THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE MONTPELLIER SUPAGRO

En Ecologie Fonctionnelle et Sciences Agronomiques

École doctorale GAIA

Portée par

Unité de recherche UMR ABSys

La résilience des systèmes agroforestiers face au changement climatique: analyse de la réponse de cultures annuelles face à la sécheresse dans un système à base de noyer sous climat méditerranéen

Présentée par Guillaume BLANCHET

Le 28 Juin 2021

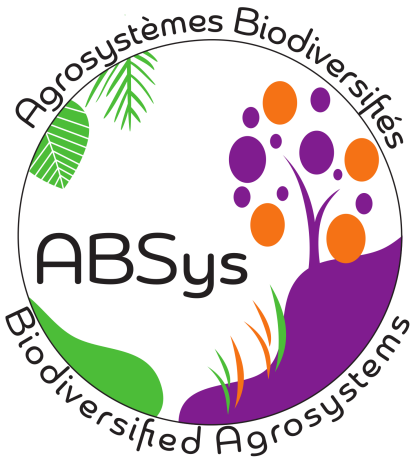
Sous la direction de Grégoire VINCENT
et le co-encadrement de Christian DUPRAZ et de Marie GOSME

Devant le jury composé de

Karine GALLARDO, Directrice de recherche, INRAE, France	Présidente du jury
Marie-Odile BANCAL, Maitre de conférences, AgroParisTech, France	Rapporteure
David RIVEST, Professeur, Université du Québec en Outaouais, Canada	Rapporteur
Thierry AMEGLIO, Directeur de recherche, INRAE, France	Examinateur
Olivier TURC, Chargé de recherche, INRAE, France	Examinateur
Grégoire VINCENT, Chargé de recherche, IRD, France	Directeur de thèse
Christian DUPRAZ, Ingénieur de recherche, INRAE, France	Invité
Marie GOSME, Chargée de recherche, INRAE, France	Invitée

UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

Montpellier SupAgro


Agrosystèmes Biodiversifiés
ABSys
Biodiversified Agrosystems

INRAE

REMERCIEMENTS

À l'image du Lez après un bel épisode méditerranéen, cette thèse ne fut pas un long fleuve tranquille. Mais ce fut une belle aventure ! Tout cela fut possible grâce à :

A Grégoire Vincent, pour avoir accepté de diriger cette thèse, d'avoir veillé à ce que la trajectoire de navigation permette d'arriver à bon port et d'avoir assuré la relecture globale de ce manuscrit. Merci !

A Christian Dupraz, pour m'avoir recruté alors que je n'étais qu'un lointain vagabond à bicyclette. Bien que tumultueuse, l'épopée sous les voiles du "*plus grand dispositif d'exclusion de pluie du monde*" installé jusqu'alors en agroforesterie restera inoubliable. Ta persévérance et ton audace dans les tourbillons de la recherche en agroforesterie sont stupéfiants à bien des égards ! Merci pour ces aventures scientifiques sous la pluie.

A Marie Gosme, pour ton soutien et tes encouragements constants pendant cette thèse, des débuts difficiles sur le terrain à la rédaction du manuscrit, en passant par la reconception totale du design expérimental et d'une nouvelle flotte de dispositifs. Merci d'avoir assumé le rôle de "discutante" en chef, alors que j'étais (parfois) pétri d'états d'âme, ou que mon esprit se perdait dans des ramifications d'idées qui nécessitaient un bon élagage.

A David Rivest et à Marie-Odile Bancal pour avoir accepté la responsabilité d'être les rapporteurs de ce travail de thèse. Merci également à Thierry Améglio, Karine Gallardo et Olivier Turc d'avoir accepté de participer au jury de thèse. Merci à tous les membres du comité de thèse pour ces conseils et ces retours annuels, avec un remerciement particulier à Josiane Seghieri pour cette bienveillance affichée dès le départ.

A Jean-Francois Bourdoncle (*aka* Jeff) et à Alain Sellier (*aka* MÖA), pour m'avoir appris les rudiments de la construction navale, quelques noeuds bien pratiques, ainsi que pour avoir ramé avec moi sur le terrain ! Vous êtes mes "*chochottes*" préférées. Merci à vous deux ! Merci également à Lydie Dufour pour la collecte et le partage des données à Restinclières, ainsi que pour l'initiation à la communication avec une CR1000. Vous êtes les artisans d'une bonne partie des expérimentations à Restinclières et c'est précieux ! Une mention au reste de l'équipe technique de l'ex-UMR SYSTEM, Yvan, Clément et Bénédicte. Un remerciement également à Monsieur Breton, pour la mise en culture des parcelles pendant ces 2 années malgré les contraintes expérimentales.

A tous ceux qui ont accepté de monter à bord avec moi pour leur stage sans connaitre les conditions de navigation : Pablo, Mattia et Valentin. Sans oublier tous les coups de pouce des autres stagiaires de l'unité entre 2017 et 2019.

A Karim Barkaoui, pour ces brises salvatrices lorsqu'il fait pétole et qu'il s'agit d'écrire un premier chapitre ainsi que pour ces discussions autour de "la" sécheresse, de la résilience et des expérimentations de manipulation du régime des pluies. Merci aussi pour tes suggestions et encouragements pour analyser les résultats en utilisant le gradient d'ombrage en tant que covariable, plutôt que la "traditionnelle" approche d'une distance/orientation à l'arbre.

A Aurélie Metay et à Eric Justes, pour m'avoir offert un peu de votre temps afin de m'aider à préciser les questions et les hypo-

thèses de recherche ou encore la méthodologie afin de structurer tout ce travail au fil de l'eau. Ce furent là des bases d'esquimautage fort pratique. Un remerciement supplémentaire à Eric, pour avoir négocié auprès de ses anciens collègues de l'UMR AGIR, des capteurs PAR afin de faire des mesures un minimum digne de ce nom.

A tous les explorateurs post-docs et contractuels qui s'aventurent dans les courants tortueux de Hi-sAFe : Isabelle Lecomte, Francesco Reyes, Kevin Wolz, Thomas Gendron. Même si je ne l'ai pas beaucoup utilisé ce modèle au final, c'est un outil de réflexion formidable.

Aux moussaillons-thésards avec qui j'ai pu échangé sur tous les trucs et astuces de la navigation doctorale : Léo, Sébastien, Daniel, Benjamin, Stolian, Audrey, Esther, Martin et Fida. Bon vent aux nouvelles recrues de la flotte ABSys : Nicolas, Laeticia, Lea et tout ceux que je n'ai finalement pas rencontré pour cause de pandémie mondiale. Une mention spécifique à Léo pour le partage de ce template LaTeX bien fichu qui traine au sein de la Coco Fanfare Club.

A Delphine Mézière, pour son soutien, ses conseils, sa bienveillance et les nombreuses discussions d'ouverture autour du RMT AgroforesterieS et les sciences participatives. A Juliette Grimaldi, pour ces discussions sur le microclimat et ces leçons de combativité.

A Carole, Viviane et Sandrine qui facilitent ou prennent en charge un bon nombre de formalités au niveau des écluses administratives.

A l'ensemble de l'UMR ABSys pour tout ces travaux et ces discussions scientifiques qui balayent un large horizon scientifique.

Aux services météorologiques dans leur globalité, sans qui toute cette thèse serait tombé à l'eau. Vos incertitudes sont de grandes leçons quant à la fascinante complexité du climat et au sentiment de vulnérabilité que les agriculteurs peuvent éprouver au quotidien.

A tout ceux qui m'ont prêté bien des éléments nécessaires pour la grande bricole des dispositifs et de l'instrumentation. On mentionnera Pascal Chapon et Florence Volaire, Benoit Gleizes et Pierre Perrin, Olivier Turc et les caves coopératives oléicoles de Pignan et Frontignan.

A ceux qui m'ont aidé à assembler les premiers prototypes des petits dispositifs, un dimanche matin juste avant l'orage : Louise et Julien. Je vous dois toujours un restau, ce n'est pas oublié.

A tout ceux avec qui j'ai amorcé des discussions lors d'une (ou deux) réunion(s) et avec qui je n'ai pas réussi à poursuivre la discussion jusqu'au bout, la faute au sentiment d'être parfois dépassé. Merci à Annette Bérard, Rémi Vézy, Karen Lammoglia et à Lydie Guilioni.

A SY-boulette, formidable calculette et machine à écrire des temps modernes sans qui cette thèse n'aurait pas été possible. Adieu SY-boulette !

Aux membres du groupe Beerstem, parce que partager de temps en temps une pinte d'écume est fort agréable et nécessaire.

A ceux qui m'ont aidé alors que le navire prenait l'eau, qu'il fallait me supporter ou me renflouer. Une mention de la plus haute distinction à mes colocs, Yohan, Elsa, Marie, Marion et tous ceux qui ont gravité autour de la collocation du Tilleul et du Figuier. Vous êtes FOR-MIDABLES.

Aux anciens collègues de l'Agroscope, pour avoir éveillé mon intérêt pour l'agronomie.

A la constellation d'amis qui a contribué à me guider lors de cette traversée. Vous étiez tous

là pour me rappeler de respirer et relativiser. Vous êtes également une grande source d'inspiration. On distinguera :

- mes amis rencontrés à travers les réseaux normands, suisses et languedociens maintenant. Une pensée pour Adrien Gaudard, un ami bien inspirant, libre coureur des montagnes, disparu brusquement au cours d'une de ses balades en quête de liberté.
- les membres de Cinécyclo, parce que pédaler est une source d'énergie pour bien plus de raisons qu'on ne le pense et qui permet de (re)trouver un peu sens lorsqu'on en manque
- les clowns de Zépétra, pour ces franches rigolades qui m'ont reboosté lors de la deuxième année
- les collectifs Cambium et Kibalbalougui, pour tout ce brassage d'idées autour d'un avenir humain, collectif et solidaire

A ma famille, pour m'avoir tous propulsé là où je suis maintenant. Vous êtes au final les armateurs historiques de cette aventure. Une mention plus spécifique dans le cadre de ce travail pour les contributions de :

- Bernard, mon papa, professeur "Jami" personnel, qui m'explique avec patience depuis fort longtemps des bases en électroniques bien pratiques pour gérer la pelotte de capteurs déployés sur le terrain
- Raphaël, mon petit frère, pour la mise en plan des petits dispositifs - beaucoup de travail pour un simple dessin... merci de m'accompagner dans ce genre de lubie.

A Louise pour avoir accepté de voguer à proximité pendant toute cette période, pour toute la joie que tu apportes et pour toutes ces réflexions que tu nourris. Merci pour ce bout de chemin et pourvu qu'il continue encore un moment.

A Chrystel, Francis et Cédric pour ces escales salvatrices dans les châtaigneraies du Carroux, les hêtraies du Chablais ou dans les sapinières du Graitery

La liste est déjà longue et j'en oublie possiblement encore... bref un grand merci à tous ! Grâce à vous tous j'ai le sentiment d'avoir amélioré ma ligne de flottaison et mes aptitudes pour la navigation malgré la tumulte du flot. C'est probablement le plus important au final.

Un dernier mot pour conclure. J'entends parfois dire que les sciences agronomique nécessitent de faire un peu de cuisine entre différentes disciplines. A la croisée d'un vaste éventail de disciplines, l'étude des systèmes agroforestiers s'apparenterait donc à une "soupe". Si on y réfléchit un peu, c'est nourrissant à bien des égards, cela peut aider à faire face à des périodes de disette et pour autant, on continue toujours de se casser les dents lorsque l'on cherche à comprendre tout ce qu'il s'y passe. Tout cela semble bien paradoxal... Peut être faut-il lui laisser le temps de mijoter un peu ?

En espérant que ce potage puisse alimenter quelques réflexions chez vous aussi,

Guillaume

AVANT-PROPOS

Ce travail de thèse a été réalisée de Octobre 2017 à Juin 2021 au sein de l'UMR ABSys (Université de Montpellier, CIHEAM-IAMM, CIRAD, INRAE, Institut Agro) à Montpellier. Ce travail a été financé la Fondation de France et les expérimentations de terrain ont eu lieu dans le cadre du projet PIRAT (*Programme Intégré de Recherches en Agroforesterie à Restinclières*) financé par le conseil départemental de l'Hérault.

Cette thèse a été dirigée par Grégoire Vincent (UMR AMAP) et co-encadrée par Marie Gosme et Christian Dupraz (UMR ABSys). Elle a également bénéficié du suivi et des conseils avisés de Josiane Seghieri, Vincent Bustillo, Patrick Jagoret, Jean-Paul Laclau, Pierre-Eric Lauri et Jean-Marc Limousin au cours de trois comités de suivi.

Publications

Blanchet G., Barkaoui, K., Bradley, M., Dupraz, C., Gosme, M. (2021). *Interactions between drought and shade on the productivity of winter pea grown in a 25-year-old walnut-based alley cropping system.* Journal of Agronomy and Crop Science. doi: 10.1111/jac.12488 <**Chapitre 2**>

Communications dans des congrès

Blanchet G., Gosme M., Dufour L., Bourdoncle J.-F., Sellier A., Dupraz C. (2018). *Will cereal crops better cope with climate change in agroforestry ? A first assessment with a rain reduction experiment in a mature alley cropping system.* Communication orale au XVe Congrès de la Société Européenne d'Agronomie (ESA). Genève, Suisse, 27-31 Août 2018.

Blanchet G., Gosme M., Dufour L., Bourdoncle J.-F., Sellier A., Dupraz C. (2019). *Drought experiments in alley cropping systems. From concepts to field reality : lessons learnt at Restinclières Farm Estate, France.* Poster présenté au IVe Congrès Mondial d'Agroforesterie. Montpellier, France, 20-22 Mai 2019. Présentation orale des expérimentations d'exclusion de pluie en place lors de la journée de visite de terrain au domaine de Restinclières.

Blanchet G., Gosme M., Dufour L., Bourdoncle J.-F., Sellier A., Vincent G., Dupraz C. (2021). *Drought-shade interactions on winter pea induce carbon source-sink mechanisms that may lead to higher yield stability in a mature alley cropping system.* Présentation courte (et virtuelle) dans le cadre du Ve Congrès Européen d'Agroforesterie. Nuoro, Italie, 17-19 Mai 2021.

