plus rapide dans le système agroforestier que dans le témoin forestier. Le rendement relatif des cultures, dans ce système, est beaucoup plus faible que celui que nous avons simulé (0.50 contre 0.78). Cette différence s'explique probablement par une densité de plantation des peupliers plus élevée que celle des noyers et un débourrement plus précoce.

4.5 Conclusions

L'analyse du fonctionnement du système agroforestier virtuel simulé par Hi-sAFé n'a pas mis en évidence d'incohérence majeure : le fonctionnement du système simulé est globalement conforme aux hypothèses formulées lors de la conception du modèle. Pour toutes les variables analysées, les ordres de grandeur sont réalistes au regard des valeurs mesurées sur nos parcelles ou trouvées dans la bibliographie. Les différences entre système agroforestier et témoins agricole et forestier, en ce qui concerne l'utilisation des ressources en eau et en lumière, ainsi que la croissance et le rendement des deux espèces, sont qualitativement conformes à l'état des connaissances sur le sujet. De ce point de vue, on peut considérer que le modèle Hi-sAFé est conforme à ses spécifications.

Au fil de cette analyse, nous avons identifié et discuté de nombreuses sources avérées ou potentielles de différences entre les systèmes agroforestiers réel et virtuel. Nous en avons aussi probablement oublié. Ces sources de différences proviennent (1) de choix initiaux des phénomènes non modélisés, choix qui peuvent être volontaires ou contraints par des raisons liées à la connaissance même des phénomènes où au temps de calcul des formalismes existants pour les prendre en compte, (2) de choix dans les formalismes utilisés (automate racinaire, répartition de la demande évaporative, déterminisme du rendement dans STICS, algorithme d'allocation aérien/souterrain pour les arbres, etc...),

ou (3) de choix dans les valeurs de paramètres. Dans l'état actuel de nos connaissances, il n'est pas possible de hiérarchiser objectivement ces sources d'erreur ni de quantifier l'erreur totale qui en résulte. Il a néanmoins été possible d'identifier certains points qui requièrent une attention particulière :

- La différence de croissance simulée entre arbres agroforestiers et forestiers résulte essentiellement de la différence de densité de plantation entre les deux systèmes. Cette différence de densité de plantation a non seulement un effet trivial sur l'intensité de la compétition pour la lumière entre arbres, mais aussi des effets non triviaux liés à la forme et à la dimension des houppiers, et aux dimensions relatives des compartiments tronc, branches et feuilles. La simulation de ces effets repose sur la formalisation et le paramétrage des allométries aériennes. Nous recommandons une réflexion de fond sur les relations d'allométrie aériennes, ainsi que sur leur dépendance à la dimension des arbres et à la densité de plantation.
- Hormis pendant les premières années suivant la plantation, la ressource hydrique n'a pas été identifiée comme limitante pour la croissance des noyers à Restinclières. Par conséquent, les formalismes et paramètres relatifs au développement du système racinaire, aux calculs de la demande évaporative et de l'absorption d'eau, ainsi qu'à l'équilibre fonctionnel entre compartiments aériens et souterrains ne semblent pas déterminants dans cette situation. On s'attend par contre à ce qu'ils revêtent une importance cruciale dans un autre contexte pédo-climatique.
- Hi-sAFe prédit une diminution des stress azotés pour les cultures agroforestières par rapport au témoin agricole, avec pour conséquence une augmentation de la LUE, et un ralentissement de la senescence foliaire. Cette réduction des stress azotés est le principal mécanisme de compensation de la réduction du rayonnement disponible. Ce résultat incite à continuer les efforts pour modéliser l'ensemble du cycle de l'azote dans Hi-sAFe, travail actuellement en cours.
- Dans le témoin agricole, Hi-sAFe simule certaines années des accidents climatiques avec un effet dramatique sur le rendement du blé dur : ce sont soit des stress hydriques précoces, soit des stress thermiques pendant le remplissage des grains. Hi-sAFe simule un évitement partiel de ces stress dans le système agroforestier, conduisant ces années-là à des rendements relatifs très élevés, parfois même supérieurs à 1. Ce résultat est particulièrement intéressant, car l'augmentation de la fréquence de ces accidents, en raison des changements climatiques, a été identifiée par Brisson et al. (2010) comme la cause principale de la stagnation du rendement des céréales en France. Les systèmes agroforestiers seraient-ils plus résistants aux changements climatiques ? L'évitement des stress simulé par Hi-sAFe repose sur (1) la faible consommation en eau par les arbres dans les horizons de surface, (2) la réduction de la demande évaporative du sol et des cultures à l'ombre des arbres, et (3) la diminution de la température de culture à l'ombre des arbres, trois points sur lesquels nous avons une forte incertitude en raison de la simplicité des formalismes du modèle. Pour le premier point, nous recommandons : (1) une réévaluation avec Hi-sAFe en introduisant un formalisme de tropisme pour l'azote

dans l'automate racinaire, qui permettra de simuler de fortes densités racinaires en surface, ainsi qu'un formalisme rendant compte de la résistance longitudinale des racines aux flux d'eau, et (2) une validation expérimentale, par des mesures isotopiques par exemple (Asbjornsen et al., 2008; Eggemeyer et al., 2009). Les deuxième et troisième points sont plus complexes à aborder. Ils demanderont soit des campagnes de mesure intensives pour caractériser le microclimat et le bilan énergétique des cultures agroforestières, soit la mobilisation de modèles dédiés spécifiquement à la modélisation des transferts de masse et de chaleur dans les couverts végétaux hétérogènes, comme DART-EB par exemple (Belot, 2007).

- Le blé dur agroforestier est soumis à des conditions très particulières, avec un éclaircissement proche de la normale jusqu'à mi avril - début mai, et une ombre intense en fin de cycle, c'est à dire pendant des stades clefs pour l'élaboration du rendement. Le modèle STICS n'a été ni développé ni paramétré pour rendre compte de cette contrainte particulière. Nous reviendrons sur ce point dans le chapitre 5.

En conclusion, l'analyse détaillée de cette simulation nous a permis d'identifier les principaux déterminants des rendements relatifs des deux espèces associées et du LER_y du système simulé. S'il n'est pas possible d'affirmer qu'il n'y a pas d'autres phénomènes importants dans la réalité, il est par contre raisonnable de considérer que les phénomènes identifiés comme importants par le modèle le sont probablement aussi dans la réalité. Ces résultats sont donc à considérer comme autant de pistes à explorer avec Hi-sAFé ou avec d'autres modèles focalisés sur certains processus, ou d'hypothèses à évaluer expérimentalement.

Partie III :
Expérimentations virtuelles : vers
l'optimisation d'un système
agroforestier noyer-blé ?

Chapitre 5

Traits phénologiques des espèces et comportement du blé agroforestier

Préambule

Ce chapitre présente les résultats d'une expérimentation virtuelle dont l'objectif était d'étudier comment des choix relatifs à la phénologie du blé dur et/ou des noyers hybrides étaient susceptibles d'influencer les interactions entre espèces, et la productivité du système agroforestier. Comme annoncé en fin de chapitre 3, afin de contrôler la robustesse de nos résultats aux incertitudes concernant le paramétrage des noyers, toutes les simulations ont été réalisées avec deux jeux de paramètres concernant les aspects racinaires et l'équilibre fonctionnel entre compartiments aériens et souterrains.

Une analyse préliminaire des résultats de ces simulations a permis de montrer que: (1) dans la situation simulée, l'incertitude liée au paramétrage des noyers n'a aucune influence sur le comportement du système, et (2) les noyers à débourrement précoce ont une croissance légèrement plus rapide que les noyers tardifs, mais cette différence n'est affectée ni par la présence du blé (comparaison avec le témoin forestier) ni par les traits phénologiques du blé. En résumé, les traits phénologiques des deux espèces influencent surtout le comportement et la productivité du blé dur. Par conséquent, et afin de simplifier le discours, nous ne présenterons dans ce chapitre que les résultats relatifs à la productivité du blé, et pour un seul jeu de paramètres du noyer.

Article en préparation pour une soumission à *European Journal of Agronomy*.

Is the phenology lag between trees and crops a major determinant of the productivity of cereal crops in temperate agroforestry systems ?

Grégoire TALBOT, Christian DUPRAZ, Marie-Hélène JEUFFROY

Notation

- Upper case letters refer to absolute variables, while lower case letters refer to log-transformed relative variables. Relative variables are defined as the ratio of the absolute values for the scenario under analysis (agroforestry, AF) compared to the reference scenario (pure crop, PC): $x = \log(X_{AF}/X_{PC})$.
- Letters with subscript t refer to values at the model time step t while letters without subscript refer either to values independent from time or values averaged or cumulated with time.
- D : density, calculated as the proportion of the total area that is grown for crops, and the number of trees per hectare for trees.
- B : biomass
- C : incident light
- A : plant light capture efficiency
- I : light competition index
- R : light use efficiency
- W : water stress effect on light use efficiency
- N : nitrogen stress effect on light use efficiency
- P : effect of crop phenology on light use efficiency
- T : effect of extreme temperatures on light use efficiency
- S : effect of light saturation on light use efficiency
- Y : yield. Refers to grain biomass for crops, timber biomass for trees
- H : harvest index, $H = Y/B$

- *G*: effect of the length of the grain filling stage on harvest index
- *U*: effect of extreme temperatures on harvest index
- *F*: Effect grain number on harvest index

5.1 Introduction

Most research on agroforestry systems (AFS)¹ was concentrated in the tropics until the early 90s (Ong et al., 2004), but recent findings indicate that modern temperate AFS may be very efficient in terms of resource use and can be compatible with modern machinery (Burgess et al., 2005; Dupraz & Newman, 1997; Dupraz & Liagre, 2008). Silvoarable agroforestry comprises widely spaced trees intercropped with arable crops. Growing high quality trees in association with arable crops in European fields may improve the sustainability of farming systems, diversify farmers' income, provide new products to the wood industry, and create novel landscapes of high value (Palma et al., 2007). Reviews of plurispecific systems indicate that complementarity for the capture of resources is a key to the productivity of mixtures (Malézieux et al., 2008). Complementarity may result from niche differentiation, either in space (e.g. different root systems depth) or time (e.g. different phenologies). Phenology lags between species may therefore be a determinant of mixtures productivity, as compared to sole cropping systems (Vandermeer, 1998). In most tropical systems, trees and crops have almost the same growing season, reducing the possibility of time complementarity (Broadhead et al., 2003), except for some out of the ordinary systems such as the Faidherbia parks in the soudano-sahelian zone (Roupsard et al., 1999) where the trees are leafy during the dry season. In temperate and Mediterranean areas, tree and crop cycles are often very different. Winter crops sown in autumn will take advantage of winter resources of light and water, while deciduous trees will mainly be active in spring and summer. Mixed cropping is often assumed to improve the land productivity through the increased capture of resources such as solar radiation and soil water by the different species (Cannell et al., 1996; Smith et al., 2004; Jahansooz et al., 2007), leading to an increase in the overall biomass productivity.

Some of the competitive interactions for resources (water, light, and nutrients) between the trees and the crops in alley cropping have been documented in a variety of practices in the tropics (Garcia-Barrios & Ong, 2004); however, references on the productivity of intercrops in temperate AFS are very scarce, and often limited to the early stages of the

1. Abbreviations:

PC: pure crop control

AF: agroforestry

AFS: agroforestry system

DBH: diameter at breast height

LUE: light use efficiency

LAI: leaf area index

PAR: photosynthetically active radiation

tree development (Dupraz, 1999; Jose et al., 2004, 2008). Few papers deal with mature tree stands. Most trees planted in temperate AFS are deciduous hardwoods such as slow growing walnut (*Juglans* spp.) or wild cherry (*Prunus avium*) trees or fast growing poplar (*Populus* spp.) and paulownia (*Paulownia* spp.) trees. These trees can be combined with either winter crops such as wheat (*Triticum* spp.) or rapeseed (*Brassica napus*) or summer crops such as maize (*Zea mays*), soybean (*Glycine max*) or sunflower (*Helianthus annuus*) (Jose et al., 2004). The crop yield is dependent on the competition between the trees and the crops for the major resources: light, water and nutrients (Ong & Huxley, 1996; Ong et al., 2004). Schematically, AFS of northern latitudes are supposed to be limited by light competition, whilst those of the Mediterranean areas are supposed to be limited by the availability of water (Eichhorn et al., 2006).

AFS are attractive to farmers as they combine a short term annual income (with the crop production) and a long-term asset (with the tree value). Farmers often wonder on the sustainability of the crop yield until tree harvest. They fear that tree competition will rapidly decrease crop productivity to unprofitable levels. The easiest way to maintain crop productivity under trees is to avoid as much as possible negative interactions between trees and crops, i.e. to maximize species complementarity, by selecting species with contrasting phenology. This is why paulownia - winter wheat intercropping is so popular in China (Yin & He, 1997) and walnut - winter wheat intercropping is considered a promising association for European AFS development (Dupraz & Liagre, 2008). Even in such systems however, the tree budburst occurs 1 to 3 months before crop harvesting, and the end of the crop cycle is subject to intense competition for light. Moreover, the trunks and branches of large trees may have a significant effect on light availability before budburst (Talbot & Dupraz, in press; Li et al., 2008). Experimental assessment of winter wheat relative yield (ratio of agroforestry crop yield over pure crop yield) in agroforestry with deciduous trees led to contrasted results, even in contexts where the competition for light is probably of similar intensity. For example, in paulownia-wheat intercropping systems with similar design (5m x 20m between trees) and similar tree height (9 to 12 m), different studies reported wheat relative yields as different as 0.49 (Li et al., 2008), 0.77 (Yin & He, 1997) and 0.91 (Yunying & Dalmacio, 1991). Similarly, Swamy et al. (2006) and Chaudhry (2003) reported wheat relative yield of about 0.8 in very dense poplar agroforestry systems (4 x 5 m between 10 m tall trees, and 4 x 6 m between 13 m tall trees respectively) in Pakistan, while Dupraz et al. (2010) observed relative yields below 0.4 in a 16 m x 4 m poplar-wheat system when poplars were 20 m tall in France.

Several hypotheses could explain such a variability in the response of winter wheat to agroforestry conditions. First, trees may compete with crops for other resources, like water or nutrient. To our knowledge however, belowground competition was never identified to be significant for winter wheat yield in temperate agroforestry, but nevertheless remains theoretically possible. The opposite seems more likely: temperate trees may suffer from water competition when they are grown with winter crops, which partially dry out the soil before budburst. This was evidenced for black walnuts (Williams &

Gordon, 1995) and hybrid walnuts (Mulia & Dupraz, 2006) mixed with winter wheat. Second, trees may have other effects than competition on crops. In particular, trees are known to induce modifications in the microclimate, that may have a significant impact on crop yield. The presence of trees in agroforestry systems can reduce significantly soil evaporation (Jackson & Wallace, 1999; Keen, 2008) and crop evaporative demand (Yunying & Dalmacio, 1991), and consequently delay water stress. Yin & He (1997) and Yunying & Dalmacio (1991) evidenced that at low paulownia density wheat yield can be increased in agroforestry compared to pure crop. This clearly demonstrates that such processes are operating in their system. Finally, due to the pedoclimatic context or to varietal traits, light may be more or less limiting the crop growth and yield, and crops may exhibit various responses to similar changes in light availability.

Addressing the question of crop yield in agroforestry requires to evaluate first the sharing of resources between trees and crop, and then the response of the crop to modified resources availability compared to pure crop conditions. Several mechanisms are supposed to compensate for the light reduction in agroforestry systems, but were never ranked in terms of effectiveness. They include a better light use efficiency in the shade, mainly for C3 species (Jose et al., 2004; Moreno, 2008), an alleviation of water stress through reduction of evaporative demand (Yunying & Dalmacio, 1991; Lin, 2010) and through reduced soil evaporation (Jackson & Wallace, 1999; Keen, 2008), or an increased fertility of the soil due to the tree litters (Swamy et al., 2006). Field results usually indicate relative cereal yield in the shade of agroforestry trees (Yin & He, 1997; Chaudhry, 2003; Swamy et al., 2006; Burgess et al., 2005) or under artificial shade (Mu et al., 2010) higher than the relative irradiation during the crop cycle, suggesting that the compensation mechanisms can be very effective. However, some authors also reported wheat yield dramatically reduced under eucalypts (Kidanu et al., 2004) or paulownias (Li et al., 2008) based agroforestry.

Grain yield can be expressed as the result of three steps: radiation interception by photosynthetic organs (related to LAI), conversion of the intercepted radiation into dry matter (related to photosynthetic efficiency) and partitioning of that dry matter, expressed by the harvest index, i.e. the ratio between grain and plant weight (Monteith, 1977; Gallagher & Biscoe, 1978). The three primary yield components are the number of spikes per square meter, the number of grains per spike and the mean grain weight. They are altered by environmental factors, depending upon the developmental stages when these conditions occur. Light availability is considered to be the first limiting factor by most models of cereal production. In particular, light deficiency before anthesis is known to decrease significantly the number of grains (Fischer, 1985; Demotes-Mainard & Jeuffroy, 2004; Wang et al., 2003). The size of the grains is usually less affected by a reduced irradiation than the number of grains (Wang et al., 2003; Borrás et al., 2004; Li et al., 2008), although some authors found both components to be equally affected (Chirko et al., 1996). The sensitive development stages of the crops may be subject in AFS either to low shading, to intense shading, or to a transition between the two, depending on the relative dates of tree budburst and crop anthesis. As a consequence,

a small change in tree and/or crop phenology may have a significant impact on crop yield. There are very scarce studies of phenological traits for the crops in AFS, but Gill et al. (2009) managed a comparison of 6 different wheat varieties in a poplar based AFS. They however only published several year average for the productivity of pure crops, which prevents to assess the relative yields in their system and the impact of the variety phenology on it.

To address such issues, agroforestry field experiments are not the easy way. Designing an experiment combining trees and crops with different phenological traits would require several decades to monitor the system until the slow growing trees that are used in temperate agroforestry are mature. The size of the experimental area would also be huge, to avoid unwanted edge effects. Moreover, the crop yield response to agroforestry conditions is expected to be highly site-specific and to change from one year to another. To date, crop simulation models are the best-known approach for integrating knowledge about complex crop processes as influenced by weather and environment. They are increasingly used in crop science to explore *in silico* complex issues, such as irrigation strategies (e.g. DeJonge et al., 2007; Soler et al., 2007; Debaeke & Aboudrare, 2004), interactions between genetic traits and environmental factors (e.g. Asseng et al., 2002; Debaeke, 2004; Chenu et al., 2009; Semenov et al., 2009), or responses to predicted climate change (e.g. Asseng et al., 2004; Meza & Silva, 2009; Lhomme et al., 2009; Liu et al., 2010). Model results should however be considered with care, because they depend on the assumptions and simplifications made in the model formalisms, and on the uncertainties in parameter estimation and input data. Depending on the model maturity and degree of validation, models can either provide quantitative predictions for direct use, or simply insight in system functioning, helping to identify potentially important processes that would require further experimental investigation or modelling efforts.

Modelling the tree-crop interactions for the main resources (light, water and nutrients) is now recognized as a key tool for designing successful agroforestry systems (van Noordwijk, 1996; Santos Martin & van Noordwijk, 2009). During the last 15 years, several process-based models have been developed worldwide to simulate tree-crop interactions, such as APSIM (Huth et al., 2002), CROPGRO (Zamora et al., 2009), Yield-SAFE (van der Werf et al., 2007), HyPAR (Mobbs et al., 1998), Hi-sAFe (Dupraz et al., 2005) or WaNuLCAS (Van Noordwijk & Lusiana, 1998). None of these models were ever used to explore the importance of tree and crop phenology on the behaviour and outputs of temperate AFS.

In this paper, we used Hi-sAFe, a process-based model of temperate silvoarable system, to explore the behaviour of a durum wheat crop associated with hybrid walnuts under a mediterranean climate. We conducted a virtual experiment for various combinations of tree and crop phenological traits, from plantation to harvest of the walnut trees, i.e. over a 40 years cycle, and analysed the processes responsible for differences between pure wheat and agroforestry wheat.

5.2 Materials and methods

5.2.1 Hi-sAFe : a process-based model for temperate silvoarable agroforestry

Hi-sAFe is a silvoarable agroforestry model that simulates the growth of a mixture of crops and trees and predicts the grain and timber production (Dupraz et al., 2005). It was designed to test the assumption that a proper description in time and space of the basic processes relating to resources use and sharing between species, and their integration over years at the plot scale could provide an understanding of the productivity of agroforestry systems. Hi-sAFe is therefore spatially explicit, runs at the day time-step, and focuses on light, water and nitrogen capture and use. Hi-sAFe simulates a rectangular plot divided into square cells (typically 1 m wide), corresponding to the spatial horizontal resolution. The soil below each cell is divided into voxels (typically 20 cm thick) down to a depth that is beyond reach of the tree and crop root systems.

For each cell of the plot, crop growth and yield are simulated with the crop model STICS (Brisson et al., 1998, version 5.0, translated in C by Poupa, 2003). The trees are modeled by an individual-based model. Trees and crops interact daily via three competition modules for light and water and nitrogen.

Trees are represented by six carbon pools relating to foliage, branches, stem, stumps, coarse roots and fine roots. The model assumes a simple geometrical description of the tree crown as an ellipsoid filled with branches and leaves. Allometric laws linking stem diameter, tree height, crown diameter, branch volume and leaf area are used to guide the tree growth. The tree root growth is described by an hydrotropic diffusion of fine roots in soil voxels, simulated by a voxel automata as suggested by Mulia et al. (2010). Coarse roots are providing a functional link between the fine roots and the stump, and their biomass in each voxel is computed according to the pipe-stem theory. The aboveground versus belowground carbon allocation is assumed to optimise the relative sizes of the foliage and fine root pools following the functional equilibrium paradigm (Grant, 1998). Tree phenology is driven by temperature : budburst is prompted by thermal time accumulation, and leaf fall is prompted either by leaf ageing (a given time after budburst) or by frost.

Light competition is modelled by a ray-tracing model adapted from the Mountain model (Courbaud et al., 2003) and described in detail in Talbot & Dupraz (in press). Daily incident radiation is simulated by a finite number of beams coming from evenly distributed directions of the sky hemisphere and reaching evenly distributed points on the plot. Each beam is assigned energy according to the SOC convention (standard overcast sky, Moon & Spencer, 1942) for daily diffuse radiation and to the sun trajectory of the day for daily direct radiation. Tree crowns are ellipsoids filled with a leaf area density and a branch area density, through which beam energy follows an exponential decaying Beer's law, and tree trunks are opaque cones. The model daily computes light

intercepted by trees and light for crops on each cell of the plot. The light interception by crops is then computed by STICS with a classical big-leaf approach.

The vertical flows of water and nitrogen within the soil profile are simulated by the STICS model (Brisson et al., 1998). The depth variations of the watertable are a forcing variable included in the weather file. In the absence of trees, the soil and crop evaporative demand are computed by STICS according to the K-PET approach, where K is a function of crop LAI (leaf area index) and PET is the grass reference evapotranspiration (Brisson et al., 2009). Similarly, the evaporative demand of isolated trees is computed as proposed by Pereira et al. (2006): proportionnal to the product of leaf area by PET. Tree-tree and tree-crop interactions for evaporative demand are simply modeled by assuming that PET and light are shared in the same proportions by trees and crops within the system. The water extraction by plants is computed using the matrix flux potential concept proposed by de Willigen et al. (2000). The algorithm was implemented in 2D in the agroforestry model WaNuLCAS (Van Noordwijk & Lusiana, 1998), and extended in 3D in the Hi-sAFe model. The matrix flux potential concept allows to describe accurately the competition between intermingled rooting systems. Water uptake is computed in 3 steps: (1) the leaf water potential of each plant is computed daily according to its evaporative demand and perception of soil water potential in the various rooted voxels; (2) in each voxel, the total potential water flow from soil to root is computed with the matrix flux potential, that accounts for root diameter and length density, for the gradient of water potential and for the soil hydraulic conductivity, (3) the actual water extraction by each plant is finally obtained with an integration at the whole plant level where the plant water uptake is given by the minimum between its demand and the sum of potential water flows in the rooted voxels.

5.2.2 Site/Simulations

The virtual experiment was carried out with the soil and weather data from the Restinclières farm in southern France (43°43'N, 4°1'E, elevation 54 m). Agroforestry experiments are monitored on this farm, including 5 hectares of walnut-wheat systems. The field data from this plot were used to parameterize tree growth, while default STICS parameters were used for durum wheat. The climate is sub-humid Mediterranean with an average annual temperature of 14.5°C (years 1991-2009) and an average annual rainfall of 847 mm (same period, min = 562 mm, max = 1670 mm). The soil is a deep calcic fluvisol (WRB, 2006; Dupraz et al., 1999). The watertable fluctuates between soil surface during rainy winters and 4.5 m depth during dry summers, and stays within reach of the rooting system of the trees.

We ran 40-years simulations for a pure crop of durum wheat (PC; reference scenario) and a mixed hybrid-walnut/durum-wheat AFS. Tree density was 74 trees.ha⁻¹ (9 m x 15 m spacing), tree rows were north-south oriented, with a 1 m wide uncropped tree strip along the tree row (7 % of total area). Trees were pruned up to 30 % of their total height every 4 years, until pruning height reached 4 m. Durum-wheat was sown each

year on November 4th at a depth of 20 mm and a density of 300 grains.m⁻², and two fixed applications of N fertilizer were carried out on 10 February (60 kg/ha) and 20 March (60 kg/ha). The virtual system is very close to the actual system with some differences in the crop rotation (the actual crop rotation includes a rapeseed breakcrop every 3 to 4 years).

5.2.3 Design of the virtual experiment

Table 5.1: Design of the virtual experiment for exploring the influence of phenology lags between trees and crops on the crop productivity in a temperate agroforestry system

factor	description	values	
TREE	tree earliness	early (E), late (L)	effect
CROP	crop earliness	early (E), late (L)	effect
CLIM	weather	1-10	replications
Total number of simulations		40	

We ran a virtual experiment with two factors (tab. 5.1): tree earliness (TREE), crop earliness (CROP), and climate replications (CLIM).

For the factor CROP, we adopted the parameter sets proposed by Debaeke (2004) for defining an early (E) and a late (L) wheat. The simulated wheat phenology for E and L cultivars under the climatic conditions of Restinclières is summarised in table 5.2. The early wheat flowered mid May to early June depending on the year and was harvested mid June to mid July, while late wheat flowered late May to mid June and was harvested late June to mid July. The late cultivar tends to develop rapidly a larger leaf area index (fig. 5.2.1) allowing a higher potential biomass production than the early one, but at the cost of a high water consumption that induces sometimes a higher level of water stress (Debaeke, 2004). The early cultivar with a slower LAI development and an earlier anthesis had the opposite strategy, with a lower potential biomass and a reduced climatic risk.

Tree budburst in Hi-sAFe is triggered by a sum of temperature (base 0°C) calculated from the first of January. For the factor TREE, we defined parameter sets for an early and a late walnut tuning the high variability observed for hybrid walnuts on our experimental plots (tab. 5.2). The average (over a 40-year simulation) leaf area dynamics for walnut and wheat are reported in figure 5.2.1.

To run a simulation over the whole agroforestry rotation, i.e. from plantation to harvest of the trees, we need a 40-year weather data series. For Restinclières, we recorded the real weather data from 1991 to 2009. For the 10 climate replications, we generated 10 series of 40-year weather data by random sampling of years in the real 1991-2009 weather series. The watertable dynamics record (2002-2009) was used to compute an empirical model based on the history of precipitation and potential evapotranspiration.

Table 5.2: Simulated phenology for walnut and wheat cultivars with the climatic data from Restinclières

Walnut phenology (TREE)		
Cultivar	Early	Late
budburst (date)	3/04 to 15/04	4/05 to 15/05
Leaf fall beginning (date)	1/10 to 13/10	6/10 to 11/11
Wheat phenology (CROP)		
Cultivar	Early	Late
Sowing (date)	4/11	4/11
Emergence to anthesis (days)	162 to 193	183 to 212
anthesis (date)	15/05 to 2/06	23/05 to 21/06
anthesis to maturity (days)	36 to 45	24 to 39
maturity (date)	15/06 to 13/07	30/06 to 16/07

The model was then used to predict watertable depth over 40 years for each climate series.

5.2.4 Crop yield analysis: the relative yield decomposition

The simulated crop yield with the crop model STICS results from the integration over the crop cycle of several processes occurring and interacting at the day time-step. In this section, we present the main processes of STICS involved in the computation of crop yield, and show how the relative yield, defined as the ratio of crop yield for two simulations, can be decomposed in a product of terms related to these processes (Talbot et al., Submitted). For a full description of STICS, see Brisson et al. (2009).

5.2.4.1 Crop biomass decomposition

The daily biomass increment can be written:

$$(\Delta B)_t = C_t A_t I_t R_t \quad (5.2.1)$$

where C_t is the incident PAR above trees, A_t is the light capture efficiency of the crop (computed from crop LAI), I_t is PAR transmittance of the tree stand, and R_t is the light use efficiency (LUE). The computation of the daily LUE involves several processes, and can be summarized as:

$$R_t = R_{max} P_t N_t W_t S_t T_t \quad (5.2.2)$$

where R_{max} is the maximal light use efficiency (parameter), P_t is a function of the crop phenological stage (LUE in STICS converts light into aboveground biomass and is reduced during the juvenile stage to account for the preferential allocation to roots), N_t

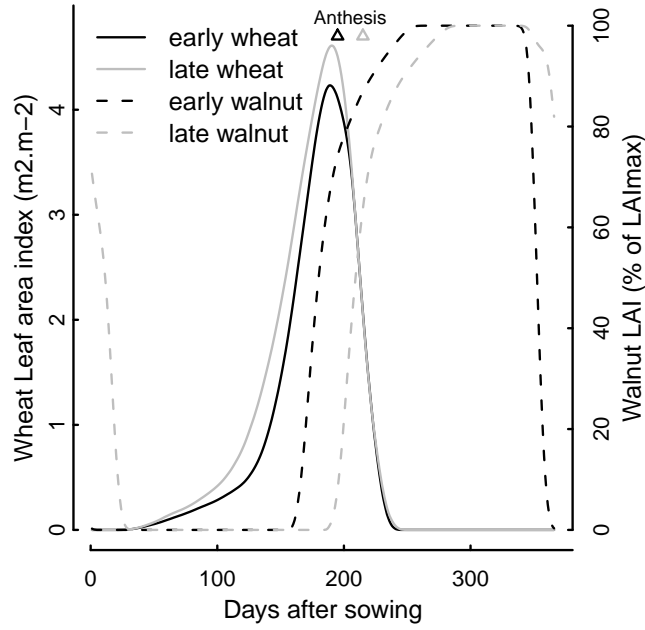


Figure 5.2.1: Averaged phenology of LAI for both wheat and walnut cultivars calculated with 10 climate replications

and W_t are the nitrogen and water stresses, S_t is a decreasing function of the amount of light intercepted, accounting for the light saturation of photosynthesis, and T_t is a function decreasing LUE in case of extreme (cold or hot) temperatures..

Combining equations 5.2.1 and 5.2.2, the daily biomass increment can be written as:

$$(\Delta B)_t = C_t A_t I_t R_{max} P_t N_t W_t T_t S_t \quad (5.2.3)$$

In appendix 5.6, we show that the final crop biomass, computed as the sum over the crop cycle of daily biomass increments, can be written as:

$$B = C A I R_{max} P N W S T \quad (5.2.4)$$

where $C = \sum C_t$ is the cumulated PAR incident above trees, $A = \sum (C_t/C) A_t$ is the average daily light capture efficiency of the crop weighted by the daily PAR incident, I is an average light competition index. The product $R = R_{max} P N W S T$ is the mean light use efficiency, each term (excepted R_{max}) expressing the contribution of the processes detailed above to the gap between R and R_{max} .

5.2.4.2 Harvest index decomposition

The STICS model computes the final yield as the product of the crop biomass with a harvest index. We decomposed the harvest index in three multiplicative effects with clear

ecophysiological meaning by analysing the STICS equations (Talbot et al., Submitted). The maximum harvest index H_{max} is a fixed variety parameter. H_{max} is first reduced by a factor G if the length of the grain filling period τ (days) is insufficient: $G = \max(\mu\tau/H_{max}, 1)$, where μ is a parameter.

Then, the product $H_{max}G$ is reduced by a second factor in case of heat stress during grain filling. According to STICS equations, grain filling does not occur on day t if the daily maximum crop temperature exceeds a fixed threshold. If this occurs, the harvest index is reduced by $\mu(B_t\tau_t - B_{t-1}\tau_{t-1})$ where B_t is crop biomass, and τ_t is time (days) since the beginning of grain filling. We define the effect of heat stress on grain filling (U) as the ratio of the computation of the harvest index accounting for heat stress over the potential harvest index ignoring it (product $H_{max}G$).

Finally, the harvest index may be limited by the maximum individual grain weight, which is set by parameter ω_{gm} . If $HB/\nu > \omega_{gm}$ where ν is the grain number, i.e. if the mean grain weight exceeds ω_{gm} , then H is recomputed as $H = \omega_{gm}\nu$. The grain number ν depends on crop vigour at anthesis, it is computed as a linear function of the biomass increment during the 30 days preceding anthesis. We define the effect F of the grain number on the harvest index, as the ratio F between the new and the old value of H .

In conclusion, the harvest index can be decomposed as:

$$H = H_{max}GUF \quad (5.2.5)$$

5.2.4.3 Final relative yield decomposition

By combining Equations 5.2.4 and 5.2.5, crop yield decomposition can be written as:

$$Y = [CAI][R_{max}PNWST][H_{max}GUF] \quad (5.2.6)$$

Where C , A and I are the incident light, the PAR transmittance and the light capture efficiency respectively, R_{max} , P , N , W , S and T describe the light use efficiency, and H_{max} , G , U and F describe the harvest index. In this paper, we aim to compare an agroforestry crop (AF) and a reference pure crop control (PC). For both systems, we used the same crop parameters so that $R_{max,PC} = R_{max,AF}$ and $H_{max,PC} = H_{max,AF}$ and the same weather file so that $C_{PC} = C_{AF}$. As a consequence, the crop log-relative yield, $y = \log(Y_{AF}/Y_{PC})$, can be written as:

$$y = a + i + (p + n + w + s + t) + (g + u + f) \quad (5.2.7)$$

where lower case letters refer to the log-ratio of corresponding upper case letters for PC and AF (e.g. $a = \log(A_{AF}/A_{PC})$).

5.2.5 Statistical analysis

We compare the behaviour of the crop yield in an agroforestry system and in a reference pure crop system. We may assume that small trees at planting time will have a

negligible effect, but that a strong impact will be observed when the tree stand will be mature. Crop yield and tree size should therefore be analysed together. Since tree size at a given age of the system can be different between the simulations, we suggest to use the LAI (leaf area index) of the tree stand (L) as a proxy to the expected influence of trees on crops.

Each term x of the relative yield decomposition (eq. 5.2.7) was linked to L and to the factors TREE and CROP with an ANCOVA (Analysis of Covariance). The regression model for the ANCOVA was

$$x \sim 0 + L + L : (\text{TREE} + \text{CROP} + \text{TREE} : \text{CROP}) \quad (5.2.8)$$

The term 0 in the regression model forces intercept to 0, and represents the assumption that x equals 0 when L is 0 (no yield response if no tree influence). The formulation of the regression model defines at most a regression line for each couple TREE/CROP.

By construction, $y = \sum x_i$ and if $x_i = k_i L$ then $y = (\sum k_i)L$: the slope of y versus L can be deduced from the slopes k_i of the terms x_i of the decomposition. The slope k_i is the contribution of the term x_i of the decomposition to the relationship between y and L .

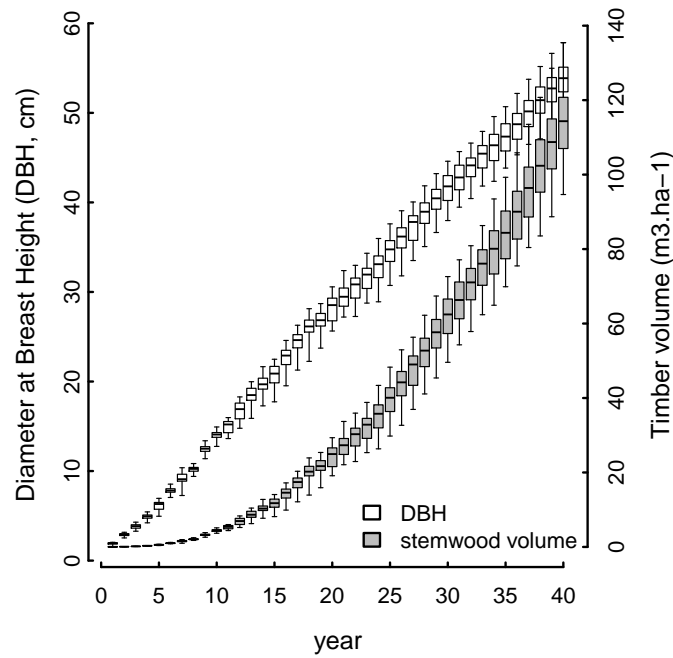


Figure 5.2.2: Dynamics of tree DBH and timber volume. Within box variability comes from the factors TREE, CROP, and CLIM (40 simulations). Lower and upper boundaries for each box stand for the 25th and 75th percentiles. The line inside each box indicates the median. Whiskers stand for the range of the values.

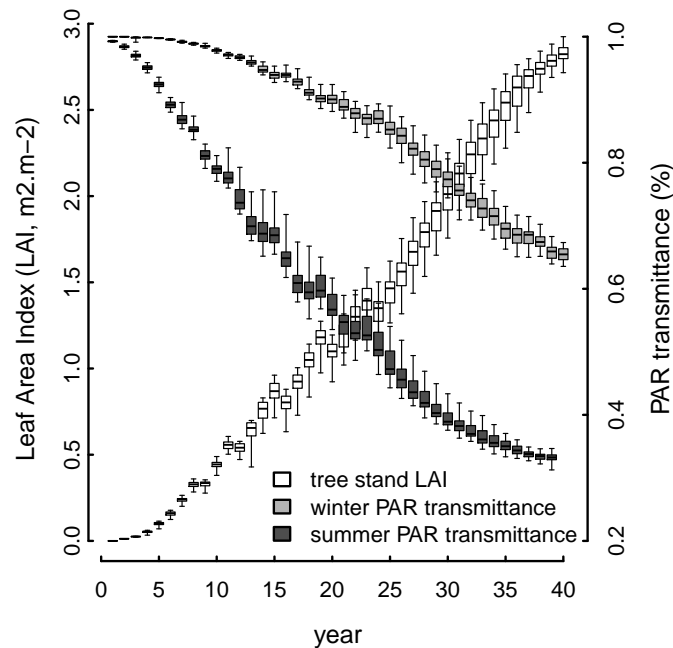


Figure 5.2.3: Light interception by trees: boxplots for the tree stand LAI, the mean PAR transmittance in winter (LAI = 0) and in full summer (LAI = maximum LAI). Within box variability comes from the factors TREE, CROP, and CLIM (40 simulations). Lower and upper boundaries for each box stand for the 25th and 75th percentiles. The line inside each box indicates the median. Whiskers stand for the range of the values.

5.3 Results

5.3.1 Tree growth and light use

A significant variability in tree growth resulted from the various factors included in the study (fig. 5.2.2). The final tree stand (40 year old) was 95 to 135 m³.ha⁻¹ of timber wood. Climate variability explained about 70% of the variance of both DBH and timber volume (data not shown). The remaining variance was mostly explained by tree earliness TREE (25%): early walnuts grew slightly faster than late ones (54.7 cm versus 53.0 cm for final DBH)

The summer PAR transmittance (under leafy trees) was higher than 80% during the first 10 years of the AF system (fig. 5.2.3). It decreased from 80 to 50 % between years 10 and 25, and was only 30% at the end of the simulation. During the 20 first years, the winter PAR transmittance remained above 90%. It decreased later down to 65% on the 40th year. In the winter period when the trees are leafless, branches and stems can intercept a significant proportion of the light. Moreover, at our latitude (43°), the sun declination is very low in winter, and sun beams pass through several trees before

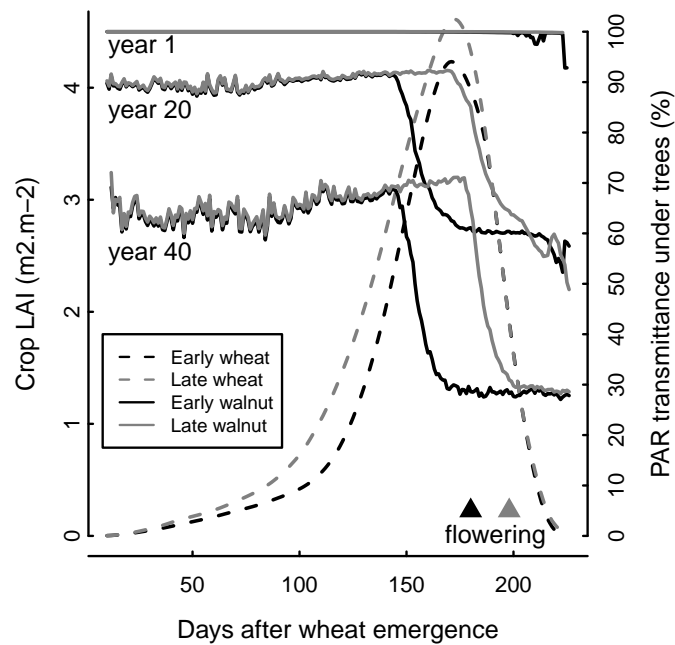


Figure 5.3.1: Dynamics of PAR transmittance under early and late trees during the crop cycle in years 1, 20 and 40, and average dynamics of the LAI of early and late crop .

reaching the soil.

As the budburst of trees occurs during the crop cycle, the crop faces the sharp transition between winter shade from branches and trunks and summer shade, as illustrated in figure 5.3.1.

5.3.2 Crop yield: main trends

The dynamics for crop yield in agroforestry (AF) are compared to pure crop control (PC) for the four combinations of the earliness of trees and crops in figure 5.3.2. The early crop cultivar was more productive and more stable in monocropping. The late cultivar was highly sensitive to climate variability. During the first years after tree plantation, yield reduction in AF resulted only from the uncropped tree strips representing about 7% of the total plot area. The AF system exhibited then a decreasing trend for crop yield, especially with early walnut, and a reduction of the interannual variability, especially for late wheat.

The overall productivity of agroforestry systems is usually measured by the Land Equivalent Ratio (LER, see Mead & Willey (1980)), defined as the sum of the relative yields for crops and trees in comparison with the yields of the same crops and trees over the same period in pure systems. It is worth distinguishing between the annual LER, calculated from annual yields (timber biomass increment for trees) and the integrated

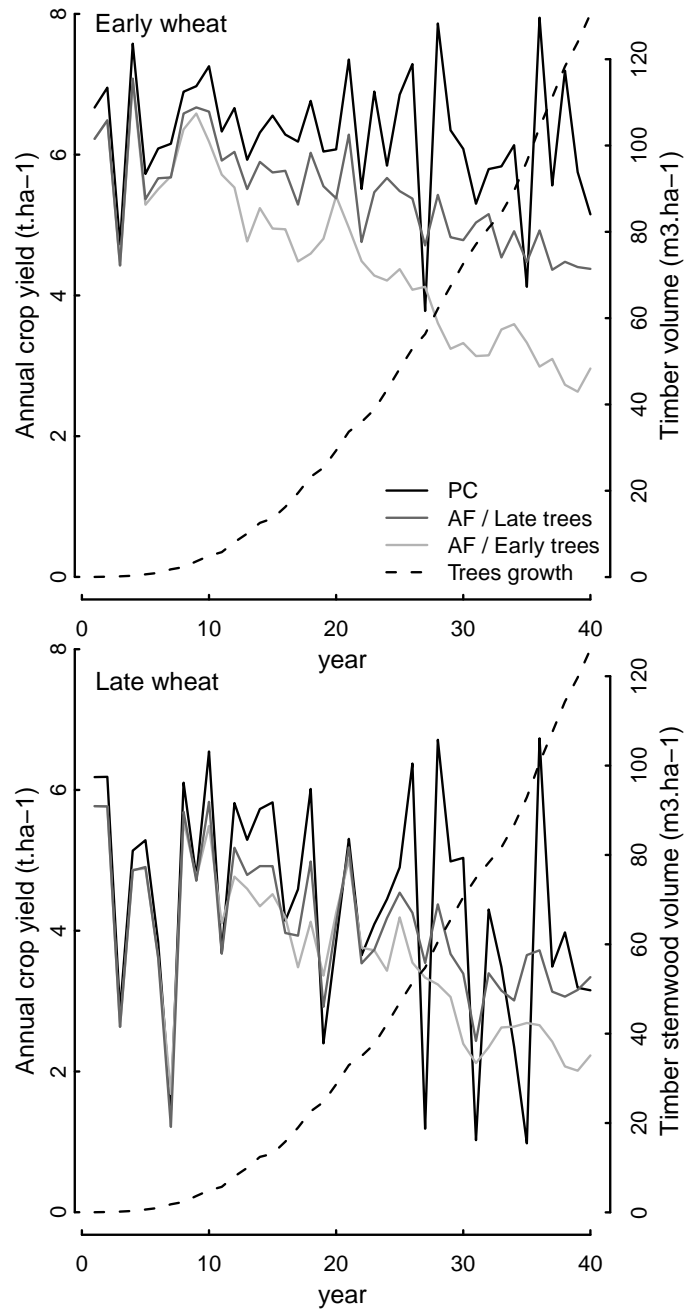


Figure 5.3.2: Crop yield variability of early (top) and late (bottom) wheat cultivars in pure crop control (PC) and agroforestry (AF) under either early or late walnut. (examples with CLIM = 1, and PARAM=1). Crop yield in AF is expressed per ha basis, including the tree row.

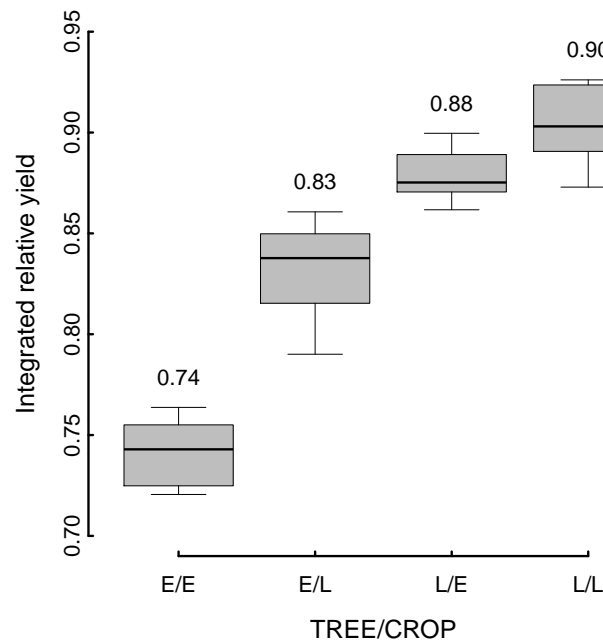


Figure 5.3.3: Integrated durum-wheat relative yield for the different combinations of tree (E: early, L: late) and crop (E: early, L: late) cultivars. Within box variability comes from the factor REP and PARAM (20 simulations). Lower and upper boundaries for each box stand for the 25th and 75th percentiles. The line inside each box indicates the median. Whiskers stand for the range of the values.

LER, calculated from cumulative yields over the whole simulation (Dupraz, 1999). The annual and integrated LER refer to two different analysis time-steps: one year and several years respectively. The relative integrated crop yield in our simulations ranged from 0.72 to 0.93 (fig. 5.3.3). It was much higher for late wheat than for early wheat, not due to higher yields in AF but to lower yields in PC. For both wheat cultivars, the integrated relative yield was higher under the late than under the early walnut. The relative integrated tree yield in our simulations ranged from 0.47 to 0.60 (results not shown, the forestry control was a 7 m x 7 m plantation), and the resulting LER ranged from 1.24 to 1.46.

5.3.3 Understanding the annual crop yield: the relative yield decomposition

The proposed decomposition for the annual log-relative yield includes two terms for light capture, five for the light use efficiency, and three for the harvest index (eq. 5.2.7). Table 5.3 gives a summary of the significance of each term.

Table 5.3: Decomposition of the annual log-relative yield y as $y = a + i + p + n + w + s + t + g + u + f$. A) Mean values and ranges. B) Analysis of covariance (ANCOVA). The regression model used for ANCOVA is detailed in section 5.2.5. Levels of significance are not presented, all effects were very significant, even if they explained less than 1% of variance. C) Slopes of the regression lines of each term versus L (LAI of the tree stand) for the different combinations of tree and crop cultivars.

variable x	y	a	i	p	n	w	s	t	g	u	f
A) variable summary:											
mean	-0.09	0.10	-0.33	0	0.04	0.04	0.04	0	0.02	0.04	-0.04
min	-0.96	-0.13	-1.05	-0.04	-0.19	-0.03	-0.01	-0.02	-0.06	-0.03	-0.66
max	1.41	0.56	0	0.02	0.29	0.62	0.12	0.05	0.15	0.34	1.11
% of > 0 values	36	92	0	27	76	95	99	52	94	94	43
B) ANCOVA, proportion of explained variance (%):											
L	21	64	94	31	43	46	90	2	56	37	8
L : TREE	9	3	5	25	16	-	6	4	1	-	10
L : CROP	5	1	-	9	1	-	-	-	-	19	-
L : CROP : TREE	1	-	-	3	-	-	-	-	-	-	1
Residuals	64	32	1	32	40	54	4	94	43	44	81
C) Slope of the regression $x = kL + 0$, absolute value (and value expressed in percent of the slope for term i):											
TREE/CROP:											
Early/Early	-0.21	0.08	-0.34	-0.01	0.06	0.03	0.04	≈ 0	0.02	0.01	-0.1
	(63)	(-25)	(100)	(2)	(-16)	(-9)	(-10)	(0)	(-6)	(-3)	(29)
Early/Late	-0.09	0.10	-0.33	≈ 0	0.04	0.04	0.03	≈ 0	0.02	0.06	-0.06
	(29)	(-32)	(100)	(1)	(-14)	(-11)	(-10)	(0)	(-6)	(-18)	(18)
Late/Early	-0.06	0.05	-0.2	≈ 0	0.02	0.03	0.02	≈ 0	0.02	0.01	0.01
	(27)	(-25)	(100)	(0)	(-8)	(-13)	(-10)	(0)	(-8)	(-5)	(-4)
Late/Late	≈ 0	0.07	-0.2	≈ 0	0.01	0.03	0.02	≈ 0	0.01	0.06	≈ 0
	(1)	(-32)	(100)	(0)	(-4)	(-16)	(-10)	(0)	(-6)	(-28)	(-2)

5.3.3.1 Light competition by trees (i effect)

The light competition by trees (term i) was the main component of the log-relative cereal yield. It took negative values ranging from -0.33 to -1.05 (tab. 5.3). This effect was mainly explained by the LAI of the tree stand (L , 94 %). The interaction of L with the factor TREE explained 5% further variance, indicating that defining a regression line for each tree cultivar is worthwhile, as illustrated in figure 5.3.4. The slope of the regression lines were -0.33 and -0.20 for early and late walnut respectively, indicating that for a given value of L , the average light availability from emergence to maturity was much more reduced under the early than under the late walnut. Adding the terms $L : \text{CROP}$ and $L : \text{CROP} : \text{TREE}$ had a negligible impact ($< 0.5\%$) on the explained variance, although the slopes of the regression $i = kL$ were slightly different for Early and Late wheat under Early walnut. Note that the slopes of the regression lines for i were much more negative than for the log-relative yield y , especially for Late wheat, indicating that some processes balanced the light competition from trees.

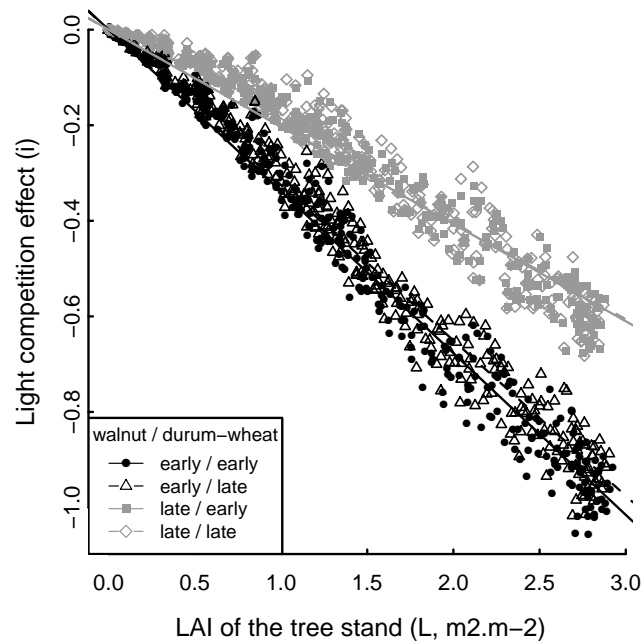


Figure 5.3.4: Light competition (i) term of the relative yield decomposition for the different combinations of tree and crop cultivars, as a function of the LAI of the tree stand (L)

5.3.3.2 Compensation by an increased light use efficiency: effects p , n , w , s and t

The effects of crop phenology and extreme temperatures on LUE were very similar for AF and PC, resulting in the relative effects p and t that were close to 0 (tab. 5.3). Both effects are negligible in the comparison of AF and PC, and will not be further discussed.

Light saturation was less active in AF as compared to PC. The effect of the light saturation of photosynthesis (s) was weak (range: -0.01 to 0.12) but almost always positive (tab. 5.3). It was fully explained by L (90%) and $L : \text{TREE}$ (6%), and quite perfectly correlated ($R^2 = 0.96$) to the light competition effect i . The slopes of the regression lines ranged from 0.02 to 0.04 , indicating that s balanced about 10% of the light competition effect.

The water stress was reduced in AF as compared to PC. The effect of the water stress (w) was positive in 95% of the cases, with a range of values from slightly negative (-0.03) to strongly positive (0.62). The overall effect of agroforestry on water stress is slightly positive, as shown by the positive slopes of w versus L . Walnut trees protect the wheat crop against water stresses. In the ANCOVA, L explained only 46% of w , and its interactions with TREE and CROP provided no further information, indicating that the weather variability had a major impact on w . This was confirmed by an other ANCOVA formulated as: $w \sim 0 + L + L : W_{PC}$, where W_{PC} is a measure of the water stress experienced by pure crops. In that ANCOVA, L and $L : W_{PC}$ explained 46% of the variance each, so that the residual was only 8%. The corresponding regression model was $w = 0.50L(1 - W_{PC})$. The mean value for W_{PC} in our simulations was 0.93 , explaining the slope 0.03 reported in table 5.3. Depending on the combination of TREE and CROP , the effect of the reduced water stress in AF on the LUE balanced 9% (Early/Early) to 16% (Late/Late) of the light competition effect.

Nitrogen stress was also reduced in AF as compared to PC. The effect of nitrogen stress (n) was positive in 76% of the cases, it took values ranging from -0.19 to 0.29 , and 60% of its variability was explained by L and by its interaction with TREE and CROP . The slopes of the regressions of n versus L were positive, indicating that nitrogen stress was reduced in AF compared to PC. This effect simply results from shading by trees, which reduced crop biomass and then nitrogen demand. The reduction of nitrogen stress balanced 4% (Late/Late) to 16% (Early/Early) of the light competition effect.

5.3.3.3 Compensation due to the dynamics of leaf area: effect a

The crop leaf area was increased in AF as compared to PC. The effect a was almost always positive (92% of the cases), and took values up to 0.56 (tab. 5.3). 64% of a variability was explained by L , and a little further by $L : \text{TREE}$ (3%) and by $L : \text{CROP}$ (1%). The regressions of a versus L had slopes ranging from 0.05 to 0.1 , off-setting 25 (early CROP) to 32% (late CROP) of the light competition effect. A positive a effect indicates that something favouring the AF crop happened in the dynamics of LAI. Understanding what happened requires a comparative analysis of the LAI dynamics for AF and PC. Such an analysis showed that the positive a values resulted mostly from a delayed leaf senescence in AF at the end of the crop cycle due to the reduced nitrogen and water stresses (results not shown), while the maximal value for LAI over the crop cycle was almost unchanged between AF and PC.

5.3.3.4 The harvest index issue

The harvest index was very dependent on the various phenology combinations. An increase duration of the grain filling period and a reduced heat stress effect were consistent across the various mixtures, while the number of grains exhibited different behaviours.

The duration of grain filling term (g) was almost always positive, indicating a prolonged grain filling in AF, and ranged from -0.06 to 0.15 (tab. 5.3). 57% of the g variability was explained by L . The residual variability of g was explained by the discrete nature of the duration of grain filling expressed as an integer number of days, generating threshold effects without biological meaning. The slopes for g versus L ranged from 0.01 to 0.02 , indicating that g off-set 6 to 8% of the light competition effect.

The term related to heat stress during grain filling (u) was almost always positive and took values up to 0.34 (tab. 5.3). As for the effect w , L was not sufficient to explain u , and we defined an other ANCOVA formulated as: $u \sim 0 + L + L : U_{PC}$, where U_{PC} is a measure of the heat stress experienced by pure crops. That regression explained 91% of u variability (37% for L and 54% for $L : U_{PC}$). The corresponding regression model was $u = 0.44L(1 - U_{PC})$. For early crop that experienced few heat stress in PC, the slope of u versus L was small and balanced only 3 to 5% of the light competition (i), whereas it balanced 18 (early tree) to 28% (late tree) of i for late crop.

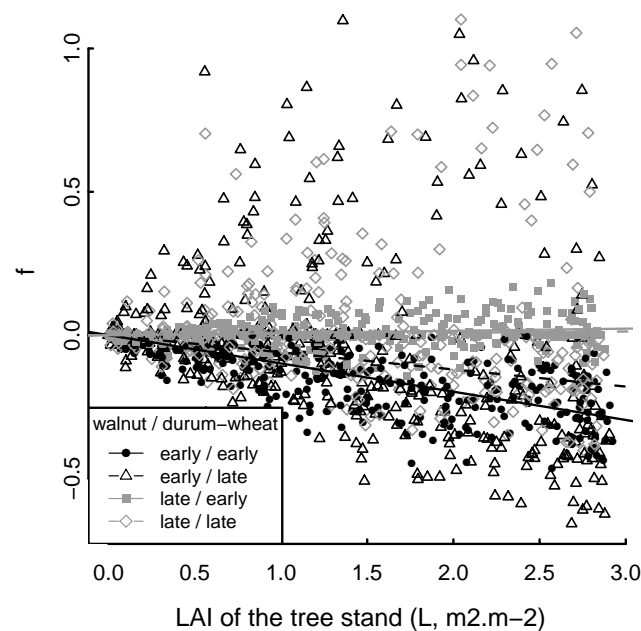


Figure 5.3.5: Grain number (f) term of the relative yield decomposition for the different combinations of tree and crop cultivars, as a function of the LAI of the tree stand (L)

The grain number term (f) ranged from very negative (-0.66) to very positive (1.11)

values, and this variability was poorly explained (less than 20%) by the ANCOVA including the variable L and the factors TREE and CROP (tab. 5.3). In the STICS model, a yield reduction by a low grain number only occurs if the biomass available for grain filling, computed as $BH_{max}GU$ (B : total biomass, H_{max} : maximal harvest index, G : reducer accounting for the duration of the grain filling period, U : reducer accounting for heat stress), is sufficient to reach the maximal grain weight (set by a parameter). In such cases, the term f takes negative values if the grain number is more reduced in AF compared to PC than the product of $BH_{max}GU$. We should recall that the grain number is computed from the biomass increment during the pre-anthesis period (30 days before anthesis). The figure 5.3.5 shows the responses of f to L for the different combinations of cultivars. The most negative f values were obtained for late wheat under early walnut, mixture in which tree budburst occurred always several days before the beginning of the pre-anthesis period (30 days before anthesis, see fig. 5.3.6). To the contrary, f never took very negative values in the early wheat - late walnut mixture, in which trees are leafless during the pre-anthesis period. In addition to the decreasing trend of f versus L , we observed very high f values for the late wheat, even for small values of L . These values correspond to cases when (1) the grain number was very low ($< 8000 \text{ m}^{-2}$) in PC due to severe stresses or reduced green leaf area during the pre-anthesis period and (2) these climatic accidents were partially avoided under tree shade. In our simulations, these situations were rare, f was larger than 0.1 in less than 10% of the cases, and the average effect of L on f was a negative effect under early walnut, for both early and late wheat.

5.4 Discussion

No previous paper intended to disentangle the various mechanisms that may explain the behaviour of temperate tree-crop systems with phenological lags between trees and crops. Most previously published results on the importance of phenological lags between trees and crops could not assess the interactions between such lags and the various growth limiting factors. The use of a dynamic model of tree-crop interactions added insights into such interactions.

Several authors indicate that mixing deciduous trees and winter crops is more efficient than mixing trees and summer crops such as Yin & He (1997) for paulownia-wheat systems in China. Poplar-wheat systems are well known for having high crop relative yields (Burgess et al., 2005; Swamy et al., 2006) while crops under evergreen trees such as eucalypts are much less productive (Kidanu et al., 2004). But field tests usually fail to quantify the reasons for such a behaviour. Is light limiting productivity, as usually assumed, or are soil factors (water, nitrogen, phosphorus) co-limiting intercrop productivity? Kho (2008) suggested that co-limiting factors are the rule, and may not be easy to detect in agroforestry systems. When water is limiting the growth and yield of pure crops, shade may become an advantage (Jose et al., 2004). However this simple

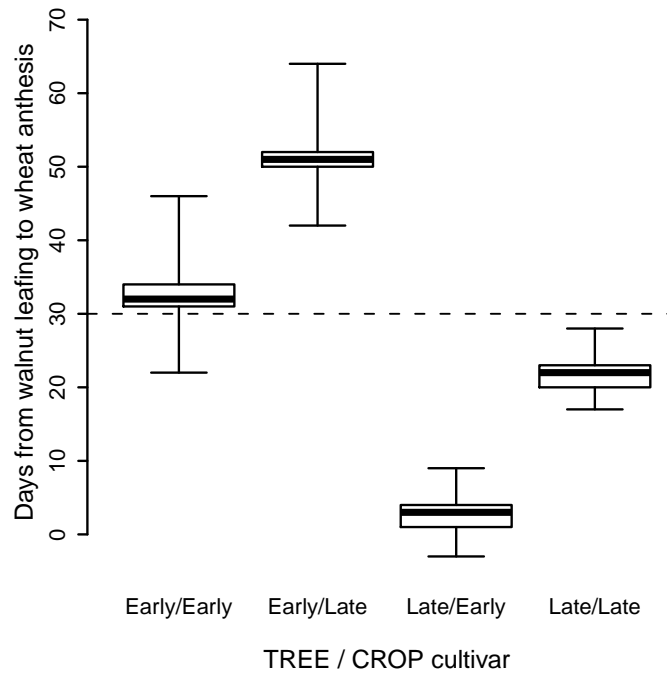


Figure 5.3.6: Time from walnut budburst to durum-wheat anthesis. Lower and upper boundaries for each box are the 25th and 75th percentiles. The line inside each box indicates the median. Whiskers mark the range of the values. The dashed line (30 days) indicates the length of the pre-anthesis period for durum-wheat for STICS.

explanation may not be relevant in many agroforestry cases for several reasons. The most obvious is that trees may worsen the water stress by competing for water, as evidenced on walnut-maize systems in North-America by Gillespie et al. (2000) in a very elegant experiment : when below-ground competition between walnut and maize was suppressed by trenching the tree roots, the maize yield was boosted even in the shade. Light was not limiting in the shade even for a C4 summer crop, water was.

The use of a dynamic model allowed us to identify and hierarchy the processes responsible for wheat yield differences between the pure crop and the agroforestry plot in our test case. Not surprisingly, the main effect of trees on crops was found to be light competition *per se* (effect *i*), and its intensity was much higher under early than under late walnuts. In addition to this trivial and direct effect, we identified 6 main processes influencing relative crop yield in the simulated system. These processes can be classified in three groups: (1) processes with a positive and systematic effect on relative yield, (2) processes with a positive but optional effect on relative yield, and (3) processes which may have a positive or negative effect on relative yield, depending on the situation.

The first group includes a lower light-saturation of the photosynthesis process (effect *s*), a reduced nitrogen stress (effect *n*), a delayed leaf senescence (effect *a*), and an increased duration of grain filling (effect *g*). The effect *s* compensated for 10 % of the

light deficit, whatever the species phenology. This process was often mentioned as a possible explanation for light competition compensations in agroforestry (Jose et al., 2004), but was never clearly evidenced, probably because of the difficulty to measure it independently from other processes. The reduction of nitrogen stress was simply due to reduced biomass and nitrogen needs in the shade. It was previously described in silvopastoral systems (e.g. Burner & Brauer, 2003), but never mentioned for cereals in agroforestry. In our simulations, the effect n compensated in average about 5 % of the light deficit under the late walnut, 15 % under the early walnut. The effect of delayed leaf senescence (a) was very efficient. Maintaining green leaves at the end of the crop cycle, it allowed an additional photosynthesis, and counterbalanced 25 and 32 % of the light deficit for early and late wheat respectively. Leaf lifetime in the crop model STICS is a function of nitrogen and water stress, a is thus an indirect effect of the reduction of both water and nitrogen stress in the shade. With the crop model SIRIUS, Semenov et al. (2009) also found wheat yield in water limiting conditions to be highly sensitive to the parameters governing the dynamics of leaf senescence.

The second group of processes, with a positive but optional effect on relative yield, includes the alleviation of water stress (effect w) and heat stress during grain filling (effect u). They were key processes during years with warm and dry spring climate, and were responsible for very high relative yields during such years. In the simulated situations, early and severe water stress with a significant impact on the mean light use efficiency over the crop cycle was quite rare, and the average w effect on relative yield compensated only 9 (early wheat under early walnut) to 16 % (late wheat under late walnut) of the light deficit. The probability of heat stress during grain filling was low for early wheat, crop yield was reduced more than 5 % one year in ten, and u compensated only 4 % of the light deficit. In contrast, the yield of the late wheat was reduced by heat stress two year of three and u compensated about 20 % of the light deficit.

The number of grains is the last relevant state variable that we identified for the determinism of the cereal relative yield and may have positive or negative effects. Negative effects are common with early walnut trees. The early walnut exerts a severe light competition on wheat during the pre-anthesis period, especially for the late wheat for which anthesis occurs about 50 days after tree's budburst. The result is a sharp decrease in the number of grains. This low number of grains may be partially offset by an increase weight per grain, but had usually a negative effect on relative yield (effect f), exacerbating the effects of light competition *per se*. The impact is less negative under late walnut: wheat biomass was more reduced than the grain number, and the grain number had no effect on the harvest index. In some cases when the number of grain was low in PC because of an early water stress, the alleviation of water stress in AF by trees led to very positive f .

These results should be considered with care, taking into consideration the adequacy of the concepts used in the model. STICS was not elaborated nor parameterized for simulating permanently shaded crops. It correctly simulates the succession of sunny and cloudy days on wheat growth, but the shade in mature agroforestry systems is

heavier. Some other aspects of tree-crop interactions are simulated in a very simple way by Hi-sAFe. The Hi-sAFe current version does not account for several processes that may influence the crop physiology. This is the case for the modification of the temperature and humidity of the air inside the cropped alleys. We intended to include a Shuttleworth-Wallace routine to predict the air temperature and humidity in the alleys, but field measurements did not evidence any significant difference so far, except on days with no wind at all. Similarly, the modification of wind speed in an alley cropping system is highly unpredictable, as both acceleration and easiness may be observed, depending on wind direction. Therefore, depending on weather conditions, opposite effects on crop evaporative demand and crop temperature may be observed in low density tree stands (Brenner, 1996; Cleugh, 1998). Our assumption that the evaporative demand was reduced proportionally to the incident radiation seems to be conservative. Regarding the LUE, the crop model STICS includes a systematic reduction of the photosynthesis light saturation in the shade, regardless of the intercepting leaf area (Brisson et al., 2009). Is that assumption still valid when the shade is not from erratic clouds, but from permanent trees? This hypothesis needs to be further evaluated. Finally, we may also question the way STICS does not distinguish between pre-anthesis assimilate reserves and post-anthesis photosynthesis for grain filling. Wang et al. (2003) indicated that post-anthesis shade may significantly diminish the harvest index, as grain filling largely relies on the net photosynthesis of the plant during the grain filling stage. As a consequence, STICS may underestimate the negative impact of shade during the grain filling stage. This could be monitored on experimental fields by photosynthesis measurements in the shade and in full sun during the grain filling stage.

Brisson et al. (2010) identified climate change as responsible for the current stagnation of cereal yields in western Europe. The frequency of water and thermal stresses in Spring is the main proposed explanation for poor yields in recent years. Lhomme et al. (2009) expect such processes to become very limiting for cereal production in Mediterranean areas. Our modelling exercise indicates that if the frequency of such events increases, as is predicted by most climate change models, agroforestry systems would protect cereal crops during harsh years and stabilize yields. While the genetic improvement of crops and varieties to face climate change is generally advocated (Ludwig & Asseng, 2010; Semenov et al., 2009), agroforestry could offer a second option as it would decrease the risks of poor yields for the crops and more than compensate the average loss of cereal production with the value of the tree products. Our results suggest that agroforestry systems could also help to maintain the use of long-cycle varieties with higher potential yields that will probably no longer be recommended in pure crop systems. These varieties may avoid the thermal and water stresses in the shade of the trees. However, this would only be efficient if agroforestry trees do not compete too much with crops for light or soil water resources. A proper management of the tree crop belowground interface is therefore recommended, as suggested by Mulia & Dupraz (2006), and would possibly include tree root trenching.

The comparison of early and late walnut simulations show that shade during pre-

anthesis is a strong reducer of cereal yield. The effect of artificial shade during the few weeks before anthesis on the number of grain has clearly been demonstrated (Fischer, 1985; Abbate et al., 1997; Demotes-Mainard & Jeuffroy, 2004). The role of the number of grains in the determinism of crop yield is more complicated. On the one hand, most authors agree that grain filling is sink-limited, i.e. that the yield is limited by the grain number. On the other hand, in cases of intense shade or severe water stress during grain filling, photosynthesis may become insufficient to meet the grain sink, and grain filling may become source-limited and rely on reserve remobilisation (Blum, 1998; Asseng & van Herwaarden, 2003). As a consequence, choosing a late tree cultivar to avoid yield losses will work only if the cereal crop is efficient in mobilizing its reserves for grain filling. This issue takes a special place in agroforestry systems, where tree leaf opening may happen before or after anthesis. If such cereal varieties were available, then optimal tree-crop systems would require late trees that would not shade the pre-anthesis stage of the cereal crop. Best tree-crop systems can only be designed by taking into account simultaneously genetic factors and management schemes.

5.5 Conclusions

Tree and crop phenological lag is a key process for the success of temperate agroforestry systems. It allows an increased capture of radiation by mixed plants resulting in high Land Equivalent Ratios that are never observed with mixtures of herbaceous crops. However competition for light is still active, as trees compete for light with crops when they are leafless (trunk and branches shade), and during the simultaneous phases of the tree and crop growth cycles, mainly in late spring and early summer. We demonstrated that competition for light may be partly compensated by a number of different processes that deal with the light use efficiency and the harvest index of the crop. Among these processes, we identified some mechanisms that were never taken into consideration by previous works: a delayed senescence of the leaves, the reduction of the Nitrogen stress or the reduction of the thermal stress during grain filling. The virtual experiment helped us to rank the various mechanisms involved. Some mechanisms are expected to become more and more important with climate change, such as the protection of crops against excess heat. While it is not easy to design new experiments aiming at exploring variability in tree and crop phenology, we may suggest innovative measurements on existing agroforestry plots to test the new hypotheses. We recommend monitoring closely the crop temperature, nitrogen status and photosynthesis rate during the grain filling stage of shaded crops in AFS, as these parameters may play a key role in the compensation mechanisms for light deficiency for shaded crops in agroforestry.

5.6 Acknowledgements

We do acknowledge the support of the Conseil Général de l'Hérault who provided continuous support for the management and study of the Restinclières agroforestry experimental site for the last 15 years, and the European Union who contributed to this work through the SAFE (Silvoarable Agroforestry for Europe) project from 2001 to 2005. We are committed to Isabelle Lecomte for her work on the implementation of the Hi-sAFe model, and to Sébastien Roux for his help during the development of the model.

Appendix

In this section, we propose a method for identifying how different processes occurring at the model time-step affect crop yield or a component of crop yield (e.g. biomass) at the time-step analysis. This method applies to variable V if the two following conditions apply:

First, the value of V at the analysis time-step results from the sum of positive increments at the model time-step $(\Delta V)_t$. This condition is not very restrictive for crop models, it applies for example to the total crop biomass in most crop models.

Second, for all time-steps t of the model, the increment $(\Delta V)_t$ can be reformulated in the form:

$$(\Delta V)_t = \prod_{i=1}^q E_{i,t} \quad (5.6.1)$$

where q is the number of processes involved in determining $(\Delta V)_t$, and $E_{i,t}$ are positive terms that can be computed from the model's parameters and from state and input variables at time-step t . It could be shown that a more general formulation, replacing the product of $E_{i,t}$ by a positive and increasing function of all $E_{i,t}$, would be a sufficient assumption for the demonstration below. However, we kept the multiplicative formulation to simplify the notations, and because it is general enough for most crop models. A simple example of such a formulation would be a model where the daily biomass increment is given by $(\Delta B)_t = L_t R_t$ with L_t the amount of light intercepted and R_t the light use efficiency.

Under these conditions, the variable V at the analysis time-step can be written as:

$$V = \prod_{i=1}^q E_{i|1:(i-1)} \quad (5.6.2)$$

where $E_{i|1:(i-1)}$ is the term corresponding to the process i given the values of the terms from 1 to $(i-1)$ is computed as:

$$E_{i|1:(i-1)} = \sum_{t=t_0}^{t_f} w_{i|1:(i-1),t} E_{i,t} \quad (5.6.3)$$

where $\omega_{i|1:(i-1),t}$ is defined as follows:

- For $i = 1$, $w_{i,t}$ equals unity for all t , and E_i is the sum of $E_{i,t}$.
- For $i \geq 2$, $w_{i|1:(i-1),t}$ is given by:

$$w_{i|1:(i-1),t} = \frac{\prod_{j=1}^{i-1} E_{j,t}}{\sum_{\tau=t_0}^{t_f} \prod_{j=1}^{i-1} E_{j,\tau}} \quad (5.6.4)$$

Note that the multiplicative decomposition of the variable V proposed in Equation 5.6.2 introduces a hierarchy of processes: the term relating to the process i explicitly depends on the dynamics of the processes from the first to the $(i - 1)^{\text{th}}$ through the definition of $w_{i|1:(i-1),t}$. As a consequence, several decompositions may be defined for a given model according to different choices for the hierarchy of the processes. Returning to our example, if we consider that light interception occurs before light conversion into biomass, the final biomass can be written $B = E_L E_{R|L}$. The first term, E_L , is computed as $E_L = \sum_{t=t_0}^{t_f} L_t$ and thus equals the amount of light intercepted, defined at the analysis time-step (L). The second term, relating to the LUE, is then computed as $E_{R|L} = \sum_{t=t_0}^{t_f} w_{R|L,t} R_t$ where $w_{R|L,t} = L_t / \sum_{\tau=t_0}^{t_f} L_t = L_t / L$. It is the average of the daily LUE weighted by the daily light intercepted (L_t). Note that the equation $B = L E_{R|L}$ implies that $E_{R|L} = B / L = R$ where R is the light use efficiency defined at the analysis time-step. This hierarchy of processes allows a decomposition of the biomass into meaningful terms at the analysis time-step, L and R . Switching the processes would lead to a decomposition that is more difficult to interpret, being an average of the intercepted light weighted by the daily LUE.

Chapitre 6

Comment placer les arbres dans une parcelle agroforestière ?

6.1 Introduction

Quelle est la densité de plantation des arbres permettant d'optimiser l'efficience biologique d'un système agroforestier ? Comment agencer les arbres dans une parcelle agroforestière ? Le choix de l'orientation des lignes d'arbres est-il important, et a-t-il une influence surtout sur les arbres ou sur les cultures ?

La réponse expérimentale à ce type de questions demanderait la mise en place de dispositifs expérimentaux de grande dimension pour s'affranchir des effets de bordure, sur des parcelles homogènes pour éviter les biais expérimentaux, et un suivi en continu sur de nombreuses années. A notre connaissance, il n'existe aucun dispositif expérimental permettant d'aborder ces questions. La seule exception est un dispositif mis en place par l'académie forestière chinoise en 1982 (Zhu et al., 1991; Yin & He, 1997), dans lequel différents espacements entre les lignes d'arbres ont été testés pour des systèmes agroforestiers à base de paulownia. Malheureusement, la croissance des paulownias dans cette expérimentation n'a pas été documentée pour les différents espacements, ce qui ne permet pas de conclure quant à la productivité globale de ces systèmes (Yin & He, 1997).

L'analyse de l'influence de l'organisation spatiale des systèmes agroforestiers sur leur fonctionnement est une des motivations principales ayant conduit à la conception du modèle Hi-sAFe. Dans ce chapitre, nous nous proposons d'étudier le déterminisme de la productivité globale (LER) d'un système agroforestier simulé par Hi-sAFe, l'association noyer hybride - blé dur de Restinclières, et sa dépendance vis à vis de deux critères de positionnement des arbres sur la parcelle : le motif de plantation des arbres et l'orientation des lignes d'arbres.

6.2 Matériel et méthode

6.2.1 Plan d'expérimentation virtuelle

Table 6.1: Plan d'expérimentation virtuelle utilisé pour optimiser la structure d'une parcelle agroforestière : facteurs testés et modalités retenues.

Nom	Nombre de niveaux	Description
MOTIF	5	Motif de plantation : voir les modalités dans le tableau 6.2.
ORIENT	2	Orientation des lignes d'arbres : nord-sud (NS) ou est-ouest (EO)
CALIB	2	Incertitude liée au paramétrage du noyer : jeux de paramètres n° 168 et 398 (voir chapitre 3)
REP	10	Variabilité climatiques : séries construites par tirages aléatoires avec remise dans la série réelle 1991-2009

Nous avons réalisé un plan d'expérimentation virtuelle basé sur notre simulation de référence représentant une association noyer hybride - blé dur située sur le domaine expérimental de Restinclières. Cette simulation de référence est présentée en détail dans les chapitres 3 et 4. Hormis les facteurs présentés dans la suite de cette section, toutes les données d'entrée (description de la parcelle, données pédo-climatiques, itinéraires techniques des arbres et des cultures, fichiers de paramètres,...) sont identiques à celles présentées dans le chapitre 3, et nous en rappelons ici uniquement les principales caractéristiques. Le climat de Restinclières est de type méditerranéen sub-humide, avec une sécheresse estivale marquée, et des pluies d'automne abondantes. Le sol est un fluvisol profond, avec une nappe alluviale dont le toit oscille généralement entre 4 m l'été et 2 m l'hiver, et remonte temporairement jusqu'en surface lors des épisodes pluvieux intenses. Le système agroforestier (AF) simulé associe des noyers hybrides plantés en lignes avec une culture intercalaire de blé dur, sur une rotation de 40 ans. Les noyers hybrides sont des arbres à phénologie tardive, qui débourent entre mi-avril et début mai selon les années, et perdent leurs feuilles en octobre ou novembre. Le blé dur est semé début novembre et récolté fin juin, il fleurit généralement peu de temps après le débourrement des noyers. Le témoin forestier (TF) utilisé comme référence pour évaluer ce système agroforestier est une plantation de noyers hybrides espacés de 7 m par 7 m, soit à une densité de 204 tiges.ha⁻¹. Le témoin agricole utilisé comme référence est une parcelle de blé dur menée avec le même itinéraire technique (travail du sol, date et densité de semis, fertilisations) que les allées cultivées agroforestières.

Nous avons exploré la réponse du système agroforestier simulé à l'agencement des arbres dans la parcelle en faisant varier deux facteurs (tableau 6.1) : le motif de plan-

tation (facteur MOTIF), défini par les espacements entre arbres sur (L_r) et entre les lignes (L_{ir}), et l'orientation des lignes d'arbres (facteur ORIENT). Deux modalités ont été testées pour le facteur ORIENT : les orientations nord-sud (NS) et est-ouest (EO). Le facteur MOTIF recouvre une gamme de densité de plantation allant d'environ 25 à 200 arbres.ha⁻¹, selon les 5 modalités D7-7, D11-5, D11-9, D19-11 et D19-19 présentées dans le tableau 6.2. Dans le système agroforestier D7-7, le motif de plantation des arbres est identique à celui du témoin forestier. Cette modalité permettra d'évaluer l'influence de la présence des cultures intercalaires sur la croissance des arbres, sans interactions avec le motif de plantation. La modalité D19-19, avec seulement 28 arbres.ha⁻¹, représente une association très extensive dans laquelle les arbres peuvent presque être considérés comme isolés. Les 3 autres modalités correspondent à des motifs de plantation typiquement agroforestiers avec un espacement entre les lignes plus grand que sur les lignes, permettant l'implantation de larges bandes de cultures intercalaires plus facilement compatibles avec la mécanisation. Elles ont été choisies de manière à représenter un gradient de densité de plantation. Les cultures sont implantées à 50 cm des lignes d'arbres dans toutes les modalités, permettant de cultiver entre 86 % (D7-7) et 95 % (D19-11 et D19-19) de la surface totale de la parcelle.

La somme LER_d des densités relatives des arbres (d_T , ratio entre les densités de plantation en AF et en TF) et des cultures (d_C , proportion de surface cultivée en AF) peut être interprétée comme un coefficient d'intensification du système : elle vaut 1 pour dans le cas d'un design substitutif, et 2 dans le cas d'un design additif. Le système agroforestier D7-7 est proche d'un design additif ($LER_d = 1.86$), très intensif, alors que le système D19-19 est au contraire très proche d'un design substitutif ($LER_d = 1.09$).

Afin d'évaluer la robustesse de nos résultats, chaque combinaison des facteurs MOTIF et ORIENT a été simulée avec plusieurs séries climatiques différentes (facteur REP, tableau 6.1), et avec deux jeux de paramètres différents pour le noyer (facteur CALIB, tableau 6.1). Le facteur REP a été construit par tirages aléatoires d'années climatiques dans la série 1991-2009, il permettra d'évaluer si les effets des facteurs MOTIF et ORIENT sur le fonctionnement du système sont dépendants de l'enchaînement des années climatiques. Le facteur CALIB correspond à deux jeux de paramètres retenus à l'issue de la phase de calibration du noyer hybride (voir chapitre 3 pour plus de détails), il permettra d'évaluer l'importance de notre incertitude concernant le paramétrage du noyer dans la réponse du système à l'agencement des arbres.

6.2.2 Analyse des résultats

Dans un objectif d'évaluation et de comparaison des différents systèmes agroforestiers simulés, les variables qui nous intéressent sont le LER_y , et les rendements relatifs intégrés des arbres (y_T) et des cultures (y_C), qui sont calculés à partir des rendements à l'échelle de la parcelle. Dans un objectif de compréhension des sources de différences entre les systèmes, nous changerons de point de vue. Pour les arbres, nous considérerons les croissances individuelles des arbres dans les différents systèmes (AF et TF),

Table 6.2: Principales caractéristiques des motifs de plantation testés. L_{ir} : espacement entre les lignes d’arbres (m); D_{ir} : densité de plantation entre les rangs (tiges.m⁻¹); L_r : espacements entre arbres sur le rang (m); D_r : densité de plantation sur le rang (tiges.m⁻¹); D : densité de plantation (tiges.ha⁻¹); d_T : densité relative de plantation par comparaison avec le témoin forestier à 204 tiges.ha⁻¹ (sans unité); L_a : largeur des allées cultivées (m); $d_C = L_c/L_{ir}$: proportion de surface cultivée (sans unité); $LER_d = d_C + d_T$: coefficient d’intensification.

Nom	L_{ir} (m)	D_{ir} (m ⁻¹)	L_r (m)	D_r (m ⁻¹)	D (tiges.ha ⁻¹)	d_T	L_a (m)	d_C	LER_d
D7-7	7	0.14	7	0.14	204	1	6	0.86	1.86
D11-5	11	0.09	5	0.2	182	0.89	10	0.91	1.8
D11-9	11	0.09	9	0.11	101	0.49	10	0.91	1.4
D19-11	19	0.05	11	0.09	48	0.23	18	0.95	1.18
D19-19	19	0.05	19	0.05	28	0.14	18	0.95	1.09

ainsi que le rendement relatif par individu (y_{ind}) et son évolution au cours du temps. Pour les cultures, nous nous intéresserons aux valeurs annuelles du rendement dans les allées cultivées, que nous appellerons “rendement allée” par opposition au “rendement parcelle” qui prend en compte les bandes non cultivées.

6.2.2.1 Sélection de variables explicatives

Afin de clarifier les relations entre les facteurs du plan d’expérience et les variables étudiées en sortie, nous utiliserons des modèles de régression multiple, couplés à des analyses de variances (ANOVA, “Analysis of variance”). Dans certains cas, nous verrons qu’il est possible de remplacer certains facteurs par des variables quantitatives, ce qui permet de réduire le nombre de paramètres et de faciliter l’interprétation des modèles de régression. Dans ces cas, nous utiliserons des analyses ANCOVA (“Analysis of covariance”), qui permettent de traiter simultanément des variables explicatives qualitatives et quantitatives, à la place des ANOVA.

Étant données les dimensions des jeux de données générés par modélisation, les critères classiques de significativité statistique ne sont pas adaptés pour sélectionner les variables et/ou facteurs pertinents pour expliquer la variabilité d’une variable d’intérêt. Nous ne présenterons pour cette raison aucun test statistique, ni aucune p-value relative aux analyses de variances réalisées (elles sont toutes très significatives). La sélection de facteurs et/ou variables explicatifs sera faite uniquement sur le critère de proportion de variance expliquée.

6.2.2.2 Décomposition du rendement relatif

Le déterminisme du rendement relatif des arbres sera analysé en utilisant la méthode de décomposition du rendement relatif (RYD), développée dans le chapitre 2. Nous avons montré dans ce chapitre que le rendement relatif par arbre (y_{ind}) peut être décomposé comme le produit de 6 termes : une capacité relative d'interception du rayonnement (a) et un indice relatif de compétition pour la lumière (i), qui déterminent la quantité relative de lumière interceptée, des effets relatifs de la phénologie (p) et du stress hydrique (w) sur l'efficacité de conversion du rayonnement (LUE), et des proportions relatives de biomasse allouée aux compartiments aériens (h_a) et de biomasse aérienne allouée au tronc (h_s). Les effets p et w étant très faibles et tous les deux négatifs, nous considérerons uniquement leur produit r , la LUE relative. Le rendement relatif individuel sera donc décomposé comme :

$$y_{ind} = airh_a h_s \quad (6.2.1)$$

Le déterminisme du rendement relatif des cultures, analysé par la même méthode, s'est révélé indépendant des facteurs étudiés ici. Les analyses présentées dans les chapitres 4 et 5 restent donc valables, et ne seront pas reprises dans ce chapitre.

6.3 Résultats

6.3.1 Dépendance du LER à l'agencement des arbres

6.3.1.1 Valeurs finales (à 40 ans)

Les LER_y simulés sont compris entre 1.20 et 1.59, leur variabilité est principalement expliquée par le motif de plantation (MOTIF : 94 % de la variance) et dans une moindre mesure par l'orientation des lignes d'arbres (ORIENT : 2 %, interaction ORIENT : MOTIF : 2 %) ¹. Les LER_y les plus élevés sont obtenus dans le système avec le même motif de plantation que dans le témoin forestier (D7-7, $LER_y = 1.55 \pm 0.02$) (figure 6.3.1), et les plus faibles dans le système avec la densité de plantation la plus faible (D19-19 m, $LER_y = 1.23 \pm 0.02$). Les motifs D19-11 et D11-9 ont des LER_y intermédiaires entre D19-19 et D7-7. Le système D11-5, bien qu'ayant une densité de plantation presque équivalente au D7-7, a un LER_y largement inférieur. Dans les 3 systèmes avec une différence entre les densités de plantation sur et entre les lignes, l'orientation nord-sud des lignes conduit à des valeurs de LER_y plus élevées que l'orientation est-ouest. Lorsque les espacements sur et entre les lignes sont similaires, l'orientation des lignes d'arbre n'a aucun effet sur le LER_y .

1. Dans le plan d'expérience réalisé ici, 2 des 5 motifs de plantation sélectionnés ont des espacements sur et entre les lignes d'arbres identiques. Dans ces cas, l'orientation des lignes d'arbres ne modifie en réalité que l'orientation des allées cultivées. Avec un plan d'expérience différent, nous aurions probablement obtenu une proportion de variance expliquée par le facteur ORIENT plus importante.

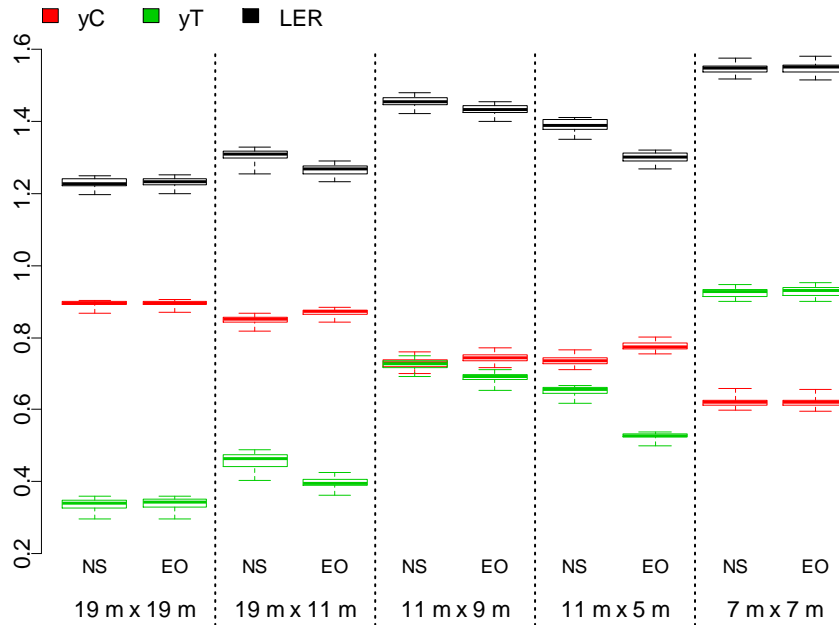


Figure 6.3.1: Variation du LER_y et des rendements relatifs des cultures (y_C) et des arbres (y_T) en fonction des facteurs MOTIF et ORIENT. La variabilité intra-boîte correspond aux 20 modalités obtenues par combinaison des facteurs REP et CALIB. La ligne médiane, les bordures et les moustaches des boîtes correspondent à la médiane, aux premier et troisième quartiles et aux valeurs extrêmes respectivement.