Activités d'encadrement

Encadrement du stage de fin d'études (L3 - Biologie fonctionnelle des plantes, Univ. Montpellier) de **Pablo Affortit** de Mars à Août 2018, ayant donné lieu à la rédaction d'un rapport de fin d'études : "Caractérisation de la réponse d'un système agroforestier méditerranéen vis-à-vis des conditions de stress hydrique dans un contexte de changement climatique".

Encadrement du stage de césure (M1-M2 - Agricultural Sciences in the Tropics and Subtropics - Univ. Hohenheim) de **Mattia Bradley** de Mars à Août 2019, ayant donné lieu à la rédaction d'un rapport : "Drought stress characterization of a winter pea crop in a Mediterranean alley cropping system".

Activités d'enseignement

Deux interventions ont eu lieu auprès des étudiants de SupAgro Montpellier dans le cadre de :

1. UE2 "Sciences Agronomiques" des licences professionnelles PAIEE (Productions Agricoles Intégrées et Enjeux Environnementaux), sous la responsabilité de Rémi Gaudin (Janvier 2020). Présentation de 2 heures sur la mise en place d'un suivi hydrique à la parcelle d'un système agroforestier
2. module PLURI (Fonctionnement des Ecosystèmes Cultivés Plurispécifiques) au sein du cursus ingénieur PVD (Production Végétale Durable), sous la responsabilité de Léo Garcia (Octobre 2020). Présentation générale de l'agroforesterie tempérée et des concepts associés lors d'une intervention avec Delphine Mézière et Pierre-Eric Lauri.

Formations suivies

International PhD Course on Agrosystems Modelling - SupAgro, Montpellier - Décembre 2017 (5 jours)

Introduction aux méthodes mathématiques et statistiques pour les modèles dynamiques en agriculture - ACTA, Montpellier - Juin 2018 (3 jours)

PlantDrought - Ecole d'été pluridisciplinaire pour mieux comprendre les concepts et méthodes d'analyse de l'adaptation des plantes à la sécheresse - SupAgro, Montpellier - Juin 2019 (5 jours)

Ethique de la recherche - MOOC - Automne 2018 (20 heures)

Recherche reproductible : principes méthodologiques pour une science transparente - MOOC - Automne 2018 (20 heures)

Table des matières

REMERCIEMENTS 1
AVANT-PROPOS 4
LISTE DES FIGURES 11
LISTE DES TABLEAUX 16

I INTRODUCTION GÉNÉRALE **21**
1 Des systèmes agricoles sous la menace du changement climatique 24
1.1 Un lien étroit entre changement climatique, production agricole et sociétés humaines 24
1.2 Modélisation du changement climatique 27
1.3 Enjeux pour les systèmes agricoles autour du bassin méditerranéen 32
2 Comment adapter les systèmes agricoles au changement climatique ? 35
2.1 La notion de résilience appliquée aux agroécosystèmes 35
2.2 Les leviers d'adaptation des systèmes agricoles 37
2.3 L'agroforesterie, une pratique agricole pertinente pour s'adapter au changement climatique ? 39
3 L'agroforesterie, principes écologiques pour l'étude de la productivité 42
3.1 Productivité d'un système agroforestier intraparcellaire 42
3.2 Les interactions arbres-culture, un équilibre dynamique et contextuel . . . 43
3.3 Réponses écophysiologiques de la culture intercalaire agroforesterie . . . 45
3.4 Incertitudes concernant l'agroforesterie en tant que levier d'adaptation au changement climatique 47
4 Problématique et questions de recherche 48

II MATÉRIELS ET MÉTHODES **51**
1 Site expérimental 54
1.1 Domaine de Restinclières - plateforme historique de la recherche agroforestière en France 54
1.2 Climat 54
1.3 La parcelle A2 56
2 Dispositif d'exclusion de pluie et design expérimental 58

2.1 Choix du concept technique pour les dispositifs d'exclusion de pluie . . . 58
2.2 Design expérimental . . . 60
2.3 Choix du scénario d'exclusion de pluie . . . 65
2.4 Prise en compte des prévisions météorologiques . . . 66
2.5 Aspects de gestion supplémentaires . . . 67
3 Caractérisation des conditions de culture en contexte agroforestier . . . 67
3.1 Caractérisation des précipitations . . . 67
3.2 Caractérisation de l'environnement lumineux . . . 68
3.3 Caractérisation du sol . . . 72
3.4 Caractérisation du microclimat . . . 74
4 Suivi de la culture et de son itinéraire technique . . . 75
4.1 Le pois d'hiver comme cas d'étude . . . 75
4.2 Itinéraire technique . . . 75
4.3 Suivi dynamique de la culture . . . 76
4.4 Évaluation du bilan radiatif solaire à l'échelle du couvert . . . 79
4.5 Mesure du rendement et de ses composantes . . . 80
4.6 Indicateurs de stress physiologique retenus . . . 81
5 Synthèse des indicateurs sélectionnés pour les chapitres et la discussion . . . 82

III RÉSULTATS **85**

1 L'agroforesterie peut-elle permettre de s'adapter à des épisodes de sécheresse ? Apports des expérimentations de manipulation du régime de pluie 87
1 Introduction . . . 87
2 Partie I - Manipuler le régime des pluies au sein de systèmes agricoles et forestiers - état de l'art . . . 90
2.1 Choisir un scénario expérimental de manipulation de régime de pluie . . . 90
2.2 Typologie des dispositifs expérimentaux existants . . . 93
2.3 Limites et contraintes expérimentales au sein des systèmes agricoles et forestiers . . . 96
3 Partie II - Manipuler le régime des pluies au sein des systèmes agroforestiers . . . 99
3.1 Spécificités des systèmes agroforestiers et conséquences sur la mise en place d'expérimentation de manipulation du régime des pluies . . . 99
3.2 Etude de cas - Dispositifs d'exclusion à Restinclières . . . 104
4 Discussion . . . 110

2 Influence de l'agroforesterie sur l'élaboration du rendement d'une culture de pois en cas de sécheresse printanière 113
1 Introduction . . . 115
2 Materials and methods . . . 117
2.1 Study site . . . 117

2.2 Experimental design . . . 118
2.3 Rainout shelters design and operation . . . 119
2.4 Climate context and rainfall manipulation scenario . . . 120
2.5 Environmental monitoring . . . 120
2.6 Crop growth monitoring . . . 121
2.7 Data analysis . . . 122
3 Results . . . 123
3.1 Reduction of light and soil water availability under large walnut trees . . . 123
3.2 Effects of rainfall regimes on soil water content . . . 125
3.3 Impacts of light conditions and rainfall regime on winter pea . . . 125
3.4 Linkages between plant biomass allocation and crop yield . . . 127
4 Discussion . . . 129
4.1 Large walnut trees strongly reduce light availability but the impacts on soil water remain limited . . . 129
4.2 Spring drought blocked the vegetative development of winter pea while tree shade only had a minor impact . . . 130
4.3 The negative effect of drought on pea yield faded with shade . . . 131
5 Conclusion . . . 132

3 Impact d'une sécheresse printanière sur la biomasse d'une culture de pois en agroforesterie et effets microclimatiques 133
1 Introduction . . . 135
2 Materials and methods . . . 137
2.1 Experimental site and rainfall manipulation experiment . . . 137
2.2 Crop development monitoring . . . 138
2.3 Characterization of plant water stress . . . 139
2.4 PAR radiation fluxes at the canopy level . . . 139
2.5 Data analysis . . . 140
3 Results . . . 144
3.1 Impact of rainfall regime on soil water availability . . . 144
3.2 Pea biomass . . . 145
3.3 Crop NDVI dynamics . . . 146
3.4 Drought impact on crop radiation budget . . . 147
3.5 Microclimate in AF conditions and pea crop temperature . . . 147
4 Discussion . . . 150
4.1 Stay green effect in AF did not offset drought impact . . . 150
4.2 Tree shade may sustain light interception and improve light use efficiency in case of spring drought . . . 151
4.3 Contrasted effects of understory microclimate on plant stress . . . 152
5 Conclusion . . . 154

IV DISCUSSION GÉNÉRALE **155**
1 Synthèse des résultats 158
2 Discussion des réponses apportées aux hypothèses de travail 160
2.1 Comment faciliter l'étude de la réponse à la sécheresse des cultures annuelles en agroforesterie par manipulation du régime de pluie ? 160
2.2 Renforcer la méthodologie pour mieux comprendre la réponse des cultures en contexte agroforestier ? 162
2.3 Approches réductionnistes et importance du timing des stress pour l'étude du rendement en agroforesterie 164
2.4 Bénéfices contrastés du microclimat en conditions sèches 166
2.5 Un microclimat qui interroge en conditions plus humides 167
2.6 Diversité des processus identifiés et conséquences pour la gestion des systèmes agroforestiers 169
3 Perspectives pour des travaux de modélisation 172
3.1 Objectifs initiaux de la thèse 172
3.2 Présentation succincte du modèle agroforestier Hi-sAFe 173
3.3 Problèmes rencontrés dans le travail de modélisation 173
3.4 Des formalismes à améliorer ? 175
4 Conclusion 181

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES **183**

ANNEXES **219**

Annexe A **Annexe A - Introduction** **221**

Annexe B **Annexe B - Matériels et méthodes** **225**

Annexe C **Annexe C - Chapitre 1** **231**

Annexe D **Annexe D - Chapitre 2** **241**

Annexe E **Annexe E - Chapitre 3** **243**

Annexe F **Annexe F - Discussion** **253**

Table des figures

1 Trajectoires du forçage climatique définies au sein des 4 scénarios RCP ("Representative Common Pathways") et anomalie de la température annuelle moyenne par rapport à la période 1986-2005. 28

2 Anomalie de la température moyenne annuelle à la surface du globe selon les différents scénarios climatiques (période de référence : 1986-2005). 29

3 Scénario du changement des précipitations annuelles moyennes, de la variabilité saisonnière, journalière et des précipitations extrêmes (d) en fonction de l'augmentation de la température moyenne annuelle. 30

4 Evolution annuelle du déficit hygrométrique (VPD) sur la période 1901-2017. . . . 31

5 Projections climatiques établies du changement de la température et des précipitations moyennes annuelles en région Méditerranéenne selon le 5ème rapport du GIEC. 33

6 Distribution des principaux écosystèmes naturels et cultivés au sein du bassin méditerranéen. 34

7 Relations théoriques entre les sources de régulation présente dans un système agricole et le régime de résilience. 36

8 Diagramme ternaire des différentes composantes d'un système agricole qui permettent de définir un système agroforestier selon le projet AGFORWARD. 40

9 Carte des parcelles agroforestières du Domaine de Restinclières à Prades-le-Lez (Hérault, France). 55

10 Climat moyen mensuel du Domaine de Restinclières (1994- 2019). 56

11 Plan de la parcelle A2 du Domaine de Restinclières. 57

12 Schéma général des dispositifs d'exclusion de pluie installés sur la parcelle A2. . . 59

13 Schéma d'implantation des placettes de suivi et des dispositifs d'exclusion de pluie au sein d'un bloc expérimental en contexte agroforestier 62

14 Illustration de la variabilité phénologique des arbres entre les blocs au 15 Mai 2019. 64

15 Image radar d'un épisode orageux, ty 67
16 Illustration de la variabilité spatiale et temporelle de la canopée des arbres au sein des blocs expérimentaux. 70
17 Capteurs PAR installés à la parcelle pour quantifier le flux de lumière incident et intercepté. 71
18 Mise en place des sondes TDR profondes en Octobre 2018 72
19 Bac d'évaporation de classe A installé en AF (bloc B) pendant la période estivale . 74
20 Illustration des principales étapes de l'itinéraire technique. 76
21 Estimation du LAI du pois selon la méthode du taux de couverture (avant fermeture du couvert) et régression linéaire établie entre le taux de couverture et les mesures de LAI destructives. 77
22 Régression linéaire établie pour chaque capteur PAR dans le cadre de la procédure d'intercalibration des capteurs. 80
I.1 Dispositifs d'exclusion de pluie de grande envergure déployés juste avant un épisode de pluie. 104
I.2 Dispositifs d'exclusion de pluie d'envergure moyenne, en place juste avant un épisode pluvieux 105
II.1 Spatial layout of experimental design at parcel A2 at the Restinclières Farm Estate (France) 118
II.2 Rainfall regimes according to cumulative rainfall. 119
II.3 Light conditions over the cropping period according to available PAR (PAR0) in agricultural control (AC) (A.), median dynamics of PAR transmittance in agroforestry (AF) (B.) and boxplots of cumulative incident PAR (PAR_{inc}) in AF (C.). . . 123
II.4 Paired analysis of mean daily soil water content (SWC) between cropping systems and rainfall regime at 20 and 50 cm depth. 124
II.5 Phenological development of winter pea and LAI dynamics according to cropping conditions and rainfall regime. 125
II.6 Linear mixed effects analyses of straw yield, grain yield and harvest index in relation with cumulated PAR over the whole cropping period and rainfall regime . . . 126
II.7 Linear mixed effects analyses of straw yield, grain yield and harvest index in relation with cumulated PAR over the whole cropping period and rainfall regime . . . 128
III.1 Flowchart of the proposed approach to analyse the drought impact on pea biomass increment and PAR radiation budget in an agroforestry (AF) system leaning on Monteith's approach. 143