Les rendements relatifs des arbres (y_T) et des cultures (y_C) ont des réactions opposées aux facteurs MOTIF et ORIENT : y_T varie avec les mêmes tendances que le LER_y , et avec une plus grande amplitude, alors que y_C varie dans le sens contraire, avec une moindre amplitude. Hormis dans le système D7-7, ce sont les cultures qui contribuent le plus au LER_y ($y_C > y_T$). Dans le système D11-9, les contributions des arbres et des cultures sont presque identiques.

6.3.1.2 Trajectoires de LER

La figure 6.3.2 représente les LER_y moyens obtenus pour chaque modalité dans le plan des rendements conjoints. Dans ce plan, les axes des abscisses et des ordonnées sont les rendements relatifs des cultures (y_C) et des arbres (y_T) respectivement. Le témoin forestier (TF) et le témoin agricole (TA) correspondent aux points (0, 1) et (1, 0), et la droite reliant les deux correspond à la valeur 1 de LER_y . En début de simulation, les rendements relatifs des arbres et des cultures sont égaux aux densités relatives ($y_C = d_C$ et $y_T = d_T$), qui sont imposées par le motif de plantation (tableau 6.2), et le LER_y est égal au LER_d . Ces valeurs initiales sont représentées par les motifs vides sur la figure 6.3.2, et les valeurs finales (à 40 ans) par les motifs pleins. A chaque simulation correspond une

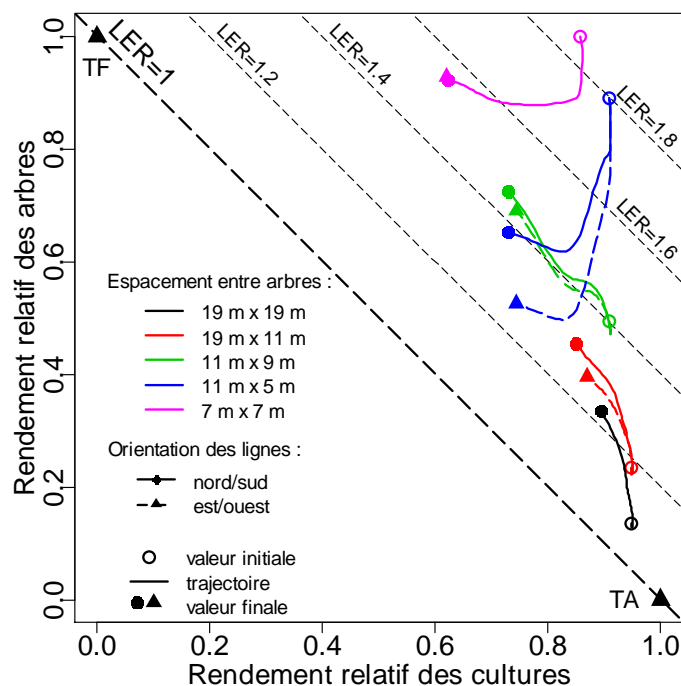


Figure 6.3.2: Trajectoires de LER_y pour les différentes modalités des facteurs MOTIF et ORIENT. Chaque courbe correspond à une moyenne sur 20 simulations obtenues par croisement des facteurs REP et CALIB. Les courbes ont été lissées par splines pour plus de lisibilité (fonction `smooth.spline` de R, avec 7 degrés de liberté)

trajectoire dans le plan des rendements conjoints. Si rien de “notable” ne se passait dans les systèmes agroforestiers simulés, c’est à dire si les arbres et les cultures se comportaient exactement de la même manière dans le système agroforestier que dans les témoins, les rendements relatifs et les LER_y devraient se maintenir à leurs valeurs initiales. Tout déplacement selon l’axe des ordonnées signifie une différence de rendement individuel entre arbres forestiers et agroforestiers. Tout déplacement selon l’axe des abscisses signifie une différence de rendement placette entre cultures agroforestières et témoin agricole.

Plus la densité de plantation des arbres est élevée, plus le LER_d et donc le LER_y initial sont élevés (tableau 6.2, figure 6.3.2). On observe deux grands types de trajectoires, en fonction de la densité de plantation. Dans les systèmes D7-7 et D11-5, à forte densité de plantation, le LER_y diminue en cours de simulation, dans un premier temps selon l’axe y_T , indiquant un rendement par arbre diminué par rapport au TF, et dans un second temps selon l’axe y_C , indiquant une perte de rendement allée pour les cultures agroforestières. Dans les systèmes à faible densité de plantation (D19-19 et D19-11), au contraire, le LER_y est initialisé à des valeurs faibles et augmente progressivement en cours de simulation. Cette augmentation résulte d’une augmentation de y_T , partiellement compensée par une diminution de y_C . Le système D11-9 a un comportement proche des systèmes à faible densité de plantation, mais la diminution de y_C et l’augmentation

de y_T sont de même amplitude, et le LER_y se maintient à sa valeur initiale, avec un remplacement progressif de y_C par y_T .

Les valeurs de LER_y obtenues pour les différents agencements des arbres sur la parcelle sont le résultat de trajectoires contrastées. Quel que soit le motif de plantation, le rendement relatif des cultures diminue en cours de simulation, l'ampleur de cette diminution étant d'autant plus importante que la densité de plantation des arbres est élevée. Le rendement relatif des arbres diminue en cours de simulation dans les systèmes à forte densité de plantation (D7-7 et D11-5), alors qu'il augmente progressivement dans les autres systèmes. Dans les sections suivantes, nous allons nous attacher à décortiquer le déterminisme de ces rendements relatifs, et de leur réponse aux deux facteurs définissant l'agencement des arbres dans les parcelles : MOTIF et ORIENT.

6.3.2 Déterminisme du rendement des arbres agroforestiers

Pour un arbre donné, il existe une relation stricte entre le diamètre à hauteur de poitrine (DBH, cm) et le rendement (volume du tronc, $m^3 \cdot arbre^{-1}$) simulés par Hi-sAFé, fixée par des lois d'allométrie (voir section 1.2.2.2). Le DBH d'un arbre étant une mesure plus intuitive à appréhender que le volume de son tronc, l'analyse comparée de la croissance individuelle des arbres sera faite sur les diamètres.

6.3.2.1 Croissance en diamètre

Après 40 ans de croissance, les noyers forestiers ont un diamètre (DBH) de 51 cm en moyenne, variant de 49 à 52 cm selon la répétition climatique. Les noyers agroforestiers ont un diamètre (DBH) moyen de 58 cm, avec un minimum de 39 cm et un maximum de 79 cm (6.3.4a). La variabilité des diamètres simulés à 40 ans en AF est expliquée à 96.8 % par le facteur MOTIF. L'ajout du facteur ORIENT (et de son interaction avec MOTIF) permet d'expliquer 1.2 % de variabilité supplémentaire. Le facteur CALIB et ses interactions avec MOTIF et ORIENT représentent 0.6 % de la variabilité, et la résiduelle (facteur REP et interactions) 1.5 %. La figure 6.3.3 présente l'évolution en cours de simulation de cette répartition de la variabilité entre facteurs. La variabilité climatique (REP) et le facteur CALIB sont responsables de la majorité de la variabilité du diamètre en début de simulation, mais leur influence décroît rapidement au profit du facteur MOTIF, et dans une moindre mesure du facteur ORIENT. Nous ne discuterons par la suite que des effets des facteurs MOTIF et ORIENT sur la croissance des arbres agroforestiers, ces facteurs étant manipulables par le design du système agroforestier. Les facteurs REP et CALIB seront considérés comme des sources d'incertitude.

L'effet net de la présence de cultures intercalaires sur la croissance en diamètre peut être évalué sur le système agroforestier qui a le même motif de plantation que le témoin forestier (D7-7). Dans ce système, les arbres ont un diamètre réduit de 1.6 cm en moyenne par rapport au TF. Cette différence prend des valeurs entre 0.1 et 3.2 cm selon les répétitions climatiques.

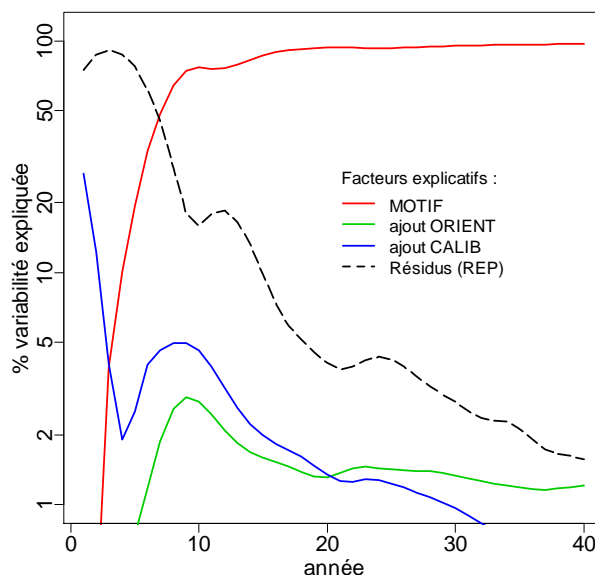


Figure 6.3.3: Évolution de la décomposition de la variance du DBH des arbres agroforestiers. MOTIF : motif de plantation. Ajout ORIENT : orientation de lignes d'arbre et interaction avec MOTIF. Ajout CALIB : jeux de paramètres pour le noyer hybride et interactions avec MOTIF et ORIENT. Pour chaque année, la décomposition de la variance a été obtenue par une ANOVA sur le modèle de régression linéaire : $DBH \text{ MOTIF} * \text{ORIENT} * \text{CALIB}$. Les courbes ont été lissées par splines pour améliorer la lisibilité de la figure (fonction `smooth.spline` de R, avec 15 degrés de liberté).

Les diamètres les plus élevés sont atteints dans le système D19-19, dans lequel les arbres peuvent presque être considérés comme isolés. Les diamètres les plus faibles, ne sont pas atteints dans le système le plus dense (D7-7) comme on aurait pu s'y attendre, mais dans le système avec l'espacement sur le rang le plus faible (D11-5). Dans les systèmes D11-9 et D19-11, les arbres atteignent des diamètres intermédiaires entre ces deux extrêmes. Lorsque l'espacement entre lignes d'arbres est différent de l'espacement sur la ligne, les diamètres simulés sont plus élevés dans les systèmes orientés nord-sud (NS) que dans ceux avec une orientation est-ouest (EO). L'écart entre les orientations NS et EO est d'autant plus important que la densité de plantation sur le rang est différente de celle sur l'inter-rang. L'ensemble de ces tendances peut être résumé par le modèle de régression linéaire suivant :

$$DBH = 89.7 - 281.1D_r + 48.6D_rF - 3.9FO \quad (R^2=0.98) \quad (6.3.1)$$

où D_r est la densité de plantation sur le rang (m^{-1}), F est une mesure de la différence entre densité de plantation sur le rang (D_r) et sur l'inter-rang (D_{ir}) : $F = D_r/D_{ir} - 1$, et O est une variable valant 0 pour une orientation nord-sud des lignes d'arbres et 1 pour une orientation est-ouest.

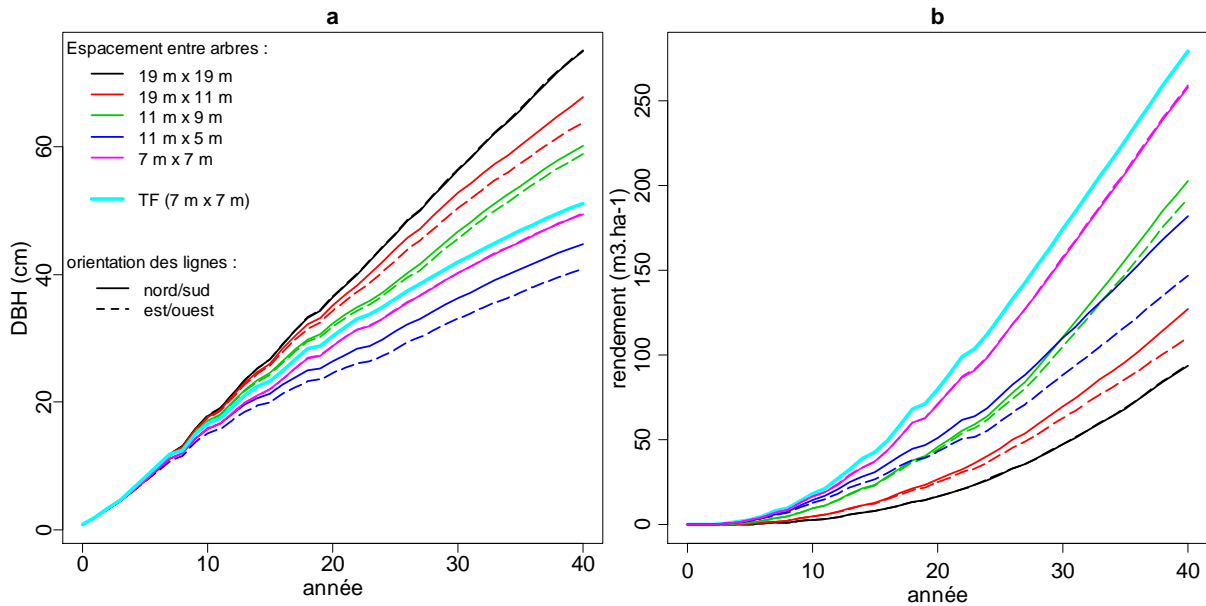


Figure 6.3.4: Croissance en diamètre (a) et rendement (b) des arbres agroforestiers en fonction du design de la plantation (espacement entre arbres et orientation des lignes d'arbres). Les courbes sont des moyennes sur les 20 modalités des facteurs REP et CALIB.

6.3.2.2 Rendement du peuplement

Le rendement en bois d'une parcelle ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) est donné par le produit du rendement individuel des arbres, assimilé ici au volume du tronc ($\text{m}^3 \cdot \text{arbre}^{-1}$), et de la densité de plantation ($\text{arbre} \cdot \text{ha}^{-1}$). L'évolution du rendement en bois des différents systèmes est reportée en figure 6.3.4b. C'est dans le témoin forestier que le rendement du peuplement est le plus élevé, il atteint $279 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ à 40 ans, soit une productivité de $7 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$. Dans le système agroforestier à 7 m par 7 m, la légère diminution de diamètre causée par la présence des cultures entraîne une diminution de 7 % de la productivité du peuplement. Dans le système à 11 m par 5 m, bien que la densité soit presque équivalente à celle du TF, la productivité du peuplement est réduite de 35 et 47 % pour les orientations nord-sud et est-ouest respectivement. Dans les autres systèmes, le gain de productivité par arbre est loin de compenser la diminution de densité, et le rendement du peuplement est très inférieur à celui simulé en TF. Dans le système D19-19 par exemple, le rendement atteint en moyenne $94 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, soit une réduction de 66 % par rapport au TF, alors que le rendement par arbre est presque multiplié par 2.5 (3.36 m^3 contre 1.37 m^3).

6.3.2.3 Les rendements relatifs et leur déterminisme

L'évolution du rendement relatif du peuplement d'arbres (y_T) pour les différentes combinaisons des facteurs MOTIF et ORIENT est reportée en figure 6.3.5a. Le rendement relatif du peuplement dépend de la densité relative de plantation d_T , imposée par le motif

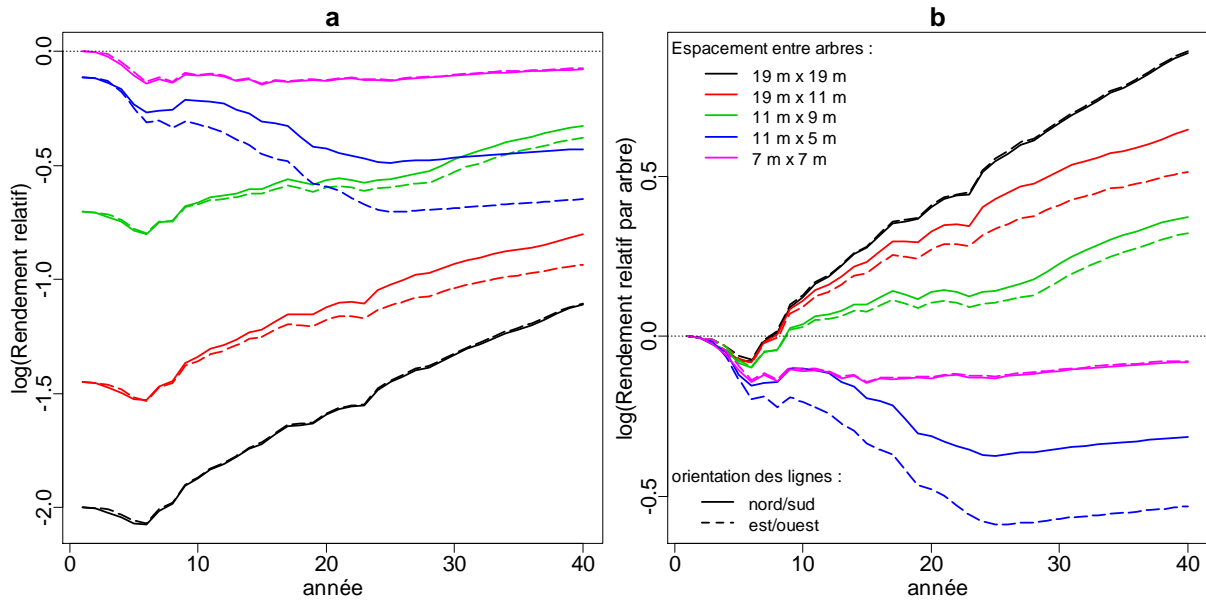


Figure 6.3.5: Évolution du rendement relatif parcelle (a) et du rendement relatif par arbre (b) pour les différentes combinaisons des facteurs MOTIF et ORIENT. Chaque courbe est une moyenne sur les 20 modalités correspondant au croisement des facteurs REP et CALIB.

de plantation (tableau 6.2), et du rendement relatif par arbre y_{ind} , dont l'évolution est présentée dans la figure 6.3.5b. La comparaison des deux figures 6.3.5a et 6.3.5b met bien en évidence l'effet de la densité de plantation sur le rendement relatif. Les différentes composantes du rendement relatif par arbre (voir équation 6.2.1) et leur évolution dans le temps sont présentées dans la figure 6.3.6. Nous avons utilisé une transformation logarithmique pour représenter le rendement relatif (figure 6.3.5) et ses composantes (figure 6.3.6). Cette transformation permet de passer d'une décomposition multiplicative du rendement relatif par arbre (équation 6.2.1) à une décomposition additive de son logarithme. Cela signifie que pour une combinaison donnée des facteurs CALIB et ORIENT, la courbe de la figure 6.3.5b est égale à la somme des 5 courbes de la figure 6.3.6. Par abus de langage, nous dirons qu'un terme de la décomposition est positif, négatif ou neutre si son logarithme est positif, négatif ou égal à 0.

Pendant les premières années de simulation, le rendement relatif par arbre diminue légèrement, quelles que soient les modalités de MOTIF et ORIENT (fig. 6.3.5). Cette diminution s'explique principalement par les termes a , h_a et h_s , et son amplitude dépend essentiellement de la répétition climatique (facteur REP). Le terme h_a quantifie la différence d'allocation de carbone vers les racines entre arbres AF et TF, sa diminution indique que les arbres AF investissent une plus grande proportion de leur biomasse dans leurs racines que les arbres TF. Cette diminution est le résultat de trois processus différents. Le premier est le travail du sol, qui, en détruisant les racines de surface, accélère le taux de renouvellement des racines. Les deux autres résultent de l'assèchement des

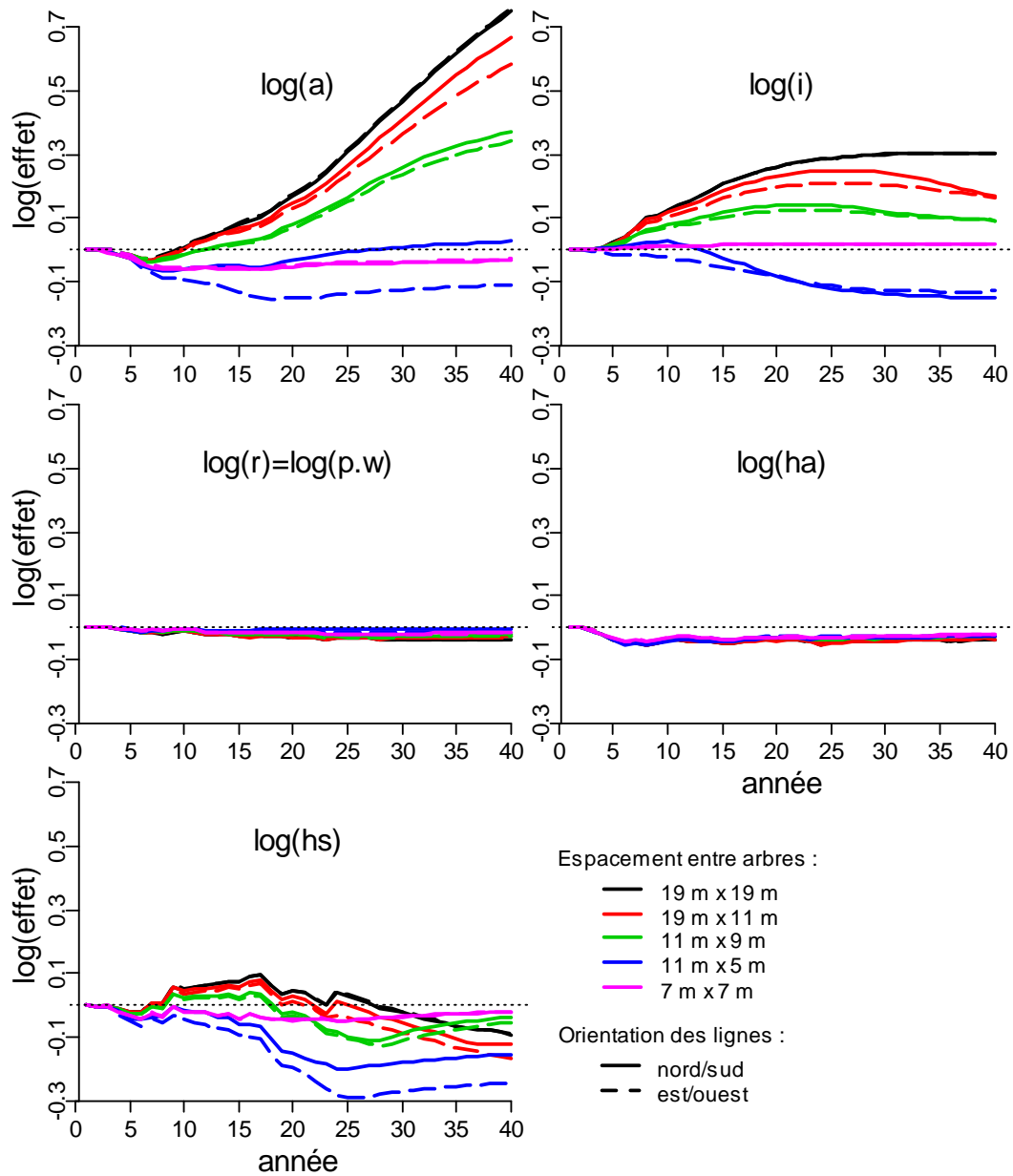


Figure 6.3.6: Décomposition du rendement relatif par arbre. a : capacité relative d'interception du rayonnement. i : indice relatif de compétition pour la lumière. r : efficacité relative de conversion de la lumière (produit des effets p et w). h_a : proportion relative de biomasse allouée aux compartiments aériens. h_s : proportion relative de biomasse aérienne allouée au tronc. Chaque courbe est une moyenne sur les 20 modalités correspondant au croisement des facteurs REP et CALIB.

horizons de surfaces par les cultures : cela induit la formation de systèmes racinaires plus profonds, donc plus coûteux en racines de structure, et augmente l'intensité des stress hydriques, auxquels les arbres répondent par une allocation préférentielle vers les racines.

Tant que le développement des houppiers n'est pas contraint par la compétition entre arbres pour l'espace, les termes h_s et a sont de simples effets de rétroaction positifs résultant des relations d'allométrie aériennes, et amplifiant l'effet de h_a . On peut en effet déduire des relations d'allométrie (section 1.2.2.2) que : (1) plus un arbre est grand, plus il développe un houppier volumineux et une surface foliaire importante, ce qui lui permet d'intercepter une plus grande quantité de rayonnement (effet a , rétroaction positive), et (2) plus un arbre est grand, plus son tronc représente une fraction importante de la biomasse aérienne totale (effet h_s , rétroaction positive). Il est intéressant de noter que dans ces simulations, la contrainte hydrique a un effet direct négligeable sur la LUE moyenne (effet r), mais se répercute sur la croissance des arbres par une modification des allocations aérien/souterrain (h_a), dont l'effet est lui même amplifié par d'autres processus.

Dans le système agroforestier à D7-7, c'est à dire avec le même motif de plantation que le TF, y_{ind} se stabilise à partir de la cinquième année, indiquant que la présence des cultures n'a plus d'effet significatif sur la croissance des arbres. On observe par contre une divergence des courbes de y_{ind} en fonction du motif de plantation et dans une moindre mesure de l'orientation des lignes d'arbres. Cette divergence s'explique par les termes i , a et h_s . Le terme i traduit l'intensité de la compétition pour la lumière. Dans les systèmes avec une moindre densité de plantation sur le rang que dans le TF, i prend des valeurs positives, indiquant une compétition pour la lumière moins intense que dans le TF. Il augmente d'autant plus rapidement et se stabilise au bout d'autant plus de temps que les arbres sont éloignés les uns des autres. Dans le système planté à D11-5, la compétition pour la lumière est au contraire plus intense que dans le TF, même si la densité totale de plantation y est légèrement plus faible, et fortement dépendante de l'orientation des lignes. Les arbres en lignes orientées nord-sud se font moins de compétition que les arbres en lignes est-ouest, et même légèrement moins que dans le TF pendant les premières années. Cette différence entre lignes nord-sud et est-ouest s'amointrit au cours du temps, et les courbes de i se rejoignent à partir de 20 ans. Dans les autres systèmes (D11-9 et D19-11), l'effet de l'orientation des lignes d'arbres apparaît plus tard, et avec une moindre intensité.

Les termes a et h_s jouent dans un premier temps le même rôle amplificateur que dans la décroissance de y_{ind} des premières années, avec cette fois-ci une conséquence positive sur y_{ind} dans les systèmes pour lesquels i est positif (D19-19, D19-11 et D11-9). Ils sont ensuite affectés par un autre phénomène : la compétition aérienne pour l'espace. Tant que les houppiers des arbres ne se touchent pas les uns les autres, leur expansion latérale est déterminée par les relations d'allométrie. Lorsque les houppiers se rejoignent, leur croissance horizontale est stoppée et seule la croissance verticale reste possible, ce qui réduit considérablement la croissance en volume des houppiers. Plus les arbres sont

espacés, plus ils développent des houppiers volumineux, ce qui augmente leur surface interceptrice (augmentation de a), mais nécessite un investissement plus important vers les branches et les feuilles (diminution de h_s).

6.3.3 Déterminisme du rendement des cultures agroforestières

Commençons par un point de vocabulaire. Hi-sAFe simule une valeur de rendement des cultures chaque année et pour chaque position sur la scène agroforestière, avec une résolution de 1 m^2 . Ces valeurs ponctuelles seront appelées rendements placette, et notées $Y_{i,AF,p}$. Pour une année i donnée, la moyenne sur l'allée cultivée des rendements placettes sera appelée rendement allée annuel et notée $Y_{i,AF,a}$. Le rendement allée intégré, $Y_{AF,a}$, est le cumul des rendements allées annuels depuis le début de la simulation. Le rendement parcelle intégré (Y_{AF}), utilisé pour l'évaluation du système, est égal au produit du rendement allée intégré et de la proportion de surface cultivée (d_C). Dans cette partie consacrée au déterminisme du rendement des cultures, nous nous intéresserons uniquement aux rendements placettes, et aux rendements allées annuels et intégrés. Pour le témoin agricole, les rendements placette et parcelle étant équivalents, nous distinguerons uniquement rendement annuel ($Y_{i,TA}$) et rendement intégré (Y_{TA}).

6.3.3.1 Du rendement placette au rendement relatif intégré : illustration par la comparaison de simulations nord-sud et est-ouest

La figure 6.3.7a présente des exemples d'évolution des rendements placettes et allées simulés dans un témoin agricole et dans deux simulations agroforestières correspondantes, avec des lignes d'arbres orientées nord-sud ou est-ouest. Le rendement simulé dans le témoin agricole vaut en moyenne 6.9 t.ha^{-1} , avec une forte variabilité interannuelle, de 3.6 à 9 t.ha^{-1} . Pendant les 10 premières années, le rendement placette est légèrement diminué à proximité des arbres dans les parcelles agroforestière (voir valeurs minimales sur la figure 6.3.7a), mais sans impact notable sur le rendement allée. Les rendements allées diminuent ensuite progressivement, pour atteindre des valeurs moyennes de l'ordre de 5 t.ha^{-1} en fin de simulation. Leur variabilité interannuelle est fortement tamponnée par rapport au témoin agricole. En particulier, le rendement est moins voire pas affecté en AF les années où il est fortement réduit en TA, avec pour conséquence des valeurs de rendement relatif annuel élevées (figure 6.3.7b).

Les rendements allée suivent une dynamique similaire pour les parcelles nord-sud (NS) et est-ouest (EO), malgré des valeurs légèrement plus faibles dans la parcelle NS en fin de simulation. On observe par contre une variabilité intraparcellaire du rendement placette beaucoup plus importante dans la parcelle EO que dans la parcelle NS. Le coefficient de variation intraparcellaire du rendement placette dans la parcelle NS, nul en début de simulation, augmente progressivement jusqu'à la 25^{ème} année où il atteint un maximum de 7 %, indiquant un rendement placette de plus en plus hétérogène, et diminue ensuite pour atteindre 4 % en fin de simulation, indiquant une homogénéisation

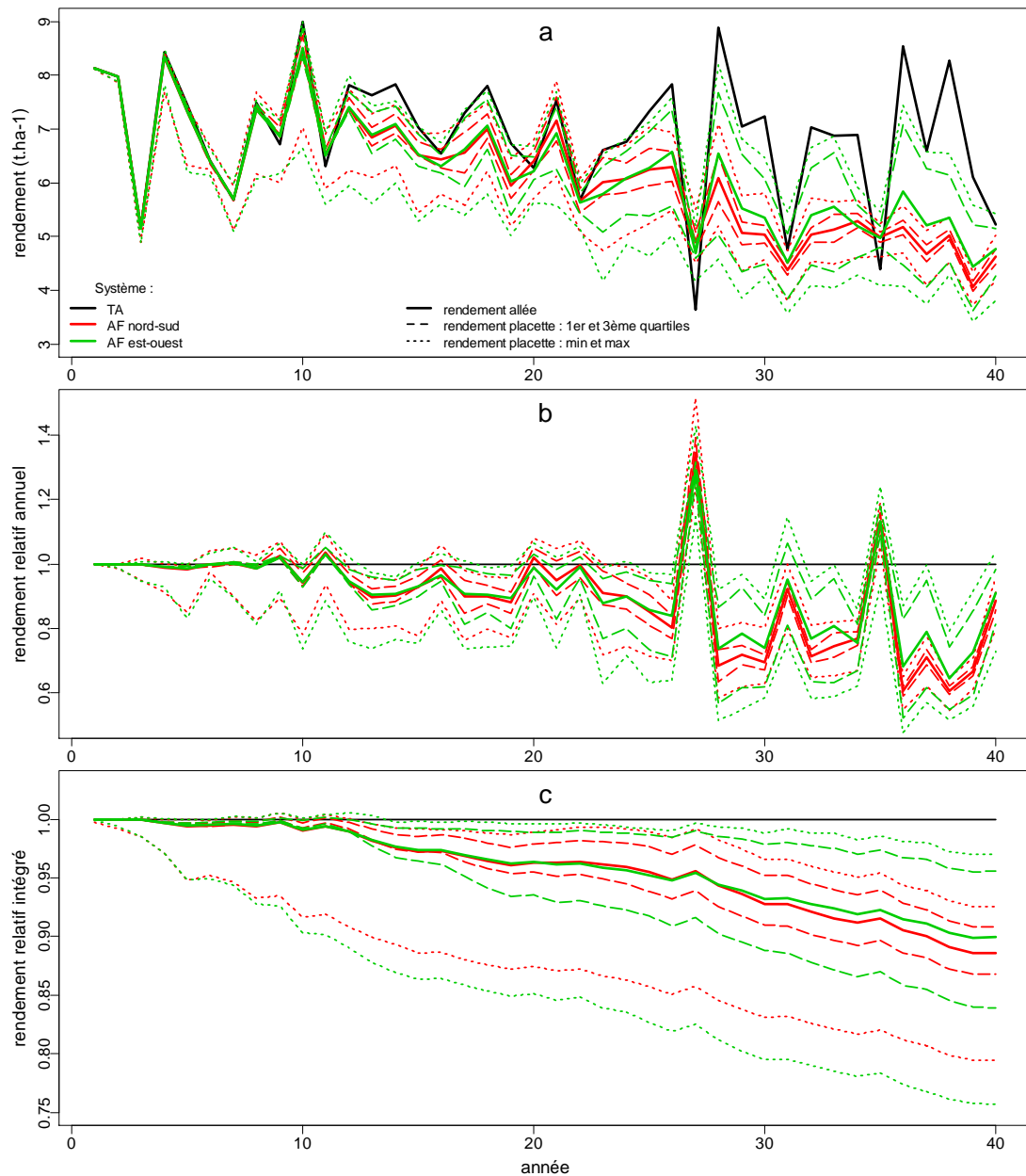


Figure 6.3.7: Du rendement placette au rendement relatif allée intégré : comparaison de simulations avec des lignes d'arbres orientées nord-sud et est-ouest. **a** : rendements annuels absolus. **b** : rendements relatifs annuels. **c** : rendements relatifs intégrés. Cet exemple correspond au motif de plantation D19-11, avec REP=1, CALIB=168.

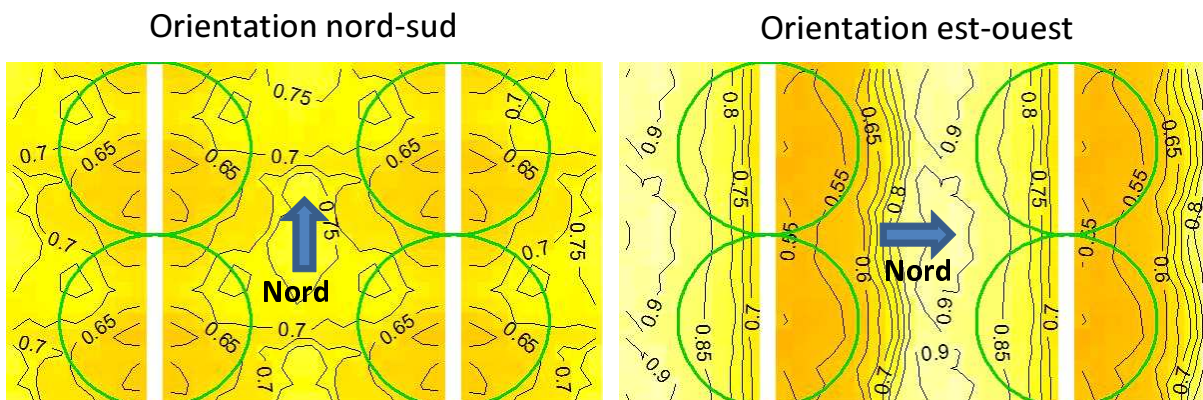


Figure 6.3.8: Exemple de distribution spatiale des rendements relatifs simulés avec des orientations nord-sud et est-ouest de lignes d'arbres. Année 28, MOTIF = D19-11, REP = 1, CALIB = 168.

des rendements placettes. Dans la parcelle EO au contraire, ce coefficient de variation augmente du début à la fin de la simulation, il vaut 13 % la 25^{ème} année, et de l'ordre de 15 à 20 % en fin de simulation. La figure 6.3.8 illustre la différence de variabilité spatiale du rendement relatif simulé entre les parcelles NS et EO. La figure 6.3.9 présente les rendements relatifs placettes intégrés sur des périodes de 10 ans, en fonction de la position par rapport aux lignes d'arbres, dans les parcelles NS et EO. Pendant la première décennie, les rendements relatifs sont proches de 1 dans les deux parcelles, avec une faible diminution au voisinage immédiat des lignes d'arbres. Les trois décennies suivantes, le rendement relatif est inférieur à 1 sur l'ensemble des deux parcelles. Dans la parcelle NS, les rendements obtenus sont symétriques par rapport aux lignes d'arbres, avec des valeurs minimales à proximité des lignes et maximales au centre des allées. Dans la parcelle est-ouest, le rendement relatif est beaucoup plus hétérogène, avec une zone de rendements faibles, une zone de rendements élevés, et un fort gradient entre les deux. La zone de rendement minimal est située au nord de la ligne d'arbre, elle s'étend de plus en plus loin au fur et à mesure que les arbres grandissent. La zone de rendement maximal, proche du centre de l'allée en début de simulation, se décale progressivement vers le nord. En fin de simulation, elle est située entre 2 et 6 m au sud de la ligne d'arbres.

Le rendement relatif allée intégré est le ratio des cumuls de rendement annuels en AF et en TA. Il vaut 1 en début de simulation, et diminue progressivement jusqu'à 0.90 dans la parcelle EO, 0.89 dans la parcelle NS (figure 6.3.7c). Il est intéressant de noter que les quelques valeurs très élevées de rendement relatif annuel, bien qu'impressionnantes, ont peu de poids dans le déterminisme du rendement relatif intégré. Ceci se comprend par le fait que le rendement relatif intégré peut s'écrire comme la moyenne des rendements relatifs annuels pondérée par les rendements du TA. Les valeurs élevées de rendements relatifs annuels correspondent à des années où le rendement est faible dans le témoin agricole, et qui ont donc peu de poids dans le calcul de la moyenne pondérée.

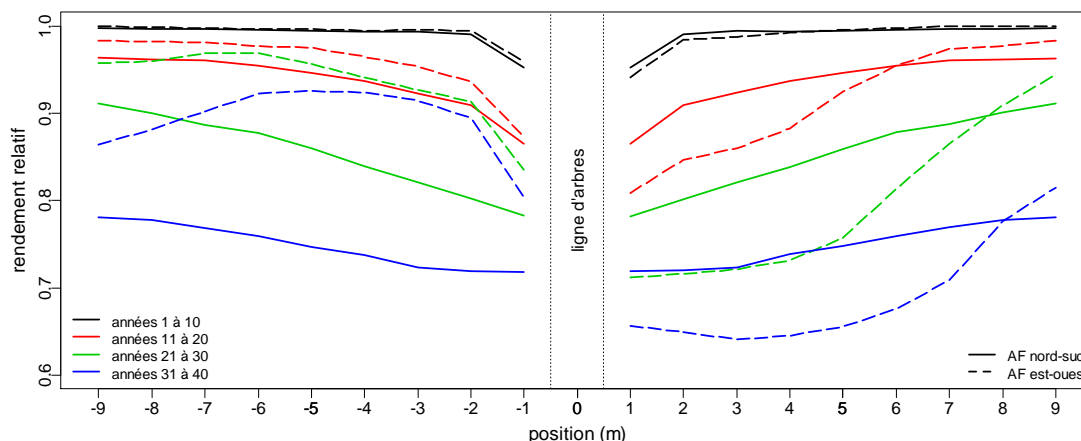


Figure 6.3.9: Rendements relatifs intégrés du blé dur par tranches de 10 ans dans des systèmes agroforestiers orientés nord-sud ou est-ouest, en fonction de la situation par rapport aux lignes d'arbres. Cet exemple correspond au motif de plantation D19-11, avec REP=1, CALIB=168. Pour l'orientation est-ouest des lignes d'arbres, le nord est situé à droite de la figure.

6.3.3.2 Déterminants du rendement relatif annuel

Dans la section précédente, nous avons détaillé les liens entre rendements placette et allée et entre rendements relatifs allée annuels et intégrés, sur deux exemples de simulations. Nous allons maintenant nous concentrer sur les effets des facteurs MOTIF et ORIENT sur le rendement simulé. Nous travaillerons ici sur les rendements allées annuels, c'est à dire sans considérer explicitement la variabilité intra-parcellaire du rendement placette.

Le rendement annuel des cultures agroforestières peut *a priori* être influencé par de nombreux facteurs : le climat de l'année, la densité, le motif de plantation et les dimensions des arbres, l'orientation des lignes d'arbres, ainsi que toutes les interactions entre ces facteurs. De plus, certains de ces facteurs, en particulier le climat de l'année et les dimensions des arbres, sont complexes et peuvent être caractérisés par de nombreuses variables. Afin d'identifier les principaux déterminants du rendement allée annuel simulé par Hi-sAFe ($Y_{i,AF}$, t.ha⁻¹), nous avons cherché à définir un modèle de régression satisfaisant au mieux les critères suivants : (1) qualité explicative (somme des carrés des écarts expliquée), (2) faible nombre de paramètres, et (3) facilité d'interprétation et de communication. Nous avons pour cela comparé des modèles avec différentes formulations mathématiques (modèles linéaires, polynômes, exponentielles), et impliquant différentes variables explicatives avec ou sans leurs interactions².

2. Nous avons préféré effectuer une régression sur le rendement absolu ($Y_{i,AF}$) plutôt que sur le rendement relatif ($y_i = Y_{i,AF}/Y_{i,TA}$) pour trois raisons :

- Le rendement absolu est bien modélisé par un modèle dont la forme mathématique est intuitive et explicitement liée à la compétition pour la lumière exercée par les arbres (exponentielle négative).
- On arrive à une meilleure qualité de prédiction du rendement absolu et du rendement relatif

Toutes simulations et tous âges du système agroforestier confondus, le rendement allée annuel simulé par Hi-sAFé ($Y_{i,AF}$, t.ha⁻¹) peut être prédit à l'aide de deux variables, le rendement du blé obtenu cette même année dans le témoin agricole ($Y_{i,TA}$, t.ha⁻¹) et le LAI du peuplement d'arbres ($T_{i,LAI}$, m².m⁻², valeur maximale atteinte l'année du semis de la culture, juste avant le début de la chute des feuilles) :

$$Y_{i,AF,a} = Y_{i,TA} + \alpha(1 - e^{-\beta T_{i,LAI}}) + \gamma \frac{Y_{max} - Y_{i,TA}}{Y_{max}} (1 - e^{-\delta T_{i,LAI}}) \quad (6.3.2)$$

où Y_{max} est le rendement potentiel de la variété simulée, déterminé par deux paramètres variétaux : le nombre maximal de grains et le poids maximal des grains (figure 6.3.10). Le ratio $(Y_{max} - Y_{TA})/Y_{max}$ est l'écart relatif entre rendement potentiel et rendement obtenu dans le témoin agricole, il peut être considéré comme un indicateur de l'influence du climat de l'année considérée sur le rendement du TA. La variable $T_{i,LAI}$ résume des informations relatives à la densité et au motif de plantation, ainsi qu'aux dimensions des arbres. Les valeurs de paramètres estimées pour ce modèle par régression non linéaire (méthode nls de R : nonlinear least-squares) sont $\alpha = -22.9 \pm 2.3$, $\beta = 0.08 \pm 0.01$, $\gamma = 11.6 \pm 0.3$, $\delta = 0.47 \pm 0.02$. Ce modèle, avec seulement 4 paramètres, rend compte de 89 % de la variabilité des rendements allées simulés en AF.

La prise en compte explicite de l'orientation des lignes d'arbres et du motif de plantation, en ajustant le modèle précédent indépendamment pour chaque modalité des facteurs ORIENT et MOTIF, ne permet d'améliorer la proportion de variance expliquée que de 3 % (89 à 92 %). Cela signifie que le rendement allée simulé, $T_{i,LAI}$ et $Y_{i,TA}$ étant donnés, ne dépend pas de l'orientation des lignes d'arbres ou du motif de plantation, ou autrement dit que les effets des facteurs MOTIF et ORIENT sur le rendement se font essentiellement via la variable $T_{i,LAI}$. On peut tirer de cette information deux conclusions : (1) les différences de rendements allée simulés entre parcelles NS et EO mises en évidence dans la figure 6.3.7 ne résultent pas de l'orientation des lignes d'arbres en tant que telle, mais de la différence de croissance des arbres entre parcelles NS et EO, et (2) la variabilité intraparcellaire du rendement placette, très différente entre parcelles NS et EO, n'a pas de conséquence notable sur le rendement allée.