III.2 Mean dynamics of soil water content in rooted soil horizons (20 and 50 cm deep) according to two cropping conditions and rainfall regimes, from pea crop emergence to harvest. . . . 144
III.3 Dynamics of total biomass of pea crop according to cropping conditions and rainfall regime. . . . 145
III.4 Dynamics of pea crop NDVI according to rainfall regime and cropping conditions. 146
III.5 arplots of the log-relative effects of rain exclusion on the logarithmic decomposition of Monteith's equation from flowering to full senescence (considered as NDVI = 0.2). . . . 148
III.6 Hourly time-based heatmap of the difference between AF and AC of air temperature (at 1.5 m), air vapour pressure deficit (VPD) and wind speed (WS) (at 2 m) from pea flowering until pea harvest. . . . 148
III.7 Hourly time-based heatmap of pea leaf temperature across cropping conditions and rainfall regime and the relative impact of rain exclusion on pea leaf temperature from pea flowering until pea harvest . . . 149
IV.1 Visualisation de la différence de vitesse du vent mesurée entre la girouette installée dans le TA (station météorologique) et en AF (bloc B). . . . 165
IV.2 Effet "lisière" au niveau de la sénescence d'une culture de pois chiche. Photo prise par Christian Dupraz en Juin 2009 au Domaine de Restinclières. . . . 167
IV.3 Taux d'incidence de l'oïdium sur le couvert de pois d'hiver selon les conditions de culture. Les mesures ont été réalisées sous le grand dispositif. . . . 168
IV.4 Système agroforestier noyer-céréale étudié dans lequel des effets de facilitations microclimatiques ont été observées dans le cadre de fortes températures printanières au Sud de l'Espagne (images tirées des annexes de Arenas-Corraliza, 2018) 171
IV.5 Scène virtuelle Hi-sAFe et ses différents éléments . . . 174
IV.6 Régression entre le nombre de grain final par plante et le taux d'accroissement de biomasse (entre le début de la floraison et le stade limite de fin d'avortement) en fonction des conditions de culture. . . . 176
IV.7 Comparaison de l'ET_0 journalière estimée selon les mesures à partir du bac d'évaporation (axe des abscisses) et selon les données météorologiques (axe des ordonnées). La relation est évaluée en TA (points oranges) et en AF (points verts). . . . 179
IV.8 Comparaison de l'ET_0 journalière estimée selon les mesures à partir du bac d'évaporation (axe des abscisses) et selon les données météorologiques (axe des ordonnées). La relation est évaluée en TA (points oranges) et en AF (points verts). . . . 180

A.1 Anomalie des températures moyennes annuelles (A.) et des précipitations annuelles (B.) à l'échelle saisonnière pour le bassin Méditerranéen. 222
A.2 Anomalie médiane des températures à l'échelle de l'année et des saisons pour le bassin Méditerranéen selon le scénario RCP2.6. 223
A.3 Anomalie médiane des cumuls de précipitations à l'échelle de l'année et des saisons pour le bassin Méditerranéen selon le scénario RCP2.6. 223
A.4 Anomalie médiane des températures à l'échelle de l'année et des saisons pour le bassin Méditerranéen selon le scénario RCP8.5. 224
A.5 Anomalie médiane des cumuls de précipitations à l'échelle de l'année et des saisons pour le bassin Méditerranéen selon le scénario RCP8.5. 224
B.1 Photographies aériennes historiques de la parcelle A2, de 1965 à 2017. 226
B.2 Apercu des photographies aériennes utilisées pour la classification de la phénologie des arbres *a priori*. 227
B.3 Classification des arbres de la parcelle selon leur DBH et discrimination choisie pour les arbres au diamètre trop faible. 227
B.4 Couple d'arbres répondant aux critères de sélection établis. 228
B.5 Comparaison du cumul de PAR incident entre les placettes exclues et témoin en AF pour deux périodes distinctes : 1) du semis à la récolte et 2) du début de la floraison à la récolte) 228
B.6 Carte des impacts racinaires observés lors de la mise en place des sondes TDR. . . 229
B.7 Boxplots des mesures d'azote minéral en agroforesterie et en témoin agricole au cours de la saison 2018-2019. 230
C.1 Illustration d'autres dispositifs d'exclusion de pluie mobilisés pour l'étude des systèmes agroforestiers 231
C.2 Design expérimental des dispositifs d'exclusion de pluie initialement envisagé . . 232
C.3 Schéma global du dispositif de grande envergure en témoin agricole 232
C.4 Schéma global de l'implantation des câbles de structure du dispositif de grande envergure en agroforesterie 233
C.5 Schéma global des éléments de collecte et d'évacuation du dispositif de grande envergure en agroforesterie 234
C.6 Photographies supplémentaires du grand dispositif 235
C.7 Illustration des aléas techniques rencontrés avec le grand dispositif d'exclusion de pluie 236
C.8 Photographies supplémentaires des dispositifs de moyenne envergure 237

C.9 Assemblage global des arceaux, des "croisillons" et des "épées" des dispositifs de moyenne envergure . . . 237
C.10 Caractérisation des effets de bords sous les dispositifs d'exclusion de pluie lors de la première saison d'expérimentation (2017-2018) . . . 238
D.1 Ternary diagrams of soil texture and the corresponding map of sampling location. 241
D.2 Comparison of daily instantaneous PAR and daily cumulated PAR as estimated with PAR sensor measurements and hemispherical photographs analysis. . . . 242
E.1 Map of sensors set-up for monitoring soil moisture, local microclimate and PAR fluxes during the rainfall manipulation experiment. . . . 243
E.2 Flowchart of the procedure for estimating and evaluating PAR fluxes at the canopy level. . . . 244
E.3 Comparison of daily incident PAR (PAR_{inc}) measured with PAR sensors and estimated with hemispherical photographs in AF conditions. . . . 245
E.4 Comparison of daily intercepted PAR (PAR_{int}) measured with PAR sensors and calculated from the LAI value using the Beer's law in all cropping conditions. . . . 246
E.5 Sensitivity analysis of the log-relative contributions of the six determinants of Monteith's equation according to different NDVI thresholds for determining the date of complete senescence. . . . 247
E.6 Observation counts of the different phenological stages during pea flowering. . . . 248
E.7 Pea biomass increment in relation to the cumulated intercepted PAR from flowering to full senescence, cropping conditions and rainfall regime. . . . 249
E.8 Mean daily air temperature from sowing to harvest in the Agricultural Control. . 250
E.9 Difference between leaf and air temperatures from mid-flowering until seed maturation, in different cropping systems and rainfall regimes. . . . 250
E.10 Stomatal conductance of pea plant according to cropping conditions, rainfall regime and date. . . . 251
F.1 Apercu du travail de calibration des paramètres variétaux pour le pois sous la version 3.5 de Hi-sAFe. . . . 253
F.2 Comparaison de la dynamique de LAI du pois d'hiver pour des scènes "identiques" entre Hi-sAFe 4.1 et STICS standalone selon les deux régimes de pluie expérimentés 255

Liste des tableaux

1 Effets du changement climatique observés depuis le milieu du XXème siècle en Europe et autour du bassin Méditerranéen 32

2 Evolution de l'occurrence du terme "*agroforestry*" au sein des rapports d'évaluation (RE) établis par le GIEC sur les stratégies spécifiquement dédiées à l'adaptation au changement climatique. Seuls les termes situés dans le corpus de texte ont été considérés. 41

3 Phénologie des arbres au sein de chaque bloc expérimental en agroforesterie. . . . 69

4 Synthèse des méthodes identifiées pour l'estimation du LAI de cultures annuelles en conditions agroforestières. 78

5 Synthèse des indicateurs mobilisés pour les chapitres de résultats 2 et 3, ainsi que pour la discussion. 83

I.1 Typologie des dispositifs d'exclusion de pluie identifiés dans la littérature. 95

I.2 Comparaison des études de manipulation du régime des pluies au sein de systèmes agroforestiers. 101

I.3 Comparaison des deux dispositifs d'exclusion de pluie proposés sur la base de critères techniques 108

II.1 Linear mixed effect analyses to test the effects of resource availability on proxies of vegetative and reproductive development. 126

II.2 Standardized major axis (SMA) regression to test the effect size of respective proxies of vegetative and reproductive development on crop performances. 127

C.1 Comparaison des aspects logistiques des dispositifs d'exclusion de pluie mis en place à Restinclières (Partie 1/2). 239

C.2 Comparaison des aspects logistiques des dispositifs d'exclusion de pluie mis en place à Restinclières (Partie 2/2). 240

D.1 Standard major axis (SMA) regression to test the interdependence of proxies for vegetative and reproductive components. 242

F.1 Paramètres nécessaires au calcul du nombre de grains dans STICS pour les plantes “déterminées” - voir équation 4.2 du livre rouge (Brisson et al., 2009) 254
F.2 Paramètres nécessaires au calcul du nombre de grains dans STICS pour les plantes “déterminées” - voir équation 4.2 du livre rouge (Brisson et al., 2009) 254
F.3 Paramètres nécessaires au calcul des stress trophiques à l’échelle de la plante dans le modèle de culture STICS. 256
F.4 Paramètres nécessaires au calcul du nombre de fruits pour les plantes “indéterminées” dans STICS (voir Eq. 4.8 et Eq. 4.9 de Brisson et al. 2009) 256
F.5 PParamètres nécessaires au calcul du remplissage des grains pour les plantes “indéterminées” dans STICS (voir Eq. 4.8 et Eq. 4.9 de Brisson et al. 2009) 256

Première partie

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

1. Des systèmes agricoles sous la menace du changement climatique
2. Comment adapter les systèmes agricoles au changement climatique ?
3. L'agroforesterie, principes écologiques pour l'étude de la productivité
4. Problématique et questions de recherche

1 Des systèmes agricoles sous la menace du changement climatique

1.1 Un lien étroit entre changement climatique, production agricole et sociétés humaines

Si les liens entre climat, agriculture et société semblent a priori évidents, l'étude des événements climatiques exceptionnels, passés et contemporains, illustre la complexité des relations qui existent entre eux. L'analyse des carottes de glace de l'Arctique et de l'Antarctique a démontré que des éruptions volcaniques majeures ont fortement influencé le climat terrestre ces 2500 dernières années (Sigl et al., 2015). En 1257, l'explosion d'un volcan indonésien, le Samalas, libéra une énorme quantité de soufre dans l'atmosphère, jusqu'à 43 km d'altitude (Lavigne et al., 2013). Dans une étude interdisciplinaire parue dans la revue Nature Geoscience, Guillet et al. (2017) ont émis l'hypothèse que les répercussions de cette éruption furent particulièrement importantes sur les sociétés européennes et asiatiques en s'appuyant sur des reconstructions dendroclimatiques et l'analyse d'un vaste corpus de textes médiévaux. Ils montrent en particulier que les étés furent particulièrement froids et humides les deux années suivantes, avec de lourdes conséquences sur les récoltes. Ce cataclysme aggrava ainsi les famines auxquelles l'Angleterre et le Japon étaient alors déjà en proie du fait d'un contexte de crise politique. Si cette anecdote historique peut sembler lointaine et spéculative, des exemples plus récents témoignent également des conséquences importantes que les aléas climatiques engendrent déjà au sein de nos sociétés contemporaines. A la suite de l'importante sécheresse observée en 2010 en Chine[1], un certain nombre de politologues ont émis l'hypothèse qu'il existait un lien entre cet aléas climatique, la révolte de 2011 en Egypte[2], et les révoltes du Printemps Arabe dans les autres pays du Moyen-Orient les années suivantes (Sternberg, 2012; Werrell and Femia, 2013). Si le lien de causalité semble particulièrement discutable (et débattu), une étude plus récente démontre malgré tout qu'il existe un lien entre la fréquence des épisodes de sécheresse et la fréquence des insurrections observées en Afrique Subsaharienne sur la période 1990-2011 (Almer et al., 2017). A la lumière de ces exemples, l'enjeu de la vulnérabilité climatique des systèmes agricoles dans un contexte de changement global apparaît donc comme capital.

En 1988, le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) est créé afin d'étudier les effets du changement climatique, d'évaluer les risques associés et de proposer des stratégies d'adaptation et d'atténuation. L'agriculture est identifiée comme un secteur d'activité prioritaire sur les questions de réchauffement climatique, tant en termes de responsabilité vis-à-vis des émissions de gaz à effets de serre (GES) que de vulnérabilité climatique. D'après le chapitre consacré à la sécurité alimentaire du dernier rapport du GIEC (Mbow et al., 2019), le système alimentaire mondial contribue entre 21 et 37% du total des émissions mondiales de GES.

[1] Alors premier producteur mondial de blé
[2] Alors premier importateur mondial de blé

Les émissions se répartissent de la façon suivante : 9 à 14% sont imputables aux activités agricoles pratiquées au sein des fermes et exploitations agricoles (culture et élevage mélangé), 5 à 14% sont attribuées aux émissions des sols agricoles et à la conversion des surfaces terrestres en terres agricoles (avec notamment la prise en compte de la déforestation et de la destruction des tourbières), auxquels s'ajoute également 5 à 10% pour toute la chaîne agroalimentaire (*i.e.* le stockage, le conditionnement, le transport, la transformation et la distribution et la consommation des denrées alimentaires). Des efforts pour réduire les émissions de GES liées aux pratiques agricoles, pour augmenter le stockage de carbone dans les sols cultivés, et pour optimiser l'utilisation des terres semblent donc stratégiques pour limiter les effets du changement climatique.

La productivité des systèmes agricoles apparaît de plus en plus vulnérable vis-à-vis des effets du changement climatique, menaçant la sécurité alimentaire mondiale. Porter et al. (2017) montrent qu'une baisse moyenne de -4.0% d'ici 2050[3] ressort des scénarios de production alimentaire mondiale issus des 5 rapports d'évaluation du GIEC. Si le chiffre n'est pas (trop) inquiétant de prime abord, il le devient (beaucoup) plus lorsque l'on considère conjointement i) la dynamique démographique croissante de la population humaine[4] et ii) la nécessité de réduire l'impact des activités anthropiques sur les écosystèmes naturels, dont les multiples services (écosystémiques) sont nécessaires au maintien d'un certain nombre de processus essentiels pour les sociétés humaines. Bien que la production agricole mondiale continue d'augmenter et que l'on produise déjà assez de nourriture à l'échelle mondiale pour subvenir aux besoins de 10 milliards d'individus (Holt-Giménez et al., 2012), il faudra maintenir la production sans augmenter la surface de terre cultivée (Molotoks et al., 2018; Thomson et al., 2019). Pour cette raison, l'observation depuis 1990 d'une stagnation des rendements des cultures majeures dans de nombreuses régions du monde attire l'attention et les raisons sous-jacentes méritent d'être élucidées (Brisson et al., 2010; Calderini and Slafer, 1998; Ray et al., 2012; Slafer et al., 1996). Plusieurs hypothèses sont proposées pour expliquer ces stagnations de rendement, notamment vis à vis des pratiques culturales (*e.g.* dépendance aux pratiques de monoculture), d'une limite possiblement atteinte dans l'amélioration des variétés, ou encore d'un changement d'orientation stratégique de la politique agricole de certains pays (*e.g.* orientation d'un compromis entre maintien de la productivité et diminution des impacts environnementaux en Europe de l'Ouest) (Lin and Huybers, 2012; Ray et al., 2012; Schauberger et al., 2018). Toutefois, l'hypothèse que la stabilisation des rendements traduirait en partie les effets du changement climatique a également été formulée à partir des années 2000, notamment parce que cette stagnation des rendements semble aussi refléter une plus grande variabilité inter-annuelle du rendement des cultures (Brisson et al., 2010; Osborne and Wheeler, 2013).

En France, Brisson et al. (2010) montrent les premiers, à l'aide de données de rendement à l'échelle départementale et de travaux de modélisation, que les effets du changement climatique

[3] En considérant la moyenne de toutes les publications considérées à travers les 5 rapports d'évaluations. La médiane globale se situe elle à -0.92%. Ce chiffre doit cependant être pris avec grande précaution. Un certain flou semble ressortir quant à l'horizon considéré, tant dans les articles de Porter et al. (2017, 2019) que dans dans le chapitre 7 sur la sécurité alimentaire du 5ème RE (Porter et al. 2014). Porter et al. (2017) se montre aussi particulièrement critique vis à vis de deux points : la surreprésentation des modèles et le manque important d'information sur la réponse des systèmes d'élevage.

[4] En fonction des scénarios, on estime que la population mondiale devrait atteindre 8 à 10 milliards d'individus d'ici 2050 (Lutz and Kc, 2010)

sont des facteurs explicatifs à considérer dans l'analyse de la stagnation des rendements du blé tendre. A un niveau plus local, ils montrent par exemple que les régions du Nord sont plus exposées à des épisodes de chaleur[5], ce qui n'était jusqu'alors pas le cas, tandis que les sécheresses ont eu un effet plus prononcé au Sud[6]. Plus récemment, Schauberger et al. (2018) ont élargi l'analyse des tendances des rendements à d'autres cultures (avoine, blé dur, betterave, colza, maïs, orge, pomme de terre, tournesol). A un échelon national, ils montrent que la dynamique reste globalement positive (à l'exception du blé dont la stagnation est confirmée), et que la variabilité des rendements semble actuellement stable. A un niveau régional, les rendements commencent en revanche à stagner pour un certain nombre de cultures (*e.g.* avoine, orge, tournesol) et les données ne semblent pas permettre d'en comprendre les raisons. Les auteurs de l'étude appellent donc à une certaine vigilance quant à des scénarios de maintien et/ou d'amélioration des rendements. Enfin, la prévision à court ou long terme des rendements de culture par modélisation fait encore face à un certain nombre de limites, du fait de situations climatiques ou de concours de circonstances mal prévus par les modèles (Ben-Ari et al., 2018).

Entre adaptation et atténuation du changement climatique, le concept d'agriculture climato-intelligente ou climato-compatible ("Climate-Smart Agriculture")

Face au double enjeu de l'agriculture vis-à-vis du changement climatique (atténuation et adaptation), la "Food and Agricultural Organization of the United Nations" (FAO) a proposé le terme de "climate-smart agriculture" à partir de 2010. Elle le définit comme une approche permettant de définir "les mesures nécessaires pour transformer et réorienter les systèmes agricoles dans le but de soutenir efficacement le développement de l'agriculture et d'assurer la sécurité alimentaire face au changement climatique" (FAO, 2021). A travers différents outils d'évaluation, cette approche tente ainsi de promouvoir les principes d'atténuation et d'adaptation au changement climatique, tout en garantissant la sécurité alimentaire à un niveau local. Les pratiques telles que l'agriculture de conservation ou l'agroforesterie sont fréquemment citées comme des applications du concept. Dans un article d'opinion, Torquebiau (2017) en propose une analyse critique, en soulignant la réelle opportunité que représente cette approche pour la conception de systèmes agricoles durables. Il insiste malgré tout sur l'ampleur de la tâche et le manque de clarté quant aux moyens mis en place pour atteindre simultanément ces objectifs. La mise en place de ces pratiques nécessite une bonne prise en compte du contexte et une coordination des acteurs locaux. Cela questionne plus largement les principes de gouvernance locale et de politique publique autour de ces enjeux.

[5] D'après l'étude, le nombre de jours avec une température moyenne au-dessus de 25°C (considéré comme seuil physiologique de stress pour le blé tendre) a augmenté d'un dizaine de jours entre la période 1956-1993 et après 1993.

[6] D'après l'étude, le stress hydrique, défini comme le déficit entre le cumul de précipitations et le cumul de l'évapotranspiration potentielle, a sensiblement augmenté de 37 à 67 mm entre les périodes 1956-1993 et après 1993.

1.2 Modélisation du changement climatique

L'évolution du climat depuis plusieurs centaines de milliers d'années est maintenant bien documentée. De nombreuses projections climatiques sont modélisées pour appréhender différents scénarios de changement climatique (IPCC, 2013). L'analyse du climat actuel et passé a permis d'identifier un certain nombre de causes responsables de la variabilité climatique de notre planète. La climatologie a notamment permis de mieux comprendre les fluctuations du climat de notre planète à court terme (cycle de l'ordre de quelques années) ou à très long terme (plusieurs dizaines de milliers d'années), en analysant notamment des fluctuations d'origine externe (*i.e.* variation de la trajectoire astronomique ou de l'activité solaire) et des fluctuations d'origine interne, liées notamment au couple océan-atmosphère, caractérisé par des phénomènes de redistribution de chaleur à la surface du globe via les courants marins (*e.g.* circulation thermohaline) ou par des oscillations "caractéristiques" des masses d'air (*e.g.* l'oscillation Nord-Atlantique ou El Niño - oscillation australe).

Les activités anthropiques émettent des GES et modifient le climat par forçage radiatif, c'est-à-dire que le bilan radiatif global entre le rayonnement solaire incident et le rayonnement (infrarouge) émis par l'atmosphère est modifié (IPCC, 2013). Le phénomène est, dans une certaine mesure, inverse aux effets d'une éruption volcanique, car les poussières projetées dans la stratosphère augmentent l'albedo de la planète. Par ailleurs, les sciences météorologiques ont permis de mieux comprendre le fonctionnement climatique à une échelle plus locale. Les prévisions climatiques et météorologiques font donc appel à des modèles numériques complexes, qui permettent de prendre en compte ces effets globaux et locaux. Dans le cadre des modèles climatiques et de simulations à long terme, les modèles les plus complexes modélisent le couple océan-atmosphère selon des "modèles de circulation générale". C'est à partir de ces modèles qu'ont été établies des projections climatiques pour le climat futur. Tous les modèles climatiques restent cependant soumis à des incertitudes du fait de la nature des processus modélisés, non linéaires : on parle de nature chaotique car les résultats d'une simulation sont particulièrement sensibles à une modification modeste de la valeur d'un paramètre ou d'une variable d'entrée du modèle. Pour pallier ce problème, les experts du GIEC ont mis en place une analyse par ensemble de modèles (dénommé Coupled Model Intercomparison Project - CMIP), afin de fournir des scénarios climatiques les plus crédibles possible, tout en indiquant le degré de fiabilité considéré.

Quatre scénarios-type d'émissions de GES, dénommés les Representative Concentration Pathways (RCP) ont été identifiés par les experts du GIEC lors de la rédaction du 5ème rapport d'évaluation et les forçages radiatifs correspondants ont été injectés dans les modèles climatiques afin de prévoir les projections climatiques globales (IPCC, 2013). Les quatre scénarios identifiés ont notamment été construits à partir d'hypothèses concernant la capacité de l'humanité à développer des politiques plus ou moins ambitieuses afin de limiter les émissions de GES (Figure I.1). L'année 1750, juste avant la révolution industrielle, a été choisie comme point de référence pour définir l'ampleur du forçage radiatif à l'horizon 2100 "imputable" aux activités anthropiques. Les quatres scénarios correspondent à des forçages radiatifs de respectivement 2.6 W.m^{-2} (RCP2.6), 4.5 W.m^{-2}

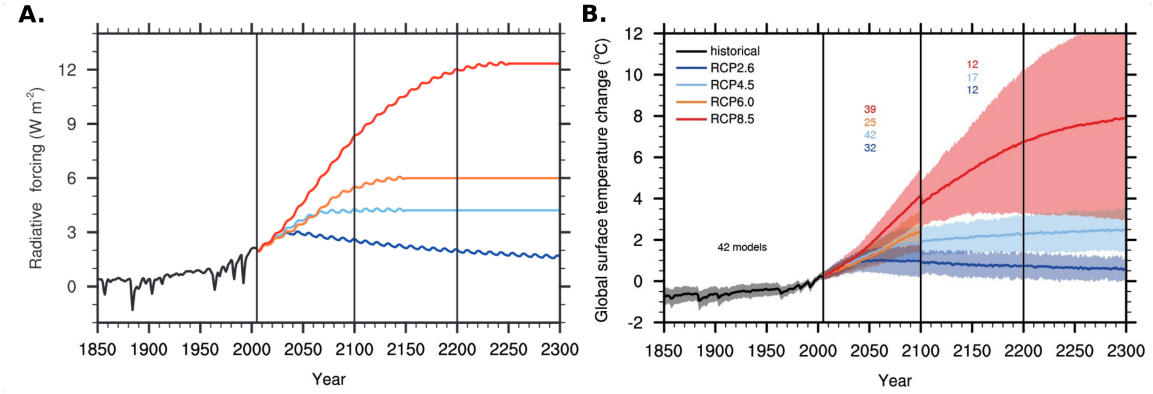


Figure 1 Trajectoires du forçage climatique définies au sein des 4 scénarios RCP ("Representative Common Pathways") (A.) et anomalie de la température annuelle moyenne par rapport à la période 1986-2005 (B.). Figure adaptée du 5ème rapport du GIEC (IPCC, 2013).

(RCP4.5), 6.0 W.m^{-2} (RCP6.0) et 8.5 W.m^{-2} (RCP8.5). Le scénario RCP2.6 traduit une volonté très forte de l'humanité pour réduire ses émissions de GES, puisque les émissions de CO2 déclinent à partir de 2020 pour s'annuler en 2100. Les scénarios RCP4.5 et RCP6.0 sont des scénarios de stabilisation des émissions à plus ou moins long terme : RCP4.5 est considéré comme un scénario intermédiaire, dans lequel les émissions de CO2 diminuent seulement à partir de 2045 et où le niveau des émissions en 2100 correspond à la moitié des émissions de 2050, tandis que RCP6.0 considère lui des émissions qui atteignent leur pic en 2080, qui diminuent ensuite progressivement. Enfin RCP8.5 est considéré comme le pire scénario possible, qui impliquerait des émissions continues et importantes, ainsi qu'un certain nombre de "boucles de rétroaction" négatives. Dans le cadre du 6ème rapport d'évaluation RE (qui paraîtra en 2021), les RCP seront couplés à des scénarios socioéconomiques (*Shared Socioeconomic Pathways* - SSP), au nombre de 5, afin de mieux décrire le lien entre les politiques mises en place et les scénarios RCP.

Au sein des scénarios climatiques proposés par le GIEC, des tendances climatiques se dégagent, mais une incertitude importante persiste au niveau régional ainsi que pour certains événements climatiques extrêmes. Bien que la teneur en CO2 de l'atmosphère soit identifiée à travers le choix du scénario climatique, les prévisions pour les autres variables climatiques résultent des travaux de modélisation, dont l'incertitude dépend de l'échelle spatiale et temporelle considérée. A une échelle annuelle, on sait que la température moyenne à la surface du globe augmentera de 0.3 à 1.7°C pour le RCP2.6 et de 2.6 à 4.8°C pour le RCP8.5 d'ici à 2100 (Figure I.2). Par ailleurs, les estimations d'augmentation de température fournies pour les surfaces continentales sont plus élevées. Pour le continent européen, Selten et al. (2020) considèrent qu'à l'horizon 2100 et dans l'hypothèse d'un scénario RCP8.5, on observerait une augmentation des températures de l'air de l'ordre de +4.6 à +7.3°C par rapport à la période actuelle (1981-2010). Outre l'augmentation de la température moyenne, c'est également la variabilité des températures qui sera affectée à différentes échelles temporelles. A une échelle journalière, la fréquence des journées anormalement chaudes a augmenté depuis 1950 et celle des journées anormalement froides a diminué (Morak et al., 2013). A une échelle infra-journalière, la fréquence des nuits chaudes a augmenté, tandis que la fréquence