En début de simulation, $T_{i,LAI}$ est très proche de 0, les deuxième et troisième termes de l'équation 6.3.2 sont proches de 0, et Y_{AF} est presque égal à Y_{TA} . Lorsque les arbres se développent, ils ont une influence croissante sur le rendement des cultures. La formulation de l'équation 6.3.2 permet de mettre en évidence le fait que cette influence des

en faisant une régression sur le rendement absolu que sur le rendement relatif. Il est toutefois possible que nous n'ayons pas trouvé "la bonne" formulation mathématique pour modéliser le rendement relatif.

- Les régressions sur le rendement relatif donnent beaucoup de poids aux rendements relatifs élevés, qui correspondent aux années avec un rendement très faible dans le témoin agricole et moins faible (mais faible quand même) dans la parcelle agroforestière, alors que ces années ont peu de poids, nous l'avons vu, dans le calcul du rendement relatif intégré.

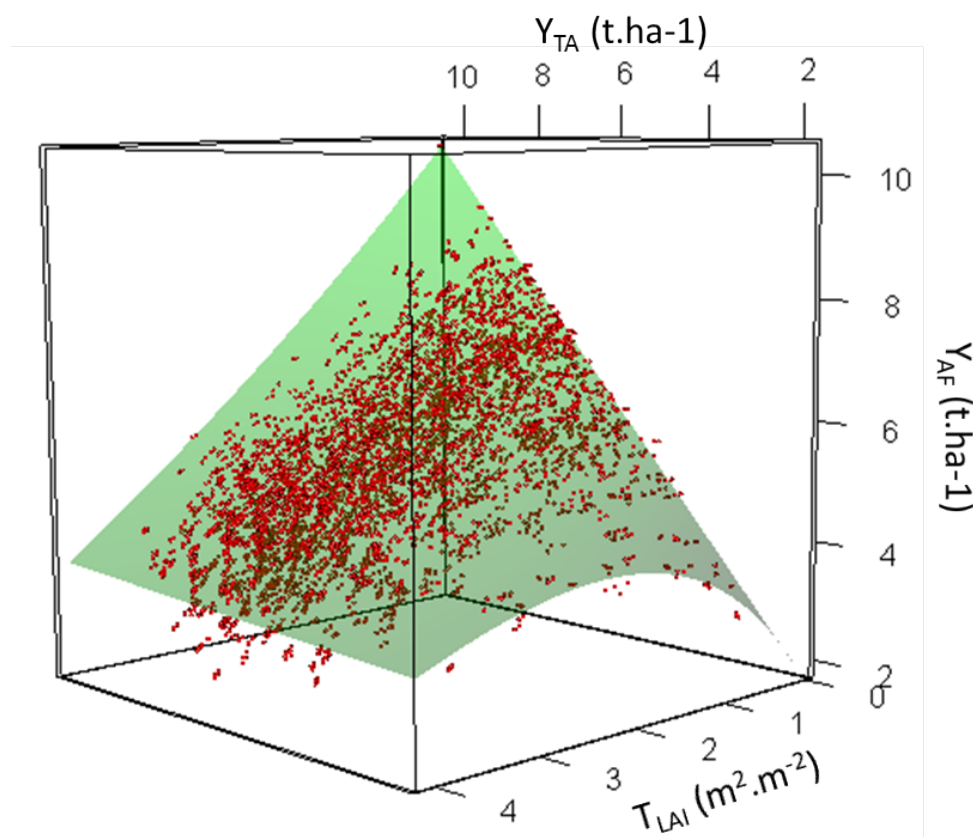


Figure 6.3.10: Ajustement d'un modèle de régression du rendement allée des cultures agroforestières. Ajustement du modèle de régression $Y_{i,AF,a} = Y_{i,TA} + \alpha(1 - e^{-\beta T_{i,LAI}}) + \gamma \frac{Y_{max} - Y_{i,TA}}{Y_{max}} (1 - e^{-\delta T_{i,LAI}})$ aux données de rendement simulées pour l'ensemble des situations. $R^2 = 0.89$, $RMSE = 0.44 \text{ t.ha}^{-1}$, $\text{biais} = 5.5 \cdot 10^{-3} \text{ t.ha}^{-1}$.

arbres sur les cultures a deux composantes : une composante systématique, uniquement dépendante de l'empreinte des arbres sur la parcelle, mesurée par $T_{i,LAI}$ (seconde partie de l'équation 6.3.2), et une composante non systématique, qui s'exprime uniquement dans les situations où le rendement obtenu en témoin agricole est inférieur au rendement potentiel de la variété (troisième partie de l'équation 6.3.2). La valeur négative du paramètre α indique que l'effet systématique des arbres sur les cultures est négatif, leur effet non systématique est au contraire positif ($\gamma > 0$).

Les mécanismes (formalismes du modèle) responsables des effets des arbres sur les cultures sont multiples, et peuvent être identifiés et hiérarchisés par la méthode de décomposition du rendement relatif (RYD) présentée dans le chapitre 2. L'application de cette méthode donnant des résultats très semblables à ceux présentés dans les chapitres 4 et 5, nous ne les présenterons pas à nouveau ici. On peut en conclure que l'organisation spatiale de la parcelle ne modifie pas les contributions relatives des différents mécanismes

impliqués dans le déterminisme du rendement relatif.

6.4 Discussion

6.4.1 Relation entre agencement et croissance des arbres agroforestiers

6.4.1.1 Motif de plantation

Dans nos simulations, c'est le motif de plantation qui détermine la croissance et le rendement des arbres agroforestiers, car il a une grande influence sur la compétition aérienne entre arbres. Les réactions simulées des arbres au choix du motif de plantation sont cohérentes avec les résultats trouvés dans la littérature forestière. En effet, plusieurs études ont montré qu'une diminution de la densité de plantation conduit à une augmentation du rendement par arbre mais une diminution du rendement du peuplement (Henskens et al., 2001; Chaudhry, 2003; Huang & Xu, 1999). De même, le fait que les arbres espacés développent une biomasse de branches plus importante, au détriment de l'allocation vers le tronc, a été mis en évidence par Henskens et al. (2001) et Gavaland et al. (2006).

Le modèle linéaire retenu pour expliquer les valeurs de diamètre final des arbres agroforestiers en fonction des facteurs MOTIF et ORIENT (équation 6.3.1) indique un résultat original, et que personne n'avait prévu : le premier déterminant de la croissance individuelle des arbres n'est pas la densité de plantation en tant que telle, mais la densité de plantation sur les rangs (D_r), c'est à dire selon la direction dans laquelle les arbres sont le plus serrés. Dans une moindre mesure, la densité de plantation entre les rangs (D_{ir}) peut influencer la croissance en diamètre. Cette influence de D_{ir} est proportionnelle au produit $D_r F$, où F est une mesure de la différence entre D_r et D_{ir} , indiquant qu'elle est d'autant plus importante que les arbres sont serrés sur le rang (D_r élevée) et que D_{ir} est différente de D_r (F élevé). Li et al. (2003) ont comparé des plantations d'eucalyptus avec la même densité totale de plantation (1666 tiges.ha⁻¹), mais avec deux motifs de plantation différents : 1 x 6 m et 2 x 3 m. Après 6 ans, les arbres plantés à 2 x 3 m avaient un volume de tronc 20 % plus élevé que ceux plantés à 1 x 6 m, indiquant qu'à densité de plantation identique, le motif de plantation a une influence sur la croissance des arbres. Dans un troisième traitement, avec une plantation à 1 m par 3 m (3333 tiges.ha⁻¹), le volume de tronc était réduit de 40 % par rapport au traitement à 1 m par 6 m, indiquant qu'à espacements sur le rang identiques, l'espacement entre rangs peut influencer le développement des arbres. Nos résultats sont cohérents avec ces observations.

Le cas du système D11-5 est particulièrement intéressant. Dans ce système, on simule non seulement un rendement par arbre plus faible que dans le D11-9, ce qui est logique puisque les arbres sont plus serrés, mais aussi, et c'est une surprise, un rendement total du peuplement plus faible que dans le D11-9. Cela signifie que la relation positive entre

densité et productivité du peuplement n'est plus valable. D'après ce résultat, il serait contre productif de trop rapprocher les arbres sur les rangs pour compenser la largeur des inter-rangs. Autrement dit, la croissance des arbres ne peut réellement bénéficier d'un inter-rang large que si l'espacement sur les rangs est suffisant. Ce résultat n'est pas intuitif, et n'avait pas été prévu par Dupraz & Liagre (2008) dans leur ouvrage sur l'agroforesterie, où des espacements très grands entre lignes d'arbres sont recommandés pour faciliter la mécanisation, et où il était suggéré de serrer les arbres sur les lignes pour maintenir des densités d'arbres suffisantes.

La présence des cultures a un effet initial négatif sur la croissance des arbres. Cet effet est visible jusqu'en fin de simulation pour le système D7-7, dans lequel il est responsable d'une diminution de 7 % du rendement, mais il est masqué par les effets liés à l'agencement des arbres dans les autres systèmes. Les dynamiques initiales du rendement relatif par arbre sont identiques pour tous les systèmes agroforestiers simulés, ce qui suggère qu'il n'y aurait pas d'interaction entre les effets liés à l'agencement des arbres et ceux liés à la présence des cultures. Pour conclure réellement sur ce point, il faudrait réaliser des simulations de témoins forestiers (c'est à dire sans culture) avec les différents motifs de plantation utilisés en agroforesterie.

Dans les simulations réalisées ici, la croissance des arbres est principalement limitée par les accès à la lumière et à l'espace aérien. Dans un contexte avec une contrainte hydrique plus forte, on s'attend *a priori* à ce que l'effet négatif des cultures sur la croissance des arbres soit plus important et plus durable, et à ce qu'il interagisse avec la densité de plantation. En effet, le volume de sol disponible pour chaque arbre et non asséché par les cultures aurait alors une importance cruciale, et les arbres peu espacés et associés à des cultures seraient fortement pénalisés.

6.4.1.2 Orientation des lignes d'arbres

D'après nos simulations, l'orientation des lignes d'arbres modifie l'intensité de la compétition pour la lumière entre arbres, avec des répercussions possibles sur la croissance et le rendement. Avec le motif D11-5, dans lequel les espacements sur et entre les rangs sont très différents, les systèmes orientés est-ouest ont une productivité réduite de 20 % par rapport aux systèmes orientés nord-sud. Montero et al. (2008), avec un modèle empirique d'interception du rayonnement basé sur l'analyse de photographies hémisphériques, arrivent à des conclusions diamétralement opposées aux nôtres, à savoir que des lignes d'arbres orientées nord-sud interceptent moins de rayonnement que des lignes d'arbres orientées est-ouest. Pour comprendre ces différences, il faut replacer le travail de Montero et al. (2008) dans son contexte. Les auteurs sont intéressés par l'interception hivernale du rayonnement par un couvert de chênes verts, afin de prédire la lumière disponible pour la croissance de cultures fourragères. Pour cela, leurs photographies hémisphériques ont été analysées en considérant la provenance du rayonnement entre les mois de novembre et mai. Leur étude se situe en Espagne, à une latitude proche de la notre (39°41' contre 43°43'). Pendant l'hiver, le soleil se lève au sud-est et se couche au

sud-ouest, et le rayonnement journalier provient surtout du sud (figure 6.4.1). Le soleil reste bas dans le ciel, et les arbres se font beaucoup d'ombre entre voisins. Dans cette situation, l'orientation est-ouest permet de réduire la compétition entre arbres. Nous, nous sommes au contraire intéressés ici à la compétition entre des noyers, c'est à dire à la période estivale, puisque les noyers n'ont pas de feuilles en hiver. En été, le soleil se lève au nord-est et se couche au nord-ouest. La proportion de rayonnement provenant du sud est réduite par rapport à l'hiver. Au midi solaire, lorsque le soleil est au sud, les ombres sont courtes et il y a peu de compétition entre arbres, alors que les ombres du matin et de l'après midi sont plus longues. Dans cette situation, la compétition entre voisins est-ouest est plus intense que la compétition entre voisins nord-sud.

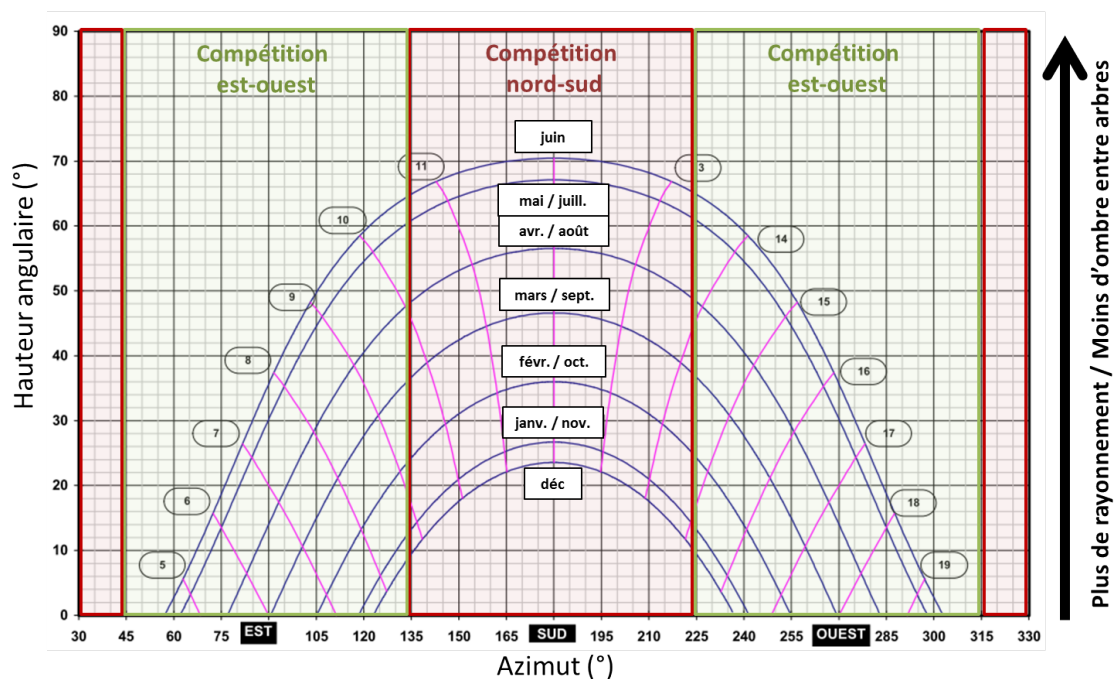


Figure 6.4.1: Diagramme solaire pour la latitude 43 ° Nord (adapté de <http://www.photovoltaique.info/IMG/pdf/43.pdf>). Les zones rouges (vertes) correspondent aux intervalles d'azimut pour lesquels la compétition entre arbres est plus forte (plus faible) avec l'orientation nord-sud qu'avec l'orientation est-ouest. Plus la hauteur angulaire est élevée, plus les ombres sont courtes, et moins la compétition est intense. Plus la hauteur angulaire est faible, plus l'épaisseur de l'atmosphère traversée par les rayons du soleil est élevée, et moins le rayonnement incident au sol est faible.

Le modèle Hi-sAFe fonctionne au pas de temps journalier et attribue en conséquence la même importance, à quantités d'énergie interceptée égales, aux rayonnements du matin, du milieu de journée et du soir, ce qui revient à considérer qu'il n'y a pas de variabilité infra-journalière de l'efficacité de la photosynthèse. En réalité, de nombreux paramètres susceptibles de modifier cette efficacité peuvent varier au cours de la journée.

C'est le cas par exemple de la conductance stomatique, généralement maximale le matin et minimale en début d'après midi (e.g. Green & McNaughton, 1997; Sinoquet et al., 2001), de la fraction de feuilles au soleil ou de la température. La prise en compte de ces considérations pourraient affecter nos conclusions sur l'effet de l'orientation des lignes d'arbres, en modifiant les importances relatives des compétitions nord-sud et est-ouest entre arbres voisins (figure 6.4.1).

Malheureusement, il n'existe à notre connaissance aucune mesure expérimentale fiable permettant de confirmer ou d'infirmer un tel effet de l'orientation des lignes dans des peuplements d'arbres espacés. Cette question est spécifique des systèmes agroforestiers, dans lesquels les espacements sur et entre lignes d'arbres sont souvent très différents pour des raisons liés à la gestion des cultures intercalaires, et elle n'est pas abordée dans la littérature sylvicole. Sur les deux sites agroforestiers expérimentaux suivis par notre équipe de recherche, Restinclières (noyers hybrides / blé dur, Hérault) et Vézénobres (peupliers hybrides / blé dur, Gard), des parcelles orientées nord-sud et est-ouest ont bien été mises en place. Mais dans les deux cas ces parcelles ne peuvent malheureusement pas être utilisées pour tester rigoureusement un effet de l'orientation des lignes à cause de biais expérimentaux qui sont apparus progressivement au cours du temps, et qui n'étaient pas soupçonnés au début de l'expérimentation. A Restinclières, malgré leur proximité (quelques dizaines de mètres), les deux parcelles ont des régimes hydriques différents (profondeur de nappe, réserve utile du sol). A Vézénobres, une des deux parcelles (lignes EO) a été mise en place dans une aspergeraie en production où les arbres ont bénéficié d'un environnement de croissance très favorable (culture d'été, fertilisation azotée) pendant les 4 premières années après la plantation, alors que l'autre parcelle (NS) était cultivée en blé.

6.4.2 Organisation spatiale et rendement des cultures

Les valeurs de rendements absolus et relatifs simulées par Hi-sAFe pour le blé dur à l'ombre de noyers, ainsi que les différents mécanismes impliqués dans leur déterminisme, ont été discutés en détail dans les chapitres 4 et 5. Dans les conditions pédoclimatiques de Restinclières, les différences de rendement entre témoin agricole et parcelle agroforestière sont essentiellement liées à l'ombre des arbres, qui a simultanément des effets positifs et négatifs sur le comportement du blé, dépendants du climat de l'année. Le résultat simulé est en général une réduction du rendement dans la parcelle agroforestière, mais de moindre amplitude que la réduction de rayonnement imposée par les arbres. Le point qui nous intéresse ici est de savoir comment les choix relatifs à l'agencement des arbres sur la parcelle peuvent influencer le comportement du blé agroforestier.

Nous avons montré qu'une orientation nord-sud des lignes d'arbres permettait d'avoir un rendement placette beaucoup plus homogène qu'une orientation est-ouest. Montero et al. (2008) et Leroy et al. (2009) sont arrivés à des conclusions similaires par modélisation de la répartition du rayonnement au sol sous des peuplements d'arbres espacés. Dans les parcelles est-ouest, les pertes de rendement sont concentrées sur une partie de

l'allée cultivée, alors que les rendements restent proches de ceux du témoin dans le reste de l'allée. Cela permettrait en théorie de ne cultiver qu'une partie de l'allée, afin de maximiser le rendement par unité de surface semée, qui détermine la rentabilité de la culture. Nos résultats montrent cependant que la zone de rendement maximal se déplace en cours de simulation (fig. 6.3.9), ce qui compliquerait la mise en application d'une telle stratégie.

Dans une expérimentation virtuelle avec le modèle agroforestier WaNuCAS, Santos Martin & van Noordwijk (2009) montrent que le rendement d'une culture de maïs agroforestier, cumulé sur le cycle de rotation des arbres (15 ans), dépend de la densité de plantation des arbres et des espacements sur et entre les rangs. Nous arrivons ici à une conclusion similaire, mais la très bonne régression obtenue pour prédire le rendement allée simulé en tenant compte uniquement du LAI du peuplement d'arbres et du rendement obtenu en TA (figure 6.3.10) suggère que l'agencement spatial des arbres (facteurs MOTIF et ORIENT) a peu d'influence en tant que tel sur le rendement du blé. Ce résultat peut sembler contradictoire avec l'effet mis en évidence de l'orientation des lignes d'arbres sur la compétition pour la lumière entre arbres. En effet, si les arbres en alignements nord-sud se font moins d'ombre entre eux que les arbres en alignements est-ouest, ils devraient en conséquence faire plus d'ombre aux cultures. Cependant, nous avons vu que l'effet de l'orientation des lignes d'arbres sur l'ombrage entre arbres n'est pas le même en été et en hiver, et le cycle du blé dur est à cheval sur les deux saisons. Un autre facteur à prendre en compte est le fait que la zone d'ombrage maximal est située sur la ligne d'arbres (non cultivée) dans les systèmes orientés nord-sud, alors qu'elle est située dans l'allée cultivée avec l'orientation est-ouest (figure 6.3.9). Dans la situation simulée ici, le rendement moyen des allées n'est pas affecté par l'orientation des lignes d'arbres, ce qui peut signifier que ces différents effets sont négligeables, ou alors qu'ils se compensent les uns les autres. Ce résultat est susceptible de changer selon la largeur de la zone non cultivée au pied des arbres, la latitude, et la phénologie des espèces associées.

Nous avons montré dans le chapitre 4 que d'après le modèle, les compétitions souterraines (eau et azote) exercées par les noyers sur le blé sont négligeables. La variabilité spatiale du rendement simulé est donc essentiellement déterminée par la variabilité spatiale de la lumière transmise sous les noyers. Dans un contexte avec compétition souterraine marquée, on s'attend *a priori* à un gradient de compétition en fonction de la distance aux lignes d'arbres. L'interaction de ce gradient de compétition souterraine avec le gradient de compétition aérienne (lumière) conduira probablement à une relation plus complexe entre organisation spatiale de la parcelle et rendement des cultures.

6.4.3 Pour maximiser le LER, planter toujours plus dense ?

Dans cette expérimentation virtuelle, nous obtenons les plus forts LER_y pour les systèmes à forte densité de plantation. Hormis pour le système D11-5, dont le comportement est particulier et sur lequel nous reviendrons par la suite, le LER_y simulé à 40 ans est proportionnel au rendement relatif des arbres. Ces résultats indiquent que le gain relatif

de productivité en bois permis par une augmentation de la densité de plantation est toujours plus important que la perte relative de rendement du blé. On remarque toutefois que les différences de LER_y entre systèmes, très importantes en début de cycle puisque fixées par le LER_d , ont tendance à s'amoinrir au cours du temps. Dans les systèmes avec un LER_d élevé, la croissance individuelle des arbres est réduite par rapport au TF car l'effet négatif des cultures n'est pas compensé comme dans les autres systèmes par des effets positifs liés à la moindre densité de plantation. De plus, la forte densité d'arbres entraîne une diminution rapide du rendement du blé. Au final, dans les systèmes les plus denses, les rendements relatifs des arbres et des cultures sont inférieurs à leur densité relative, ce qui signifie une perte de rendement individuel pour les arbres et par unité de surface cultivée pour les cultures. Au contraire, dans les systèmes initialisés à faible densité, les arbres poussent plus rapidement que dans le témoin forestier, et comme ils sont peu nombreux, ils ont une moindre influence sur le rendement des cultures. On a alors un LER qui augmente au cours du temps : l'augmentation du rendement relatif par arbre est plus importante que la diminution de rendement relatif par unité de surface cultivée.

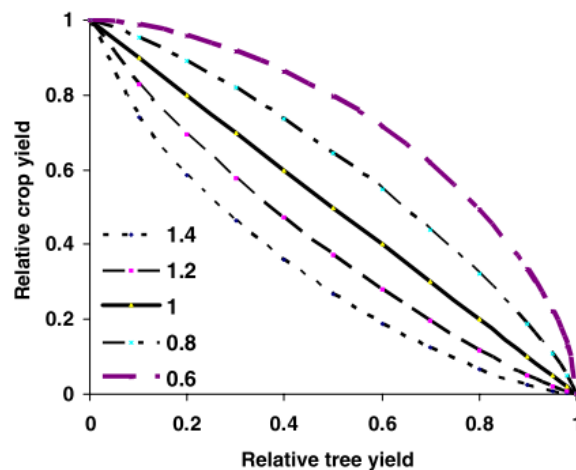


Figure 6.4.2: Plan des rendements conjoints (source : Santos Martin & van Noordwijk, 2009). Légende : “Trade-off between tree and crop yield, with net negative ($X < 1$) or net positive ($X > 1$) interactions”.

Le LER_y serait donc maximal à forte densité de plantation ? A première vue, ce résultat paraît contraire à l'intuition, et avec l'idée couramment admise selon laquelle il existerait un “juste milieu”, un système “équilibré” maximisant l'efficacité biologique du système. Cette hypothèse d'un optimum est souvent symbolisée par une courbe comme celle reproduite en figure 6.4.2, que l'on trouve dans de nombreuses revues sur les cultures associées ou les systèmes agroforestiers (e.g. Vandermeer, 1989; Jose et al., 2004; Garcia-Barrios & Ong, 2004). Nous nous proposons dans un premier temps de discuter la robustesse de

notre résultat aux incertitudes du modèle Hi-sAFe, et de revenir ensuite sur le sens de la figure 6.4.2.

Étant données les dynamiques de LER_y simulées pour les différents systèmes, diminution progressive à forte densité de plantation et augmentation progressive à faible densité, on peut se demander si la relation obtenue entre LER_y et densité de plantation est liée au choix de la durée de rotation (40 ans), et si un allongement de cette durée conduirait à une inversion de tendance. Pour répondre à cette question, nous avons réalisé des simulations jusqu'à 60 ans pour les différents motifs de plantation. La réponse est non : les LER_y des systèmes à faible densité continuent bien à augmenter légèrement entre 40 et 60 ans et ceux des systèmes à forte densité continuent à diminuer, mais ces évolutions sont de moins en moins rapides et l'on ne simule pas d'inversion de la relation entre densité de plantation et LER_y . Nous avons vu dans les chapitres 4 et 5 que les rendements relatifs du blé dur simulés par Hi-sAFe sont plutôt optimistes : en raison de plusieurs mécanismes de compensation, les pertes de rendement simulées sont toujours moins importantes que les réductions de rayonnement imposées par les noyers. La relation positive entre densité de plantation et LER_y est-elle sensible à la relation entre réduction de rayonnement (i) et rendement relatif du blé dur (y) ? La réponse est également négative. Il est possible de recalculer les LER_y en posant des hypothèses beaucoup moins optimistes sur le rendement relatif du blé dur (y égal à i , y égal à i^2). Par ces calculs, on obtient toujours des LER_y plus élevés à forte densité qu'à faible densité.

La relation positive entre densité de plantation et LER_y semble donc robuste. Pourquoi une telle différence avec l'attendu de la figure 6.4.2 ? La réponse est à chercher dans le design du système. La courbe de la figure 6.4.2 a une explication théorique simple dans le cas de cultures annuelles associées selon un design substitutif : à densité totale constante, si les compétitions inter-spécifiques sont plus faibles que les compétitions intra-spécifiques, c'est à dire s'il y a complémentarité entre les espèces, alors on s'attend à obtenir une productivité du mélange maximale dans une association équilibrée, qui minimise les compétitions intra-spécifiques. Les systèmes agroforestiers considérés ici sont des associations très particulières du point de vue de leur design. Les cultures sont semées dans les allées à la même densité que dans le témoin agricole, et les compétitions intra-spécifiques sont a priori inchangées. Au contraire, les arbres sont plantés à moindre densité que dans le témoin forestier, et leur rendement relatif résulte donc à la fois d'une modification des interactions intra-spécifiques et de la mise en place des interactions inter-spécifiques. Le design du système est intermédiaire entre un design substitutif et un design additif : plus la densité d'arbres est élevée, plus on est proche d'un design additif. On peut noter par ailleurs que pendant leur phase d'installation, les arbres sont petits et utilisent une faible proportion des ressources du milieu, y compris dans le témoin forestier. Un témoin forestier conçu pour une utilisation maximale des ressources du milieu aurait été initialisé à très forte densité (plusieurs milliers de tiges par hectare) et éclairci progressivement, sa productivité totale (en incluant le bois récolté lors des éclaircies) aurait été plus élevée.

La principale explication de la relation positive entre densité de plantation et LER_y ,

dans notre situation, est la quasi-absence d'interactions (complémentarité) entre espèces en début de simulation, qui confère un avantage évident aux designs presque additifs. En cours de rotation, les différences entre systèmes s'amointrissent progressivement, en raison d'un effet net négatif des arbres sur les cultures (compétition interspécifique) et d'un effet de compétition entre arbres, tous les deux plus forts dans les systèmes à forte densité.

Il faut cependant souligner que si la productivité du système était exprimée non pas en unités physiques, mais en valeur monétaire, alors de nouveaux facteurs devraient être pris en compte dans l'optimisation du système. La valeur unitaire bois produit est par exemple fortement dépendante du diamètre des troncs, variant en 2010 de 300 euros par m³ pour des tiges de noyer de diamètre 20 cm à plus de 3000 euros par m³ pour des tiges de diamètre 60 cm. De même, la valeur de la céréale dépend de la teneur en protéines des grains, et certains travaux suggèrent que celle-ci est plus élevée pour des céréales qui ont mûri à l'ombre (Dufour et al., submitted). Ces facteurs sont susceptibles de déplacer considérablement les optimums : le prix progressif du bois favorisera les systèmes agroforestiers avec une faible densité d'arbres mais de forts diamètres. Un raisonnement économique devrait aussi prendre en compte les produits secondaires des arbres (bois de taille, produits d'éclaircies), mais ainsi que leur coût d'installation et d'entretien. Dans le cadre du projet européen SAFE, un modèle technico-économique, Farm-SAFE (Graves et al., 2011) a été développé pour traiter ces questions. Ce modèle requiert en entrée des données relatives à la productivité du système. Il avait été prévu initialement d'utiliser les résultats de Hi-sAFé pour renseigner ces données, mais en raison des difficultés rencontrées pour le développer, le paramétrer et établir sa validité, il a été décidé de développer un modèle biophysique plus simple à cet effet (Yield-SAFE, van der Werf et al., 2007). Yield-SAFE fait cependant des hypothèses contredites par nos résultats, comme celle d'un indice de récolte fixe pour les arbres par exemple, et il serait intéressant d'explorer avec Farm-SAFE la signification économique des résultats de Hi-sAFé.

6.4.4 LER et concavité de la courbe de croissance en volume du peuplement

La moindre croissance des arbres dans le système D11-5 s'explique par une compétition intense entre arbres voisins sur la ligne de plantation (voir figure 6.3.6). Il en résulte une productivité relative du peuplement d'arbres inférieure à celle du système D7-7, qui a presque la même densité de plantation, et même à celle du système D11-9, pourtant beaucoup moins dense. Le système D11-5 a une autre particularité, à savoir que son LER_y simulé est inférieur à ce qu'on aurait pu prédire d'après la relation entre rendement relatif des arbres (y_T) et LER_y simulée pour les autres motifs de plantation (figure 6.3.2).

Ce phénomène s'explique par une dynamique de croissance du peuplement d'arbres particulière, bien visible sur la figure 6.3.4b : plus rapide que le peuplement D11-9

pendant les premières années, mais moins rapide ensuite. Autrement dit, la courbe de croissance en volume du peuplement D11-5 est moins concave que celles des autres situations. En conséquence, les arbres ont rapidement un effet délétère sur le rendement des cultures, mais cette perte de rendement des cultures n'est pas compensée par une productivité finale élevée du peuplement d'arbres. Ce résultat suggère pour une productivité finale du peuplement d'arbres donnée, le LER_y sera maximisé par une courbe de croissance du peuplement la plus concave possible, c'est à dire lente au début et rapide à la fin. Dans ce travail, nous avons raisonné sans éclaircies et avec un régime d'élagage fixe, identique pour tous les systèmes. Régime d'éclaircies et élagages sont deux leviers qui permettraient de manipuler la dynamique de croissance du peuplement et qui pourraient être explorées lors d'une prochaine expérimentation virtuelle.

6.5 Conclusions et perspectives

Ce travail montre le potentiel du modèle Hi-sAFe pour étudier des questions relatives à l'organisation spatiale des systèmes agroforestiers, et à son effet sur la productivité des espèces associées. L'utilisation de la modélisation a permis de mettre en évidence des phénomènes non intuitifs, comme la différence de croissance entre arbres en alignements nord-sud et est-ouest. L'utilisation de la méthode de décomposition du rendement relatif (RYD) nous a permis d'identifier rapidement les processus responsables des différences entre systèmes.

Nos résultats montrent une relation positive entre densité de plantation et productivité globale du système, mesurée par le LER_y . L'efficacité biologique du système, en termes d'utilisation de l'espace, est maximale à forte densité. Nous avons cependant montré que cette maximisation du LER_y se fait au prix d'une perte de rendement des cultures. Le choix de la densité de plantation résultera donc d'un arbitrage entre pertes de rendement acceptées pour les cultures et optimisation de la productivité totale. Nous avons focalisé ce travail sur l'étude du déterminisme du LER_y , mais il serait tout à fait possible d'introduire d'autres critères d'optimisation dans notre approche. De même, il serait intéressant d'évaluer les conséquences de choix de conduite du système, comme le régime d'élagage des arbres ou le choix de leur âge d'exploitation, qui devraient permettre de manipuler la contribution des arbres et des cultures au rendement total, ou une évolution de la largeur des allées cultivées en cours de rotation, pour conserver un rendement allée plus élevé.

En raison d'une forte complémentarité phénologique entre espèces, et d'un sol profond avec accès à une nappe permanente pour les arbres, notre cas d'étude (l'association noyer hybride/blé dur de Restinclières) est très intéressant d'un point de vue productif, comme en témoignent les valeurs de LER simulées, qui sont d'un autre ordre de grandeur que les LER obtenus en général sur les associations de cultures annuelles (Malézieux et al., 2008). Il l'est en revanche beaucoup moins d'un point de vue théorique, car les interactions souterraines ont peu d'influence sur la productivité des espèces, qui est essentiellement

déterminée par les compétitions intra- (noyer) et interspécifiques (blé) pour la lumière. L'étude des relations entre organisation spatiale de la parcelle et productivité du système donnera probablement des résultats plus subtils dans un milieu plus contraint, ou avec des espèces moins complémentaires.

Discussion générale et perspectives

Ce travail s'inscrit dans une démarche de modélisation intégrative des systèmes agroforestiers tempérés. Cette démarche consiste à mobiliser des connaissances et à poser des hypothèses sur les processus qui régissent le fonctionnement du système à une échelle de temps et d'espace donnée, afin d'étudier la manière dont ils interagissent et déterminent le fonctionnement du système à des échelles de temps et/ou d'espace supérieures. Les objectifs de cette thèse étaient initialement orientés non pas vers le développement du modèle, mais vers son utilisation. Nous nous étions donné deux objectifs principaux :

- un objectif cognitif : utiliser le modèle pour comprendre comment les processus de partage des ressources et de croissance des plantes interagissent et s'intègrent dans le temps et dans l'espace pour déterminer la productivité de chaque espèce et la productivité globale du système agroforestier.
- un objectif appliqué : utiliser le modèle comme outil d'aide à la conception de systèmes agroforestiers. Les ambitions des concepteurs du modèle étaient très grandes : le modèle devait permettre de choisir les bons couples arbres-cultures, d'optimiser les itinéraires de conduites des deux espèces. En particulier, le modèle devait déterminer les densités de plantation des arbres et les règles d'élagage et d'éclaircie des peuplements d'arbres. Il avait même été prévu un couplage avec un modèle technico-économique. Nous avons été conduits à réduire ces ambitions, car la finalisation et le débogage d'une première version opérationnelle du modèle Hi-sAFé ont constitué une part importante de ce travail. Ce second objectif ne pouvait être abordé que si nous avions une confiance suffisante dans le modèle.

Cette discussion est organisée en deux parties, consacrées respectivement à ces deux objectifs.

Comprendre le déterminisme de la productivité

La simulation, une “expérience concrète du second genre” (Varenne, 2003)

Un nombre croissant d'auteurs s'accordent sur le statut scientifique particulier de la simulation informatique (e.g. Varenne, 2003; Peck, 2004). Hi-sAFé fait partie de la caté-

gorie des modèles complexes, dont le comportement ne peut pas être déduit *a priori* des équations qui le composent, mais uniquement analysé et compris *a posteriori*, c'est à dire par la réalisation et l'observation d'une simulation. A ce titre, la simulation a un statut proche de celui de l'expérimentation. La simulation informatique étant entièrement mesurable, elle offre à l'utilisateur la possibilité d'analyser l'évolution de l'ensemble des variables d'état du système, et donc de comprendre *a posteriori* le détail des relations de causalité ayant conduit à un comportement donné du système.

Le modèle est alors un outil de réflexion, qui en intégrant l'ensemble des hypothèses posées lors de sa formulation, ainsi que l'ensemble des données relatives au sol, au climat et aux espèces associées, aide l'utilisateur à appréhender et à gérer mentalement la complexité du système. Ainsi, le modèle nous a "ouvert les yeux" sur un certain nombre de points, comme par exemple :

- les interactions entre arbres et nappe. C'est par l'analyse de simulations, et la constatation qu'une remontée de nappe prolongée pouvait être la cause de stress hydriques violents l'année suivante, et par l'utilisation du modèle de nappe pour reconstruire la dynamique de nappe les deux années suivant la plantation, que nous avons été amenés à proposer une nouvelle hypothèse pour expliquer la différence de croissance entre les noyers de la parcelle agroforestière A3 et ceux de la parcelle forestière A4.
- la prise en compte de l'opportunisme racinaire des noyers permet de générer une ségrégation spatiale des systèmes racinaires des noyers et des céréales, mais ce résultat est intimement lié aux décalages phénologiques entre espèces, et au régime pluviométrique particulier avec une sécheresse estivale marquée.
- l'importance des interactions entre les ressources limitantes lumière et azote pour le blé dur. La réduction de rayonnement disponible sous les arbres, en réduisant la production de biomasse, permet de réduire considérablement les besoins en azote et donc indirectement d'améliorer le statut azoté des cultures.
- la relation complexe entre compétition entre arbres pour la lumière et orientation des lignes de plantation. En effet, cette réponse dépend étroitement de la latitude et de la saisonnalité des périodes de croissance, ce qui peut conduire à des optimums inverses selon les espèces.

Il est très difficile d'identifier avec certitude les apports de la modélisation sur ces aspects, et ce principalement pour deux raisons. La première est que les phénomènes mis en évidence par le modèle sont généralement "logiques", et une fois mis en évidence, il paraissent même souvent "évidents" même s'ils n'étaient pas intuitifs *a priori*. La seconde raison est que Hi-sAFe regroupe des formalismes mis au point par des spécialistes de champs disciplinaires variés. Les phénomènes mis en évidence peuvent paraître triviaux pour ces spécialistes. Par exemple, Les effets potentiellement délétères d'un engorgement prolongé du sol sur la croissance des arbres sont bien connus en science forestière (e.g. Lévy & Lefèvre, 2001). L'intérêt de la modélisation intégrative est de replacer ces processus connus dans un contexte spécifique, ici l'agroforesterie, et d'étudier leur importance et leurs interactions avec l'ensemble des autres processus qui caractérisent le système

agroforestier.

Hiérarchiser et synthétiser pour comprendre

L'évaluation de la productivité d'un système agroforestier nécessite sa comparaison avec les cultures pures correspondantes : un témoin agricole et un témoin forestier (Vandermeer, 1989; Dupraz, 1999). La compréhension du déterminisme de la productivité physique de l'association, quantifiée par son LER, nécessite donc une analyse comparée de trois simulations.

Hi-sAFé est un modèle avec plusieurs centaines de variables d'état, des entrées stochastiques (climat), et fonctionnant sur plusieurs milliers de pas de temps. Il génère, pour une simulation standard sur 40 ans, des jeux de plusieurs millions de données qui sont au delà de la capacité de traitement par les tableurs. Dans ce travail, nous avons développé une méthode permettant d'identifier et de hiérarchiser, au sein de cette grande quantité d'information, les informations les plus pertinentes pour comprendre la différence de productivité d'une espèce entre deux simulations, quantifiée par le rendement relatif. Nous avons appelé cette méthode RYD, pour "Relative Yield Decomposition". La RYD est basée sur une analyse préalable des équations du modèle impliquées dans le calcul du rendement et sur le calcul, à partir des sorties journalières du modèle, d'indicateurs intégrés de la contribution de différents processus au déterminisme du rendement relatif. Elle fournit ainsi un niveau d'analyse intermédiaire entre les sorties finales (productivité) et les variables d'état journalières.

Nous avons appliqué cette méthode à plusieurs reprises au fil de ce travail, tant au rendement relatif des arbres qu'à celui des cultures, et montré comment ses résultats peuvent être utilisés pour analyser le fonctionnement du système. A posteriori, la RYD s'est révélée utile pour :

- Orienter l'utilisateur vers une analyse plus précise des résultats. Étant centrée uniquement sur le rendement, et fournissant des informations à des échelles de temps longues (année ou plus), la RYD ne permet pas toujours de comprendre l'origine des différences simulées entre le système agroforestier et les parcelles témoins. Par contre, elle permet d'identifier les variables à explorer pour le comprendre. Par exemple, grâce à la RYD, nous avons mis en évidence qu'une part importante de la différence de rendement entre blé agroforestier et blé en témoin agricole résultait d'une différence de dynamique de surface foliaire (effet a de la décomposition). En se focalisant sur l'analyse de la surface foliaire du blé pour des années où cet effet était important, nous avons pu conclure qu'il s'agissait d'une différence de vitesse de sénescence foliaire en fin de cycle, alors que les dynamiques de croissance foliaire sont similaires pour les deux systèmes. L'analyse de l'indice de récolte des arbres est une autre illustration des apports de la RYD. Initialement, nous n'avions pas distingué, dans le calcul de l'indice de récolte, ce qui était imputable à l'équilibre fonctionnel aérien/souterrain, et ce qui relevait de l'allocation intra-aérienne (tronc versus feuilles et branches). La RYD nous a permis d'identifier une différence d'in-

dice de récolte entre arbres agroforestier et forestiers. Ceci nous a incité à séparer l'indice de récolte en deux composantes. Finalement, nous avons pu conclure que cette différence résultait principalement d'une allocation plus importante vers les branches et les feuilles pour les arbres agroforestiers que pour les arbres forestiers, et qu'elle était par conséquent dictée par les relations d'allométrie aériennes.

- Organiser et synthétiser l'information. Sur l'exemple étudié, la RYD nous a permis d'identifier les principaux déterminants du rendement relatif des arbres et des cultures, de les hiérarchiser en termes d'importance, et de caractériser leur évolution en fonction de l'âge du système et des événements climatiques.
- Dans l'analyse d'expérimentations virtuelles, les différents termes de la RYD nous ont servi de base pour la comparaison des simulations. Dans le chapitre 5 par exemple, nous avons mis en évidence que la réduction de rendement des cultures imputable à la réduction du nombre de grain était très sensible aux traits phénologiques des espèces.

Nous pourrions qualifier la RYD de méthode d'introspection de modèles, par opposition aux méthodes d'exploration de modèles comme les analyse de sensibilité (Saltelli & Scott, 2000; Ruget et al., 2002; Richter et al., 2010) ou la méta-modélisation (Marrel et al., 2008), qui s'attachent à décrire statistiquement les relations entre entrées et sorties des modèles, sans rentrer dans le détail du fonctionnement du système (approches "boîte-noire"). Ces deux types d'approches pourraient être utilisés de manière complémentaire, en procédant à une analyse de sensibilité avec les termes de notre décomposition comme variables d'intérêt. Une telle approche permettrait de compléter les résultats de l'analyse de sensibilité classique, qui identifie des paramètres d'entrée importants, en apportant des explications sur l'origine mathématique de cette importance.

Restinclières, une proposition plausible de fonctionnement

Nous avons utilisé le modèle Hi-sAFé pour simuler une situation agroforestière précise : une parcelle de noyers hybrides plantés à 9 m par 13 m et associés à du blé dur. Cette parcelle a une existence réelle, et fait l'objet d'un suivi expérimental sur le domaine de Restinclières (Hérault, France). L'analyse de cette simulation nous a permis d'identifier les principaux déterminants du rendement des deux espèces dans ce système, sous l'ensemble des hypothèses liées à la construction et au paramétrage du modèle. La rotation agroforestière peut être découpée en 4 phases, correspondant à différents stades de maturité du peuplement d'arbres :

- De 0 à 5 ans. La parcelle agroforestière a un comportement proche de celui d'une parcelle agricole. Les noyers ont une influence négligeable sur les flux d'énergie et de matière à l'échelle de la parcelle. Dans les allées cultivées, le blé dur est semblable à une culture pure. L'assèchement des horizons de surface par le blé dur, combiné à une faible pluviométrie estivale, conduit les noyers agroforestiers à investir une plus grande proportion de biomasse dans leur système racinaire, qui se développe préférentiellement le long des lignes d'arbres et en profondeur dans

les allées cultivées. Cet investissement racinaire pénalise la croissance aérienne des noyers agroforestiers.