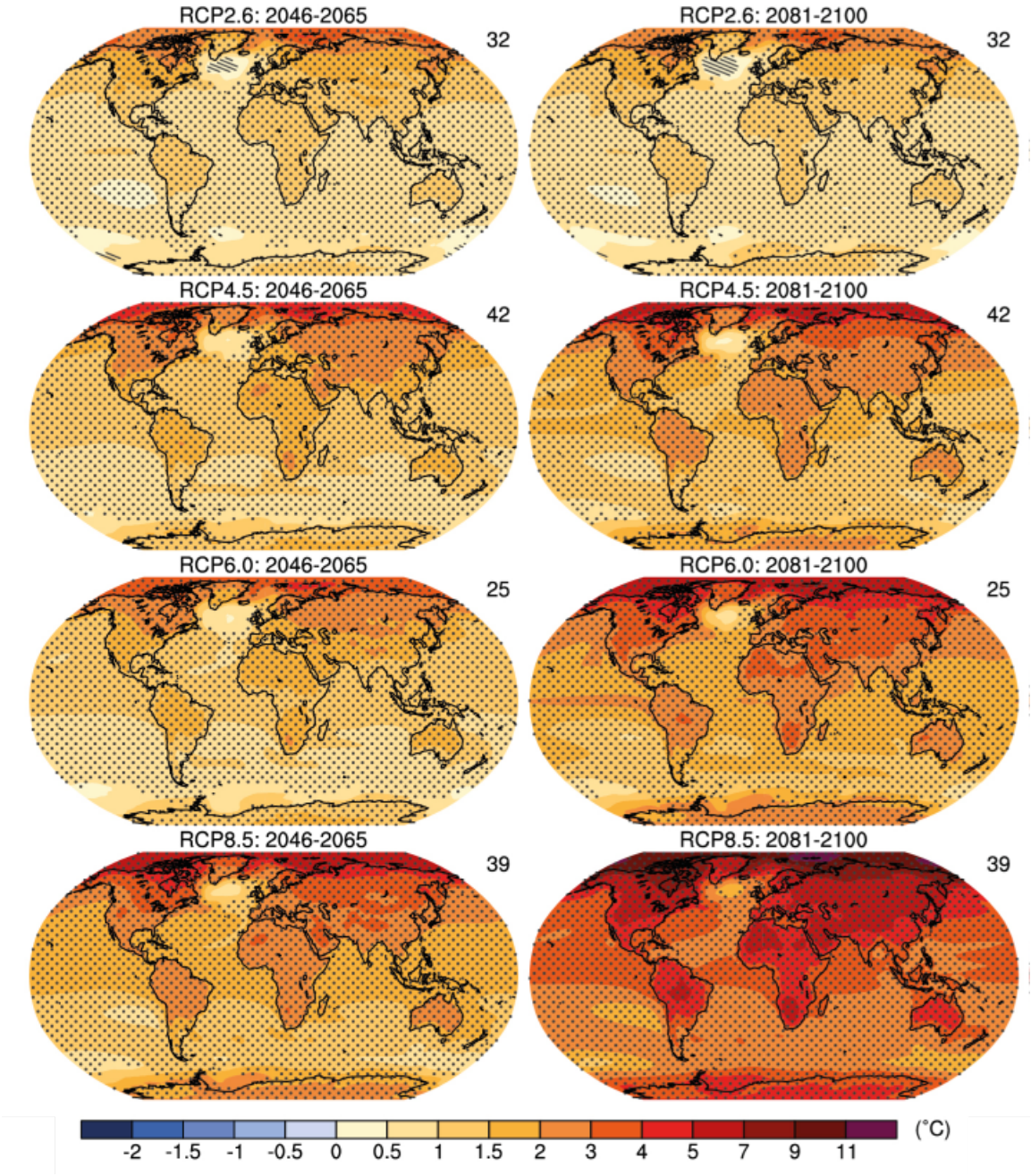


Figure 2 Anomalie de la température moyenne annuelle à la surface du globe selon les différents scénarios climatiques (période de référence : 1986-2005). Les chiffres indiquent le nombre de simulations climatiques considérées au sein de chaque période. Figure adaptée du 5ème rapport du GIEC (IPCC, 2013).

des nuits froides ou des épisodes de gel ont diminué (Morak et al., 2011, 2013). Si les prédictions pour les épisodes de canicule restent incertaines, il existe un consensus pour dire que leur intensité et leur fréquence augmenteront (Herrera-Estrada and Sheffield, 2017; Lhotka et al., 2018). Schär et al. (2004) suggère que la canicule extrême de l'été 2003 en Europe devrait devenir un événement climatique plus fréquent : l'été 2003 est à peine plus chaud qu'un été moyen tel que projeté pour la période 2070-2100 dans l'hypothèse d'un scénario RCP8.5. Il semble donc nécessaire de

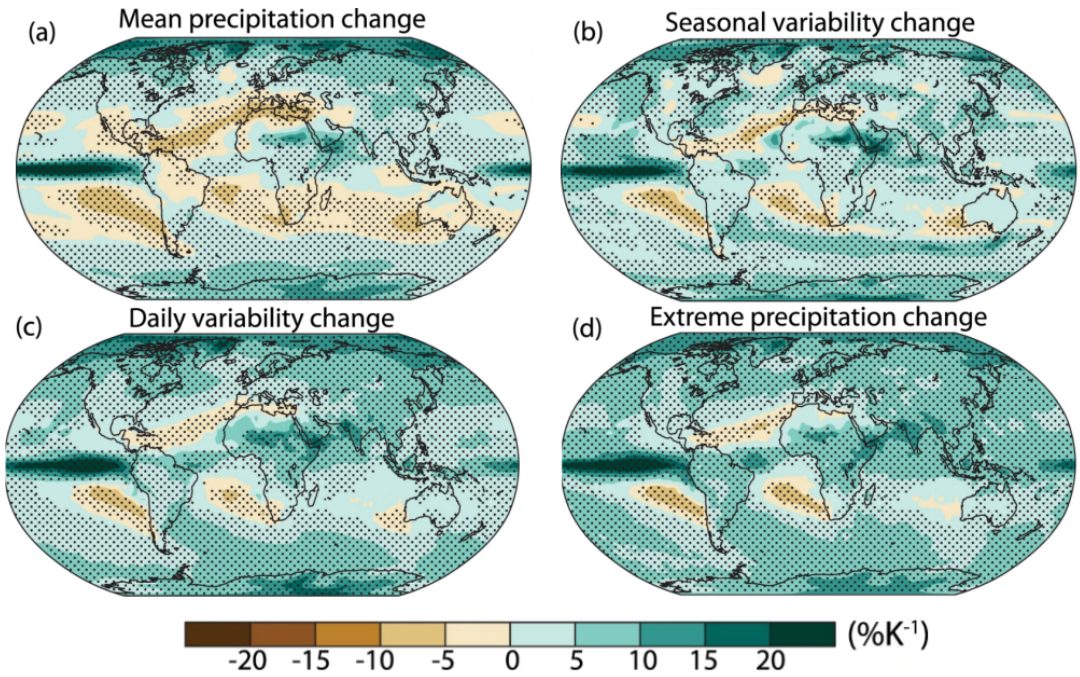


Figure 3 Scénario du changement des précipitations annuelles moyennes (a), de la variabilité saisonnière (b) et journalière (c) et des précipitations extrêmes (d) en fonction de l'augmentation de la température moyenne annuelle (scénario RCP8.5). Les pointillés indiquent les régions où au moins 67% des modèles s'accordent sur le signe du changement. Figure tirée de Pendergrass et al. (2017)

considérer à la fois une modification de la distribution moyenne des températures, mais également une augmentation significative de la variabilité journalière et saisonnière des températures, ce qui représente un défi supplémentaire pour les modèles climatiques.

D'après les projections climatiques, le cumul de pluie au niveau des continents semble globalement stable quel que soit le scénario, mais on observe un renforcement des contrastes entre régions sèches et humides. A l'échelle planétaire, les précipitations semblent actuellement assez peu affectées d'un point de vue quantitatif, et les experts du GIEC concluent à une absence globale de tendance pour le XXème siècle. Par contre des tendances spatiales sont perceptibles, avec une augmentation des précipitations plus marquée dans l'hémisphère Nord à l'exception de régions déficitaires comme le bassin méditerranéen et le Sahel où le déficit pluviométrique semble s'accentuer particulièrement (Dore, 2005). Malgré tout, une incertitude importante demeure vis-à-vis de la distribution temporelle de la pluviométrie au sein des projections climatiques car la variabilité temporelle des précipitations augmente avec l'augmentation des températures, que ce soit à l'échelle journalière ou à l'échelle inter-annuelle (Pendergrass et al. 2017 - voir Figure 3). En particulier, il est attendu que l'alternance entre des périodes sèches et des périodes de précipitations intenses va devenir plus fréquente, avec pour conséquence une augmentation des risques de sécheresse et d'inondations pour de nombreuses régions du globe (Pendergrass and Knutti, 2018). Par conséquent, l'appréciation du changement de la pluviométrie à une échelle annuelle et régionale doit être considérée avec précaution, puisque les conséquences écologiques, économiques et

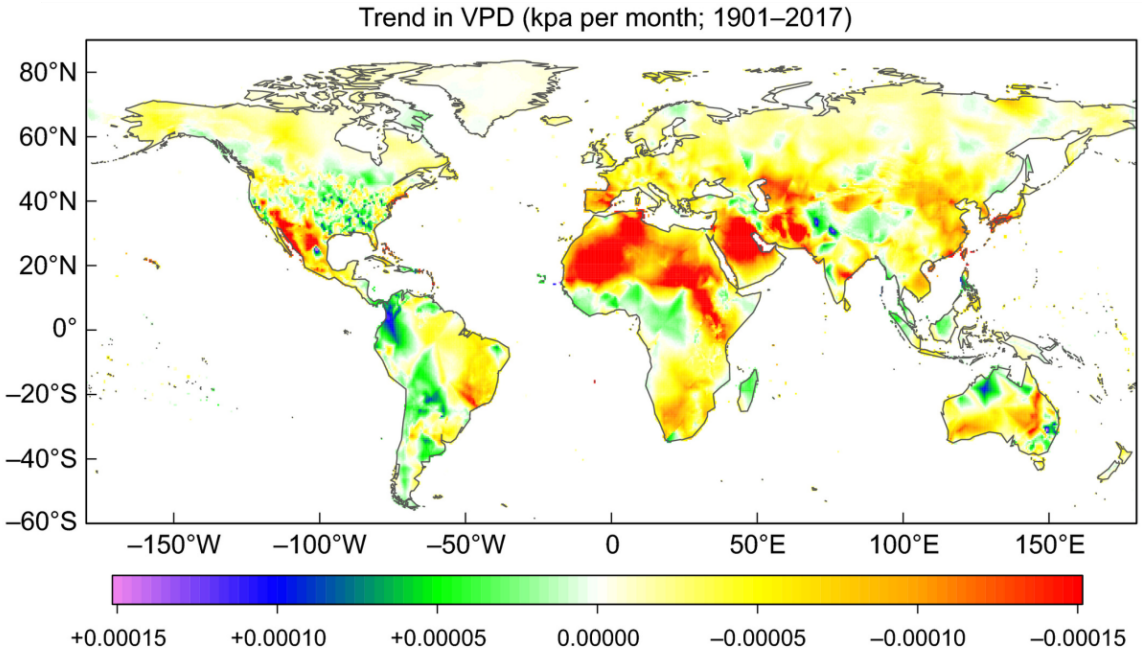


Figure 4 Evolution annuelle du déficit hygrométrique (VPD) sur la période 1901-2017. Figure tirée de Grossiord et al. (2020)

sociales doivent prendre en compte ces changements au niveau de la distribution temporelle.

En dehors de la température et des précipitations, l'augmentation du déficit hygrométrique (*vapour pressure deficit* - VPD) pourrait avoir des conséquences importantes sur le développement de la végétation à une très large échelle. L'augmentation de la température moyenne contribue à augmenter la capacité de l'atmosphère à stocker de l'humidité sous forme de vapeur, puisque la pression de vapeur saturante augmente exponentiellement avec la température. Par conséquent, l'augmentation de la température moyenne a un fort impact sur l'augmentation du VPD, et donc de la demande évaporative à large échelle (Figure 4). Yuan et al. (2019) affirment d'ailleurs qu'un point de bascule a été franchi à la fin des années 1990 et que l'augmentation du VPD s'est fortement accélérée depuis. L'observation de mortalité de grande ampleur dans les massifs forestiers ces dernières décennies en cas de sécheresse et de forte chaleur montre que l'action combinée d'un déficit hydrique conséquent avec de forts VPD est particulièrement délétère (Allen et al., 2010). Des phénomènes de cavitation au niveau des vaisseaux conducteurs peuvent notamment apparaître chez les arbres, provoquant alors une rupture hydraulique au niveau des flux de sève (Cochard, 2020). Grossiord et al. (2020) montrent dans une revue de littérature que les effets isolés du VPD sur la croissance des végétaux sont encore peu documentés et mal intégrés dans les modèles de croissance pour la végétation. Une autre conséquence de l'augmentation de la demande évaporative concerne un assèchement des sols de plus en plus important, ce qui limite également le drainage et la recharge des nappes phréatiques.

A terme, il est admis que l'aridité pourrait gagner du terrain du fait d'une température et d'une demande évaporative plus importante (Asadi Zarch et al., 2017), tandis que la fréquence et l'in-

Tableau 1 Effets du changement climatique observés depuis le milieu du XXème siècle en Europe et autour du bassin Méditerranéen - adapté du Tableau 2.13 du Chapitre 2 du premier groupe de travail du GIEC (IPCC, 2013)

Variable climatique	Critère retenu pour l'évaluation	Tendance observée	Confiance
Journées chaudes	Nb. jours où Tmax >90ème percentile	Augmentation générale	Elevée
Journées froides	Nb. jours où Tmin <10ème percentile	Diminution générale	Elevée
Nuits chaudes	Nb. jours où Tmin >90ème percentile	Augmentation générale	Elevée
Nuits froides Episode de gel	Nb. jours où Tmin <10ème percentile Nb. jours où Tmin <0°C	Augmentation dans la plupart des régions	Elevée
Episode de canicule	Indices spécifiques*	Augmentation dans la plupart des régions	Elevée
Précipitation extrême	Précipitation maximale en 1 jour Cumul de pluie des jours les plus pluvieux (95/99ème percentile)	Plus de régions avec une augmentation que de région avec une diminution, et des variations régionales et saisonales	Elevée
Manque d'eau Sécheresse	Nb. jours consécutif avec P <1mm Indices spécifiques	Variation spatiale des tendances Augmentation dans le bassin méditerranéen	Moyenne Elevée pour le bassin méditerranéen

tensité des épisodes de sécheresse risquent eux d'augmenter, du fait d'une plus grande instabilité climatique, notamment pour les précipitations (Pendergrass and Knutti, 2018).