- De 5 à 15 ans. Les noyers ont un système racinaire bien développé, et bénéficient d'une ressource en eau importante, non utilisée par les cultures. Leur système racinaire opportuniste les conduit à utiliser préférentiellement l'eau située dans les horizons profonds du sol, dont le potentiel hydrique est plus élevé, et ils ne font en conséquence aucune compétition souterraine aux cultures. En raison de leur densité plus faible que dans le témoin forestier, les noyers agroforestiers se font moins de compétition pour la lumière entre eux, ce qui leur permet une croissance plus rapide. L'ombre hivernale des noyers agroforestiers est encore très faible (<10%), mais leur ombre estivale commence à être importante (jusqu'à 30%). A proximité immédiate des arbres, où l'ombre est plus intense, le rendement du blé dur est diminué par rapport au témoin agricole. Ces pertes de rendement localisées ont peu d'impact sur le rendement relatif moyen des allées cultivées, qui reste compris entre 0.9 et 1.
- De 15 à 25 ans. Le témoin forestier est un couvert fermé dans lequel la compétition pour la lumière est intense. Le couvert agroforestier se referme progressivement, la compétition entre arbres prend de l'importance, mais reste plus faible que dans le TF. Les arbres AF développent des houppiers plus volumineux, qui leur permettent d'intercepter plus de rayonnement, mais qui leur demandent aussi un investissement important dans les branches et les feuilles. L'ombre des noyers devient non négligeable en hiver, intense en été. La réduction de rayonnement disponible sous les arbres a tendance à réduire la production de biomasse et l'indice de récolte (via une réduction du nombre de grains) du blé dur, mais elle est atténuée par plusieurs mécanismes de compensation : une réduction des stress hydrique et azoté, une moindre saturation lumineuse de la photosynthèse, une sénescence foliaire ralentie, et des stress thermiques moins fréquents pendant le remplissage des grains. De la combinaison de ces effets résulte une diminution du rendement du blé dur moins importante que la diminution de rayonnement. Par son effet modérateur des stress hydrique et thermique, la présence des arbres permet de tamponner en grande partie la variabilité inter-annuelle du rendement du blé.
- De 25 à 40 ans. Le couvert agroforestier est fermé, et la compétition pour la lumière entre arbres y est presque aussi importante que dans le témoin forestier. En raison de leurs plus grandes dimensions, les arbres agroforestiers interceptent individuellement plus de lumière, et poussent donc plus rapidement que les arbres forestiers. L'ombre des arbres est intense, y compris en hiver (troncs et branches), et le rendement du blé est fortement réduit par rapport au témoin agricole. Les années sans accidents climatiques (stress hydrique et/ou thermique) dans le témoin agricole, le rendement du blé agroforestier est réduit de moitié environ par rapport au témoin agricole. Les autres années, les rendements relatifs sont plus élevés.

Au final, grâce à leur capacité à valoriser l'eau disponible en profondeur, les noyers sont peu affectés par la présence des cultures. En raison de la densité de plantation plus faible que dans le témoin forestier, le rendement en bois de la parcelle agroforestière est plus

faible que celui de la parcelle forestière, mais le rendement par arbre est plus élevé. Le rendement relatif simulé pour le peuplement d'arbres est égal à 0.65, pour une densité relative de 0.42. En début de rotation, le rendement du blé dur n'est pas affecté par la présence des noyers, et le rendement relatif du blé est égal à la proportion de la surface qui est cultivée. Ensuite, les noyers exercent une influence croissante sur la parcelle, notamment en réduisant la lumière disponible. En raison du débourrement tardif des noyers, le blé n'est soumis à une ombre intense qu'à la fin de son cycle, et plusieurs mécanismes de compensation permettent de limiter les conséquences de cette ombre sur le rendement. Le rendement relatif simulé pour le blé dur, intégré sur 40 ans, est égal à 0.78, par une proportion de surface cultivée égale à 0.92. Le LER du système, défini comme la somme des rendements relatifs, est égal à 1.43. C'est une valeur extrêmement élevée, probablement la plus élevée jamais mise en évidence sur un système agroforestier.

Comment aller plus loin ?

Par construction, une démarche de modélisation intégrative comme celle adoptée ici n'apporte pas de nouvelles connaissances sur les processus à l'échelle à laquelle ils sont représentés. Elle nous a par contre permis de discuter les importances relatives de ces processus et d'identifier des lacunes dans les connaissances ou dans la manière de formaliser ces processus. Dans le chapitre 4, nous avons identifié de nombreuses sources d'incertitudes qui pourraient avoir une influence sur la simulation de la productivité du système. Sans chercher l'exhaustivité, nous revenons ici sur certains points qui nous paraissent particulièrement importants, et proposons des pistes pour améliorer leur prise en compte.

Relation densité/productivité pour les arbres

La relation entre densité de plantation et productivité des arbres a été mise en évidence comme un facteur majeur d'explication des différences entre arbres forestiers et agroforestiers. Hi-sAFe rend compte de cette relation très simplement, via (1) le module de compétition pour la lumière, et (2) un arrêt de croissance horizontale des houppiers lorsque les arbres se touchent. Un effet "secondaire" de cet arrêt de croissance horizontale des houppiers est une augmentation de la fraction de carbone allouée au tronc (indice de récolte), due au fait que les biomasses de branches et de feuilles sont des fonctions du volume du houppier. Qualitativement, les tendances simulées par Hi-sAFe sont cohérentes avec la littérature sur le sujet : dans une plantation à faible densité, les arbres poussent plus rapidement, développent des houppiers plus volumineux et allouent une part plus importante de leur biomasse aux branches et aux feuilles que dans une plantation à forte densité (cf. sections 4.4.1.2 et 6.4.1.1). Ce résultat encourageant doit cependant être modéré par deux remarques : (1) la réponse simulée de l'indice de récolte des noyers à la densité de plantation résulte directement des relations d'allométrie, qui ont été paramétrées pour de petits arbres (inférieurs à 20 cm de diamètre) en

peuplements peu denses, et (2) Hi-sAFé ne simule pas de modification de ces allométries en fonction de la densité de plantation, alors que la modification de l'allométrie entre hauteur et diamètre du tronc par exemple est connue pour être sensible à la densité de plantation (e.g. Cabanettes et al., 1998; Gavaland et al., 2006).

Pour affiner la compréhension et la modélisation de la relation entre densité de plantation et productivité, nous recommandons une réflexion de fond sur les relations d'allométrie. Il faudra en particulier (1) paramétrer à nouveau les relations d'allométrie sur un échantillon de noyers plus important, couvrant une large gamme de dimensions et de conditions de croissance (contexte pédo-climatique, densité de plantation), (2) évaluer la sensibilité des réactions simulées à ces paramètres, et si nécessaire (3) définir plusieurs jeux de paramètres, en fonction de la dimension des arbres, (4) modifier la forme mathématique des équations et/ou (5) introduire des formalismes permettant de rendre compte de la modification des relations d'allométrie, ajustées pour des arbres à croissance libre, en fonction de la densité du peuplement.

Le paramétrage des allométries aériennes de Hi-sAFé demande des mesures relatives aux dimensions des arbres et de leur houppiers, ainsi que des mesures de biomasse de tronc et de branches et de surface foliaire (section 1.2.2.2). Dans des peuplements peu denses et réguliers, comme c'est le cas des plantations de noyers, les dimensions des arbres et de leur houppiers sont des mesures relativement faciles à acquérir, et il est envisageable de les réaliser sur un grand nombre d'arbres. Les mesures de biomasse et de surface foliaire sont plus délicates. Leur mesure directe est très coûteuse en main d'oeuvre. Les méthodes d'inversion de la fraction de trouée à partir de photographies permettent une estimation indirecte de la surface interceptrice d'arbres isolés, et donc d'en estimer la surface foliaire sous certaines hypothèses (Villalobos et al., 1995; Phattaralerphong et al., 2006; Talbot & Dupraz, in press). Ces dernières années, de nombreuses méthodes de traitement des données acquises par LIDAR (Light Detection and Ranging) terrestre ont été développées. Ces méthodes semblent particulièrement prometteuses pour estimer la surface foliaire, la biomasse de tronc par reconstitution du profil de tige ou la biomasse de branches par reconstruction de l'architecture d'arbres sans feuilles (Côté et al., 2009; Livny et al., 2010; Dassot et al., 2011).

Contrairement à l'automate racinaire par exemple, dont le comportement est complexe et ne peut pas être étudié en dehors du modèle complet, les allométries aériennes sont de simples équations, et elles peuvent être étudiées analytiquement et indépendamment du modèle Hi-sAFé dans son ensemble. Cela offre la possibilité d'étudier analytiquement les relations entre espacement entre arbres, dimension et formes des houppiers et biomasses des différents compartiments aériens, et d'évaluer leur sensibilité aux paramètres des relations d'allométrie. Ces dernières années, de nombreux travaux théoriques ont été menés pour comprendre l'origine des relations d'allométrie. En posant des hypothèses simples sur la géométrie fractale des plantes et sur les contraintes hydrauliques et mécaniques subies par leur partie aérienne, West et al. (1999) ont proposé un modèle permettant de déduire des relations d'allométrie reliant les dimensions et les biomasses des différents compartiments aériens pour l'ensemble des plantes vasculaires. Différentes

études ont montré qu'il était possible d'affiner ce modèle général pour intégrer les effets de la hauteur de base du houppier et la contribution du bois de coeur à la biomasse de tronc (Mäkelä & Valentine, 2006), des facteurs d'auto-ombrage au sein des houppiers (Duursma et al., 2010), ou des effets de compétition entre arbres (Kaitaniemi & Lintunen, 2008). Ces travaux pourraient être mobilisés pour vérifier la cohérence des allométries de Hi-sAFe avec des lois générales sur les contraintes hydrauliques et mécaniques, et éventuellement pour les reformuler dans un cadre plus général.

Modification des stress hydriques et thermiques des cultures

Nous avons montré dans le chapitre 4 que les ordres de grandeur simulés pour les différents termes du bilan hydrique sont réalistes. Cependant, nous avons aussi mis en évidence une forte sensibilité du rendement du blé dur aux stress hydriques printaniers, ainsi qu'un évitement possible de ces stress en conditions agroforestières. Ce dernier point repose (1) sur la faible consommation d'eau issue des horizons de surface par les noyers, et (2) sur la réduction de la demande évaporative du blé et de l'évaporation du sol à l'ombre des noyers. Une légère modification de l'un de ces deux aspects pourrait modifier considérablement nos conclusions, passant d'une situation où les noyers réduisent les stress à une situation où ils les aggravent.

Nous avons montré que Hi-sAFe a tendance à sous-estimer la proportion de racines de noyer dans les horizons superficiels, probablement en raison de la non prise en compte de la disponibilité des nutriments dans le fonctionnement de l'automate racinaire. De plus, la non prise en compte de la résistance hydraulique longitudinale des racines et de la composante gravitaire du potentiel hydrique peut contribuer à une sous estimation de la contribution des horizons de surface à l'alimentation hydrique des arbres. Une version plus récente de Hi-sAFe, incluant ces différents points, conduit à la simulation de densité racinaires plus élevées en surface comme nous le prévoyions, mais la consommation d'eau par les noyers dans les horizons de surface reste très faible (Querné, communication personnelle, 2011). Ces résultats sont d'une importance cruciale pour le fonctionnement de l'association blé-noyer et devront être confirmés expérimentalement, par des mesures isotopiques par exemple (Asbjornsen et al., 2008; Eggemeyer et al., 2009).

Les économies d'eau en conditions agroforestières, par réduction de la demande évaporative du sol et des cultures, sont modélisées très sommairement par Hi-sAFe. La réduction des stress thermiques pendant le remplissage des grains, phénomène aussi simulé par Hi-sAFe, est intimement lié à ces économies d'eau. Transpiration et température de surface sont en effet deux variables liées par le bilan énergétique des cultures. Pour une compréhension plus fine de ces phénomènes, une stratégie possible consisterait à utiliser un modèle spécifiquement conçu à cet effet. Le modèle DART-EB par exemple, mis au point par Belot (2007), permet de simuler le bilan radiatif, les échanges turbulents, les transferts de masse (eau, CO₂) et de chaleur ainsi que les températures de surface au sein d'une scène tridimensionnelle. L'application d'un tel modèle à une scène agroforestière serait probablement riche d'enseignements.

Remplissage des grains pour les cultures ombragées

La sensibilité du nombre de grains du blé au rayonnement intercepté pendant la période précédant la floraison est un phénomène bien documenté (e.g. Fischer, 1985; Abbate et al., 1997; Demotes-Mainard & Jeuffroy, 2004), et bien reproduit par le modèle STICS intégré dans Hi-sAFé (chapitres 4 et 5). Le poids des grains simulé par STICS est déduit du nombre de grains et de l'indice de récolte qui, hormis en cas de stress thermique pendant le remplissage des grains, est une fonction linéaire du temps. Ce formalisme ne fait pas la distinction entre nouveaux assimilats et remobilisation pendant le remplissage des grains, et suppose donc implicitement qu'une photosynthèse réduite pendant cette période est partiellement compensée par une augmentation des remobilisations et n'a pas d'effet sur l'indice de récolte. La majorité des auteurs s'accordent sur le fait que le remplissage des grains chez le blé est généralement limité par la demande des grains, et non par la disponibilité en carbohydrates (Borrás et al., 2004). Dans la majorité des cas cependant, la remobilisation ne constitue qu'une faible proportion du poids final des grains (Austin et al., 1977; Bidinger et al., 1977), ce qui signifie que l'assimilation nette est suffisante pour satisfaire leur demande. Dans une association blé noyer, en raison d'une ombre intense pendant le remplissage des grains, il est possible que l'assimilation nette ne soit plus suffisante pour satisfaire la demande des grains. Il a été montré que dans de telles situations, la remobilisation des réserves accumulées avant l'anthèse est stimulée, et peut être responsable d'une large proportion du poids des grains final (Blum, 1998; Asseng & van Herwaarden, 2003).

Ces aspects de la physiologie du blé pourraient être abordés par l'utilisation de modèles simulant explicitement la remobilisation des ressources. On pourra s'orienter pour cela soit vers des modèles de cultures "classiques" comme APSIM (McCown et al., 1996) ou SUCROS (Van Ittersum et al., 2003), modèles proches de STICS en termes de complexité mais gérant explicitement le phénomène de remobilisation, soit vers des modèles de type structure-fonction, basés sur une description 3D des plantes à l'échelle de l'organe (Vos et al., 2010). Le modèle NEMA, proposé par Bertheloot et al. (2011), modélise explicitement l'assimilation, la remobilisation et l'allocation du carbone et de l'azote pendant le remplissage des grains du blé. Ce type de modèles pourrait d'ailleurs être utilisé pour aborder d'autres aspects de la physiologie du blé dur en conditions agroforestières, comme la saturation lumineuse de la photosynthèse (Evers et al., 2010) ou les modifications morphologiques en réponse au ratio rouge clair sur rouge sombre (Evers et al., 2007).

Au delà de la productivité

Les systèmes agroforestiers tempérés sont mis en avant par de nombreux auteurs pour leurs services écosystémiques. Ils permettraient en particulier une limitation de l'érosion des sols et la pollution des nappes par les nitrates, une diversification des paysages, une conservation de la biodiversité, et une séquestration du carbone atmosphérique (Palma

et al., 2007; Jose, 2009; Nair et al., 2009). De même que pour la productivité, la généralisation de résultats obtenus dans des contextes spécifiques est délicate, et la modélisation apparaît comme une voie possible pour étudier les potentialités environnementales de l'agroforesterie (Palma et al., 2007).

Hi-sAFe simule des bilans de carbone et d'azote, il peut donc en théorie fournir des informations relatives à deux questions au coeur des préoccupations environnementales : la lixiviation des nitrates, et la séquestration de carbone. La finalisation de Hi-sAFe sur les aspects relatifs au bilan azoté a été réalisée récemment dans le cadre d'un contrat avec l'Agence de l'eau, dans l'objectif d'évaluer la capacité des systèmes agroforestiers à réduire les fuites de nitrates. De même, Hi-sAFe sera utilisé dans le cadre du projet ANR ECOSFIX (Services écosystémiques des racines-redistribution hydrique, séquestration du carbone, fixation du sol), pour étudier la contribution potentielle du turn-over racinaire à la séquestration de carbone dans les systèmes agroforestiers. De même que pour la productivité, les sorties de Hi-sAFe sur ces aspects seront à considérer avec précaution. Effectivement, le modèle suppose un certain nombre de simplifications et comporte des incertitudes sur les paramètres. Ils n'en seront pas moins une base intéressante de réflexion.

Un outil pour explorer des alternatives de conception et de conduite

Le second objectif de cette thèse était d'utiliser le modèle Hi-sAFe comme un outil d'exploration pour étudier les conséquences, en termes de productivité, de choix de conception et/ou de conduite des systèmes agroforestiers. Nous avons pour cela choisi deux cas d'étude, tous les deux basés sur notre système de référence, l'association noyer hybride - blé dur de Restinclières. Le premier avait pour objectif d'étudier des questions temporelles, par le choix de traits phénologiques des espèces associées. Le second était orienté vers des questions spatiales, à savoir le choix de la densité de plantation des arbres et de leur disposition sur la parcelle.

Traits phénologiques des espèces et productivité

Dans la première expérimentation virtuelle (chapitre 5), nous avons comparé des systèmes agroforestiers associant noyer hybrides et blé dur avec différents traits phénologiques, précocité de débourrement pour les noyers et précocité de floraison pour le blé. Nous avons travaillé dans un contexte pédoclimatique constant, correspondant à la parcelle A3 de Restinclières. Dans ce contexte, la croissance des noyers hybrides s'est révélée très peu sensible aux traits phénologiques des espèces, et notre analyse s'est concentrée sur la productivité du blé dur. En plus d'un effet direct et prévisible de la compétition pour la lumière sur la production de biomasse, nous avons mis en évidence plusieurs phénomènes intéressants :

-
- Dans les associations où les noyers débourent plus d'un mois avant la floraison du blé, le nombre de grains est fortement réduit, avec un effet négatif sur l'indice de récolte. Dans les autres associations, nombre de grains et biomasse sont réduits dans les mêmes proportions, et la diminution du nombre de grain n'a pas d'effet sur l'indice de récolte. S'il était confirmé, ce résultat constituerait un critère simple de choix spécifique et/ou variétal pour concevoir des systèmes agroforestiers : choisir une combinaison arbres/céréale telle l'ombre des arbres soit peu intense durant les semaines précédant la floraison de la céréale.
 - La présence des noyers, en réduisant le rayonnement disponible et la demande évaporative pour l'ensemble sol-culture, permet de réduire la fréquence et la sévérité des accidents climatiques (stress hydriques et thermiques) subis par le blé. Ce phénomène est simulé pour toutes les combinaisons de traits phénologiques, mais il est particulièrement important pour le blé tardif, pour lequel ces accidents sont plus fréquents. Ce résultat est particulièrement intéressant dans le cadre des réflexions sur l'adaptation des systèmes de cultures aux changements climatiques, au cours desquels la fréquence de ces accidents est amenée à augmenter (Brisson et al., 2010). L'agroforesterie pourrait être une stratégie alternative ou complémentaire aux solutions généralement proposées pour s'adapter à ces changements, qui sont principalement la sélection variétale et la modification des dates de semis (Gate, 2008; Debaeke & Aboudrare, 2004; Semenov et al., 2009). Cette stratégie consisterait à accepter une perte de rendement moyen des céréales, en contre partie d'une diminution du risque d'années critiques, et d'un revenu supplémentaire lié à l'exploitation des arbres.

En discussion de ce chapitre, nous avons vu que ces résultats étaient fortement conditionnés par certaines hypothèses simplificatrices dans la modélisation des interactions arbres-cultures et du déterminisme du rendement des cultures. A posteriori, il nous semble que si Hi-sAFe a permis d'apporter un premier regard sur cette question, les phénomènes mis en évidence sont subtils, et une étude plus poussée devrait mobiliser des modèles plus fins en termes de mécanismes. A l'avenir, nous recommandons une utilisation de Hi-sAFe pour comparer des situations plus contrastées.

Organisation spatiale et productivité

La seconde expérimentation virtuelle s'est concentrée sur les conséquences, en termes de productivité des deux espèces, de choix relatifs à la densité et à la disposition des arbres dans la parcelle agroforestière. Pour l'association noyer hybride / blé dur de Restinclières, d'après ces simulations, la relation entre organisation spatiale du système et productivité du système est essentiellement structurée par la compétition aérienne entre arbres, pour la lumière et pour l'espace.

Nos principales conclusions concernant la croissance des arbres sont les suivantes : (1) plus les arbres sont espacés, plus ils poussent rapidement mais moins leur indice de récolte est élevé ; (2) le gain de rendement par arbre, à faible densité, n'est pas suffisant

pour compenser la moindre quantité d'arbres, et le rendement du peuplement reste plus faible qu'à forte densité; (3) lorsque les écarts entre lignes sont grands, une densité trop élevée de plantation sur les lignes ne permet pas aux arbres de profiter pleinement de l'espace entre lignes, ce qui pénalise la croissance du peuplement; et (4) la compétition entre arbres pour la lumière est moins forte en alignements nord-sud qu'en alignements est-ouest.

Pour les cultures, nos résultats suggèrent que l'organisation spatiale de la plantation a une influence sur la variabilité spatiale du rendement. En particulier, le rendement est moins variable avec des lignes d'arbres nord-sud qu'avec des lignes d'arbres est-ouest. En revanche, la valeur moyenne sur la parcelle du rendement des cultures semble peu influencée par la disposition des arbres.

Enfin, la productivité totale du système, mesurée par le LER, est maximale à forte densité de plantation. Les différences de LER entre systèmes plantés à différentes densités, très fortes en début de rotation, ont tendance à s'amoinrir au cours du temps.

Perspectives d'exploration virtuelle

Dans cette thèse, beaucoup de travail a été investi dans le développement et le débogage du modèle, le développement d'outils informatiques pour permettre son utilisation intensive, le paramétrage et la calibration pour l'association noyer hybride - blé dur, et la compréhension du fonctionnement du modèle. Par conséquent, nous nous sommes limités aux exemples d'expérimentations virtuelles développés ci-dessus. Dans les deux cas, l'analyse des simulations a permis de mettre en évidence des phénomènes intéressants et non intuitifs.

Choix des espèces en fonction du contexte pédoclimatique

Un des enjeux de la modélisation en agroforesterie est de pouvoir évaluer le potentiel de différentes associations d'espèces dans différents contextes pédoclimatiques. Dans ce travail, nous nous sommes concentrés sur l'étude d'une association donnée (noyer hybride - blé dur), dans un contexte donné (Restinclières).

Le modèle STICS est un modèle de culture générique. Il a été paramétré pour la plupart des grandes cultures tempérées, et évalué dans une large gamme de contextes pédoclimatiques. C'est d'ailleurs la principale raison pour laquelle il a été retenu lors de la conception de Hi-sAFé. Pour la modélisation des cultures donc, le changement de contexte pédoclimatique ou d'espèce ne devrait a priori pas poser de problème majeur. STICS devrait permettre de comparer des cultures d'hiver et d'été, à enracinement profond ou superficiel, irriguées ou non irriguées, ou à croissance déterminée ou indéterminée, sur différents types de sols et sous différents régimes climatiques. De même que pour le blé dur, les résultats obtenus seront à considérer avec précaution, car de même que pour le blé dur, il est possible que les conditions particulières subies par les cultures agroforestières sortent du domaine de validité du modèle.

Les modules de compétition pour l'eau et la lumière ont été conçus pour être génériques, et leur paramétrage est indépendant du contexte pédoclimatique. Le changement d'espèce ou de contexte sera plus délicat à réaliser pour la modélisation des arbres. Sur l'exemple du noyer hybride, nous avons montré que les données dont nous disposions à Restinclières n'étaient pas suffisantes pour paramétrer certains formalismes du modèle, en particulier ceux liés au fonctionnement racinaire et à l'équilibre fonctionnel entre compartiments aériens et souterrains. Des données issues d'autres sites seront nécessaires pour poursuivre le paramétrage. Il ne nous paraît pas raisonnable d'espérer, à courte échéance, un paramétrage de Hi-sAFe robuste au changement de contexte pédoclimatique, et pour plusieurs espèces d'arbres. Une alternative possible consisterait à définir des idéotypes d'espèces d'arbres, à débourrement précoce ou tardif, à croissance déterminée ou indéterminée, avec des houppiers de différentes formes, des systèmes racinaires plus ou moins réactifs et opportunistes, ou des stratégies variées dans leur allocation aérien/souterrain. Ces idéotypes permettraient d'explorer des questions théoriques, comme le rôle de la plasticité racinaire sur les complémentarités entre espèces par exemple, mais aussi d'identifier certaines caractéristiques intéressantes à considérer dans le choix des essences à utiliser en agroforesterie. Il faut cependant garder à l'esprit que le comportement du modèle d'arbre n'a pour le moment été étudié en détail que pour une espèce et sur un site. Il sera donc nécessaire de s'assurer du bon fonctionnement du modèle avant de se lancer dans des expérimentations virtuelles lourdes en temps de calcul et en analyse de données.

Vers une simulation plus réaliste et plus souple de la conduite des systèmes agroforestiers

Dans notre exploration de la relation entre organisation spatiale du système et productivité (chapitre 6), nous avons considéré des choix simples d'organisation initiale du système agroforestier, et avec une conduite figée. Hi-sAFe a été conçu pour pouvoir explorer une gamme beaucoup plus large de choix de conception et de conduite des systèmes, qui permettrait la simulation de situations plus réalistes. En particulier :

- Le choix de l'âge d'exploitation des arbres. Nous avons montré que les arbres agroforestiers plantés à faible densité ont une croissance plus rapide, ce qui signifie qu'ils atteignent leur taille d'exploitabilité plus tôt. Le gestionnaire aura alors le choix de récolter les arbres plus tôt, ou au contraire de les laisser grossir encore, pour bénéficier de leur croissance rapide, mais avec un rendement des cultures intercalaires fortement diminué.
- La définition du régime d'éclaircie. Dans les simulations réalisées ici, nous avons fait l'hypothèse que les arbres étaient plantés à leur densité finale. En réalité, les plantations forestières sont souvent initialisées à très forte densité et éclaircies ensuite. Ce mode de gestion permet de limiter le développement de la végétation spontanée grâce à une fermeture rapide du couvert, de favoriser la croissance en hauteur des arbres, et de ne sélectionner que les meilleurs arbres lors de l'éclaircie. Dans un contexte agroforestier, plusieurs stratégies sont possibles. On peut choisir

d'adopter une densité de plantation faible pour limiter la compétition des arbres sur les cultures, quitte à remplacer les arbres morts si nécessaire, où au contraire choisir de planter plus d'arbres afin de sélectionner les plus beaux lors de l'éclaircie, mais avec un effet potentiellement délétère sur le rendement des cultures. Pour l'instant, il n'y a pas de méthode permettant de gérer les éclaircies dans Hi-sAFé. L'introduction de telles méthodes demanderait cependant peu de travail, et ouvrirait des perspectives intéressantes dans l'exploration d'itinéraires sylvicoles adaptés spécifiquement à l'agroforesterie.

- Adaptation de la largeur des bandes non cultivées. Réduire au maximum la largeur des lignes d'arbres permet de cultiver une plus grande proportion de la surface de la parcelle, et donc d'augmenter la productivité totale du système. Dans certaines situations, il peut toutefois être intéressant de conserver des lignes d'arbres plus larges. En conditions pédoclimatiques contraignantes pour les arbres, une bande cultivée plus large pendant les premières années permettrait de limiter la compétition exercée par les cultures, et de favoriser l'installation des arbres. En fin de rotation, si le rendement des cultures est fortement réduit au voisinage des lignes d'arbres, on pourra choisir de ne cultiver qu'une portion des allées afin de maintenir un rendement acceptable sur la partie cultivée.
- Adoption d'itinéraires techniques spécifiques pour la gestion des arbres et/ou des cultures. En particulier, on pourra choisir un régime d'élagage des arbres plus sévère pour limiter l'influence des arbres sur les cultures, quitte à pénaliser légèrement la croissance initiale des arbres. Dans une situation avec une compétition souterraine marquée, le cernage racinaire des arbres où un travail du sol profond avant le semis des cultures devrait favoriser la ségrégation des systèmes racinaires. Enfin, étant donnée la diminution des besoins azotés des cultures agroforestières en fin de rotation, et le retour de fertilité induit par les litières des arbres, il peut être opportun d'adapter la fertilisation en fonction de l'âge du système.

D'autres critères de sélection que le LER

Le LER est une mesure globale et objective permettant de comparer un système agroforestier avec les cultures pures correspondantes. Il a une interprétation simple en termes d'efficacité d'utilisation de l'espace, et il est par conséquent largement utilisé pour communiquer sur la productivité des systèmes agroforestiers. Pour cette raison, nous avons utilisé le LER et les rendements relatifs comme fils directeurs pour l'analyse de la productivité. Dans un cadre de conception et d'optimisation de systèmes, le LER ne sera évidemment pas le seul critère à prendre en compte.

Tout d'abord, l'utilisation des rendements relatifs peut être trompeuse. Dans le chapitre 5 par exemple, les rendements relatifs les plus élevés sont obtenus pour le blé tardif, mais ces fortes valeurs de rendement relatif ne s'expliquent pas par de bons rendements en agroforesterie, mais par de mauvais rendements en témoin agricole. Il est donc indispensable de considérer les rendements absolus en plus des rendements relatifs.

Le maintien d'un rendement acceptable pour les cultures intercalaires, permettant un revenu régulier, est souvent la préoccupation majeure des porteurs de projets agroforestiers. Dans le chapitre 6, nous avons montré que les valeurs de LER les plus élevées sont obtenues à forte densité de plantation des arbres, mais avec des rendements des cultures fortement diminués. A partir des sorties de Hi-sAFé, il est possible de calculer des critères basés sur des seuils de productivité acceptable pour les cultures. En climat méditerranéen, où le blé dur est soumis à une forte variabilité interannuelle des conditions climatiques, la prise en compte du risque climatique est une question cruciale. D'après nos résultats, l'influence croissante des arbres dans une parcelle agroforestière conduit à une diminution progressive du rendement moyen, mais aussi à une diminution du risque d'obtenir des rendements très faibles en cas d'accident climatique. Selon la fréquence de ces accidents climatiques, il pourra être intéressant d'accepter des pertes de rendement moyen plus fortes, en plantant plus dense, afin de stabiliser le rendement des cultures plus rapidement. Pour étudier un tel compromis, il faudra considérer l'évolution, en fonction de l'âge de système, de la variabilité et des valeurs extrêmes du rendement simulé, en plus de sa valeur moyenne.

Annexes

Annexe A

Entrées du modèle pour la simulation noyer hybride - blé dur à Restinclières

A.1 Paramètres du noyer hybride (fichier .tree)

Paramètre	unité	description	Valeur	Source
<i>Phénologie (voir section 1.2.2.1)</i>				
D_0	Jour Julien	Jour de levée de dormance des bourgeons (début de cumul de température)	61	voir section A.1.1
T_0	°C	Température de base pour l'accumulation de température	0	voir section A.1.1
S_T	°C.Jours	Somme de température pour déclencher le débourrement	612	voir section A.1.1
D_{LE}	Jours	Durée d'expansion foliaire	91	voir section A.1.1
D_V	Jours	Durée de végétation (du débourrement au début de la chute des feuilles)	180	voir section A.1.1
D_{LF}	Jours	Durée de la chute des feuilles	15	-
T_{LF}	°C	Température seuil (froid) pour un déclenchement anticipé de la chute des feuilles	0	-

Annexe A Entrées du modèle pour la simulation noyer hybride - blé dur à Restinclières

Paramètre	unité	description	Valeur	Source
<i>Description aérienne (voir section 1.2.2.2)</i>				
$a_{h/dbh}$	-	coefficient a pour la relation hauteur/DBH	31	Restinc, Castries, NDL
$b_{h/dbh}$	-	coefficient b pour la relation hauteur/DBH	0.72	Restinc, Castries, NDL
$a_{v/h,dbh}$	-	coefficient a pour la relation volume de tronc/DBH/hauteur	-1.29	IFN
$b_{v/h,dbh}$	-	coefficient b pour la relation volume de tronc/DBH/hauteur	1.75	IFN
$c_{v/h,dbh}$	-	coefficient c pour la relation volume de tronc/DBH/hauteur	0.87	IFN
$a_{a/dcb}$	-	coefficient a pour la relation aire du houppier/DCB	401	Restinc, NDL
$b_{a/dcb}$	-	coefficient b pour la relation aire du houppier/DCB	1.38	Restinc, NDL
$a_{l/v}$	-	coefficient a pour la relation volume du houppier/surface foliaire	5.34	Restinc, NDL
$b_{l/v}$	-	coefficient b pour la relation volume du houppier/surface foliaire	0.61	Restinc, NDL
$a_{s/t}$	$m^3.m^{-3}$	coefficient de proportionnalité entre volume de souche et volume de tronc	0.2	-
$a_{b/v}$	$m^3.m^{-3}$	coefficient de proportionnalité entre volume de branches et volume du houppier	6e-4	Restinc
LMA	$Kg.m^{-2}$	Leaf Mass Area	0.1	Restinc
ρ_{wood}	$Kg.m^{-3}$	Densité du bois (branches, tronc et racines de structure)	616	Restinc
<i>Photosynthèse et réserves carbonées (voir section 1.2.2.2)</i>				
LUE_{max}	$gC.MJ^{-1}$	efficience maximale de la photosynthèse (nette)		voir section A.1.3
$A_{LUE_{max}}$	Jours	nombre de jours après débourrement pour atteindre LUE_{max}	60	Lacointe et al. (1995)
c_{lue}	$gC.MJ^{-1}.Jours^{-2}$	coefficient pour la variation de LUE en fonction de l'âge physiologique des feuilles	7.81e-5	Lacointe et al. (1995)
p_{NSC}	-	taille cible du pool de carbone de réserve (en proportion du carbone ligneux)	0.1	-

A.1 Paramètres du noyer hybride (fichier .tree)

Paramètre	unité	description	Valeur	Source
a_{NSC}	-	seuil de déficit foliaire ($1 - C_f/C_f^*$, où C_f et C_f^* sont la taille et la taille cible du pool feuilles) au dessus duquel les réserves peuvent être utilisées	0.1	-
b_{NSC}	-	proportion maximale de réserves mobilisable par jour (en proportion du pool NSC)	0.2	-
c_{NSC}	-	idem, en proportion de C_f^*	0.1	-
<i>Fonctionnement azoté</i>				
NC_L	-	ratio N/C optimal pour les feuilles	0.04	-
NC_{FR}	-	ratio N/C optimal pour les racines fines	0.03	-
NC_W	-	ratio N/C optimal pour les compartiments ligneux	0.01	-
N_{target}	-	ratio quantité d'azote cible (utilisée pour la demande) sur quantité d'azote optimale (calculée à partir des pools de C et des ratios N/C)	1.2	-
PNR_L	-	fraction d'azote remobilisé lors de la sénescence des feuilles	0.2	-
PNR_{FR}	-	fraction d'azote remobilisé lors de la sénescence des racines	0.2	-
<i>Système racinaire (voir section 1.2.2.3)</i>				
SRL	$m.g^{-1}$	longueur spécifique des racines fines	8.17	Mulia & Dupraz (2006)
$\alpha_{CR/FR}$	m^2m^{-1}	section de racine de structure nécessaire par unité de longueur de racines fines		voir section A.1.3
φ	-	opportunisme racinaire (pour l'eau)		voir section A.1.3
ρ	-	paramètre d'économie de carbone pour l'automate racinaire		voir section A.1.3
α	$m.m^{-3}$	seuil de colonisation de l'automate racinaire		voir section A.1.3
p	-	coefficient de plagiotropisme	0.6	-
$t_{1/2}$	jours	demi-vie des racines fines dans les voxels saturés		voir section A.1.3
$t_{1/2,sat}$	jours	demi-vie des racines fines dans les voxels non saturés	30	-

Annexe A Entrées du modèle pour la simulation noyer hybride - blé dur à Restinclières

Paramètre	unité	description	Valeur	Source
$t_{CR,sat}$	jours	durée de vie des racines de structure dans les voxels saturés	50	-
<i>Allocation aérien/souterrain (voir section 1.2.2.4)</i>				
ΔR_{max}	-	variation maximale journalière de la cible R^* pour la proportion de carbone capteur aérien		voir section A.1.3
Rmax	-	Valeur maximale autorisée pour R^*	0.85	-
Rmin	-	Valeur minimale autorisée pour R^*	0.15	-
k_d	-	vitesse de dérive de R^* en absence de stress		voir section A.1.3
ϕ_W	-	sensibilité au stress hydrique pour l'évolution de R^*		voir section A.1.3
<i>Interception de la lumière (voir section 1.2.3)</i>				
μ	-	coefficient d'aggrégation du feuillage	1	voir section B
WAD	m.m ⁻³	densité de surface de branches	0.026	voir section B
σ_{PAR}	-	absorptance des feuilles dans le PAR (rayonnement photosynthétiquement actif)	0.85	Monteith (1975)
<i>Module d'extraction d'eau (voir section 1.2.4.2)</i>				
h_{max}	cm	Potentiel hydrique maximal pour la fonction de Campbell (pas de réduction de la demande)	-10000	valeur par défaut
h_{min}	cm	Potentiel hydrique minimal pour la fonction de réduction de Campbell	-30000	valeur par défaut
α	-	paramètre de courbure pour la fonction de réduction de Campbell	0.1	valeur par défaut
h_{buf}	-	"buffer potential" : différence de potentiel requise pour l'entrée d'eau dans les racines (exprimé en proportion du potentiel hydrique du sol)	0.05	valeur par défaut
r	cm	rayon des racines absorbantes	0.05	valeur par défaut
k_r	cm.jour ⁻¹	conductivité hydraulique axiale des racines fines (cm ³ d'eau par cm de différence de potentiel hydrique, par cm de longueur de racines et par jour)	1e-5	valeur par défaut

A.1.1 Paramétrage de la phénologie

Débourrement

La paramétrage du débourrement des noyer hybrides a été réalisé à partir des relevés effectués à Restinclières de 2003 à 2009, sur un échantillon de 40 arbres. Pour une année donnée, nous avons observé une grande variabilité entre arbres pour la date de débourrement, alors que nous sommes intéressés par un arbre moyen uniquement dans le cadre de Hi-sAFé. La date de débourrement de l'arbre moyen a été définie comme la date à laquelle 50 % des arbres ont débourré. Pour chaque date i de mesure, nous avons calculé la proportion d'arbres $p(i)$ ayant débourré. Cette proportion peut être modélisée par une courbe sigmoïde en fonction du temps thermique :

$$p(i) = \frac{1}{1 + e^{-b * (\sum_{d=D_0}^i (T(i)-T_0) - S_T)}} \quad (\text{A.1.1})$$

où $T(i)$ est la température du jour i , et b , S_T , D_0 et T_0 sont des paramètres. T_0 est la température de base pour le calcul du temps thermique, D_0 est la date de début de cumul de température, S_T est la somme de température déclenchant le débourrement, et b est un paramètre de courbure de la sigmoïde décrivant la variabilité entre arbres pour la date de débourrement.

La température de base T_0 a été fixée à 0°C. Les 3 autres paramètres de la sigmoïde ont été optimisés sur la base du R^2 de la sigmoïde. Les valeurs retenues sont $D_0 = 61$ (2 mars), $S_T = 612$ degrés.jour et $b = 1.6e - 2$. La sigmoïde correspondante est représentée en figure A.1.

Fin d'expansion foliaire

La date de fin d'expansion foliaire (fin d'expansion de rameaux longs) n'a été mesurée qu'en 2003. Cette année là, le seuil de 50 % des arbres ayant terminé leur expansion foliaire est atteint le jour 198, alors que la date moyenne de débourrement est le jour 122. Nous retiendrons pour la durée d'expansion foliaire (D_{LE}) la valeur de 76 jours.

Durée de végétation et chute des feuilles

En utilisant le formalisme proposé par Lacoïnte et al. (1995) pour l'évolution de l'efficacité d'utilisation de la lumière en fonction de temps écoulé depuis le débourrement, on obtient une efficacité nulle à partir de 175 jours après le débourrement. Nous utiliserons cette valeur pour déclencher la chute des feuilles. Le débourrement ayant généralement lieu vers la fin du mois d'avril, ce paramétrage donne un début de chute des feuilles vers la fin du mois d'octobre (en absence de températures froides avant cette date).

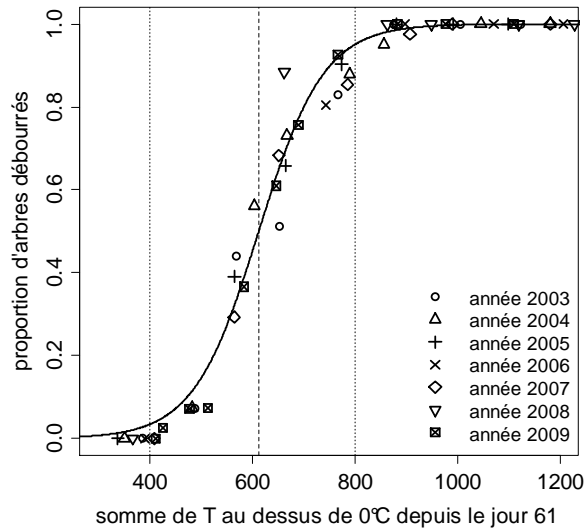


Figure A.1: Ajustement d'une courbe sigmoïde pour la proportion d'arbres débourrés en fonction du temps thermique. La droite en pointillés larges ($S_T = 612$) correspond à la valeur retenue pour simuler un arbre moyen. Les droites en pointillé fin ($S_T = 400$ et $S_T = 800$) correspondent aux valeurs retenues pour la simulation de noyers précoces et tardifs pour l'expérimentation virtuelle sur la phénologie (voir 5).

A.1.2 Paramétrage aérien du noyer hybride

- La relation entre hauteur (m) et diamètre à hauteur de poitrine (cm) a été ajustée à partir de mesures effectuées sur noyer hybride, sur les sites expérimentaux de Restinclières (environ 9000 points entre 1996 et 2008, pour un diamètre maximal de 28 cm) et Castries (Hérault, 2600 points entre 1992 et 2008, diamètre maximal de 22 cm). La relation obtenue est présentée dans la figure Notons que les résidus sont structurés : la relation ajustée a tendance à surestimer la hauteur des arbres de moins de 5 cm et de plus 15 cm de diamètre, et à la sous-estimer pour les arbres de diamètre intermédiaire.
- La relation entre hauteur, diamètre et volume du tronc a été ajustée à partir de données de l'IFN (Inventaire Forestier National) sur noyer noir. La relation ajustée est présentée en figure A.3.
- La relation entre diamètre du tronc à la base du houppier et aire projetée au sol du houppier a été ajustée à partir de données de Restinclières (2007 : 4 arbres, 2008 : 4 arbres, 2009 : 2 arbres), Castries (2004 : 30 arbres, 2008 : 2 arbres) et Notre Dames de Londres (2004 : 9 arbres, 2007 : 4 arbres, 2008 : 4 arbres). La hauteur de base du houppier a été mesurée comme étant la hauteur d'insertion de la première branche. L'aire projetée au sol du houppier a été estimée comme présenté en Annexe B. La relation obtenue est présentée en figure A.4.

- La relation entre surface foliaire et volume du houppier a été ajustée à partir de données de Restinclières (2007 : 4 arbres, 2008 : 4 arbres, 2009 : 2 arbres), Castries (2008, 2 arbres) et Notre Dame de Londres (2007 : 4 arbres, 2008 : 4 arbres). Les méthodes de mesure du volume du houppier et de la surface foliaire sont identiques à celles présentée en annexe B. La relation obtenue est présentée en figure A.5.

A.1.3 Paramètres obtenus par calibration

Le principe adopté pour la calibration du module arbre est explicité dans la section 3.2.1. Les valeurs de paramètres pour les 5 simulations retenues, exprimées en fonction de leur position dans l'intervalle entre borne inférieure et borne supérieure, sont présentées dans le tableau suivant (les valeurs indiquées représentent la position dans l'intervalle entre borne inférieure et borne supérieure) :

paramètre	bornes		Valeur pour la simulation				
	inférieure	supérieure	n°168	n°398	n°474	n°488	n°747
$\alpha_{CR/FR}$	1e-7	2e-7	0.511	0.993	0.254	0.308	0.374
LUE_{max}	0.6	0.7	0.164	0.101	0.012	0.020	0.048
Φ_W	0.5	2	0.747	0.118	0.520	0.910	0.677
ΔR_{max}	2e-3	4e-3	0.321	0.832	0.291	0.561	0.906
k_d	0.1	0.3	0.353	0.270	0.805	0.057	0.001
$t_{1/2}$	80	300	0.067	0.000	0.001	0.167	0.027
α	600	1200	0.278	0.061	0.310	0.148	0.093
φ	0.1	0.3	0.484	0.718	0.797	0.172	0.397
ρ	0.5	1.5	0.184	0.826	0.914	0.007	0.945

Pour les expérimentations virtuelles, les jeux de paramètres 168 et 368, les plus contrastés des 5 retenus, ont été utilisés comme facteur de contrôle.