1.3 Enjeux pour les systèmes agricoles autour du bassin méditerranéen

Les effets du changement climatique se font déjà ressentir autour du bassin méditerranéen et vont s'accentuer tout au long du XXIème siècle. L'analyse des données climatiques à l'échelle de l'Europe et du bassin méditerranéen au cours du XXème siècle montre déjà des premiers effets perceptibles du changement climatique. Par rapport à la période 1960-1970, on observe une augmentation de la température moyenne en Méditerranée de l'Ouest de 1 à 1.5°C et une augmentation des températures estivales moyennes de 1.5°C en Méditerranée de l'Est (Sanchis-Ibor et al., 2020). La fréquence des journées et des nuits chaudes augmente tandis que la fréquence des jours de gel, des journées et des nuits froides diminue (Tableau 1). Les événements exceptionnels ou extrêmes augmentent également, avec une augmentation des épisodes de canicule, de précipitations extrêmes, de manque d'eau ou de sécheresse (IPCC, 2013; Vicente-Serrano et al., 2014). Le bassin méditerranéen est identifié comme une zone particulièrement vulnérable au changement climatique, et fait l'objet d'études spécifiques, notamment à travers le programme MedCordex[7]

[7]Le programme MedCordex est un sous-programme du projet Cordex (www.cordex.org/), qui vise à réduire l'échelle des projections climatiques établies à l'échelle du globe (à partir des modèles de circulation globale) à une échelle régionale. Le projet Cordex propose un découpage régional en fonction du contexte climatique local, généralement par continent. Cependant, trois régions font l'objet d'un travail plus approfondi du fait d'une forte densité de population et/ou d'une forte vulnérabilité climatique : i) le bassin méditerranéen, ii) l'Afrique du Nord et le Moyen-Orient et iii) l'Asie du Sud-Est. D'autres programmes de recherche pour une réduction d'échelle des simulations climatiques

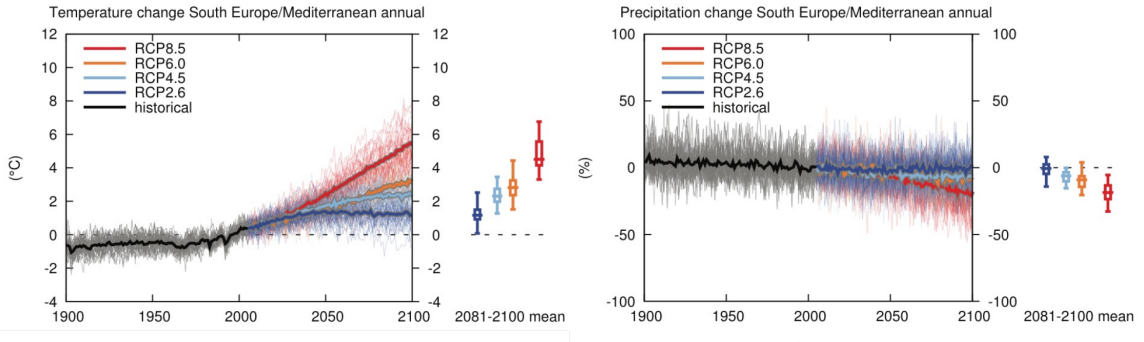


Figure 5 Projections climatiques établies du changement de la température et des précipitations moyennes annuelles en région Méditerranéenne selon le 5ème rapport du GIEC (IPCC, 2013). Des projections spatialisées et à l'échelle saisonnière sont disponibles en Appendice A.

(www.medcordex.eu). Les scénarios de changement climatique établis à l'échelle du bassin méditerranéen confirment une forte accentuation des tendances observées au cours du XXème siècle (Figure 5). Rien que pour les précipitations, Lionello and Scarascia (2018) estiment par exemple qu'une réduction moyenne de 4% (ou 20 mm) des cumuls de précipitations est attendue pour chaque degré de température en plus. La gestion de l'eau représente donc un enjeu majeur pour les systèmes agricoles du bassin méditerranéen.

Le maintien de la capacité de production agricole en zone méditerranéenne nécessite de s'adapter au contexte de changement climatique. A l'image des paysages méditerranéens, l'agriculture méditerranéenne est elle aussi diversifiée (Figure 6 - Malek and Verburg 2017). Les zones cultivées représentent au total environ 40% du territoire du bassin méditerrannéen avec une majorité de terres cultivées en régime pluvial (60% des terres agricoles en régime pluvial et 40% en régime irrigué). L'enjeu de l'eau pour le secteur agricole est conséquent puisque si les surfaces irriguées restent inchangées, il est considéré que les besoins en eau pour l'irrigation vont augmenter de 4 à 18% d'ici la fin du XXIème siècle (Fader et al., 2016). Pour les terres cultivées en régime pluvial, les cultures annuelles dominantes sont les céréales et les légumineuses, et bien que ces cultures soient majoritairement des cultures d'hiver, elles restent cependant fortement soumises aux aléas climatiques, notamment lors de stress hydriques et thermiques printaniers importants (del Pozo et al., 2019). Malek and Verburg (2018) ont étudié différent scénarios d'adaptation pour répondre aux besoins de production des pays méditerranéens, en considérant notamment des aspects de gestion au niveau de i) l'irrigation (changement des surfaces et efficience) ; ii) de l'intensité de production des systèmes de cultures et iii) de la diversification des productions agricoles. Ils montrent en particulier qu'il existe un équilibre nécessaire entre les systèmes de cultures irrigués et les systèmes de cultures pluviaux. Les systèmes irrigués restent importants pour maintenir la production agricole à l'échelle régionale, mais ils restent fortement dépendants de i) la capacité à améliorer leur efficience et ii) la capacité à maintenir un approvisionnement en eau suffisant et durable. Pour compenser la baisse de production des systèmes irrigués en manque d'eau, il faudrait augmenter

existent également à une échelle nationale : pour la France, le projet DRIAS (www.drias-climat.fr) met à disposition un guichet cartographique pour faciliter la visualisation des travaux de modélisation existants.

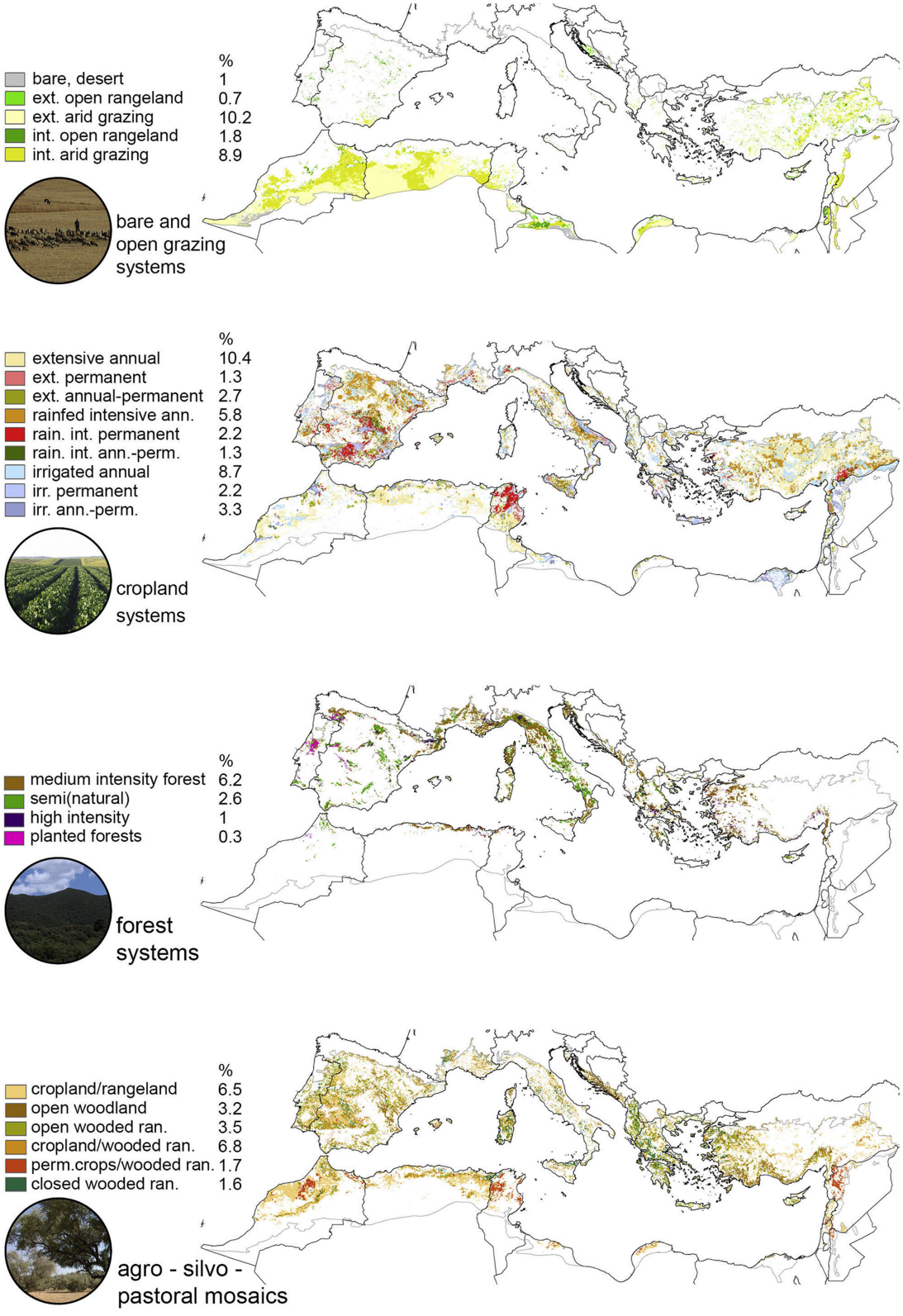


Figure 6 Distribution des principaux écosystèmes naturels et cultivés au sein du bassin méditerranéen. Figure tirée de Malek and Verburg (2017).

de 50 à 130% la productivité des systèmes pluviaux, en fonction de l'efficience atteinte par les systèmes d'irrigation. Ils concluent par ailleurs que la diversité des systèmes agricoles méditerranéens

reste un élément important pour sécuriser autant que possible la production alimentaire locale.

2 Comment adapter les systèmes agricoles au changement climatique ?

2.1 La notion de résilience appliquée aux agroécosystèmes

La notion de résilience définit en écologie la capacité dynamique d'un système à retrouver des caractéristiques fonctionnelles et structurelles après une perturbation. Le terme a été introduit en écologie par Holling (1973) dans le cadre de l'étude de la dynamique des populations. Toutefois, des contre-exemples ont souligné l'importance de mieux préciser les concepts affiliés à la notion de résilience. Par exemple, l'étude du fonctionnement écologique de certains systèmes forestiers a révélé la nécessité d'une certaine fréquence dans les feux de forêts pour garantir un niveau de productivité dans le temps, au risque de voir le peuplement dépérir sous l'action de certains ravageurs ou de la sécheresse (Attiwill, 1994). Cet exemple questionne donc les notions de perturbation (*i.e.* le feu), d'état initial ou de référentiel (*i.e.* la forêt avant le feu), et l'échelle de temps considérée (*i.e.* la durée du cycle nécessaire pour évaluer le rôle écologique du feu de forêt). Plus largement, la notion de résilience implique un certain nombre de concepts associés, et nécessite de distinguer différentes propriétés dynamiques des systèmes écologiques. Walker et al. (2004) distinguent ainsi quatre notions connexes, à savoir : i) la latitude (*i.e.* la "déformation" maximale qu'un système peut subir avant qu'il ne perde sa capacité à retrouver son état initial), ii) la résistance (*i.e.* le degré d'opposition qu'offre un système face à une perturbation), iii) la précarité (*i.e.* le degré de proximité d'un système à un seuil/une limite délimitant sa capacité à retrouver son état initial en cas de perturbation), iv) la panarchie (*i.e.* la dépendance du système à des effets d'échelle inférieure ou supérieure au système considéré). La notion de résilience est aussi associée à celle de stabilité d'un système, qui se réfère à la notion de fluctuations temporelles de certaines variables écologiques autour d'un ou plusieurs points d'équilibre en réponse à une perturbation. Similairement à la notion de résilience, les concepts et la terminologie autour de la stabilité écologique sont sujets à débat chez les écologues (Gunderson, 2000; Ives and Carpenter, 2007). Pour éviter au maximum la confusion autour des aspects relatifs à la résilience et la stabilité, Grimm and Wissel (1997) suggèrent de caractériser le domaine de validité des résultats expérimentaux obtenus en précisant systématiquement : i) le niveau de description considéré (*e.g.* un individu, une population), ii) la (les) variable(s) d'intérêt(s), iii) le référentiel (statique ou dynamique), iv) la perturbation considérée, v) l'échelle spatiale, et vi) l'échelle temporelle. La multiplicité des facteurs à préciser pour définir le domaine de validité d'une étude souligne la complexité d'une généralisation des résultats obtenus.

Dans le cas des agroécosystèmes, la définition de la notion de résilience est également compliquée par trois spécificités de ces systèmes : (i) la priorité donnée à l'objectif de production agricole (la résilience sera donc assujettie au maintien d'une fonction particulière de l'écosystème : la pro-

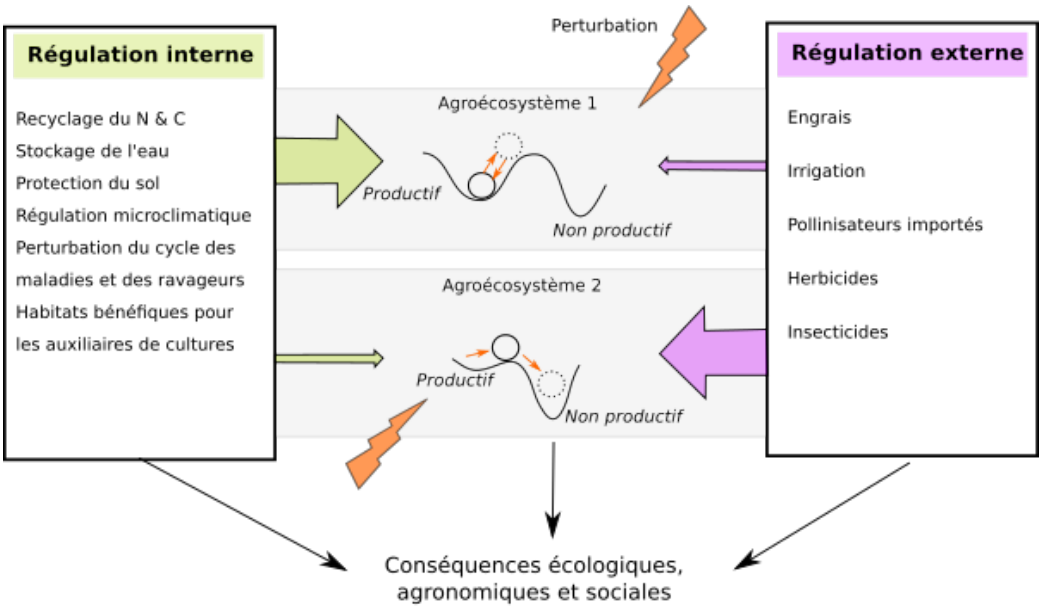


Figure 7 Relations théoriques entre les sources de régulation d'un système agricole et son régime de résilience. Un degré élevé de régulation interne conduit à un niveau de résilience élevé du régime de production tandis qu'un niveau de régulation externe élevé induit un degré de résilience faible avec une probabilité élevée de basculer dans un fonctionnement peu (ou pas) productif. Figure tirée (et traduite) de Peterson et al. (2018)

duction de denrées agricoles), (ii) le caractère piloté du système (les pratiques culturales forcent l'évolution du système et on ne peut plus parler d'équilibre dynamique, mais plutôt d'équilibre maintenu artificiellement) et (iii) le fait que les systèmes agricoles sont des systèmes ouverts, souvent très dépendant de l'apport d'intrants, et exportant une part importante de la biomasse sous forme de produits agricoles. Rist et al. (2014) soulignent donc la nécessité de prendre en compte les caractéristiques spécifiques des systèmes de production avant d'appliquer les concepts théoriques de la résilience écologique. Pour éviter de tomber dans le piège d'un débat autour de la définition de résilience et des concepts affiliés, Peterson et al. (2018) ont proposé un cadre d'analyse qui précise explicitement les considérations autour i) des fonctions productives, ii) des mécanismes de régulation impliquées dans l'étude de la perturbation considérée et iii) les effets d'échelle dans l'étude de la résilience des systèmes cultivés. Dans le cadre de la notion de fonction productive, l'indicateur de productivité (ou de provision de services plus largement) doit être précisé (*e.g.* grain vs. biomasse totale) et les concepts affiliés à la résilience du système cultivé (*e.g.* productivité, stabilité, résistance,...) doivent être évalués pour différentes échelles temporelles. Parmi les mécanismes de régulation face à une perturbation donnée, un compromis semble exister entre la régulation interne du système cultivé, garantie par un certain nombre d'interactions écologiques qui assurent des services de support (*e.g.* amélioration du cycle des nutriments) et de régulation (*e.g.* prédation de ravageurs), et la régulation externe, garantie par les itinéraires techniques (Figure 7).