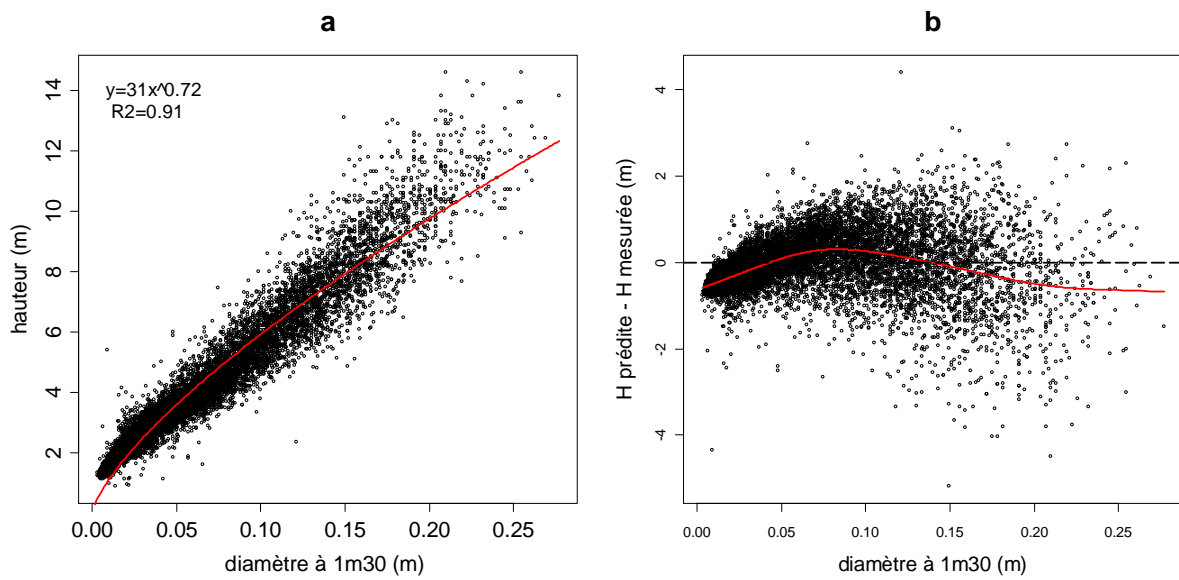


Figure A.2: Relation entre hauteur (m) et DBH (m). a) Ajustement de la relation par régression non linéaire. b) résidus en fonction du DBH

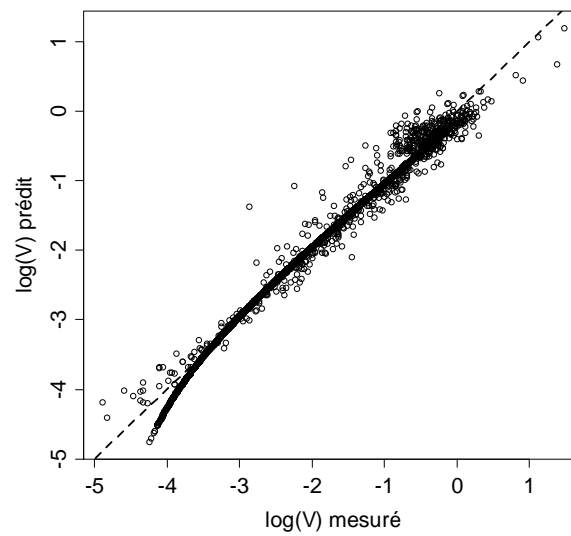
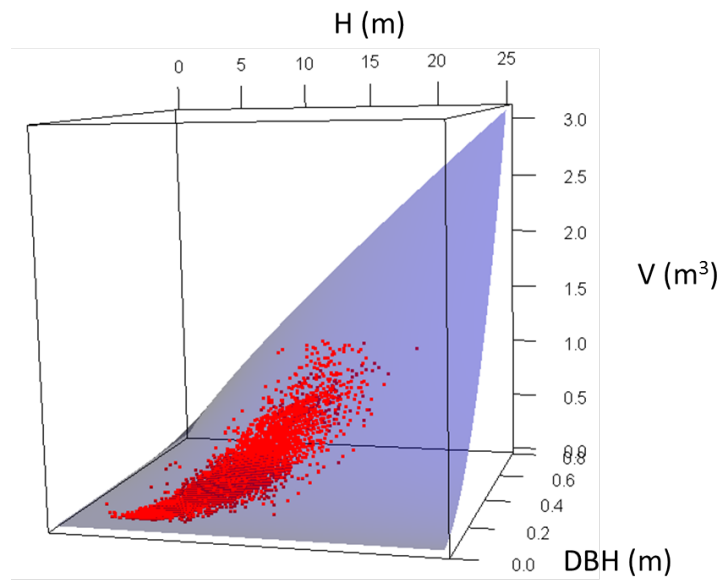


Figure A.3: Relation entre DBH, hauteur et volume du tronc, et relation entre volume du tronc mesuré et volume du tronc prédit selon la relation $\log(V) = -1.29 + 1.75 \log(\text{DBH}) + 0.86 \log(H)$. $R^2 = 0.98$

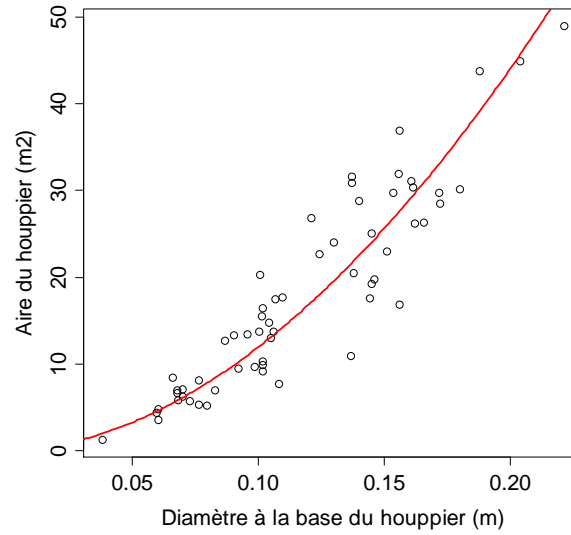


Figure A.4: Relation entre diamètre du tronc à la base du houppier et aire du houppier : $A = 916.DCB^{1.89}$, $R^2 = 0.87$

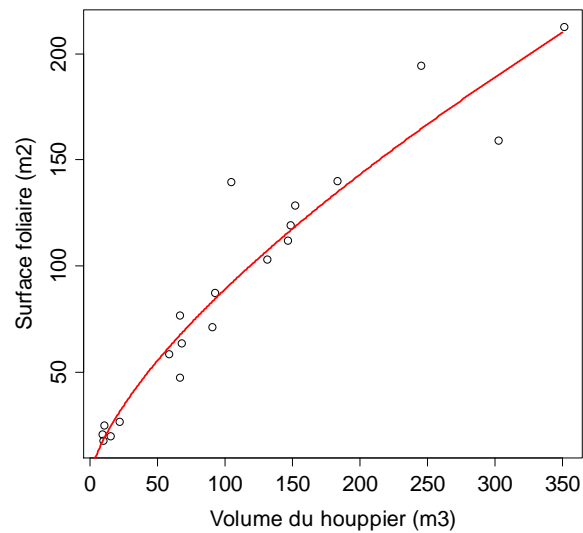


Figure A.5: Relation entre volume du houppier (m³) et surface foliaire (m²) : $SF = 3.8.V^{0.68}$, $R^2 = 0.92$

A.2 Paramètres du blé dur (fichiers .plt et .csp)

Un premier paramétrage de STICS pour la variété Claudio (semée à Restinclières) a été réalisé par Balde (2007) à partir du paramétrage par défaut de Ardente, variété proche de Claudio et déjà paramétrée. Quelques modifications supplémentaires ont été apportées par la suite. Le tableau suivant répertorie les valeurs de paramètres utilisées, ainsi que leur justification. Pour la signification des paramètres, se référer à la notice entrées-sorties de STICS¹.

paramètre	valeurs par défaut (Ardente)	Modifications par Balde (2007) pour Claudio	Modification supplémentaire
codemonocot	1	-	-
tdmin	0	-	-
tdmax	28	-	-
codetemp	2	-	-
codegdh	1	-	-
coeflevamf	1	-	-
coefamflax	1	-	-
coeflaxsen	1	-	-
coefsenlan	1	-	-
coeflevdrp	1	-	-
coefdrpmat	1	-	-
coefflodrp	1	-	-
codephot	1	-	-
phobase	6.3	-	-
phosat	20	-	-
coderetflo	1	-	-
stressdev	0.2	-	-
codebfroid	2	-	-
jvcmini	7	-	-
julvernal	274	-	-
tfroid	6.5	-	-
ampfroid	10	-	-
codeperenne	1	-	-
codegermin	1	-	-
tgmin	0	-	-
stpltger	80	-	-
codehypo	1	-	-

1. disponible sur le site de STICS : http://www.avignon.inra.fr/agroclim_stics/content/download/3046/31656/version/2/file/entreesorties.pdf

Annexe A Entrées du modèle pour la simulation noyer hybride - blé dur à Restinclières

paramètre	valeurs par défaut (Ardente)	Modifications par Balde (2007) pour Claudio	Modifiacion supplémentaire
belong	0.006	-	-
celong	2	-	-
elmax	4.43	-	-
nlevlim1	10	-	-
nlevlim2	50	-	-
plastrochrone	120	-	-
bdens	7	-	-
laicomp	0.304	-	-
hautbase	0	-	-
hautmax	1	-	-
codelaitr	1	-	-
vlaimax	2.2	-	-
pentlaimax	5	-	-
udlaimax	3	-	-
ratiodurviel	0.8	-	-
tcmin	0	-	-
tcmax	40	-	-
ratiosen	0.8	-	-
abscission	0	-	-
innturgmin	0.3	-	-
codlainer	2	-	-
dlaimaxbrut	3.20E-04	-	-
durviesupmax	0.4	-	-
innsen	0.35	-	-
rapenturg	0.5	-	-
codetransrad	1	-	-
extin	0.5	-	-
codtefcroi	1	-	-
teopt	10	-	-
teoptbis	20	-	-
efcroijuv	2.5	-	-
efcroiveg	4.25	-	-
efcroirepro	4.25	-	-
remobres	0.2	-	-
coefmshaut	0	-	-
slamax	300	-	-
slamin	180	-	-
tigefeuil	0.5	-	-

A.2 Paramètres du blé dur (fichiers .plt et .csp)

paramètre	valeurs par défaut (Ardente)	Modifications par Balde (2007) pour Claudio	Modifiacion supplémentaire
envfruit	0.3	-	-
sea	100	-	40 ²
codeindetermin	1	-	-
nbjgrains	30	-	-
cgrain	0.03	0.035 ³	-
cgrainv0	0	-	-
nbgrmin	6000	-	0 ⁴
codeir	1	-	-
vitircarb	0.0121	-	-
irmax	0.55	-	-
codetrem	1	-	-
tminrem	0	-	-
tmaxrem	38	-	-
vitpropsucre	0.0008	-	-
vitprophuile	0	-	-
vitirazo	0.0206	-	-
sensanox	1	-	-
stoprac	sen	-	-
sensrsec	0.47	-	-
contrdamax	0.3	-	-
codetemprac	2	-	-
coderacine	2	-	-
draclong	110	-	-
debsenrac	1000	-	-
lvfront	0.012	-	-
longsperac	18182	-	-
tletale	-16	-	-
tdebgel	-4	-	-
codgellv	2	-	-
nbfgellv	2	-	-
tgellv10	-4	-	-

2. La valeur par défaut (100) conduit à des valeurs de EAI (Ear Area Index) allant jusqu'à plus de 3 m²·-2. La nouvelle valeur permet d'avoir des valeurs plus proches de celles trouvées dans la littérature (voir Sánchez (2008) par exemple)

3. Balde (2007) a constaté que le paramétrage par défaut conduisait à une sous-estimation du nombre de grains. Pour pallier à ce problème, il a augmenté les valeurs des paramètres cgrain et nbgrainmax

4. Dans une situation avec très faible accumulation de biomasse pendant le phase de latence, le fait de borner le nombre de grains par le bas augmentait artificiellement le rendement, ce qui nuisait à la comparaison entre rendements agricole et agroforestier.

Annexe A Entrées du modèle pour la simulation noyer hybride - blé dur à Restinclières

paramètre	valeurs par défaut (Ardente)	Modifications par Balde (2007) pour Claudio	Modifiacion supplémentaire
tgelle90	-16	-	-
codgeljuv	2	-	-
tgeljuv10	-10	-	-
tgeljuv90	-16	-	-
codgelveg	2	-	-
tgelveg10	-4.5	-	-
tgelveg90	-10	-	-
codgelflo	2	-	-
tgelflo10	-4.5	-	-
tgelflo90	-6.5	-	-
psisto	20	-	-
psiturg	4	-	-
h2ofeuilverte	0.9	-	-
h2ofeuiljaune	0.15	-	-
h2otigestruc	0.6	-	-
h2oreserve	0.7	-	-
h2ofrvert	0.4	-	-
stdrpd	551	-	-
deshydbase	0.015	-	-
tempdeshyd	0.01	-	-
codebeso	1	-	-
kmax	1.2	-	-
codeintercept	2	-	-
adil	5.35	-	-
bdil	0.442	-	-
adilmax	8.47	-	-
bdilmax	0.44	-	-
masecNmax	1.54	-	-
INNmin	0.3	-	-
inngrain1	0.32	-	-
inngrain2	0.78	-	-
codelegume	1	-	-
codazofruit	1	-	-
stlevamf	210	-	280 ⁵
stamflax	260	-	320 ⁵

5. L'augmentation de stlevdrp sans modifier stlevamf et stamflax a pour conséquence une durée plus longue entre la date de LAI maximal et la date de floraison, qui peut avoir un effet dramatique sur le rendement simulé via une réduction du nombre de grains. Afin d'éviter ce phénomène irréaliste, nous avons décidé de réduire un petit peu stlevdrp,

paramètre	valeurs par défaut (Ardente)	Modifications par Balde (2007) pour Claudio	Modifiacion supplémentaire
stlevdrp	657	807 ⁶	750 ⁵
pgrainmaxi	0.052	-	-
adens	-0.5	-	-
croirac	0.2	-	-
stflodrp	10	-	-
durvieF	200	-	-
jvc	0	-	-
sensiphot	0	-	-
stlaxsen	575	-	-
stsenlan	412	-	-
nbgrmax	15000	20000 ⁷	-
stdrpmat	750	-	-

Paramètres du blé dur pour l'algorithme d'extraction d'eau (fichier .csp)

Paramètre	Unité	Signification	Valeur	Source
h_{max}	cm	Potentiel hydrique maximal pour la fonction de Campbell	-15000	Delacour (2006)
h_{min}	cm	Potentiel hydrique minimal pour la fonction de réduction de Campbell	-30000	Delacour (2006)
α	-	paramètre de courbure pour la fonction de réduction de Campbell	0.1	Delacour (2006)
h_{buf}	-	“buffer potential” : différence de potentiel requise pour l'entrée d'eau dans les racines (en proportion de h_{sol})	0.05	Delacour (2006)
r	cm	rayon des racines absorbantes	0.12	Delacour (2006)
k_r	cm.jour ⁻¹	conductivité hydraulique axiale des racines fines	1e-5	Delacour (2006)

et d'augmenter stlevamf et stamflax. Ainsi, le décalage phénologique entre Claudio et Ardente est réparti entre les différents stades.

6. Claudio étant plus tardive que Ardente, Balde (2007) a reculé de 150 degrés jours le déclenchement de la floraison.

7. voir la note relative au paramètre cgrain 3

A.3 Définition d'une nouvelle espèce pour simuler la végétation spontanée du témoin forestier

Pour des raisons informatiques, nous n'avons pas réussi à utiliser l'espèce "prairie" de STICS, qui est une espèce perenne. Nous avons donc choisi de définir une nouvelle espèce, que nous avons construite à partir des fichiers de paramètres du blé dur, en modifiant les paramètres suivants :

paramètre	Valeur blé dur	Valeur végétation spontanée
codebfroid	2	1
stpltger	80	40
belong	0.006	0.01
elmax	4.43	8.43
nlevlim1	10	200
nlevlim2	50	400
dlaimaxbrut	3.20E-04	1.5E-4
efcroijuv	2.5	2
efcroiveg	4.25	3.25
efcroirepro	4.25	3.25
sea	40	0
stoprac	sen	lax
sensrsec	0.47	0.01
kmax	1.2	1.4
adil	5.35	1.2
adilmax	8.47	3
masecNmax	1.54	0.5
stlevamf	280	400
stamflax	320	500
stlevdrp	750	1100
pgrainmaxi	0.052	0.01
adens	-0.5	-0.6
croirac	0.2	0.04
durvieF	200	300
jvc	0	10
sensiphot	0	0.5
nbgrmax	20000	5000
stdrpmat	750	450

L'itinéraire technique utilisé avec cette espèce est le suivant :

- pas de travail du sol.
- semis le jour 250 (début septembre). Densité de semis 600 grains.m⁻²
- pas de récolte

A.4 Description et initialisation de la scène (fichier .pld)

Informations générales et paramètres de sol :

Paramètre	unité	valeur	remarque
<i>Informations générales sur la parcelle</i>			
latitude	-	43°43' N	
<i>Design de la plantation</i>			
espacement sur la ligne	m	9	
espacement entre les lignes	m	13	
orientation des lignes	-	Nord-Sud	
<i>paramètres de sol pour STICS (voir la notice entrées-sorties de STICS⁸)</i>			
profhum	m	0.35	égale à la profondeur de travail du sol
Norg	-	0.12	
albedo	-	0.2	
obstarac	m	1.2	ce paramètre détermine la profondeur maximale d'enracinement de la culture
q0	mm	12	
conseuil	KgN.ha ⁻¹ .mm ⁻¹	0	
pH		8.3	
activation macroporosité	-	non	
activation remontées	-	non	
capillaires			
activation pierres	-	non	
activation nitrification	-	non	

Rq : les valeurs de teneur en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement, ainsi que la densité apparente du sol sont calculées à partir des données de texture du sol et des fonctions de pédotransfert.

8. disponible sur le site de STICS : http://www.avignon.inra.fr/agroclim_stics/content/download/3046/31656/version/2/file/entreesorties.pdf

Paramètre	unité	valeur	remarque
<i>Comportement de l'azote dans le sol (pour l'algorithme d'extraction d'azote)</i>			
a_{NO3}	-	0.3	
a_{NH4}	-	3.55	
p_{NO3}	-	1	hypothèse simplificatrice : $NH4 \ll NO3$
$K_{N,eau}$	$cm^2 jour^{-1}$	1	
d_0	-	-0.011	
d_1	-	0.15	

Paramètres de texture du sol par horizon :

Variable	Couche	profondeur	limons	argiles	sable	matière organique	taille moyenne des grains de sable
unité	-	cm	%	%	%	%	μm
	1	0-40	60	20	20	2.4	290
	2	40-80	58	25	17	1.5	290
	3	80-140	62	26	12	1.9	290
	4	140-240	57	25	18	1.7	290
	5	240-400	61	32	7	3.2	290

Les paramètres de texture ont été obtenus par mesures de granulométrie sur la parcelle A3 de Restinclières. Ils sont utilisés dans le modèle pour calculer, avec les équation de pédo-transfert (Wösten et al., 1999) :

- Les teneurs en eau volumique à la capacité au champ ($pF=2.5$) et au point de flétrissement ($pF=4.2$) fournies à STICS.
- La densité apparente fournie à STICS.
- Les relations entre potentiel hydrique, teneur en eau volumique, et conductivité hydraulique du sol, utilisées par l'algorithme d'extraction d'eau (voir section 1.2.4.2).

Initialisation du sol par horizon

Variable	Couche	profondeur	teneur en eau	teneur en NO3	teneur en NH4
unité	-	cm	$m^3 m^{-3}$	$KgN.ha^{-1}$	$KgN.ha^{-1}$
	1	0-40	0.2	11	0
	2	40-80	0.15	8	0
	3	80-140	0.15	5	0
	4	140-240	0.15	2	0
	5	240-400	0.15	0	0

La teneur en eau initiale est initialisée à des valeurs faibles (proche du point de flétrissement), car la simulation débute fin Août.

Initialisation des arbres

variable	unité	description	valeur
H	m	hauteur	1
Hel	m	hauteur élaguée	0.5
r_h	m	rayons horizontaux du houppier	0.25
R^*	-	valeur cible pour le ratio feuilles/(feuilles+racines fines)	0.5
$z0$	m	profondeur d'enracinement	0.6
$r0$	m	expansion latérale du système racinaire	1 (1 seul voxel colonisé)

A.5 Itinéraire technique

- La largeur des lignes d'arbre (zone non cultivée) est fixée à 1 m (fichier .sim). Les flux d'eau et d'azote sur la ligne d'arbre sont modélisés en utilisant l'espèce "sol nu" de STICS (valeurs par défaut).
- Le régime d'élagage des arbres n'est pas donné dans un fichier de paramètre, mais dans le code du Script qui exécute Hi-sAFé (fichier ScriptGen.java). Le régime d'élagage adopté est le suivant :
 - le premier élagage a lieu en 2002 (les arbres ont 7 ans). Ensuite, on fait un élagage tous les 4 ans jusqu'à arriver à la hauteur cible, fixée à 4 m.
 - à chaque élagage, la hauteur de base du houppier est fixée à 30 % de la hauteur totale de l'arbre.
- L'itinéraire technique du blé dur (fichier .tec) est le suivant :

Paramètre	unité	valeur
<i>Travail du sol</i>		
Date	jour julien	299
Profondeur	cm	30
<i>Semis</i>		
Date	jour julien	308
profondeur	cm	2
densité	grains.m ⁻²	300
<i>Fertilisations</i>		
type d'engrais		ammonitrates
profondeur	cm	0
nombre d'apports	-	3
Dates des apports	jour julien	400/420/450

Paramètre	unité	valeur
Quantités apportées	KgN.ha ⁻¹	30/80/50
<i>Récolte</i>		
Date de récolte	-	Maturité physiologique
Résidus à la récolte	-	Chaumes et racines uniquement

A.6 Modèle de dynamique de hauteur de nappe (fichier climat)

Le modèle présenté ici ne prétend pas décrire de façon réaliste les mécanismes responsables des variations de hauteur de nappe à Restinclières. Il a été construit de manière totalement empirique, en cherchant à reproduire les relations observées entre les données climatiques de Restinclières et les relevés piézométriques effectués sur les parcelles expérimentales :

1. **Observations.** Le niveau de la nappe a tendance à diminuer en absence d'épisodes pluvieux conséquents. Il diminue rapidement lorsqu'il est élevé, juste après une remontée de nappe, et de plus en plus tendement au fur et à mesure qu'il diminue. **Modélisation.** On considère que le niveau de nappe a une tendance intrinsèque à décroître exponentiellement jusqu'à une valeur minimale, correspondant à la profondeur maximale de la nappe. La profondeur de nappe d'un jour donné est donnée par : $z_t = z_{t-1} - a(z_{max} + z_{t-1})^b$, où z_t est la profondeur de nappe (en cm) le jour t , z_{max} est un paramètre de profondeur maximale de la nappe (=540 cm), et a et b sont des paramètres de forme ($a = 1.4e - 5$, $b = 2.25$).
2. **Observations.** Les remontées de nappe conséquentes font toutes suite à des épisodes pluvieux importants. Les épisodes pluvieux ne sont pas tous suivis de remontées de nappe. La relation entre pluies et remontées de nappe semble dépendre du climat des jours et des mois précédents (historique des pluies et de l'ETP). **Modélisation.** Pour reproduire ces observations, il a été nécessaire d'introduire une notion de mémoire du système. Cette mémoire est modélisée par une variable M_t , dont l'évolution est gouvernée par les deux lois : $M_t = M_{t-1} + \text{pluie}_t - \text{ETP}_t$, et $M_t \in [0, D]$ où D est un paramètre (=300 mm). M_t est analogue à un réservoir d'une capacité égale à D , rempli par les pluies et vidé par l'ETP. Les remontées de nappe sont déclenchées par la condition suivante : $\text{pluie}_{t-1} + M_{t-2} > l$, où l est un paramètre (=120 mm).
3. **Observation.** L'amplitude des remontées de nappe, lorsqu'il y en a, est dépendante de la quantité de pluie. **Modélisation.** Si $\text{pluie}_{t-1} + M_{t-2} > l$, c'est à dire si la pluie du jour $t - 1$ est suffisante étant donnée la valeur de M au jour $t - 2$

pour déclencher une remontée de nappe, alors la profondeur de nappe du jour t est calculée comme $z_t = z_{t-1} - a(z_{max} + z_{t-1})^b + m\text{pluie}_{t-1}^n$ avec $m = 6$ et $n = 0.6$.

Les paramètres de ce modèle (D , z_{max} , a , b , l , m et n) ont été ajustés pour reproduire au mieux la dynamique de hauteur de nappe observée sur la période 2002-2009 dans la parcelle A3 de Restinclières.

Annexe B

Simple models for light competition within agroforestry discontinuous tree stands : are leaf clumpiness and light interception by woody parts relevant factors ?

Grégoire Talbot et Christian Dupraz.

Article à paraître dans *Agroforestry Systems* doi : 10.1007/s10457-011-9418-z

Abstract

Predicting the temporal and spatial variability of radiation intensity under wide-spaced tree stands is required for many applied issues in savannah-like ecosystems, orchards, agroforestry and urban forestry systems. Numerous authors have advocated the use of simple light interception models that approximate the crown shape with ellipsoids. They have suggested taking into account leaf clumping to improve the efficiency of these simple models, but this was never assessed. We tested this hypothesis together with the impact of including predictions of light interception by woody parts (trunks, branches). We calibrated and evaluated the model using cross-validation across eight walnut trees with field measurements of radiation intensity and spatial heterogeneity using hemispherical photographs. Leafless trees were efficiently modelled using Wood Area Density (WAD, m^2m^{-3}) for branches and an opaque cone for the trunk. We introduced a clumping parameter (μ) but this proved inefficient, clumping being highly variable amongst trees. This results from the limitations of representing the crown as an ellipsoid, a procedure too coarse to be improved by using a clumping parameter. The model proved efficient to predict the light pattern around an average tree, but was not

fit for simulating the variability of individual trees. We finally discuss practical recommendations for modelling light competition in integrated agroforestry models simply.

B.1 Introduction

Wide-spaced tree stands are characteristics of many ecosystems (savannah type, opened forests) and agro-ecosystems (agroforestry, low density orchards, urban forestry). Predicting the temporal and spatial variations of radiation intensity under the tree stratum is often required when working on issues that involve a living community underneath the trees, such as understorey in forests, crops in agroforestry or grass in urban parks. Agroforestry systems are expected to spread over millions of hectares during the 21st century in both temperate and tropical countries (Nair, 2007; Reisner et al., 2007). Such systems are characterized by a high spatial and temporal heterogeneity, both above and below the ground (Mulia & Dupraz, 2006). The productivity of both trees and the understorey is highly dependent on resource availability and competition processes. Growth patterns are co-limited by several resources simultaneously (Kho et al., 2001). In this paper, we will focus on tree-crop mixtures, as the productivity of the crop stratum in agroforestry is central to the value of the system, and should be carefully predicted. However, the models presented here may be used for any other kind of wide-spaced trees systems.

Competition for resources in tree-crop systems evolves dynamically over time. Light competition is asymmetrical, as trees spread above crops, whereas competition for below-ground resources is more symmetrical, with intermixed root systems. The phenologies of tree and crop species are often asynchronous, resulting in various patterns of competition from day to day, season to season and year to year. Modelling these competition processes requires a daily time step to account for such dynamics. A model that could predict the productivity of tree-crop systems should be able to predict both the competition for resources and the effect of competition on tree and crop growth at the daily time step. The amount of photosynthetically active radiation (PAR) intercepted is crucial for predicting the productivity of tree and crop species. Predicting light interception by trees and spatial patterns of ground irradiance is therefore required in the dynamic modelling of such systems.

Numerous models have been proposed to simulate light interception by plant canopies (see Brunner, 1998 for a review). They are usually classified according to the level of complexity of the canopy architecture. It ranges from simple, horizontally homogeneous canopies, to complex detailed descriptions at organ scale. Most of them are based on the turbid medium analogy, applying the Beer's law to predict the interception probability of a beam that crosses the canopy. The hypotheses of Beer's law in its initial formulation have been extensively discussed: (1) leaf size is to be infinitely small, and (2) leaf area density (LAD, $\text{m}^2.\text{m}^{-3}$) uniformly and randomly distributed within the canopy volume (Sinoquet et al., 2005). Small leaf size assumption has been shown to have a negligible effect on the predictions of models for large enough plants (Thanisawanyangkura et al.,

1997). But the uniform and random hypothesis for leaf area distribution may lead to an underestimation of mutual shading between leaves and consequently to overestimations of the intercepted light (Cohen et al., 1995; Begué et al., 1996; de Castro & Fetcher, 1999).

Tree canopies are clumped at several scales: leaves are clumped within shoots, shoots within branches and branches within trees. Two main strategies have been proposed to account for leaf clumping. A first strategy consists of keeping a canopy description that ignores the gaps between trees, but modifies the attenuation law by introducing correcting parameters (Nilson, 1971; Cohen et al., 1995). This strategy eliminates the bias of Beer's law, but is inadequate to predict the heterogeneity of PAR transmittance below trees, because canopy geometry is not described explicitly. It has been extensively used in dense forest stands for indirect estimates of the Leaf Area Index (LAI) by gap fraction inversion methods (e.g. Chen, 1996). A second strategy consists of using a finer canopy geometry description. The canopy may be divided either in subvolumes corresponding to individual trees, such as ellipsoids (Norman & Welles, 1983; Bartelink, 1998; Martens et al., 2000), paraboloids (Courbaud et al., 2003), more complex shapes (e.g. Cescatti, 1997a), eventually divided again in subvolumes (Mariscal et al., 2000) or voxels (Knyazikhin et al., 1996; de Castro & Fetcher, 1998; Sinoquet et al., 2005). Leaf area distribution within subvolumes may be considered uniform or described by statistical functions (Wang & Jarvis, 1990; Cescatti, 1997a). Finally, some light models use an explicit stand description at scale of shoot or leaf (Dauzat et al., 2001; Mialet-Serra et al., 2001; Casella & Sinoquet, 2007; Lamanda et al., 2008). The finer the level of canopy description is, the better the predictions of the models (Sinoquet et al., 2005). But both computation time and the number of input parameters increase dramatically (Mialet-Serra et al., 2001; Roupsard et al., 2008). This is not compatible with dynamic models designed for simulations over long periods of time and applied to a large number of species.

Separation between tree crowns usually is the main source of clumping (Bartelink, 1998; Nilson, 1999), and most light models for forest, orchard or agroforestry stands use a stand geometry description at the scale of individual trees. Each tree crown is represented by a volume assimilated to a turbid medium. This description level provides accurate predictions of transmitted light repartition at a daily time step (Norman & Welles, 1983; Bartelink, 1998; Mariscal et al., 2000, 2004). The transmittance of tree crowns in such models may be simulated either by a porosity coefficient (Oyarzun et al., 2007) or by using Beer's law (e.g. Norman & Welles, 1983; Courbaud et al., 2003; Zhao et al., 2003): $I = I_0 \exp(-kL)$ where I_0 and I are light intensity before and after crown crossing, L the path length within tree crown, and k the extinction coefficient. k may be estimated from experimental data (Zhao et al., 2003) or approximated as a function of leaf area density, leaf angle distribution and the optical properties of leaves. Sensitivity analyses have shown that the predictions of such models are sensitive to k (Stadt & Lieffers, 2000; Zhao et al., 2003) or to the porosity parameter (Oyarzun et al., 2007).

A canopy description at the scale of individual trees explicitly accounts for leaf clump-

ing in discrete tree crowns. It generally assumes a random dispersion of leaves within the crown. However, simple geometrical shapes are very rough approximations of real tree shapes, and leaves are clustered within shoots (Cohen et al., 1995; Falster & Westoby, 2003). In some cases the effective leaf area density or the extinction coefficient of tree crowns may be estimated using optical methods (Zhao et al., 2003; Annandale et al., 2004), implicitly accounting for leaf clumping. In other cases, leaf area is estimated by destructive (Mariscal et al., 2000; Stadt & Lieffers, 2000) or allometric methods (Cescatti, 1997b; Brunner, 1998), and the random hypothesis may lead to discrepancy between model predictions and experimental data (Mariscal et al., 2000).

The light interception by branches and trunks is usually ignored by forest or orchard tree growth models (but see Brunner, 1998). It has no direct impact on tree growth: shading on tree leaves caused by ligneous parts of the tree is assumed to be negligible. But when the model is expected to predict light availability for the understory, light interception by the opaque ligneous parts of trees may become significant. This is particularly crucial in temperate agroforestry comports deciduous tree species. In these systems, many crops grow at times of the year when the tree is leafless (Dupraz & Newman, 1997).

We have designed a model for light availability that will later be embedded in a dynamic biophysical model of agroforestry stands that should manage trees and crops growth at the daily time step, and integrate competition for light, water and nitrogen. This light model should meet the two following expectations: (i) a description of the shape and size of the crowns that is easy to parameterize, and (ii) fast computation speed to allow for simulating multiple trees concurrently for the whole life of the trees (century time scale). This model was inspired by the Mountain model (Courbaud et al., 2003), a ray-tracing model that uses ellipsoids or paraboloids for a simple crown description. We intend to evaluate the potential for an increased model accuracy through the introduction of simple formalisms, with a negligible impact on computation time. We explored four strategies: (1) the explicit computation of light interception by tree stems, (2) introducing wood area density (WAD, m^2m^{-3}) to account for light interception due to branches, (3) introducing an explicit leaf angle distribution in place of the spherical assumption; and (4) introducing a clumping coefficient (μ) at the scale of an individual tree crown. We propose a gap-fraction inversion method to estimate parameters μ and WAD. This method was applied to eight hybrid walnuts from two temperate agroforestry systems located in the South of France. We will discuss the relevance of the formalisms introduced by comparing the model's predictions for the shaded-fraction of sky (complementary to the gap-fraction) to estimates obtained with hemispherical photographs. The sensitivity of the model to μ and WAD is analyzed.

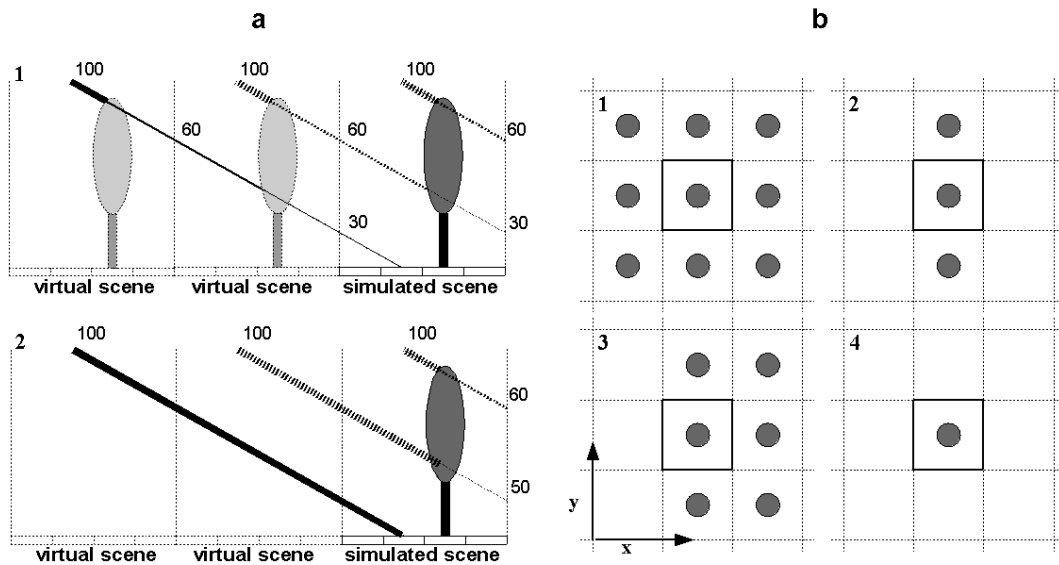


Figure B.1: Principle of the algorithm for optional toric symmetry. a) in all cases, the simulated plot is replicated to avoid below-ground edge effects (toric symmetry), but the replicates may be either identical to the simulated plot (1) or void (2). b) depending on the options for toric symmetry, the model can simulate an infinite stand (1, all replicates filled), a hedgerow (2, y-replicates filled), the edge of a tree stand (3, y and x-positive replicates filled) or a single tree (4, all replicates void)

B.2 Materials and methods

B.2.1 Light competition model

B.2.1.1 Simplified stand description

The model computes daily light repartition within a rectangular plot divided in square cells. The plot may have a slope of any steepness or aspect. Each cell may host a crop, a tree, or both. Crops are assumed to be homogeneous across a cell. They are modelled using the crop model STICS (Brisson et al., 1998). The tree canopy is described at the scale of an individual tree: each crown is represented by an ellipsoid filled with foliage and considered a turbid medium.

Light models often use a torus approach to avoid artificial edge effects (Courbaud et al., 2003). The modelled plot is virtually replicated towards infinity in all directions. This allows the simulation of an infinite tree stand. For this study, we needed to simulate an isolated tree. We designed an optional toric symmetry algorithm that permits “switching off” toric symmetry, either for the positive and/or negative side of both x- and/or y-axis. Replicates may either contain trees or not (fig. B.1a). This allows the simulation of a single tree, a hedgerow, a tree stand or the edge of a tree stand (fig. B.1b).

B.2.1.2 Incident radiation

Daily incident radiation is simulated by a finite number of beams coming from evenly distributed directions of the sky hemisphere. Each direction Ω is defined by an elevation θ and an azimuth α , and accounts for a sector of the sky vault. Daily incident radiation is shared between these sectors. Incident PAR is divided between direct and diffuse radiation using standard relationships (Bonhomme, 1993). The light module predicts the % of incoming energy intercepted or transmitted and absolute values can be computed on a daily basis by applying these proportions to the absolute values of incoming energy. Diffuse radiation is shared between sections of the sky either uniformly (UOC Uniform OverCast sky radiance distribution) or according to the Standard OverCast sky (SOC, Moon & Spencer, 1942). The position of the sun is computed at regular time steps using classical astronomic laws (Bonhomme, 1993). For each position of the sun, direct radiation is allocated between the different sectors proportionally to the intersection area with a sector of equal solid angle centered on the sun position.

B.2.1.3 Ray-tracing method

A beam of light is calculated for each sky sector and each cell. The length of the beam's path (L) is calculated through each tree crown (see Norman & Welles, 1983; Bartelink, 1998; Martens et al., 2000 for details) after an optimization procedure that selects trees potentially intercepting the beam (Courbaud et al., 2003). In cases where the dimensions of a cell are large in comparison with the size of the tree, the spatial resolution of the model is increased by computing several beams per cell. Relative beam energy is decremented when it passes through crowns according to the law of attenuation. Results can then be integrated to the sky vault, to compute the daily light interception of each tree. Trunks were represented as opaque cones with a diameter DBH (Diameter at Breast Height) at 1.3 m height and a diameter of 0 at tree height.

There are two options available for modelling light interception by crops: (i) PAR transmittance below tree canopy is sky integrated and light interception by crops computed with a simple Beer's law as in conventional crop models (see Brisson et al., 1998), or (ii) competition for light between neighbour crops is accounted for by extending the ray-tracing method to crops represented by parallelepipeds. This is useful when neighbour crops have different heights.

B.2.1.4 A law for radiation interception by tree crowns

The transmittance of tree crowns is traditionally computed according to the turbid-medium analogy. We have introduced two corrections to account for leaf clumping and interception by branches. With a given ray and a given tree, gap fraction is calculated as:

$$\exp(-(G(\Omega)\mu\text{LAD} + \text{WAD})L) \tag{B.2.1}$$

$G(\Omega)$ is the projection factor of leaf area in direction Ω (unitless), μ the clumping coefficient (unitless), LAD and WAD the leaf and wood area density (m^2m^{-3}), and L the length of the ray's path across the tree crown (m). We tested two options with the $G(\Omega)$ function: a spherical leaf angle distribution as assumed in most light models, so that $G(\Omega) = 0.5$ in all directions, and an explicit leaf angle distribution computed from measurements by Parveaud et al. (2008). A clumping coefficient below 1, equal to 1 or above 1 indicates a clumped, random or regular distribution of leaves inside the canopy volume respectively.

According to Goudriaan's approximation (Goudriaan, 1977) accounting for light scattering by leaves, the proportion of transmitted PAR is enunciated thus:

$$\frac{I}{I_0} = \exp\left(-(G(\Omega)\mu\sqrt{\sigma}\text{LAD} + \text{WAD})L\right) \quad (\text{B.2.2})$$

with σ the leaf absorptance in PAR wavelength (unitless). Because the reflectance of branches and leaves is low for PAR radiation, intercepted light is considered to be complementary to transmitted light. The intercepted light is then shared between branches (with no impact on tree growth) and leaves (used for photosynthesis): we assumed that the shade of branches on tree leaves is negligible, the amount of PAR intercepted by leaves is thus given by eq.B.2.2 with $\text{WAD} = 0$. The clumping coefficient μ accounts for clumping within tree crown, i.e. leaf clumping within shoots and shoot clumping within tree crown. Clumping between separated tree crowns is imposed by the position and size of the trees on the plot, and by the procedure that calculates the size of ellipsoids. Therefore, μ depends on the procedure used to define the ellipsoids that represent tree crowns.

B.2.1.5 Optimizing the triggering of the light model

The light model is a very time consuming module of the integrated tree-crop simulation model. To reduce computation time, the module is not triggered every day, but only when either sun declination or leaf area of trees have changed significantly. In practice, with a 2° threshold for sun declination and a 5% threshold for either tree height, tree leaf area, crop height or crop leaf area, the ray-tracing method is called about 70-80 times a year.

B.2.2 Field estimation of the clumping index and wood area density

B.2.2.1 Tree measurements and ellipsoid calibration

We monitored eight hybrid walnut trees (*Juglans nigra x regia NJ201*), selected from two different sites (tab. B.1). Four trees were located in the experimental agroforestry fields at Restinclières (South of France, $43^\circ42'$ N, $3^\circ51'$ E, 54 m elevation), the four others in an agroforestry plot at Notre-Dame-de-Londres (South of France, $43^\circ49'$ N,

Annexe B Simple models for light competition within agroforestry discontinuous tree stands : are leaf clumpiness and light interception by woody parts relevant factors ?



Figure B.2: Trees were wrapped for leaf litter gathering using a mobile crane for tall trees.

3°46' E, 160 m elevation). We selected walnut trees of various sizes (from 3.6 to 10.5 meter height) and either pruned up to about 30 % of total tree height or unpruned. We selected isolated trees for a simplified interpretation of hemispherical photographs.

For each tree, we measured the total height (z_{max}), the height of the lower leaf (z_{min}), and the (x, y) coordinates of the farthest leaves from the tree trunk in the four cardinal directions $(x_{min}, y_{min}, x_{max}, y_{max})$. We used a simple method to define an ellipsoid from these measures (Villalobos et al., 1995): ellipsoid center coordinates are $i = (i_{max} + i_{min})/2$ and radius are $r_i = (i_{max} - i_{min})/2$, with $i = x, y$ or z .

The leaf area of each tree was measured by harvesting leaves during leaf fall in October 2007. To obtain a complete gathering of tree leaves, we wrapped the trees in nets with a small mesh size before the start of leaf fall (fig. B.2), providing a measure of total leaf dry weight (W). Specific leaf area (SLA, $\text{cm}^2.\text{g}^{-1}$) and the proportion of leaflets to the total leaf dry weight were measured prior to leaf fall in August 2007. For each tree, we sampled leaves from the top, middle and bottom of the crown (only top and bottom for small trees), and from inside and outside the crown. Sixty leaves were collected for each tree and pinched for three 1 cm^2 round limb samples per leaf (from the distal and intermediate leaflets). The samples were oven-dried to measure the SLA of limbs. Total leaf dry-weight and rachis dry-weight were measured and used to compute the proportion (p_l) of leaflets in the leaf dry weight. This allowed us to compute the leaf area (LA) of trees as: $\text{LA} = \text{SLA} \cdot p_l \cdot W$.

B.2.2.2 Using hemispherical photographs to compute the gap fraction at the cell level

We shot 24 (16 for small trees) hemispherical photographs evenly distributed around each tree (fig. B.3) both in late summer (with maximal leaf area) and winter (without leaves). Neighbouring trees were erased from photographs with the Gimp software (www.gimp.org). The photographs were then analyzed with the Gap Light Analyser software (Frazer et al., 1999) to calculate the proportion P^{obs} of sky obscured by the tree. Because of the difficulty for separating the different trees close to the skyline, we didn't consider elevations lower than 16° .

B.2.2.3 Parameter estimation

The parameters estimation was achieved with the R statistical software (www.r-project.org). $N = 13320$ sky sectors were created at regular azimuth and elevation intervals on the sky vault with an angle step of 2° , but excluding elevations under 16° . According to the law for attenuation mentioned above (eq. B.2.1), for each section of sky i , the simulated shaded fraction writes:

$$P_i(\mu, \text{WAD}) = 1 - \exp(-(G(\Omega)\mu\text{LAD} + \text{WAD})L_i) \quad (\text{B.2.3})$$

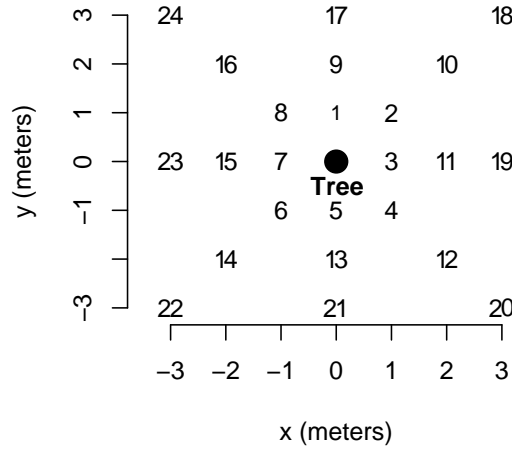


Figure B.3: Hemispherical photographs positions around trees. For all photographs, z-coordinate is 90 cm high. For the small trees N1 and N2, we limited the protocol to photographs 1 to 16.