Malgré ces spécificités, la notion de résilience est de plus en plus utilisée pour orienter la conception de systèmes agricoles. Dans une revue de littérature, Peterson et al. (2018) montrent

que le nombre de publications scientifiques qui considèrent la notion de résilience a augmenté à partir de 2005.

2.2 Les leviers d'adaptation des systèmes agricoles

L'adaptation des systèmes agricoles au changement climatique se définit comme un ensemble de stratégies pour augmenter leur résilience, c'est-à-dire maintenir une capacité de production malgré des aléas climatiques de plus en plus fréquents. La mise en place de stratégies d'adaptation nécessite de considérer des leviers techniques, socio-économiques et politiques différents en fonction des échelles spatiales (*e.g.* territoire, exploitation, parcelle) et temporelles considérées. En reprenant le cadre ESR (Efficience-Substitution-Reconception) proposé par Hill and MacRae (1996), on peut classer les leviers à l'échelle de la parcelle en trois groupes :

- ceux visant à améliorer l'efficience des ressources disponibles et importées au sein d'un système (*e.g.* en ajustant les techniques d'irrigation afin de minimiser les pertes d'eau)
- ceux basés sur une substitution d'un produit ou d'une pratique par une autre (*e.g.* utilisation de variétés tolérantes à la sécheresse)
- la reconception des systèmes, combinant plusieurs des leviers précédemment cités et modifiant les composantes du système.

L'adaptation des itinéraires techniques constitue une première piste pour faire face au changement climatique. Pour les systèmes irrigués, une adaptation des techniques d'irrigation peut être considérée afin de limiter les pertes en eau par évaporation à la parcelle (Fader et al., 2016). Pour les systèmes en régime pluvial, des travaux sont menés pour adapter les calendriers de semis dans les situations où des inquiétudes existent vis-à-vis des stress hydriques et thermiques printaniers. En anticipant les dates de semis de quelques jours, il semble possible de réduire l'exposition des cultures à des stress thermiques pendant la floraison ou le remplissage du grain (Jat et al., 2018). D'autres travaux soulignent la possibilité d'envisager la combinaison de plusieurs leviers au niveau des itinéraires techniques, comme l'application supplémentaire d'une dose d'azote et/ou d'irrigation pour limiter les pertes face à des aléas thermiques (Dubey et al., 2020).

La substitution de variétés sensibles aux aléas climatiques par des variétés plus résistantes est une solution largement étudiée pour faire face au changement climatique. Ainsi, un grand nombre de travaux concerne le développement de variétés tolérantes à des pressions abiotiques (*e.g.* le stress hydrique ou le stress thermique) ou biotiques par sélection génotypique ou par génie génétique (Hall and Richards, 2013). Ces travaux visent ainsi à adapter la capacité physiologique des plantes à des conditions extrêmes spécifiques. D'autres travaux, plus minoritaires, montrent également la pertinence d'approches basées sur la mise en culture de population de variétés (Østergård et al., 2009; Riviere, 2014), offrant ainsi une plus grande diversité génétique et fonctionnelle pour une même culture pour faire face à des aléas divers.

Enfin, une dernière piste beaucoup plus ambitieuse concerne la reconception globale du système de culture. La diversification spatiale et temporelle des cultures constitue un levier de reconception de plus en plus important (Duru et al., 2015; Malézieux et al., 2009). En effet, des études sur les écosystèmes naturels et semi-naturels ont montré un lien entre biodiversité et résilience. L'étude des écosystèmes prairiaux a notamment montré qu'il existait un lien entre la diversité spécifique d'une prairie et sa capacité à maintenir un niveau de production face à un épisode de sécheresse sévère, puisqu'une prairie diversifiée arrivait à maintenir un niveau de production supérieur à celui d'une prairie composée d'une ou deux espèces seulement (Tilman et al., 1996). Une plus grande richesse spécifique peut ainsi permettre d'assurer une plus grande diversité et/ou une redondance des fonctions écologiques, ce qui permettrait ainsi de mieux faire face aux aléas climatiques (Mori et al., 2013). La conception des systèmes agricoles selon des principes agroécologiques, mettant l'accent sur la diversification des cultures et des paysages est donc perçue comme un moyen d'améliorer la résilience des systèmes face au changement climatique (Altieri et al., 2015; Malézieux, 2012). Des études ont d'ailleurs montré la pertinence d'une diversification à l'échelle d'une parcelle agricole (Davis et al., 2012; Gaudin et al., 2015), à l'échelle du paysage (Abson et al., 2013) et à l'échelle nationale (Renard and Tilman, 2019) en réponse au risque d'aléas climatiques. A l'échelle de la parcelle, cette diversification peut prendre différentes formes : allongement des rotations de culture, introduction de cultures intermédiaires, pratiques d'intercultures, agroforesterie, agrivoltaïsme…

Reconcevoir son système de culture constitue cependant une contrainte très importante pour l'agriculteur. Cela implique de revoir la gestion globale sur le long terme, avec un besoin de mobiliser et d'adapter plusieurs leviers (*e.g.* au niveau des itinéraires techniques, au niveau du choix des variétés) pour prendre en compte les spécificités pédoclimatiques, ce qui peut générer une source d'incertitude additionnelle, une prise de risque financière importante et ce qui constitue donc un frein important à l'adoption de telles pratiques. Toutefois, la reconception des systèmes agricoles représente un levier d'adaptation de plus en plus crédible sur le long-terme dans une perspective d'intensification écologique des pratiques agricoles sous la contrainte du changement climatique (Pretty et al., 2018). Par exemple, dans le 5ème rapport d'évaluation du GIEC, il est expressément recommandé de développer dès que possible la pratique de l'agriculture de conservation et l'agroforesterie au sein des zones arides du continent africain, où les scénarios climatiques sont particulièrement critiques (Field et al., 2014).

En somme, le concept de résilience peut donc servir au développement de méthodes d'évaluation et de conception dans le cadre de l'adaptation des systèmes de culture au changement climatique, avec pour spécificité d'introduire la notion de compromis entre fonction de production et services écosystémiques sur le long terme. La notion de compromis soulève également la nécessité d'évaluer la réponse du système à travers un ensemble d'échelles spatiales et temporelles, mais aussi d'ordre écologiques, sociales et économiques, à l'image des réflexions autour des stratégies d'adaptation des systèmes de production au changement climatique.

2.3 L'agroforesterie, une pratique agricole pertinente pour s'adapter au changement climatique ?

Par définition, l'agroforesterie représente un ensemble de pratiques agricoles où l'arbre tient une place centrale au sein du système de production. Il existe une vaste déclinaison des systèmes agroforestiers, qui associent à minima une strate arborée, une strate herbacée et/ou des animaux au sein d'une même surface cultivée, dont la diversité est parfois synthétisée à l'aide d'un diagramme ternaire (Figure 8). Ce diagramme reste cependant une représentation synthétique des systèmes référencés sous le terme "agroforesterie". Certains systèmes, notamment ceux observés en zone tropicale, sont particulièrement complexes puisque le nombre d'étages au sein de la strate arborée est plus élevé. C'est le cas par exemple des systèmes de culture traditionnels pour la culture du cacaoyer sous les tropiques. D'autres systèmes présentent également une strate arbustive ou grimpante, à l'image des certains vignobles traditionnels où certaines vignes grimpent sur les arbres (*e.g.* Altieri and Nicholls 2002). L'étagement des strates constitue une base de réflexion importante pour la conception de designs agroforestiers, et la part de plantes pérennes au sein de la strate arbustive pourrait prendre une part plus importante en contexte tempéré et méditerranéen dans le cadre d'une production fruitière (Lauri, 2021; Lovell et al., 2017).

Les pratiques agroforestières s'appuient sur la diversité importante des systèmes agricoles traditionnels à travers le monde dans lesquels les arbres font partie intégrante du système de production. Cette pratique est longtemps restée inféodée au milieu des paysans ou des petits cultivateurs où l'arbre constitue une diversification substantielle et pérenne de la production. Il permet ainsi de faire face aux aléas de production. En Corse, les châtaigneraies étaient traditionnellement associées à d'autres productions agricoles sur le même espace (*e.g.* maraîchage et élevage). Elles constituaient un facteur de résilience sociétale (*i.e.* sous les aspects agricoles, économiques, sociaux et politiques) très fort du moyen-âge jusqu'au milieu des années 1950 (Michon, 2011). Ainsi, plusieurs "sociétés de la châtaigne" en France (*e.g.* en Ardèche, dans le Haut-Languedoc, en Corse), en Italie, en Espagne et au Portugal ont existé pendant cette période. De façon plus générale, on trouve une grande diversité de pratiques agroforestières sur le pourtour méditerranéen, autour d'arbres emblématiques tels que l'olivier, l'arganier, le chêne vert ou le noyer (Michon, 2011). Ces pratiques s'inscrivent aujourd'hui majoritairement dans le cadre de pratiques sylvo-pastorales (den Herder et al., 2017), mais on trouve encore localement des associations agroforestières traditionnelles avec des cultures annuelles typiques de la région, à savoir les céréales et les légumineuses (Daoui and Fatemi, 2014; Temani et al., 2021).

La conception des systèmes agroforestiers concerne aussi des pratiques agricoles modernisées : l'agroforesterie intraparcellaire (ou "*alley cropping*" en anglais) est compatible avec la mécanisation, en combinant des allées cultivées et des alignements d'arbres réguliers et dimensionnés en fonction des machines. Ce type d'agroforesterie est particulièrement adapté pour les grandes cultures. Selon Kang (1993), l'agroforesterie intraparcellaire viserait ainsi à concilier "l'art et la sagesse des paysans traditionnels avec l'efficacité de la science actuelle". En contexte tempéré et méditerranéen, des essais à long-terme sur des parcelles expérimentales ont été lancés à partir

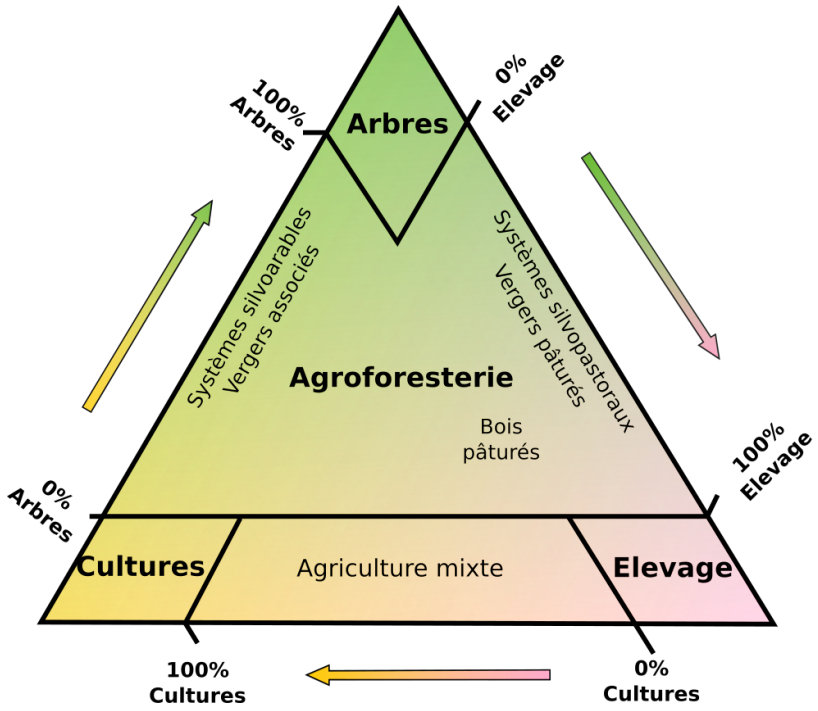


Figure 8 Diagramme ternaire des différentes composantes d'un système agricole qui permettent de définir un système agroforestier selon le projet AGFORWARD (Burgess et al., 2018).

des années 1980 au Canada (Université de Guelph, 1987), en France (Centre INRA de Montpellier, 1995) et aux Etats-Unis (Université du Missouri, 1997). Depuis, l'intérêt des agriculteurs, des conseillers et des chercheurs s'accroît. Malgré tout, cette pratique reste encore marginale dans le paysage agricole, et les estimations d'agroforesterie intraparcellaire avec des cultures annuelles sont de l'ordre de 11700 ha à l'échelle de la France[8] (soit 0.04% de la surface agricole utile (SAU) ; den Herder et al. 2017) et de 580000 ha à l'échelle européenne (soit 0.3% de la SAU - den Herder et al. 2017).