With L_i the length of the path across the tree ellipsoid of the ray coming from the sky sector i and hitting the photograph position. The simulated shaded fraction of a whole photograph is then:

$$P^{\text{sim}}(\mu, \text{WAD}) = \sum_{i=1}^N w_i P_i(\mu, \text{WAD}) \quad (\text{B.2.4})$$

with w_i the proportion of pixels on photographs situated in sector i .

Parameters were estimated with a non linear least-square regression (algorithm “nl2sol” of the PORT library - see <http://www.netlib.org/port/> - implemented in the nls R method) for minimizing the sum of the deviations:

$$S(\mu, \text{WAD}) = \sum_{\substack{\text{seasons} \\ \text{trees} \\ \text{photographs}}} (P^{\text{sim}}(\mu, \text{WAD}) - P^{\text{obs}})^2 \quad (\text{B.2.5})$$

WAD was first estimated from winter photographs (LAD = 0), then μ was estimated from summer photographs.

B.2.3 Evaluation of the model for predicting the shaded fraction by cross-validation.

The model was evaluated by computing different indices of concordance between simulated and observed (hemispherical photographs) values for the shaded fraction P : relative bias (rB), root mean squared relative error of prediction (RMSrE) and model

efficiency (EF), as given by equations:

$$rB = \frac{\overline{P^{sim} - P^{obs}}}{\overline{P^{obs}}} \quad (\text{B.2.6})$$

$$\text{RMSrE} = \sqrt{\left(\frac{P^{sim} - P^{obs}}{P^{obs}}\right)^2} \quad (\text{B.2.7})$$

$$\text{EF} = 1 - \frac{\sum (P^{sim} - P^{obs})^2}{\sum (\overline{P^{obs}} - P^{obs})^2} \quad (\text{B.2.8})$$

The efficiency provides information about the predictive power of the model relatively to the mean of the observations. When it is computed from several photographs of a same tree, it evaluates the model ability to reproduce the spatial variability of P around this tree. When it is computed from several trees, it evaluates also the model for capturing differences in P for trees of different size, shape and LAD.

To provide unbiased estimators of the indices, we used the cross-validation principles: for each tree, the model is parameterized with data from all the other trees. Summer (leafy canopies) and winter (only branches) model performances were evaluated separately.

In order to test the relevance of introducing new processes (leaf clumping, light interception by branches) we compared the model performances with and without these processes included.

B.2.4 Sensitivity analysis

We explored the model sensitivity to parameters μ and WAD with two virtual walnut trees, a small (5 m high, $r_x = r_y = 1.9$ m, $r_z = 1.8$ m, LAD = $1.5 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$) and a large one (15 m high, $r_x = r_y = 4.5$ m, $r_z = 5.6$ m, LAD = $0.51 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$). For each tree size, a high density plot (123 tree.ha⁻¹, 9 m between trees) and a low density plot (44 tree.ha⁻¹, 15 m between trees) were tested. The torus symmetry algorithm was fully activated for these simulations. We ran one year simulations with a typical phenology cycle for walnut trees: budburst on April 15th, and the end of leaf fall on November 15th. Climatic data from Restinclières, year 1997 were used, with a SOC partition for diffuse radiation. We realized simulations with μ ranging from 20% to 200% of the estimated value with a 20% step, and WAD from 0 (no branches) to 200% of the estimated value with a 20% step.

The incident PAR above the canopy is divided into three parts by the light model: PAR intercepted by tree leaves, PAR intercepted by branches and trunks, and PAR transmitted under the tree canopy. The analyzed outputs were the light capture efficiency of tree leaves, and the mean PAR transmittance below the leafy (8/3 to 23/11)

Annexe B Simple models for light competition within agroforestry discontinuous tree stands : are leaf clumpiness and light interception by woody parts relevant factors ?

Table B.1: Description of the monitored trees: general description: diameter at breast height (DBH); ellipsoid dimensions: coordinates of ellipsoid center relatively to plantation point (x, y, z), ellipsoid radii (r_x, r_y, r_z) and volume (V); results from leaf area measurements: average specific leaf area (SLA), leaflet to leaf dry weight proportion (p_l), total leaf dry weight (W), total leaf area (LA) and leaf area density (LAD).

general description				ellipsoid dimensions		leaves				
tree name	pruning	height	DBH	(x, y, z)	(r_x, r_y, r_z)	SLA	p_l	W	LA	LAD
		m	cm	m	m	$\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	-	Kg	m^2	$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$
R1	no	8.2	18	(0.1, 0.13, 4.1)	(3.8, 3.7, 4.1)	98	0.80	24.5	194	0.79
R2	yes	10.5	18.3	(-0.2, -1, 7)	(3.7, 2.7, 3.5)	115	0.75	13	112	0.76
R3	yes	9.8	18.5	(0.1, 0, 6.4)	(2.9, 2.2, 3.4)	114	0.75	10.2	87	0.94
R4	no	8.4	14.2	(0.0, -0.2, 4.6)	(3, 2.8, 3.8)	125	0.81	10.2	103	0.78
N1	no	3.6	7.3	(0.2, -0.1, 2.4)	(1.4, 1.3, 1.2)	120	0.79	2	20	2.24
N2	no	3.8	7.6	(0.2, -0.2, 2.7)	(1.5, 1.4, 1.1)	120	0.84	1.9	17	1.77
N3	yes	8.3	21.1	(0.6, 0.8, 5.6)	(2.9, 3.1, 2.8)	100	0.74	18.8	140	1.34
N4	yes	7.2	17.7	(-0.1, 0.5, 4.6)	(2.7, 2.4, 2.5)	95	0.75	11.8	77	1.15

R: Restinclières, NDL: Notre Dame de Londres.

or leafless (rest of the year) canopy. The light capture efficiency was computed as $\varepsilon = \text{PAR}_{int}/(\text{PAR}_{inc}\text{LA})$ where PAR_{int} is the PAR radiation intercepted by tree leaves over the year and PAR_{inc} the PAR incident on a unit horizontal surface above the canopy. ε is similar to the $\overline{\text{STAR}}$ (Silhouette to Total Area Ratio integrated over sky vault) frequently used for isolated trees (Sinoquet et al., 2007), but integrates rediffusion (with Goudriaan's approximation) and shading between trees. The light capture efficiency has no unit, but may be expressed in m^2m^{-2} : an efficiency of 1 signifies that 1 m^2 of leaf area intercepts as much PAR as a 1 m^2 plane surface laying on the soil.

We studied the sensitivity of the model for three outputs: light capture efficiency and the summer and winter PAR transmittances. We computed their elasticity to parameters at the point defined by the nominal values for μ and WAD ($\mu = 0.76$ and $\text{WAD} = 0.026$) obtained after parametrization with an explicit interception by trunks and a spherical leaf angle distribution. The elasticity is defined as the ratio of the relative change in the output to the relative change in a parameter.

B.3 Results

B.3.1 Ellipsoid calibration

The routine for adjusting an ellipsoid to the monitored trees proved to be very easy and convenient. The center of the ellipsoids was not aligned with the trunk position for most trees (x or y different from 0), indicating asymmetrical crowns (tab.B.1). Small trees had very high LAD compared to large trees. For the large trees, there was no substantial

Table B.2: Estimated values and confidence intervals for μ and WAD . The parameters were estimated from least square regression from winter photographs for WAD and summer photographs for μ . Parameters were either estimated from photographs taken under one tree or from all photographs excepted those from trees R1 and R4. For tree R4, the confidence interval of the very large value of μ was not computable by the R nls method.

tree	estimation of WAD (m^2m^{-3})		estimation of μ after computation of WAD with trunks	
	Without trunks	With trunks	spherical $G(\Omega)$	explicit $G(\Omega)$
R1	0.023 ± 0.002	0.020 ± 0.002	0.56 ± 0.11	0.39 ± 0.11
R2	0.036 ± 0.006	0.014 ± 0.001	0.80 ± 0.05	0.52 ± 0.03
R3	0.045 ± 0.006	0.017 ± 0.002	0.99 ± 0.14	0.65 ± 0.09
R4	0.039 ± 0.003	0.033 ± 0.003	$4.90 \pm \text{NA}$	$3.42 \pm \text{NA}$
N1	0.048 ± 0.002	0.030 ± 0.002	0.47 ± 0.03	0.32 ± 0.03
N2	0.049 ± 0.004	0.027 ± 0.003	0.53 ± 0.06	0.35 ± 0.04
N3	0.059 ± 0.006	0.036 ± 0.003	1.15 ± 0.23	0.76 ± 0.15
N4	0.048 ± 0.005	0.029 ± 0.003	1.21 ± 0.16	0.81 ± 0.10
All trees but R1 and R4	0.048 ± 0.003	0.026 ± 0.002	0.76 ± 0.06	0.50 ± 0.04

relationship between the pruning regime and the LAD. We could have expected the opposite, as pruning results in irregular canopies with large empty areas inside the ellipsoid.

B.3.2 Parameters estimation

B.3.2.1 Estimates of the wood area density

When the interception by trunks was not explicitly computed, the estimated wood area density accounted for both trunks and branches, and ranged from $0.023 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$ for tree R2 to $0.059 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$ for tree N3. When accounting for branches only, WAD ranged from 0.014 to 0.036.

B.3.2.2 Estimates of the clumping coefficient

Under the spherical assumption for leaf angle distribution, the two trees that were never pruned (R1 and R4) showed radically different behaviours (tab.B.2): tree R1 had a clear foliage clumping ($\mu = 0.56$) whereas tree R4 seemed to have a very regular leaf distribution ($\mu = 4.90$). However, these trees had very low-hanging branches that caused two problems in the analysis of hemispherical photographs: (i) the gap fraction values measured from photographs with tree leaves very close to the camera are unstable and unreliable: a leaflet close to the camera will obscure a large amount of the sky vault. Using these pictures for estimating the clumping coefficient leads to artificially high and unstable values for μ ; (ii) for such unpruned trees, the silhouettes of neighbour trees

are intimately mixed with the silhouette of the studied tree, leading to an additional uncertainty in the relationship between the estimated proportion of sky obscured on photographs and the distance from the tree.

The first problem explained that the very high μ observed for tree R4 was not significantly different from 1. The high apparent foliage clumping for tree R1 also resulted from an additional artifact: very low-hanging branches of this tree led to the parameterization of an ellipsoid touching the soil (tab. B.1). As a consequence, some photographs were shot from locations that laid inside the adjusted ellipsoid. For these photographs, all rays in the model are intercepted by the tree, leading to a more than 90% shaded fraction under the no clumping hypothesis, whereas picture analysis leads to values ranging from 65 to 85%. This resulted in the estimation of a very low and unreliable clumping coefficient.

For these reasons, the two unpruned trees R1 and R4 were not used for cross validation and evaluation of the model.

The clumping coefficient estimated with the other trees ranged from 0.47 (tree N1) to 1.15 (tree N3) with the spherical leaf angle distribution, and from 0.32 to 0.81 with the explicit leaf angle distribution. In both cases, the large pruned trees (R3, N3, N4 and R2) had a larger μ than small trees (N1 and N2), suggesting a more regular leaf distribution.

B.3.3 Model evaluation

B.3.3.1 Predicting the shaded fraction under leafless trees

By construction, the null model (without trunks nor branches) is unable to predict any sky mask by leafless trees. Accounting for light interception by trunks only was not sufficient for predicting the shaded fraction P under leafless trees (tab.B.3a). Estimating WAD and evaluating the model on the same tree (tab.B.3d) informs about the best prediction that is attainable for each tree without changing the model formalisms (ellipsoids for tree crowns, cones for trunks). For all trees, our model can predict P with a small bias ($rB < 6\%$) and a greater than 0.9 efficiency.

When the wood area density was estimated from other trees (cross validation), the explicit interception by conical trunks improved the model performances for all trees (tab.B.3b versus c), reducing the bias ($rB = 6\%$) and improving the efficiency ($EF = 0.75$, see fig.B.1) on the whole dataset (all trees). However, the model was poorly performant when evaluated on individual trees: P was for example under-estimated by 49% for tree R2 while it was over-estimated by 22% for tree N3.

B.3.3.2 Predicting the shaded fraction by leafy trees

Introducing light interception by branches and stems had very few effects on model evaluation under leafy trees (results not shown). Global predictions (on all trees) of the

Table B.3: Model evaluation with leafless trees: comparing the predicted shaded fraction P with hemispherical photographs: **(a)** model accounting for trunks only. **(b)** interception by trunks was not explicitly computed, WAD was estimated from 5 trees and model evaluated on the 6th. **(c)** model accounting for trunks, WAD was estimated from 5 trees and model evaluated on the 6th. **(d)** model accounting for trunk, WAD was estimated from 1 tree and model evaluated on the same tree. rB, RMSrE and EF are the relative bias (eq.B.2.6), the root mean squared relative error (eq.B.2.7), and the model efficiency (eq.B.2.8).

tree	a			b			c			d		
	rB (%)	RMSrE (%)	EF -	rB (%)	RMSrE (%)	EF -	rB (%)	RMSrE (%)	EF -	rB (%)	RMSrE (%)	EF -
R2	46	48	≈ 0	ns	-61	0.76	-49	52	0.06	-2	9	0.95
R3	45	48	< 0	6	-25	0.47	-27	34	0.61	-1	16	0.90
N1	72	74	< 0	-27	-5	0.11	-16	22	0.92	6	16	0.97
N2	66	69	< 0	-26	-8	0.23	8	19	0.90	5	18	0.91
N3	66	67	< 0	10	15	0.23	22	24	0.49	-2	11	0.90
N4	66	67	< 0	14	-12	0.26	7	11	0.91	-2	9	0.95
all	59	62	< 0	-1	-17	0.43	-6	31	0.75	ns	13	0.95

ns signifies smaller than 0.5 %

Table B.4: Model evaluation under leafy trees: comparing the predicted shaded fraction P with hemispherical photographs: **(a)** spherical leaf angle distribution, no leaf clumping ($\mu = 1$). **(b)** spherical leaf angle distribution, μ estimated from 5 trees and model evaluated on the sixth. **(c)** explicit leaf angle distribution, μ estimated from 5 trees and model evaluated on the sixth. **(d)** explicit leaf angle distribution, μ estimated from 1 tree and model evaluated on the same tree. In all cases, the model included interception by trunks (approximated as opaque cones) and branches (WAD = 0.026 m²m⁻³).

tree	a			b			c			d		
	rB (%)	RMSrE (%)	EF -	rB (%)	RMSrE (%)	EF -	rB (%)	RMSrE (%)	EF -	rB (%)	RMSrE (%)	EF -
R2	-9	11	0.7	ns	6	0.90	1	6	0.90	-1	6	0.90
R3	-3	10	0.84	6	10	0.72	6	10	0.74	-2	10	0.84
N1	-33	35	< 0	-27	29	0.30	-25	27	0.37	04	10	0.96
N2	-38	41	< 0	-26	31	0.34	-25	29	0.35	ns	12	0.89
N3	1	8	0.89	10	12	0.68	9	12	0.70	-1	8	0.90
N4	1	8	0.92	14	16	0.63	14	16	0.65	-3	8	0.95
all	-11	21	0.74	-1	18	0.73	ns	17	0.74	ns	9	0.96

ns signifies smaller than 0.5 %

model without clumping ($\mu = 1$) and a spherical $G(\Omega)$ showed good agreement between observed (P^{obs}) and simulated (P^{sim}) shaded fractions (tab. B.4a), with a 11% relative bias and an efficiency of 0.74. However tall and small trees behaved differently: the model gave proper estimates for tall trees (R2, R3, N3 and N4) - the relative bias was low with 1% underestimations to 9% overestimations, the RMSrE was about 10% and the model efficiency exceeded 0.7 - while the shaded fraction was overestimated by more than 30% for small trees (N1 and N2), resulting in a poor predictive power ($\text{EF} < 0$).

The model with an explicit leaf angle distribution and no leaf clumping largely overestimated P for all trees, and the details of its evaluation are not presented. When μ was estimated and the model used on the same tree (tab. B.4d with the explicit leaf angle distribution; note that the spherical leaf angle distribution gave very similar results), predictions of P were not biased and very efficient ($\text{EF} > 0.8$) for all trees, showing that our formalism is able to reproduce the spatial variability of P under individual trees. However, the value of RMSrE (about 10%) suggests that using simple ellipsoids does not allow a good reproduction of all the variability observed with hemispherical photographs.

Introducing an average clumping coefficient deduced from other trees increased little the model performance (tab. B.4b,c), whatever the assumption for the leaf angle distribution was. The overestimation of P was reduced from 11% to less than 1%, but efficiency was unchanged and RMSrE little reduced.

These results indicate that while introducing a clumping coefficient could theoretically increase the model accuracy, this may not prove correct. This coefficient was too variable between trees and using a single average value was not efficient to increase the model performances. We finally will use the value $\mu = 0.76$ estimated from all trees under the spherical leaf angle distribution assumption as a reference for the sensitivity analysis. Predicted versus observed values for the shaded fraction are plotted in fig. B.1.

B.3.4 Sensitivity analysis

B.3.4.1 Light capture efficiency of trees

The light capture efficiency ε of trees provides information about the sum of self-shading within trees and light competition between trees (fig.B.2a). In the low density plot (15 x 15 m), ε was similar for large and small trees, indicating similar self-shading rates: the crown size of large trees is compensated by a lower leaf area density. ε is little affected by light competition in the high density plot for small trees (-3%) while it is reduced by 20% for large trees. Light capture efficiency is very sensitive to μ (tab.B.5), with elasticities ranging from 0.42 to 0.51, but insensitive to WAD. Even for large trees in the high density plot, the elasticity of WAD is only -0.02 , indicating that modelling light interception by branches is useless when focussing on light interception by leafy trees.

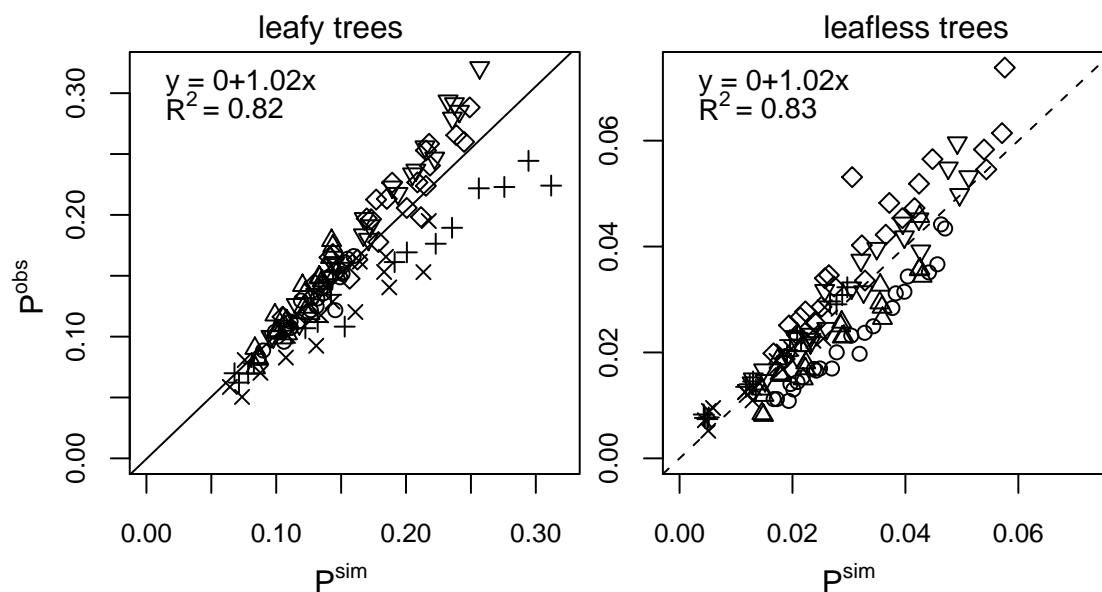


Figure B.1: Simulated versus observed shaded fraction P on hemispherical photographs, with the model including light interception by trunk, and both parameters μ and WAD estimated from all trees, leaf angle distribution was kept spherical. Each point represents an hemispherical photograph, with symbols \circ , \triangle , $+$, \times , \diamond and ∇ for trees R2, R3, N1, N2, N3 and N4 respectively.

Table B.5: Elasticity of the model predictions to parameters μ and WAD. for model predictions. Elasticities are computed at the parameter values estimated from all trees for the model accounting for trunks and assuming a spherical leaf angle distribution ($\mu = 0.76$, WAD = 0.026).

Analysed output	parameter	large trees		small trees	
		9 m	15 m	9 m	15 m
Light capture	μ	0.42	0.50	0.50	0.51
efficiency	WAD	-0.02	-0.01	<i>ns</i>	<i>ns</i>
Summer PAR	μ	-0.76	-0.18	-0.07	-0.02
transmittance	WAD	-0.14	-0.03	<i>ns</i>	<i>ns</i>
Winter PAR	WAD	-0.28	-0.10	-0.01	<i>ns</i>
transmittance					

ns signifies lower than 0.005

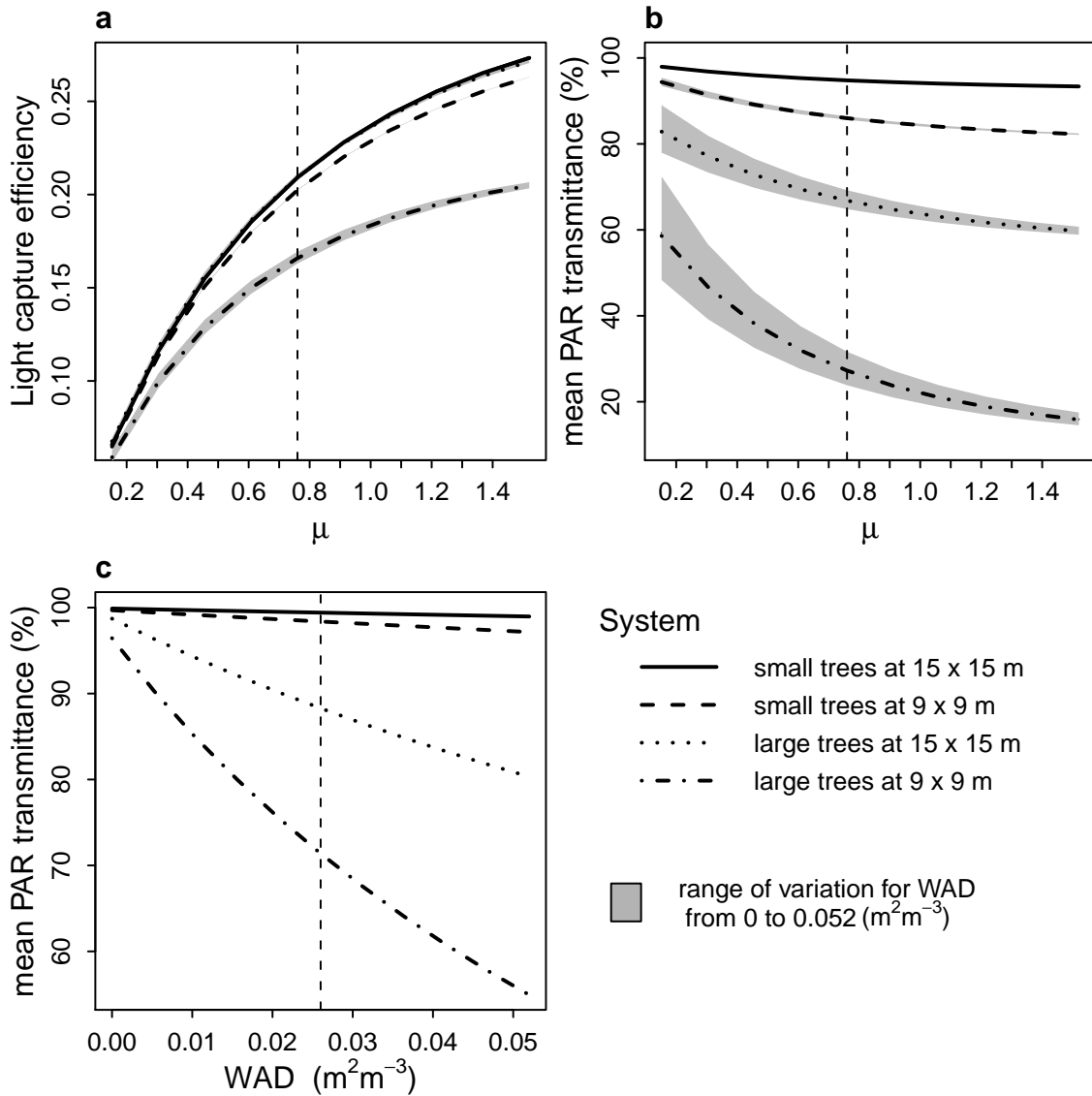


Figure B.2: Sensitivity of three model outputs to parameters μ and WAD for small (5 m high, $r_x = r_y = 1.9$ m, $r_z = 1.8$ m, LAD = 1.5) or large (15 m high, $r_x = r_y = 4.5$ m, $r_z = 5.6$ m, LAD = 0.51) trees planted at 9 m or 15 m spacing. **a:** light capture efficiency (ε , averaged over the leafy period) . **b:** PAR transmittance under leafy trees . **c:** PAR transmittance under leafless trees (only to the wood area density WAD). The PAR transmittance was averaged over the simulated plot and during the leafy (from 15/04 to 15/11) or leafless (rest of the year) period.

B.3.4.2 PAR transmittance under leafy trees

Whatever the values for μ and WAD, the amount of PAR intercepted on the large plot by small trees in our simulations was little compared to the total PAR incident, so that the PAR transmittance on the plot remained close to 1 (fig. B.2b) and was little sensitive to μ and WAD (tab. B.5). For large trees, the PAR transmittance was reduced and more sensitive to μ , with elasticities of 0.18 and 0.76 for trees planted at 15 and 9 m spacing respectively. WAD values can affect the PAR transmittance under large trees, but sensitivity to WAD remained negligible relatively to sensitivity to μ .

B.3.4.3 PAR transmittance under leafless trees

PAR interception by leafless small trees was negligible at the plot level, whatever the plot density and the parameters values (fig.B.2c): less than 3% of incident PAR were intercepted by trees. On the contrary, branches and trunks of large trees intercepted 12% and 29% of the incident PAR and had elasticities of -0.28 and -0.10 (tab.B.5) in the low and high density plots respectively.

B.4 Discussion

B.4.1 Should we account for light interception by branches and stems?

The sensitivity analysis showed that accounting for light interception by woody elements had a negligible effect on the predicted light capture efficiency and transmittance for leafy trees. This is consistent with the fact that it is neglected by most simple light models designed for forest or orchard stands (Zhao et al., 2003; Oyarzun et al., 2007). However, in the case of agroforestry systems with phenological lags between deciduous trees and winter crop species, the prediction of light availability under a leafless tree canopy is important. According to our simulations, in a stand of 15 m tall walnut trees at $156 \text{ trees.ha}^{-1}$, winter PAR transmittance is reduced by 29% by leafless trees (fig. B.2). Such a reduction in PAR availability can reduce drastically the crop productivity (Li et al., 2008), as winter radiation levels are already very low. This impact was never cited in the agroforestry literature nor included in agroforestry light models.

When the model was evaluated on the whole dataset of hemispherical pictures for all the trees, we obtained unbiased and efficient predictions (tab. B.3c, fig. B.1) of the proportion P of sky obscured by leafless trees by introducing a wood area density parameter estimated from other trees, and by using a simple description of stems by cones as proposed by Brunner (1998). This was validated with hemispherical photographs data. The model is thus able to globally reproduce the spatial pattern of irradiance at ground level for various tree sizes. However, the poor performances of the model when evaluated on individual trees indicated that an average wood area density cannot

reproduce the effects of architectural specificities of trees. The model can only be used to predict the average shade pattern under an average tree, but this is what is usually expected from an agroforestry model.

B.4.2 Should we take leaf clumping within crown into account?

The clumping coefficient, when estimated at the single shoot scale, may be related to botanical parameters (Falster & Welstoby, 2003). When it is estimated at larger scales, it integrates different levels of clumping that may compensate. In our study case, it included the clumping at shoot and tree scale, clumping at stand scale being explicitly taken into account by modelling the crowns of individual trees. Parveaud et al. (2008) checked the influence of the random leaf area distribution ($\mu = 1$) hypothesis at different scales on light interception with 3D detailed mock-ups of young hybrid walnuts describing the trees at the leaf scale. They concluded that the random hypothesis held at the shoot scale, but led to an over-estimation of the intercepted light at the branch or the whole crown scale. They also showed that using a spherical leaf angle distribution led to an under-estimation of the intercepted light. Our results indicate that the issue is more complicated when the trees are approximated by simple ellipsoids, the μ estimate being dependent from the procedure to adjust the ellipsoid.

Light models that simplify tree canopies with simple volumes such as cones, cylinders or ellipsoids are sensitive to the procedure to adjust these volumes and to their optical parameters (Stadt & Lieffers, 2000; Zhao et al., 2003; Möttus et al., 2006). Trees have inherently a complex shape, and numerous geometric shapes and calibration procedures can approximate a real tree canopy shape. For a stand of young grey alders (*Alnus incana*) approximated by ellipsoids, Möttus et al. (2006) concluded that the optimal calibration procedure for modelling light transmittance should end up with ellipsoids including 95% of the leaves. This conclusion was obtained with 3D mock-ups of the trees and involved heavy workload. Therefore, it is not advisable as an easy parameterization procedure of ellipsoids. In this paper, we explored a simpler procedure, easy to reproduce, and requiring only few input data. All state variables used by the model to describe the tree canopy depend on this procedure, such as the volume and coordinates of the adjusted ellipsoid and the mean leaf area density within this volume. As a consequence, as stated by Cescatti (1997b), the clumping coefficient defined at the tree scale is more a fitting than a bio-physically meaningful parameter. It accounts both for leaf clumping at shoot and tree scale and for discrepancies between real trees and adjusted ellipsoids: any intercepting surface (isolated leafy branches, tree trunk) situated outside the adjusted ellipsoid tends to increase μ , while zones empty of leaves in the adjusted ellipsoid tend to decrease it.

The clumping parameter ranged from 0.47 to 1.21 for our six hybrid walnut trees assuming a spherical leaf angle distribution. It was close to 0.5 with a small confidence interval for small trees, while it ranged from 0.8 to 1.2 with much larger confidence intervals for large pruned trees (tab. B.2). This results from a poor agreement between

the actual crown shape of large trees and ellipsoids. As a consequence, introducing an average clumping coefficient estimated from other trees was inefficient for improving the predicted shade fraction around individual trees. Therefore, more detailed light modelling around a given tree could only be achieved with a more detailed crown description of that tree. Nevertheless, the model evaluation on the whole dataset showed that it captured the main effects of tree size and photograph positions on the shaded fraction ($EF = 0.73$, $R^2 = 0.82$), and that introducing a correcting clumping coefficient reduced the bias of model predictions. As a conclusion, μ can be used as a correcting parameter only if specific data are available, which is not the case for most situations where generic models are used.

B.4.3 Accuracy of model predictions

The global evaluation of the model showed that it captured most of the variability of the shaded fraction on hemispherical pictures taken at various positions under leafy or leafless trees of various size (fig. B.1). The model is thus adapted for rendering the spatial heterogeneity and dynamics during various stages of the life of trees for the shaded fraction at soil level under a virtual stand of average trees. However, when the evaluation was performed tree by tree, we obtained overestimates for some trees, underestimates for others, with a large RMSrE: our model is not adapted to take into account the effects of architectural specificities of a given tree, and should be applied only to an average virtual tree. This aspect was ignored by most previous papers addressing this issue (Courbaud et al., 2003; Bartelink, 1998; Zhao et al., 2003). It cannot be ignored when using the model on a specific tree such as a real tree that would be monitored in a field tree-crop interaction study.

The sensitivity analysis gave us information about the uncertainty of model predictions for PAR capture efficiency by trees and PAR transmittance under trees at different age and density. This will be useful in the construction of an integrated wide-spaced tree stand (agroforestry, orchard, urban forestry) model. It will set the requirements for the level of precision that should be expected from the other modules that will be included in the integrated model.

B.4.4 Using gap-inversion methods for estimating canopy parameters of wide-spaced trees

To our knowledge, the reported use of hemispherical photographs in a spatially explicit context is scarce. Fournier et al. (1996), Parveaud et al. (2008) and Stuckens et al. (2009) used hemispherical photographs to evaluate spatially explicit light models and/or methods for reconstructing individual tree architecture. Courbaud et al. (2003) used hemispherical photographs for the calibration of the LAD and the evaluation of a light model for norway spruce stands. In this paper, we proposed a method for estimating structural parameters of individual trees by inversion of the shaded-fraction on

hemispherical photographs with a spatially explicit radiation interception model. The advantages and pitfalls of gap-fraction inversion methods have been extensively discussed (Jonckheere et al., 2004), and several theories and softwares have been developed to improve the image processing (Jonckheere et al., 2005; Cescatti, 2007), to account for horizontal heterogeneity (Nilson, 1999), leaf clumping at several scales (Cohen et al., 1995) or multiple scattering (Leblanc & Chen, 2001). With the notable exceptions of the work of ? and Zhao et al. (2003) with classical photographs, Villalobos et al. (1995) with a Plant Canopy Analyzer (LI-COR LAI 2000) and Huang & Pretzsch (2010) with a terrestrial laser, most of these methods were designed for studies at the whole canopy scale with no spatially explicit description, and are not suitable to predict the radiation heterogeneous pattern at ground (or crop) level.

B.5 Conclusions

We have developed a simple yet spatially explicit model for predicting light competition in wide-spaced tree stands such as those observed in savannahs, orchards, agroforestry systems and urban forestry. Predicting the spatial patterns of light availability at ground level is required for the modelling of microclimate and productivity of the understorey. Spatially heterogeneous levels of radiation may induce heterogeneity in the understorey that could be detrimental to productivity. As an example, this could perhaps prevent certain crops to perform economically within agroforestry systems. Accurately predicting the light availability and heterogeneity at ground or crop level in wide-spaced tree stands is therefore crucial. This model uses well established theories of light interception by heterogeneous canopies and uses a canopy description at the scale of an individual tree crown. We tested if introducing parameters that account for light interception by woody elements and non random leaf distribution would improve the accuracy of prediction of the model. The parameterization of a wood area density improved the model, providing unbiased predictions of the shaded fraction under leafless trees, and slightly improved predictions of the spatial light heterogeneity at crop level. Surprisingly, the introduction of a clumping coefficient failed to improve model predictions for leafy trees. Although this improvement of light competition models was suggested by several authors, our study indicates that the estimation of the clumping coefficient was too dependent of the canopy volume adjustment procedure. This procedure was not efficient enough to account for the actual shape of individual tree crowns. Our conclusions back the use of a simple light interception model to simulate the day to day variation of light interception by discontinuous canopies of spaced trees provided that the model aims at predicting the impact of an average tree. Predicting the detailed light interception by a real tree is not within the reach of any simplified model that assimilates the tree crown to an ellipsoid.

Bibliographie

- Abbate P. E., Andrade F. H., Culot J. P., Bindraban P. S., 1997. Grain yield in wheat : effects of radiation during spike growth period. *Field Crops Research* 54, 245–257.
- Affholder F., Scopel E., Neto J. M., Capillon A., 2003. Diagnosis of the productivity gap using a crop model. methodology and case study of small-scale maize production in central brazil. *Agronomie* 23, 305–325.
- Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., Smith M., 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements. FAO, Rome.
- Anderson L. S., Sinclair F. L., 1993. Ecological interactions in agroforestry systems. *Agroforestry Forum* 6, 57–91.
- Annandale J. G., Jovanovic N. Z., Campbell G. S., du Sautoy N., Lobit P., 2004. Two-dimensional solar radiation interception model for hedgerow fruit trees. *Agricultural and Forest Meteorology* 121, 207–225.
- Asbjornsen H., Shepherd G., Helmers M., Mora G., 2008. Seasonal patterns in depth of water uptake under contrasting annual and perennial systems in the Corn Belt Region of the Midwestern U.S. *Plant and Soil* 308, 69–92.
- Asseng S., Jamieson P. D., Kimball B., Pinter P., Sayre K., Bowden J. W., Howden S. M., 2004. Simulated wheat growth affected by rising temperature, increased water deficit and elevated atmospheric CO₂. *Field Crops Research* 85, 85–102.
- Asseng S., Turner N. C., Ray J. D., Keating B. A., 2002. A simulation analysis that predicts the influence of physiological traits on the potential yield of wheat. *European Journal of Agronomy* 17, 123–141.
- Asseng S., van Herwaarden A. F., 2003. Analysis of the benefits to wheat yield from assimilates stored prior to grain filling in a range of environments. *Plant and Soil* 256, 217–229.
- Aumann C. A., 2007. A methodology for developing simulation models of complex systems. *Ecological Modelling* 202, 385–396.
- Austin R. B., Edrich J. A., Ford M. A., Blackwell R. D., 1977. The fate of the dry matter, carbohydrates and ¹⁴C lost from the leaves and stems of wheat during grain filling. *Annals of Botany* 41, 1309–1321.

- Balde A., 2007. Modélisation de la réaction d'une culture de céréale à l'ombre des arbres : adaptation du modèle stics. Master's thesis, Montpellier Supagro.
- Bartelink H. H., 1998. Radiation interception by forest trees : a simulation study on effects of stand density and foliage clustering on absorption and transmission. *Ecological Modelling* 105, 213–225.
- Becquey J., 1997. Les noyers à bois. Editions IDF, Paris.
- Begué A., Prince S. D., Hanan N. P., Roujean J. L., 1996. Shortwave radiation budget of Sahelian vegetation 2. Radiative transfer models vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology* 79, 97–112.
- Bellocchi G., Rivington M., Donatelli M., Matthews K., 2010. Validation of biophysical models : issues and methodologies. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 30, 109–130.
- Belot A., 2007. Simulation des échanges d'énergie et de masse d'un couvert végétal : Développement et validation d'un modèle quasi 3D, DART-EB. Ph.D. thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse.
- Bertheloot J., Cournède P.-H., Andrieu B., 2011. NEMA, a functional–structural model of nitrogen economy within wheat culms after flowering. I. Model description. *Annals of Botany*, (online first).
- Bidinger F., Musgrave R. B., Fischer R. A., 1977. Contribution of stored pre-anthesis assimilate to grain yield in wheat and barley. *Nature* 270, 431–433.
- Block R., Van Rees K., Knight J., 2006. A review of fine root dynamics in populus plantations. *Agroforestry Systems* 67, 73–84.
- Blum A., 1998. Improving wheat grain filling under stress by stem reserve mobilisation. *Euphytica* 100, 77–83.
- Bonhomme R., 1993. The solar radiation : characterization and distribution in the canopy. In : Varlet-Granchet C., Bonhomme R., Sinoquet H. (Eds.), *Crop structure and Light Microclimate*. INRA, Paris, pp. 17–28.
- Boote K. J., Jones J. W., Hoogenboom G., Pickering N. B., 1998. The CROPGRO model for grain legumes. In : Tsuji G., Hoogenboom G., Thornton P. (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 99–128.
- Borrás L., Slafer G. A., Otegui M. E., 2004. Seed dry weight response to source-sink manipulations in wheat, maize and soybean : a quantitative reappraisal. *Field Crops Research* 86, 131–146.
- Brandle J. R., Hodges L., Zhou X. H., 2004. Windbreaks in North American agricultural systems. *Agroforestry Systems* 61, 65–78.

- Brenner A. J., 1996. Micro-climatic modification in agroforestry. In : Ong C. K., Huxley P. A. (Eds.), *Tree-Crop Interactions : A Physiological Approach*. CAB International, Wallingford, UK, pp. 159–187.
- Brisson N., Gate P., Gouache D., Charmet G., Oury F.-X., Huard F., 2010. Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. *Field Crops Research* 119, 201–212.
- Brisson N., Launay M., Mary B., Beaudoin N., 2009. Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model. Quae, Versailles.
- Brisson N., Mary B., 2002. STICS Version 5.0. Notice concepts et formalismes. INRA.
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M. H., Ruget F., Nicoullaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Durr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet, D. Cellier P., Machet J. M., Meynard J. M., Delecolle R., 1998. STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. 1. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18, 311–346.
- Brisson N., Ruget F., Gate P., Lorgeau J., Nicoullaud B., Tayot X., Plenet D., Jeuffroy M. H., Bouthier A., Ripoche D., Mary B., Justes E., 2002. STICS : a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize. *Agronomie* 22, 69–92.
- Brisson N., Wery J., Boote K., 2006. Fundamental concepts of crop models illustrated by a comparative approach. In : Wallach D., Makowski D., Jones J. W. (Eds.), *Working with Dynamic Crop Models-Evaluation, Analysis, Parameterization, and Applications*. Elsevier, Amsterdam, pp. 257–279.
- Broadhead J. S., Black C. R., Ong C. K., 2003. Tree leafing phenology and crop productivity in semi-arid agroforestry systems in Kenya. *Agroforestry Systems* 58, 137–148.
- Brooker R. W., Maestre F. T., Callaway R. M., Lortie C. L., Cavieres L. A., Kunstler G., Liancourt P., Tielbörger K., Travis J. M. J., Anthelme F., Armas C., Coll L., Corcket E., Delzon S., Forey E., Kikvidze Z., Olofsson J., Pugnaire F., Quiroz C. L., Saccone P., Schiffers K., Seifan M., Touzard B., Michalet R., 2008. Facilitation in plant communities : the past, the present, and the future. *Journal of Ecology* 96, 18–34.
- Brunner A., 1998. A light model for spatially explicit forest stand models. *Forest Ecology and Management* 107, 19–46.
- Bruno J. F., Stachowicz J. J., Bertness M. D., 2003. Inclusion of facilitation into ecological theory. *Trends in Ecology and Evolution* 18, 119–125.
- Burgess P. J., Incoll L. D., Corry D. T., Beaton A., Hart B. ., 2005. Poplar (*Populus spp.*) growth and crop yields in a silvoarable experiment at three lowland sites in England. *Agroforestry Systems* 63, 157–169.

BIBLIOGRAPHIE

- Burner D. M., Brauer D. K., 2003. Herbage response to spacing of loblolly pine trees in a minimal management silvopasture in southeastern USA. *Agroforestry Systems* 57, 69–77.
- Cabanettes A., Auclair D., Imam W., 1998. Diameter and height growth curves for widely-spaced trees in European agroforestry. *Agroforestry Systems* 43, 169–181.
- Cannell M. G. R., Mobbs D. C., Lawson G. J., 1998. Complementarity of light and water use in tropical agroforests ii. modelled theoretical tree production and potential crop yield in arid to humid climates. *Forest Ecology and Management* 102, 275–282.
- Cannell M. G. R., van Noordwijk M., Ong C. K., 1996. The central agroforestry hypothesis : the trees must acquire resources that the crop would not otherwise acquire. *Agroforestry Systems* 34, 27–31.
- Casella E., Sinoquet H., 2007. Botanical determinants of foliage clumping and light interception in two-year-old coppice poplar canopies : assessment from 3-D plant mock-ups. *Annals of Forest Science* 64, 395–404.
- Cescatti A., 1997a. Modelling the radiative transfer in discontinuous canopies of asymmetric crowns. I. Model structure and algorithms. *Ecological Modelling* 101, 263–274.
- Cescatti A., 1997b. Modelling the radiative transfer in discontinuous canopies of asymmetric crowns. II. Model testing and application in a Norway spruce stand. *Ecological Modelling* 101, 275–284.
- Cescatti A., 2007. Indirect estimates of canopy gap fraction based on the linear conversion of hemispherical photographs : methodology and comparison with standard thresholding techniques. *Agricultural and Forest Meteorology* 143, 1–12.
- Chaudhry A. K., 2003. Comparative study of different densities of poplar in wheat based agroforestry system in central Punjab. Ph.D. thesis, Faculty of agriculture, university of agriculture Faisalabad, Pakistan.
- Chen J. M., 1996. Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands. *Agricultural and Forest Meteorology* 80, 135–163.
- Chenu K., Chapman S. C., Tardieu F., McLean G., Welcker C., Hammer G. L., 2009. Simulating the yield impacts of organ-level quantitative trait loci associated with drought response in maize : A "gene-to-phenotype" modeling approach. *Genetics* 183, 1507–1523.
- Chirko C. P., Gold M. A., Nguyen P. V., Jiang J. P., 1996. Influence of orientation on wheat yield and photosynthetic photon flux density (Qp) at the tree and crop interface in a paulownia-wheat intercropping system. *Forest Ecology and Management* 89, 149–156.
- Cleugh H., 1998. Effects of windbreaks on airflow, microclimates and crop yields. *Agroforestry Systems* 41, 55–84.

- Cohen S., Mosoni P., Meron M., 1995. Canopy clumpiness and radiation penetration in a young hedgerow apple orchard. *Agricultural and Forest Meteorology* 76, 185–200.
- Courbaud B., de Coligny F., Cordonnier T., 2003. Simulating radiation distribution in a heterogeneous Norway spruce forest on a slope. *Agricultural and Forest Meteorology* 116, 1–18.
- Coutts M. P., 1982. Growth of sitka spruce seedlings with roots divided between soils of unequal matric potential. *New Phytologist* 92, 49–61.
- Cox G. M., Gibbons J. M., Wood A. T. A., Craigan J., Ramsden S. J., Crout N., 2006. Towards the systematic simplification of mechanistic models. *Ecological Modelling* 198, 240–246.
- Crout N. M. J., Tarsitano D., Wood A. T., 2009. Is my model too complex? evaluating model formulation using model reduction. *Environmental Modelling & Software* 24, 1–7.
- Côté J.-F., Widlowski J.-L., Fournier R. A., Verstraete M. M., 2009. The structural and radiative consistency of three-dimensional tree reconstructions from terrestrial lidar. *Remote Sensing of Environment* 113, 1067–1081.
- Dassot M., Constant T., Fournier M., 2011. The use of terrestrial lidar technology in forest science : application fields, benefits and challenges. *Annals of Forest Science*, 1–16.
- Dauzat J., Rapidel B., Bergé A., 2001. Simulation of leaf transpiration and sap flow in virtual plants : model description and application to a coffee plantation in Costa Rica. *Agricultural and Forest Meteorology* 109, 143–160.
- Davi H., Dufrière E., Granier A., le Dantec V., Barbaroux C., Francois C., Breda N., 2005. Modelling carbon and water cycles in a beech forest. part II : Validation of the main processes from organ to stand scale. *Ecological Modelling* 185, 387–405.
- de Angelis D. L., Mooij W. M., 2003. In praise of mechanistically rich models. In : Canham C., Cole J., Lauenroth W. (Eds.), *Models in ecosystem science*. Princeton University Press, Princeton, Ch. 5, pp. 61–82.
- de Castro F., Fetcher N., 1998. Three dimensional model of the interception of light by a canopy. *Agricultural and Forest Meteorology* 90, 215–233.
- de Castro F., Fetcher N., 1999. The effect of leaf clustering in the interception of light in vegetal canopies : theoretical considerations. *Ecological Modelling* 116, 125–134.
- de Coligny F., Ancelin P., Cornu G., Courbaud B., Dreyfus P., Goreaud F., Gourlet-Fleury S., Meredieu C., Saint-André L., 2003. Copsis : Computer-aided projection for strategies in silviculture : advantages of a shared forest-modelling platform. In : *Modelling forest systems. Workshop on the interface between reality, modelling and the parameter estimation processes*, Sesimbra, Portugal, 2-5 June 2002. pp. 319–323.
- de Willigen P., Nielsen N. E., Claassen N., Castrignano A. M., 2000. Modelling water and nutrient uptake. In : Smit A. L., Bengough A. G., Engels C., M. V. N., Pellerin S., Van de Geijn S. C. (Eds.), *Root Methods, a Handbook*. Springer Verlag, Berlin, Ch. 15, pp. 509–544.

BIBLIOGRAPHIE

- de Willigen P., van Noordwijk M., 1987. Uptake potential of non-regularly distributed roots. *Journal of Plant Nutrition* 10, 1273–1280.
- de Willigen P., Van Noordwijk M., 1994. Diffusion and mass flow to a root with constant nutrient demand or behaving as a zero-sink. ii. zero-sink uptake. *Soil Science* 157, 171–175.
- de Willigen P., van Noordwijk M., 1995. Model for interactions between water and nutrient uptake. In : Kabat P., Marshall B., van den Broek B., Vos J., van Keulen H. (Eds.), *Modelling and Parameterization of the Soil-Plant-Atmosphere System : a Comparison of Potato Growth Models*. Wageningen Pers, Wageningen, The Netherlands, pp. 135–153.
- Debaeke P., 2004. Scenario analysis for cereal management in water-limited conditions by the means of a crop simulation model (STICS). *Agronomie* 24, 315–326.
- Debaeke P., Aboudrare A., 2004. Adaptation of crop management to water-limited environments. *European Journal of Agronomy* 21, 433–446.
- DeJonge K. C., Kaleita A. L., Thorp K. R., 2007. Simulating the effects of spatially variable irrigation on corn yields, costs, and revenue in Iowa. *Agricultural Water Management* 92, 99–109.
- Delacour G., 2006. Paramétrage et évaluation locale du modèle d'interaction arbre-culture Hi-sAFé. Master's thesis, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier.
- Demotes-Mainard S., Jeuffroy M.-H., 2004. Effects of nitrogen and radiation on dry matter and nitrogen accumulation in the spike of winter wheat. *Field Crops Research* 87, 221–233.
- Ding S., Su P., 2010. Effects of tree shading on maize crop within a poplar-maize compound system in hexi corridor oasis, northwestern China. *Agroforestry Systems* 80, 117–129.
- Dufour L., Metay A., Talbot G., Dupraz C., submitted. Assessing light competition for cereal production in temperate agroforestry systems using experimentation and crop modeling. *Journal of Agronomy and Crop Science*.
- Dupraz C., 1998-2008. Programme intégré de recherches en agroforesterie à Restinclières - PIRAT. rapports annuels. Tech. rep., INRA, Montpellier.
- Dupraz C., 1999. Adequate design of control treatments in long term agroforestry experiments with multiple objectives. *Agroforestry Systems* 43, 35–48.
- Dupraz C., 2002. Tree-crops interaction models : state of the art report. Deliverable D.1.1 of the SAFE European research contract QLK5-CT-2001-00560. Tech. rep., INRA, Montpellier.
- Dupraz C., Burgess P., Gavaland A., Graves A., Herzog F., Incoll L., Jackson N., Keesman K., Lawson G., Lecomte I., Liagre F., Mantzanas K., Mayus M., Moreno G., Palma J., Papanastasis V., Paris P., Pilbeam D., Reisner Y., Vincent G., van der Werf W., 2005. Synthesis of the silvoarable agroforestry for Europe project. Tech. rep., INRA, Montpellier.

- Dupraz C., Fournier C., Balvay Y., Dauzat M., Pesteur S., Simorte V., 1999. Influence de quatre années de culture intercalaire de blé et de colza sur la croissance de noyers hybrides en agroforesterie. Actes du colloque Bois et forêts des agriculteurs, 95–114.
- Dupraz C., Liagre F., 2008. Agroforesterie, des arbres et des cultures. Editions France-Agricole, Paris.
- Dupraz C., Marrou H., Talbot G., Dufour L., Nogier A., Ferard Y., 2011. Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use : towards new agrivoltaic schemes. Renewable Energy, (first online).
- Dupraz C., Newman S., 1997. Temperate agroforestry : the European way. In : Gordon A., Newman S. (Eds.), Temperate Agroforestry Systems. CAB International, Wallingford, UK, pp. 181–236.
- Dupraz C., Querné A., Talbot G., Dufour L., 2010. What explanations for the surprising productivity of temperate agroforestry systems as measured by their Land Equivalent Ratio ? In : Proceedings of Agro2010, the XIth ESA Congress. August 29th-September 3rd, 2010, Montpellier, France.
- Duursma R., Mäkelä, A. and Reid D., Jokela E., Porté A., Roberts S., 2010. Self-shading affects allometric scaling in trees. Functional Ecology 24, 723–730.
- Easterling W. F., Hays C. J., Easterling M. M., Brandle J. R., 1997. Modeling the effect of shelterbelts on maize productivity under climate change : an application of the EPIC model. Agriculture, Ecosystems & Environment 61, 163–176.
- Eggemeyer K., Awada T., Harvey F., Wedin D., Zhou X., Zanner C., 2009. Seasonal changes in depth of water uptake for encroaching trees *Juniperus virginiana* and *Pinus ponderosa* and two dominant C4 grasses in a semiarid grassland. Tree Physiology 29, 157–169.
- Eichhorn M., Paris P., Herzog F., Incoll L., Liagre F., Mantzanas K., Mayus M., Moreno G., Papanastasis V., Pilbeam D., Pisanelli A., Dupraz C., 2006. Silvoarable systems in Europe : Past, present and future prospects. Agroforestry Systems 67, 29–50.
- Ellis E. A., Bentrup G., Schoeneberger M. M., 2004. Computer-based tools for decision support in agroforestry : current state and future needs. Agroforestry Systems 61/62, 401–421.
- Evers J. B., Vos J., Chelle M., Andrieu B., Fournier C., Struik P. C., 2007. Simulating the effects of localized red :far-red ratio on tillering in spring wheat (*Triticum aestivum*) using a three-dimensional virtual plant model. New Phytologist 176, 325–336.
- Evers J. B., Vos J., Yin X., Romero P., van der Putten P. E. L., Struik P. C., 2010. Simulation of wheat growth and development based on organ-level photosynthesis and assimilate allocation. Journal of Experimental Botany 61, 2203–2216.
- Falster D. S., Welstoby M., 2003. Leaf size and angle vary widely across species : what consequences for light interception ? New Phytologist 158, 509–525.

BIBLIOGRAPHIE

- Fischer R. A., 1985. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *The Journal of Agricultural Science* 105, 447–461.
- Fournier R. A., Landry R., August N. M., Fedosejevs G., Gauthier R. P., 1996. Modelling light obstruction in three conifer forests using hemispherical photography and fine tree architecture. *Agricultural and Forest Meteorology* 82, 47–72.
- Frazer G. W., Canham C. D., Lertzman K. P., 1999. Gap Light Analyser (GLA) : Imaging Software to Extract Canopy Structure and Gap Light Transmission Indices from True-Colour Fisheye Photographs. Users Manual and Program Documentation, Version 2.0. Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia.
- Friend A. D., Stevens A. K., Knox R. G., Cannell M. G. R., 1997. A process-based, terrestrial biosphere model of ecosystem dynamics (Hybrid v3.0). *Ecological Modelling* 95, 249 – 287.
- Gallagher J. N., Biscoe P. V., 1978. Radiation absorption, growth and yield of cereals. *The Journal of Agricultural Science* 91, 47–60.
- Garcia-Barrios L., Ong C. K., 2004. Ecological interactions, management lessons and design tools in tropical agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 61, 221–236.
- Gate P., 2008. Impacts du changement climatique sur la croissance et le développement du blé en France. *Oléagineux, Corps Gras, Lipides* 5, 332–336.
- Gavaland A., Duval H., Willm J., Burnel L., 2006. Exemples d'amélioration de la croissance et de la forme du noyer hybride par l'accompagnement ligneux. *Forêt Entreprise* 170, 26–31.
- Gea-Izquierdo G., Montero G., Cañellas I., 2009. Changes in limiting resources determine spatio-temporal variability in tree-grass interactions. *Agroforestry Systems* 76, 375–387.
- Gill R., Singh B., Kaur N., 2009. Productivity and nutrient uptake of newly released wheat varieties at different sowing times under poplar plantation in north-western India. *Agroforestry Systems* 76, 579–590.
- Gill R. A., Jackson R. B., 2000. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytologist* 147, 13–31.
- Gillespie A. R., Jose S., Mengel D. B., Hoover W. L., Pope P. E., Seifert J. R., Biehle D. J., Stall T., Benjamin T. J., 2000. Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the midwestern USA 1. Production physiology. *Agroforestry Systems* 48, 25–40.
- Goudriaan J., 1977. Crop micrometeorology : a simulation. Wageningen Centre for Agricultural Publishing and Documentation.
- Grant R. F., 1998. Simulation in ECOSYS of root growth response to contrasting soil water and nitrogen. *Ecological Modelling* 107, 237–264.

- Graves A. R., Burgess P. J., Liagre F., Pisanelli A., Paris P., Moreno G., Bellido M., Mayus M., Postma M., Schindler B., Mantzanas K., Papanastasis V. P., Dupraz C., 2008. Farmer perceptions of silvoarable systems in seven European countries. In : Rigueiro-Rodríguez A., McAdam J., Mosquera-Losada M. R., Nair P. K. R. (Eds.), *Agroforestry in Europe*. Vol. 6 of *Advances in Agroforestry*. Springer Netherlands, pp. 67–86.
- Graves A. R., Burgess P. J., Liagre F., Terreaux J.-P., Borrel T., Dupraz C., Palma J., Herzog F., 2011. Farm-SAFE : the process of developing a plot- and farm-scale model of arable, forestry, and silvoarable economics. *Agroforestry Systems* 81, 93–108.
- Graves A. R., Burgess P. J., Palma J., Herzog F., Moreno G., Bertomeu M., Dupraz C., Liagre F., Keesman K., van der Werf W., 2007. Development and application of bio-economic modelling to compare silvoarable, arable, and forestry systems in three European countries. *Ecological Engineering* 29, 434–449.
- Graves A. R., Burgess P. J., Palma J., Keesman K. J., van der Werf W., Dupraz C., van Keulen H., Herzog F., Mayus M., 2010. Implementation and calibration of the parameter-sparse Yield-SAFE model to predict production and land equivalent ratio in mixed tree and crop systems under two contrasting production situations in Europe. *Ecological Modelling* 221, 1744–1756.
- Green S. R., McNaughton K. G., 1997. Modelling effective stomatal resistance for calculating transpiration from an apple tree. *Agricultural and Forest Meteorology* 83, 1–26.
- Grimm V., 1994. Mathematical models and understanding in ecology. *Ecological Modelling* 75-76, 641–651.
- Guner S., Yagci V., Tilki, F. Celik N., 2010. The effects of initial planting density on above- and below-ground biomass in a 25-year-old *Fagus orientalis* Lipsky plantation in Hopa, Turkey. *Scientific Research and Essays* 5, 1856–1860.
- Hein S., Spiecker H., 2008. Crown and tree allometry of open-grown ash (*Fraxinus excelsior*; l.) and sycamore (*Acer pseudoplatanus*; l.). *Agroforestry Systems* 73, 205–218.
- Heinen M., 2001. FUSSIM2 : brief description of the simulation model and application to fertigation scenarios. *Agronomie* 21, 285–296.
- Henskens F. L., Battaglia M., Cherry M., Beadle C., 2001. Physiological basis of spacing effects on tree growth and form *Eucalyptus globulus*. *Trees-Structure and Function* 15, 365–377.
- Henskens F. L., Battaglia M., Ottenschlaeger M. L., 2008. Silvicultural design support for farm forestry. Tech. rep., Rural Industries Research and Development Corporation, Australia.
- Hodge A., 2010. Roots : the acquisition of water and nutrients from the heterogeneous soil environment. *Progress in Botany* 71, 307–337.
- Huang P., Pretzsch H., 2010. Using terrestrial laser scanner for estimating leaf areas of individual trees in a conifer forest. *Trees-Structure and Function* 24, 609–619.

BIBLIOGRAPHIE

- Huang W., Xu Q., 1999. Overyield of *Taxodium ascendens*-intercrop systems. *Forest Ecology and Management* 116, 33–38.
- Huth N. I., Carberry P. S., Poulton P. L., Brennan L. E., Keating B. A., 2002. A framework for simulating agroforestry options for the low rainfall areas of australia using APSIM. *European Journal of Agronomy* 18, 171–185.
- Jackson N. A., Wallace J. S., 1999. Soil evaporation measurements in an agroforestry system in Kenya. *Agricultural and Forest Meteorology* 94, 203–215.
- Jahansooz M. R., Yunusa I. A. M., Coventry D. R., Palmer A. R., Eamus D., 2007. Radiation- and water-use associated with growth and yields of wheat and chickpea in sole and mixed crops. *European Journal of Agronomy* 26, 275–282.
- Johnson M. V., MacDonald J. D., Kiniry J. R., Arnold J., Gassman P. W., 2009. ALMANAC : A potential tool for simulating agroforestry yields and improving SWAT simulations of agroforestry watersheds. *International Agricultural Engineering Journal* 18, 51–58.
- Jonckheere I., Fleck S., Nackaerts K., Muysa B., Coppin P., Weiss M., Baret F., 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination. part I. theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 121, 19–35.
- Jonckheere I., Nackaerts K., Muys B., Coppin P., 2005. Assessment of automatic gap fraction estimation of forests from digital hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 132, 96–114.
- Jose S., 2009. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits : an overview. *Agroforestry Systems* 76, 1–10.
- Jose S., Allen S. C., Nair P. K. R., 2008. Tree-crop interactions : lessons from temperate alley-cropping systems. In : Baitsh D. R., Kohli R. K., Jose S., Singh H. P. (Eds.), *Ecological basis of agroforestry*. CRC Press, pp. 15–36.
- Jose S., Gillespie A. R., Pallardy S. G., 2004. Interspecific interactions in temperate agroforestry. *Agroforestry Systems* 61, 237–255.
- Kaitaniemi P., Lintunen A., 2008. Precision of allometric scaling equations for trees can be improved by including the effect of ecological interactions. *Trees-Structure and Function* 22, 579–584.
- Keen C. S., 2008. Utilization of water and light resources by annual crops under semi-arid conditions when planted between *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit hedgerows. Ph.D. thesis.
- Kho R. M., 2000a. A general tree-environment-crop interaction equation for predictive understanding of agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environnement* 80, 87–100.

- Kho R. M., 2000b. On crop production and the balance of available resources. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 80, 71–85.
- Kho R. M., 2008. Approaches to tree-environment-crop interactions. In : Batish D. R., Kohli R. K., Jose S., Singh H. P. (Eds.), *Ecological Basis of Agroforestry*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Ch. 4, pp. 51–72.
- Kho R. M., Yacouba B., Yayé M., Katkoré B., Moussa A., Iktam A., Mayaki A., 2001. Separating the effects of trees on crops : the case of *Faidherbia albida* and millet in niger. *Agroforestry Systems* 52, 219–238.
- Kidanu S., Mamo T., Stroosnijder L., 2004. Eucalyptus-wheat interaction on ethiopian nitosols. *Agricultural Systems* 80, 151–170.
- Knyazikhin Y., Kranigk J., Miessen G., Panfyorov O., Vygodskaya N., Gravenhorst G., 1996. Modellind three-dimensional distribution of photosynthetically active radiation in sloping coniferous stands. *Biomass and Bioenergy* 11, 189–200.
- Kramer P. J., Kozlowski T. T., 1979. *Physiology of woody plants*. Academic Press, New York.
- Krohs U., 2006. A priori measurable worlds. In : *Models and Simulations Conference*, Paris 12-13 juin.
- Lacointe A., Kajji A., Daudet F., Archer P., Frossard J., 1995. Seasonal variation of photosynthetic carbon flow rate into young walnut and its partitioning among the plant organs and functions. *Journal of Plant Physiology* 146, 222–230.
- Lamanda N., Dauzat J., Jourdan C., Martin P., Malézieu E., 2008. Using 3D architectural models to assess light availability and root bulkiness in coconut agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 72, 63–74.
- Le Dizès S., Cruiziat P., Lacointe A., Sinoquet H., Le Roux X., Balandier P., Jacquet P., 1997. A model for simulating structure-function relationships in walnut tree growth processes. *Silva Fennica* 31, 313–328.
- Leblanc S. G., Chen J. M., 2001. A practical scheme for correcting multiple scattering effects on optical LAI measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* 110, 125–139.
- Lecomte I., Dupraz C., Mayus M., Burgess P., 2002. Technical plan for implementing the HySAFE biophysical model. Deliverable D.1.2 of the SAFE European Research contract QLK5-CT-2001-00560. Tech. rep., INRA, Montpellier.
- Leroy C., Sabatier S., Wahyuni N., Barczy J. F., Dauzat J., Laurans M., Auclair D., 2009. Virtual trees and light capture : a method for optimizing agroforestry stand design. *Agroforestry Systems* 77, 37–47.
- Lhomme J. P., Mougou R., Mansour M., 2009. Potential impact of climate change on durum wheat cropping in Tunisia. *Climatic Change* 96, 549–564.

BIBLIOGRAPHIE

- Li F., Meng P., Fu D., Wang B., 2008. Light distribution, photosynthetic rate and yield in a paulownia-wheat intercropping system in China. *Agroforestry Systems* 74, 163–172.
- Li G., Xu J., Lu Z., Chen J., 2003. A study on effect of density/spacing on tree growth and stand volume of *Eucalyptus urophylla* plantation for pulp wood. In : *Eucalyptus plantations : research, management and development : proceedings of the International Symposium, Guangzhou, China, 1-6 September 2002*. World Scientific Pub Co Inc, p. 352.
- Liagre F., 2008. L'agroforesterie en France. l'agroforesterie est-elle une idée moderne? *Agroforesteries* 1, 7–10.
- Lin B. B., 2010. The role of agroforestry in reducing water loss through soil evaporation and crop transpiration in coffee agroecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology* 150, 510–518.
- Liu S., Mo X., Lin Z., Xu Y., Ji J., Wen G., Richey J., 2010. Crop yield responses to climate change in the Huang-Huai-Hai plain of China. *Agricultural Water Management* 97, 1195–1209.
- Livny Y., Yan F., Olson M., Chen B., Zhang H., El-Sana J., 2010. Automatic reconstruction of tree skeletal structures from point clouds. In : *ACM Transactions on Graphics*.
- Lobell D. B., Cassman K. G., Field C. B., 2009. Crop yield gaps : their importance, magnitudes, and causes. *Annual Review of Environment and Resources* 34, 179–204.
- Loehle C., 1997. A hypothesis testing framework for evaluating ecosystem model performance. *Ecological Modelling* 97, 153–165.
- Logan J. A., 1994. In defense of big ugly models. *American Entomologist* 40, 202–207.
- Loreau M., 1998. Biodiversity and ecosystem functioning : a mechanistic model. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 95, 5632–5636.
- Lott J. E., Ong C. K., Black C. R., 2009. Understorey microclimate and crop performance in a *Grevillea robusta*-based agroforestry system in semi-arid Kenya. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 1140 – 1151.
- Ludwig F., Asseng S., 2010. Potential benefits of early vigor and changes in phenology in wheat to adapt to warmer and drier climates. *Agricultural Systems* 103, 127–136.
- Lévy G., Lefèvre Y., 2001. La forêt et sa culture sur sol à nappe temporaire. Ecole nationale du génie rural, des eaux et des forêts, Nancy, France.
- Maestre F. T., Callaway R. M., Valladares F., Lortie C. J., 2009. Refining the stress-gradient hypothesis for competition and facilitation in plant communities. *Journal of Ecology* 97, 199–205.

- Malézieux E., Crozat Y., Dupraz C., Laurans M., Makowski D., Ozier-Lafontaine H., Rapidel B., de Tourdonnet S., Valantin-Morison M., 2008. Mixing plant species in cropping systems : concepts, tools and models. a review. *Agronomy for Sustainable Development* 28, 1–20.
- Mariscal M., Orgaz F., Villalobos F., 2000. Modelling and measurement of radiation interception by olive canopies. *Agricultural and Forest Meteorology* 100, 183–197.
- Mariscal M. J., Marens S. N., Ustin S. L., Chen J., Weiss S. B., Roberts D. A., 2004. Light-transmission profiles in an old-growth forest canopy : simulation of photosynthetically active radiation by using spatially explicit radiative transfer models. *Ecosystems* 7, 454–467.
- Marrel A., Iooss B., Dorpe F. V., Volkova E., 2008. An efficient methodology for modeling complex computer codes with gaussian processes. *Computational Statistics & Data Analysis* 52, 4731 – 4744.
- Martens S. N., Breshears D. D., Meyer C. W., 2000. Spatial distribution of understory light along the grassland/forest continuum : effect of cover, height, and spatial pattern of tree canopies. *Ecological Modelling* 126, 79–93.
- Mayus M., Van Keulen H., Stroosnijder L., 1998. A model of tree-crop competition for wind-break systems in the sahel : description and evaluation. *Agroforestry Systems* 43, 183–201.
- McCown R. L., Hammer G. L., Hargreaves J. N. G., Holzworth D. P., Freebairn D. M., 1996. APSIM : A novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agricultural Systems* 50, 255–271.
- Mead R., Willey R. W., 1980. The concept of 'Land Equivalent Ratio' and advantages in yields from intercropping. *Experimental Agriculture*, 16, 217–228.
- Meza F. J., Silva D., 2009. Dynamic adaptation of maize and wheat production to climate change. *Climatic change* 94, 143–156.
- Mialet-Serra I., Dauzat J., Auclair D., 2001. Using plant architectural models for estimation of radiation transfer in a coconut-based agroforestry system. *Agroforestry Systems* 53, 141–149.
- Miller A. W., Pallardy S. G., 2001. Resource competition across the crop-tree interface in a maize silver maple temperate alley cropping stand in Missouri. *Agroforestry systems* 53, 247–259.
- Mize C. W., Colletti J., Batchelor W., Kim J. S., Takle E. S., Brandle J. R., 2008. Modeling a field shelterbelt system with the shelterbelt agroforestry modeling system. In : Batish D., Kohli R., Jose S., Singh H. (Eds.), *Ecological basis of agroforestry*. CRC, pp. 287–299.
- Mäkelä A., Valentine H., 2006. Crown ratio influences allometric scaling in trees. *Ecology* 87, 2967–2972.
- Mobbs D. C., Cannell M. G. R., Crout N. M. J., Lawson G. J., Friend A. D., Arah J., 1998. Complementarity of light and water use in tropical agroforests I. Theoretical model outline, performance and sensitivity. *Forest Ecology and Management* 102, 259–274.

- Monteith J. L., 1975. *Vegetation and the atmosphere, Volume 1, Principles*. Academic Press, London, United Kingdom.
- Monteith J. L., 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Serie B* 281, 277–294.
- Montero M. J., Moreno G., Bertomeu M., 2008. Light distribution in scattered-trees open woodlands in Western Spain. *Agroforestry Systems* 73, 233–244.
- Moon P., Spencer D. E., 1942. Illumination from a non-uniform sky. *Transactions of the Illuminating Engineering Society*. New York 37, 707–726.
- Moreno G., 2008. Response of understorey forage to multiple tree effects in Iberian dehesas. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 123, 239–244.
- Möttus M., Sulev M., Lang M., 2006. Estimation of crown volume for a geometric radiation model from detailed measurements of tree structure. *Ecological Modelling* 198, 506–514.
- Mu H., Jiang D., Wollenweber B., Dai T., Jing Q., Cao W., 2010. Long-term low radiation decreases leaf photosynthesis, photochemical efficiency and grain yield in winter wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science* 196, 38–47.
- Muetzelfeldt R. I., 1995. A framework for a modular modelling approach for agroforestry. *Agroforestry Systems* V30, 223–234.
- Muetzelfeldt R. I., Sinclair F., 1993. Ecological modelling of agroforestry systems. *Agroforestry Forum* 4, 207–247.
- Mulia R., 2005. *Modélisation tri-dimensionnelle de la croissance du système racinaire des plantes en milieu hétérogène avec l’approche de l’automate voxellaire*. Ph. d., Université Montpellier 2, Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier 2.
- Mulia R., Dupraz C., 2006. Unusual fine root distributions of two deciduous tree species in southern France : What consequences for modelling of tree root dynamics ? *Plant and Soil* 281, 71–85.
- Mulia R., Dupraz C., van Noordwijk M., 2010. Reconciling root plasticity and architectural ground rules in tree root growth models with voxel automata. *Plant and Soil* 337, 77–92.
- Muthuri C. W., Ong C. K., Black C. R., Mati B. M., Ngumi V. W., Van Noordwijk M., 2004. Modelling the effects of leafing phenology on growth and water use by selected agroforestry tree species in semi-arid Kenya. *Land Use and Water Resources Research* 4, 1–11.
- Nair P. K. R., 2007. The coming age of agroforestry. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 87, 1613–1619.
- Nair P. K. R., Kumar B. M., Nair V. D., 2009. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 172, 10–23.

- Nijland G. O., Schouls J., Goudriaan J., 2008. Integrating the production functions of Liebig, Michaelis-Menten, Mitscherlich and Liebscher into one system dynamics model. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences* 55, 199–224.
- Niklas K. J., 1995. Size-dependent allometry of tree height, diameter and trunk-taper. *Annals of Botany* 75, 217–227.
- Nilson T., 1971. A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands. *Agricultural Meteorology* 8, 25–38.
- Nilson T., 1999. Inversion of gap frequency data in forest stands. *Agricultural and Forest Meteorology* 98-99, 43–448.
- Norman J. M., Welles J. M., 1983. Radiative transfer in an array of canopies. *Agronomy Journal* 75, 481–488.
- Nuberg I. K., 1998. Effect of shelter on temperate crops : a review to define research for Australian conditions. *Agroforestry Systems* 41, 3–34.
- Oelbermann M., Paul Voroney R., Gordon A. M., 2004. Carbon sequestration in tropical and temperate agroforestry systems : a review with examples from Costa Rica and southern Canada. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 104, 359–377.
- Ong C. K., 1995. The 'dark side' of intercropping : manipulation of soil resources. In : Sinoquet H., Cruz P. (Eds.), *Ecophysiology of tropical intercropping*. INRA editions, pp. 45–65.
- Ong C. K., Black C. R., Marshall F. M., Corlett J. E., 1996. Principles of resource capture and utilization of light and water. In : Ong C. K., Huxley P. (Eds.), *Tree-crop interactions : a physiological approach*. CAB International.
- Ong C. K., Huxley P., 1996. *Tree-crop interactions : a physiological approach*. Tree-crop interactions : a physiological approach. CAB International, Wallingford.
- Ong C. K., Kho R. M., Radersma S., 2004. Ecological interactions in multispecies agroecosystems : concepts and rules. In : van Noordwijk M., Cadisch G., Ong C. (Eds.), *Below-ground interactions in tropical agroecosystems : concepts and models with multiple plant components*. CABI Publishing, Wallingford., pp. 1–15.
- Oreske N., 2003. The role of quantitative models in science. In : Canham C., Cole J., Lauenroth W. (Eds.), *Models in Ecosystem Science*. Princeton University Press, Princeton, NJ, Ch. 2, pp. 13–31.
- Oreskes N., Belitz K., 2001. Philosophical issues in model assessment. In : Anderson M., Bates P. (Eds.), *Model Validation : Perspectives in Hydrological Science*. John Wiley & Sons, New York, pp. 23–41.
- Oyarzun R. A., Stöckle C. O., Whiting M. D., 2007. A simple approach to modeling radiation interception by fruit-tree orchards. *Agricultural and Forest Meteorology* 142, 12–24.

BIBLIOGRAPHIE

- Palma J. H. N., Graves A. R., Bunce R. G. H., Burgess P. J., Filippi R. d., Keesman K. J., Keulen H. v., Liagre F., Mayus M., Moreno G., Reisner Y., Herzog F., 2007. Modeling environmental benefits of silvoarable agroforestry in Europe. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 119, 320–334.
- Parveaud C. E., Chopard J., Dauzat J., Courbaud B., Auclair D., 2008. Modelling foliage characteristics in 3D tree crowns : influence on light interception and leaf irradiance. *Trees-Structure And Function* 22, 87–104.
- Peck S. L., 2004. Simulation as experiment : a philosophical reassessment for biological modeling. *Trends in Ecology & Evolution* 19, 530–534.
- Peichl M., Thevathasan N., Gordon A., Huss J., Abohassan R., 2006. Carbon sequestration potentials in temperate tree-based intercropping systems, Southern Ontario, Canada. *Agroforestry Systems* 66, 243–257.
- Pereira A., Green S., Villa Nova N., 2006. Penman-Monteith reference evapotranspiration adapted to estimate irrigated tree transpiration. *Agricultural Water Management* 83, 153–161.
- Phattaralerphong J., Sathornkich J., Sinoquet H., 2006. A photographic gap fraction method for estimating leaf area of isolated trees : assessment with 3D digitized plants. *Tree Physiology* 26, 1123–1136.
- Poupa J. C., 2003. CSTICS : couplage informatique de STICS avec des modèle extrinsèques. In : Séminaire STICS, Arles.
- Qi X., Mize C., Batchelor W., Takle E., Litvina I., 2001. SBELTS : A model of soybean production under tree shelter. *Agroforestry Systems* 52, 53–61.
- Quinkenstein A., Wöllecke J., Böhm C., Grünewald H., Freese D., Schneider B. U., Hüttl R. F., 2009. Ecological benefits of the alley cropping agroforestry system in sensitive regions of Europe. *Environmental Science & Policy* 12, 1112 – 1121.
- Rao M. R., Nair P. K. R., Ong C. K., 1998. Biophysical interactions in tropical agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 38, 30–50.
- Reisner Y., Filippi R. d., Herzog F., Palma J., 2007. Target regions for silvoarable agroforestry in Europe. *Ecological Engineering* 29, 401–418.
- Richter G. M., Acutis M., Trevisiol P., Latiri K., Confalonieri R., 2010. Sensitivity analysis for a complex crop model applied to durum wheat in the mediterranean. *European Journal of Agronomy* 32, 127–136.
- Ritchie J. T., Otter S., 1985. Description and performance of CERES-Wheat : A user-oriented wheat yield model. In : In ARS Wheat yield project. ARS-38 Natl Tech Info Serv, Springfield, VA., pp. 159–175.

- Rivest D., Cogliastro A., Bradley R., Olivier A., 2010a. Intercropping hybrid poplar with soybean increases soil microbial biomass, mineral n supply and tree growth. *Agroforestry Systems* 80, 33–40.
- Rivest D., Oliver A., Gordon A., 2010b. Les systèmes de cultures intercalaires avec arbres feuillus : jumeler production de bois et production agricole tout en protégeant l'environnement. Tech. rep., Direction générale des services agroenvironnementaux. Agriculture et Agroalimentaire Canada.
- Robinson A. P., Froese R. E., 2004. Model validation using equivalence tests. *Ecological Modelling* 176, 349–358.
- Roupsard O., Dauzat J., Nouvellon Y., Deveau A., Feintrenie L., Saint-André L., Mialet-Serra I., Braconnier S., Bonnefond J., Berbigier P., Epron D., Jourdan C., Navarro M., Bouillet J., 2008. Cross-validating sun-shade and 3D models of light absorption by a tree-crop canopy. *Agricultural and Forest Meteorology* 148, 549–564.
- Roupsard O., Ferhi A., Granier A., Pallo F., Depommier D., Mallet B., Joly H. I., Dreyer E., 1999. Reverse phenology and dry-season water uptake by *Faidherbia albida* (Del.) A. Chev. in an agroforestry parkland of Sudanese west Africa. *Functional Ecology* 13, 460–472.
- Ruget F., Brisson N., Delecolle R., Faivre R., 2002. Sensitivity analysis of a crop simulation model, STICS, in order to choose the main parameters to be estimated. *Agronomie* 22, 133–158.
- Saltelli, A. C. K., Scott E. (Eds.), 2000. *Sensitivity Analysis*. Wiley, Chichester.
- Sánchez J., 2008. Análisis ecofisiológico y molecular del impacto de la mejora genética del trigo duro en ambiente mediterráneo sobre la formación del rendimiento y la acumulación de aminoácidos y proteínas. Ph.D. thesis, Universidad de Granada.
- Santos Martin F., van Noordwijk M., 2009. Trade-offs analysis for possible timber-based agroforestry scenarios using native trees in the Philippines. *Agroforestry Systems* 76, 555–567.
- Schroth G., 1998. A review of belowground interactions in agroforestry, focussing on mechanisms and management options. *Agroforestry Systems* 43, 5–34.
- Semenov M. A., Martre P., Jamieson P. D., 2009. Quantifying effects of simple wheat traits on yield in water-limited environments using a modelling approach. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 1095–1104.
- Shibu M. E., Leffelaar P. A., van Keulen H., Aggarwal P. K., 2010. LINTUL3, a simulation model for nitrogen-limited situations : Application to rice. *European Journal of Agronomy* 32, 255–271.
- Shili-Touzi I., Tourdonnet S. D., Launay M., Dore T., 2010. Does intercropping winter wheat (*Triticum aestivum*) with red fescue (*Festuca rubra*) as a cover crop improve agronomic and environmental performance? a modeling approach. *Field Crops Research* 116, 218–229.

- Sinoquet H., Le Roux X., Adam B., Ameglio T., Daudet F. A., 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 & Environment* 24, 395–406.
- Sinoquet H., Sonohat G., Phattaralerphong J., Godin C., 2005. Foliage randomness and light interception in 3-D digitized trees : an analysis from multiscale discretization of the canopy. *Plant, Cell and Environment* 28, 1158–1170.
- Sinoquet H., Stephen J., Sonohat G., Lauri P., Monney P., 2007. Simple equations to estimate light interception by isolated trees from canopy structure features : assessments with three-dimensional digitized apple-trees. *New Phytologist* 175, 94–106.
- Skomarkova M., Vaganov E., Mund M., Knohl A., Linke P., Boerner A., Schulze E.-D., 2006. Inter-annual and seasonal variability of radial growth, wood density and carbon isotope ratios in tree rings of beech (*Fagus sylvatica*) growing in Germany and Italy. *Trees-Structure and Function* 20, 571–586.
- Smith M., Burgess S. S. O., Suprayogo D., Lusiana B. W., 2004. Uptake, partitioning and redistribution of water by roots in mixed-species agroecosystems. In : van Noordwijk M., Cadisch G., K. O. C. (Eds.), *Below-ground interactions in tropical agroecosystems : concepts and models with multiple plant components*. pp. 157–170.
- Soler C. M. T., Sentelhas P. C., Hoogenboom G., 2007. Application of the CSM-CERES-Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. *European Journal of Agronomy* 27, 165–177.
- Stadt K. J., Lieffers V. J., 2000. MIXLIGHT : a flexible light transmission model for mixed-species forest stands. *Agricultural and Forest Meteorology* 102, 235–252.
- Stöckle C. O., Donatelli M., Nelson R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy* 18, 289–307.
- Steduto P., Hsiao T. C., Raes D., Fereres E., 2009. AquaCrop-the FAO crop model to simulate yield response to water : I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal* 101, 426–437.
- Stuckens J., Somers B., Delalieux S., Verstraeten W. W., Coppin P., 2009. The impact of common assumptions on canopy radiative transfer simulations : A case study in citrus orchards. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 110, 1–21.
- Swamy S. L., Mishra A., Puri S., 2006. Comparison of growth, biomass and nutrient distribution in five promising clones of *Populus deltoides* under an agrisilviculture system. *Bioresource Technology* 97, 57–68.
- Talbot G., Dupraz C., in press. Simple models for light competition within agroforestry discontinuous tree stands : are leaf clumpiness and light interception by woody parts relevant factors? *Agroforestry Systems*.

- Talbot G., Roux S., Dupraz C., Graves A., Marrou H., Wery J., Submitted. Relative yield decomposition : a generic method for understanding the behaviour of complex crop models. *Environmental Modelling & Software*.
- Thanisawanyangkura S., Sinoquet H., Rivet P., Crétenet P., Jallas E., 1997. Leaf orientation and sunlit leaf area distribution in cotton. *Agricultural and Forest Meteorology* 86, 1–15.
- Thevathasan N. V., Gordon A. M., 2004. Ecology of tree intercropping systems in the north temperate region : Experiences from southern Ontario, Canada. *Agrofor. Syst.* 61, 257–268.
- Tilman D., Lehman C. L., Thomson K. T., 1997. Plant diversity and ecosystem productivity : theoretical consideration. *Proceedings of the national academy of sciences* 94, 1857–1861.
- van der Werf W., Keesman K., Burgess P., Graves A., Pilbeam D., Incoll L. D., Metselaar K., Mayus M., Stappers R., van Keulen H., Palma J., Dupraz C., 2007. Yield-SAFE : a parameter-sparse, process-based dynamic model for predicting resource capture, growth, and production in agroforestry systems. *Ecological Engineering* 29, 419–433.
- Van Ittersum M. K., Leffelaar P. A., Van Keulen H., Kropff M. J., Bastiaans L., Goudriaan J., 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. *European Journal of Agronomy* 18, 201–234.
- Van Nes E. H., Scheffer M., 2005. A strategy to improve the contribution of complex simulation models to ecological theory. *Ecological Modelling* 185, 153–164.
- van Noordwijk M., 1996. Models as part of agroforestry research design. *AgriVita Journal on Agricultural Sciences* 19, 192–197.
- van Noordwijk M., Lawson G., Soumaré A., Groot J., Hairiah K., 1996. Root distribution of trees and crops : competition and/or complementarity. In : Ong C., Huxley P. (Eds.), *Tree-crop interaction*. CAB International, Wallingford, UK, pp. 319–364.
- Van Noordwijk M., Lusiana B., 1998. WaNuLCAS, a model of water, nutrient and light capture in agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 43, 217–242.
- van Noordwijk M., Rahayu S., Williams S. E., Hairiah K., Khasanah N., Schroth G., 2004. Crop and tree root-system dynamics. In : *Below-ground interactions in tropical agroecosystems : concepts and models with multiple plant components*. pp. 83–107.
- Van Sambeek J. W., Garrett H. E., 2004. Ground cover management in walnut and other hardwood plantings. In : Michler C. H., Pijut P. M., Van Sambeek J. W., Coggeshall M. V., Seifert J., Woeste K., Overton R., Ponder F. (Eds.), *Black walnut in a new century, proceedings of the 6th Walnut Council research symposium ; 2004 July 25-28 ; Lafayette, IN*. Gen. Tech. Rep. NC-243. St. Paul, 188 p. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, North Central Research Station.
- Vandermeer J., 1989. *The ecology of intercropping*. Cambridge University Press.

BIBLIOGRAPHIE

- Vandermeer J., 1998. Maximizing crop yield in alley crops. *Agroforestry systems* 40, 199–206.
- Varenne F., 2003. La simulation conçue comme expérience concrète. In : *Le statut épistémologique de la simulation, actes des 10èmes journées de Rochebrune*.
- Vertessy R. A., Hatton T. J., Reece P., O’Sullivan S. K., Benyon R. G., 1997. Estimating stand water use of large mountain ash trees and validation of the sap flow measurement technique. *Tree Physiology* 17, 747–756.
- Villalobos F. J., Orgaz F., Mateos L., 1995. Non-destructive measurement of leaf area in olive (*Olea europaea* L.) trees using a gap inversion method. *Agricultural and Forest Meteorology* 73, 29–42.
- Vos J., Evers J. B., Buck-Sorlin G. H., Andrieu B., Chelle M., de Visser P. H. B., 2010. Functional-structural plant modelling : a new versatile tool in crop science. *Journal of Experimental Botany* 61, 2101–2115.
- Walker A., Mutuo P., van Noordwijk M., Albrecht A., Cadisch G., 2007. Modelling of planted legume fallows in Western Kenya using WaNuLCAS. (I) Model calibration and validation. *Agroforestry Systems* 70, 197–209.
- Wallace J. S., 1996. The water balance of mixed tree-crop systems. In : Ong C. K., Huxley P. (Eds.), *Tree-Crop Interactions : A Physiological Approach*. CAB International, Wallingford, UK, pp. 189–233.
- Wang Y. P., Jarvis P. G., 1990. Description and validation of an array model : MAESTRO. *Agricultural and Forest Meteorology* 51, 257–280.
- Wang Z., Yin Y., He M., Zhang Y., Lu S., Li Q., Shi S., 2003. Allocation of photosynthates and grain growth of two wheat cultivars with different potential grain growth in response to pre- and post-anthesis shading. *Journal of Agronomy and Crop Science* 189, 280–285.
- Wells C. E., Eissenstat D. M., 2001. Marked differences in survivorship among apple roots of different diameters. *Ecology* 82, 882–892.
- West G. B., Brown J. H., Enquist B. J., 1999. A general model for the structure and allometry of plant vascular systems. *Nature* 400, 664–667.
- Williams J. R., Jones C. A., Kiniry J. R., Spanel D. A., 1989. The EPIC crop growth model. *Transactions of the ASAE (USA)* 32, 497–511.
- Williams P., Gordon A., 1995. Microclimate and soil moisture effects of three intercrops on the rows of a newly-planted intercropped plantation. *Agroforestry Systems* 29, 285–302.
- WRB I., 2006. World reference base for soil resources 2006. 2nd edition. World soil resources reports No. 103. Tech. rep., FAO, Rome.
- Wösten J. H. M., Lilly A., Nemes A., Le Bas C., 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* 90, 169–185.

- Yin R., He Q., 1997. The spatial and temporal effects of paulownia intercropping : The case of northern China. *Agroforestry Systems* 37, 91–109.
- Yunying W., Dalmacio R., 1991. Energy balance, water use and wheat yield in a paulownia-wheat intercropping field. In : Zhu Z., Mantang, Cai M., Wang S., Jiang Y. (Eds.), *Agroforestry systems in China*. Chinese Academy of Forestry and Intern. Canada Development Research Center.
- Zamora D., Jose S., Jones J., Cropper W., 2009. Modeling cotton production response to shading in a pecan alleycropping system using CROPGRO. *Agroforestry Systems* 76, 423–435.
- Zhao W., Qualls R., Berliner P., 2003. Modeling of the short wave radiation distribution in an agroforestry system. *Agricultural and Forest Meteorology* 118, 185–206.
- Zhu Z., Cail M., Wang S., Jiang Y., 1991. *Agroforestry systems in China*. Chinese Academy of Forestry and Intern. Canada Development Research Center, Singapour.