Les rapports du GIEC mentionnent explicitement l'agroforesterie comme une pratique pertinente pour atténuer le changement climatique et s'adapter à ses effets. Concernant les aspects d'adaptation, l'agroforesterie est mentionnée avant tout pour les zones tropicales (Amérique Centrale et du Sud, Afrique Centrale, Asie du Sud-Est), et ensuite pour les zones désertiques d'Afrique. Le rôle de l'agroforesterie dans la lutte contre la désertification et l'adaptation à la sécheresse est mis en avant dès le second rapport d'évaluation pour les régions arides du continent africain (Tableau 2). Cet aspect revient de façon plus explicite lors du 5ème rapport d'évaluation, où l'agroforesterie est mentionnée pour faire face à des épisodes de sécheresse et de canicule intense, en particulier dans les documents de vulgarisation destinées aux décideurs politiques. Bien que le recul scientifique existant reste limité et s'appuie originellement sur des pratiques traditionnelles

[8] Ces chiffres méritent toutefois d'être nuancés car la méthodologie d'identification et de classification des parcelles agroforestières proposée par den Herder et al. (2017) reste critiquable. Il n'existe pas encore d'étude précise à l'échelle de la France. Les chiffres européens interpellent également. Par ailleurs, l'intérêt et la dynamique actuelle pour les projets de plantation de parcelles agroforestières est croissante, et nécessiterait d'actualiser régulièrement les estimations. A dire d'expert, les estimations actualisées (*i.e.* en 2020) de la surface totale des parcelles plantées en agroforesterie intraparcellaire se situerait plus autour de 40000 à 50000 ha (Fabien Liagre, communication personnelle).

Tableau 2 Evolution de l'occurrence du terme "*agroforestry*" au sein des rapports d'évaluation (RE) établis par le GIEC sur les stratégies spécifiquement dédiées à l'adaptation au changement climatique. Seules les mentions explicites, situées dans le corpus de texte ont été considérées.

Rapport du GIEC	Chapitre considéré	Occurrence du mot "*agroforestry*"
1er RE (1990)	"*The IPCC Response Strategies*"	0[a]
2ème RE (1995)	"*Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change : Scientific- Technical Analyses*"	6[a]
3ème RE (2001)	"*Impacts, Adaptation and Vulnerability*"	12
4ème RE (2007)	"*Impacts, Adaptation and Vulnerability*"	3
5ème RE (2014)	"*Impacts, Adaptation and Vulnerability*" Partie A : Aspects globaux Partie B : Aspects régionaux	27 (3[b]+ 4[c]+ 3[d]) (17)

[a] Les mentions relatives à la notion d'atténuation ont été soustraites, à savoir 10 dans le 1er RE et 41 dans le 2nd RE car les stratégies d'atténuation et d'adaptation aux changements climatiques étaient rassemblées dans le même document ; [b] Synthèse pour les décideurs politiques ; [c] Synthèse technique ; [d] Corpus principal

(Altieri et al., 2015), l'agroforesterie semble être préconisée pour faire face à des aléas climatiques particulièrement intenses.

Les bénéfices apportés par l'association d'arbres et de cultures au sein d'une parcelle peuvent s'appréhender sous de multiples facettes, puisque l'introduction d'arbre au sein d'une parcelle complexifie la structure spatiale et temporelle (Duru et al., 2015). A l'instar de l'assolement à l'échelle d'une exploitation, ou de la rotation de culture à l'échelle de la parcelle, l'agroforesterie est une pratique de diversification qui peut permettre de faire face aux aléas climatiques. Au niveau des cycles biogéochimiques, des études montrent une amélioration du recyclage des éléments nutritifs par la présence du système racinaire profond des arbres (Dupraz and Liagre, 2008; Wolz et al., 2018), le stockage de matière organique dans le sol par incorporation de la litière aérienne et dégradation de la litière souterraine (Cardinael et al., 2015a, 2017, 2018; Pardon et al., 2017). A terme, ces effets peuvent contribuer à améliorer l'infiltration de l'eau (Anderson et al., 2009; Wang et al., 2015) ainsi qu'à limiter les écoulements de surface et l'érosion (Narain et al., 1997a). L'introduction d'alignements d'arbres au sein de la parcelle contribue également à créer des habitats favorables à la présence d'auxiliaires qui peuvent contribuer à la lutte biologique contre les ravageurs des cultures (Boinot et al., 2019a; Pardon et al., 2019). La présence d'arbres dans les parcelles modifie également le microclimat, par l'ombre des arbres qui diminue le rayonnement reçu par les cultures, par la transpiration des arbres qui humidifie l'air, par le masque nocturne de la voûte céleste qui réduit le refroidissement radiatif et par les effets (positifs ou négatifs selon la direction du vent) sur la vitesse du vent. Une vision d'ensemble des services écosystémiques fournis par les systèmes agroforestiers est proposée par Jose (2009). Ces aspects constituent probablement des atouts pour faire face à certains aléas climatiques. Mais la mise en place de systèmes agroforestiers peut induire un certain nombre de disservices, avec des baisses de rendement dus à la compétition

pour les ressources (Gillespie et al., 2000; Pardon et al., 2018; Reynolds et al., 2007; Thevathasan et al., 2004), une perturbation des cycles biogéochimiques (*e.g.* immobilisation temporaire de l'azote par apport des matières organiques) (Jose et al., 2000), ou encore une augmentation des pressions de maladies sur les cultures par modification du microclimat (Schroth et al., 1995). Ces aspects nécessitent donc d'être évalués en lien avec la productivité du système agroforestier.

3 L'agroforesterie, principes écologiques pour l'étude de la productivité

Par abus de langage et par simplification de l'écriture, les termes "agroforesterie" et "systèmes agroforestiers" feront référence implicitement aux designs agroforestiers intra-parcellaires (ou alley cropping en anglais) pour la suite du manuscrit, sauf mention contraire.

3.1 Productivité d'un système agroforestier intraparcellaire

L'analyse de la productivité globale d'une parcelle agroforestière est généralement évaluée de façon relative selon le concept de surface équivalente assolée (ou Land Equivalent Ratio - LER). La notion de LER a été définie par Mead and Willey (1980) et permet de quantifier la productivité d'une association culturale en calculant la surface nécessaire en conditions de monoculture pour obtenir la même production qu'au sein de l'association. Pour un système agroforestier, on peut donc écrire l'équation suivante (TA pour témoin agricole, TF pour témoin forestier, AF pour l'agroforesterie) :

$$LER = LER_{\text{partiel,arbre}} + LER_{\text{partiel,culture}} = \frac{Rendement_{\text{arbre,AF}}}{Rendement_{\text{arbre,TF}}} + \frac{Rendement_{\text{culture,AF}}}{Rendement_{\text{culture,TA}}}$$

L'association agroforestière sera considérée comme avantageuse si la valeur du LER est supérieure à 1. Dans le cas des systèmes à base d'arbres fruitiers, où la récolte est annuelle ou biannuelle, des LER annuels/biannuels positifs ont déjà été publiés pour des systèmes à base d'oliviers (Panozzo et al., 2019; Temani et al., 2021) ou de jujube (Wang et al., 2014). Par ailleurs, le calcul de LER nécessite la présence de parcelles forestières et agricoles comparables, ce qui nécessite des dispositifs expérimentaux lourds et sur le long terme, pour lesquels l'hétérogénéité locale du sol ne se révèle que lorsque les arbres sont bien développés. Cela peut empêcher de comparer rigoureusement les différentes modalités en l'absence d'un nombre suffisant de répétitions. Pour cette raison, il n'existe pas encore de données mesurées et publiées de LER pour des systèmes agroforestiers à base de bois d'œuvre sur un cycle complet. Des travaux de modélisation existent malgré tout à titre indicatif et proposent des LER compris entre 1 et 1.4 en Europe de l'Ouest pour des systèmes avec une densité d'arbres comprise entre 50 et 113 arbres.ha^{-1} (Graves et al., 2007; Sereke et al., 2015). Pour la culture intercalaire, qui constitue le revenu annuel de l'agriculteur avant que les arbres ne soient récoltés, le rendement peut baisser au fur et à mesure que les arbres se développent et que la compétition pour la lumière ou les ressources du sol augmente. Des effets de facilitations ont

malgré tout été observés, lors d'années extrêmes, par forte chaleur par exemple (Arenas-Corraliza et al., 2018). Il est donc essentiel de comprendre comment les interactions arbre-culture régissent la productivité du système agroforestier.

3.2 Les interactions arbres-culture, un équilibre dynamique et contextuel

Bien que les sciences écologiques aient défini de nombreuses interactions écologiques entre les êtres vivants, Vandermeer (1989) propose de réduire et de synthétiser les interactions entre espèces au sein des associations de cultures avec deux concepts : la compétition et la facilitation. Dans le cadre d'analyse proposé par Vandermeer (1989), la notion de compétition se réfère au partage d'une ressource entre les espèces associées. La compétitivité d'une culture est proportionnelle à la part de la ressource qu'elle capture. Une culture A sera considérée comme peu compétitive si elle capture moins de ressources que la culture B lorsque les deux cultures sont associées. La compétition dépend de nombreux processus : synchronisme ou pas des besoins (phénologies décalées), efficacité des organes de captation de la ressource (*e.g.* feuilles ou racines), architecture spatiale et temporelle des plantes (*e.g.* racines superficielles ou profondes).

Les relations de compétition entre l'arbre et la culture sont de nature différente en fonction de la ressource concernée. Il est possible de distinguer une certaine typologie dans les interactions de compétition entre deux espèces différentes. Craine and Dybzinski (2013) font la distinction entre les effets de compétition par i) préemption de la ressource, lorsqu'une espèce A réduit la quantité de ressource disponible pour une espèce B sans que l'espèce B ne puisse rien faire, et par ii) réduction de la disponibilité, lorsque les deux espèces A et B ont accès à la même ressource. Dans un système agroforestier, on observe ainsi des effets de compétition par préemption pour l'acquisition de la lumière par l'arbre qui domine la culture, et pour l'acquisition de l'eau des pluies par une culture à enracinement superficiel si l'arbre a uniquement des racines profondes. L'intensité de la compétition est fortement dynamique. Au moment de l'implantation de la parcelle, les arbres sont peu développés. Les cultures intercalaires ont donc un fort pouvoir compétitif en réduisant la disponibilité de l'eau et des nutriments accessibles pour l'arbre. Dans le cas de culture de taille imposante, telle que le maïs, la culture peut même réduire la lumière disponible pour l'arbre au début de la rotation agroforestière. Au fur et à mesure que l'arbre se développe, le rapport compétitif pour la lumière entre l'arbre et la culture s'inverse. Par ailleurs, l'intensité des effets de compétition au sein des systèmes agroforestiers dépend fortement des complémentarités des besoins, dans l'espace et dans le temps. Ces complémentarités peuvent être renforcées par la plasticité phénotypique des espèces cultivées, qui s'adaptent l'une à l'autre.

La complémentarité peut s'interpréter avec le concept de niche écologique : les besoins d'une espèce peuvent être décrits par un espace multidimensionnel, dénommé niche fondamentale. En interagissant avec d'autres espèces, cette niche peut être modifiée - on parle alors de niche réalisée. Pour une espèce donnée, la modification de cette niche peut survenir de façon passive, par réduction de la disponibilité d'une ressource par une autre espèce, ou de façon active, par plas-

ticité de certains traits pour accéder à des ressources jusqu'alors inaccessible (*e.g.* déformation racinaire, élongation des tiges, etc). La notion de complémentarité est centrale pour des systèmes agroforestiers, où des cultures annuelles et pérennes sont associées, et constitue une base de réflexion importante pour les designs agroforestiers. Cannell et al. (1996) ont d'ailleurs proposé de formuler une "hypothèse centrale biophysique de l'agroforesterie". Cette hypothèse stipule que pour qu'un système agroforestier soit fructueux, "les arbres doivent acquérir des ressources que la culture n'aurait pas acquises autrement". La conception des systèmes agroforestiers mobilise donc les aspects liés à la complémentarité spatiale (*e.g.* ségrégation des systèmes racinaire pour l'accès aux ressources du sol) et temporelle (*e.g.* association agroforestière basée sur des rotations à base de cultures d'hiver, pour bénéficier du développement hivernal de la culture lorsque les arbres sont dépourvus de feuilles). Lors de la conception, les conditions locales doivent être prises en compte, pour pouvoir anticiper si des effets de complémentarité pourront avoir lieu. Par exemple, Smith et al. (1997) montrent au Sahel que les prélèvements en eau seront spatialement différenciés entre une culture de millet et des arbres de bordure si la nappe phréatique peut être atteinte par le système racinaire des arbres.

Dans l'approche de Vandermeer (1989), ce sont les processus de facilitation qui sont au cœur du fonctionnement efficace des mélanges d'espèces. Ce sont les processus qui augmentent les ressources à partager (via la compétition) entre les espèces. Avec la facilitation, la présence d'une culture profite à la productivité de la culture associée. Il peut s'agir d'amélioration de la quantité de ressources disponibles : meilleure infiltration des pluies, meilleure capacité de rétention en eau du sol, diminution du ruissellement, retour de nutriments grâce aux racines profondes des arbres (pompe à nutriments, filet de sécurité racinaire). Mais il peut aussi s'agir d'effets microclimatiques ou de régulation des populations des bioagresseurs.

Dans les systèmes agroforestiers, il existe plusieurs types d'effets facilitateurs en fonction des processus impliqués. On parle par exemple d'effet "refuge" (nurse effect) pour décrire la modification du microclimat sous les arbres qui favorise le développement de plantes présentes sous la canopée. En limitant les amplitudes thermiques et l'évapotranspiration, la modification du microclimat peut jouer un rôle protecteur dans le cadre de températures élevées (Arenas-Corraliza et al., 2018). Le système taungya (association de cultures vivrières dans de jeunes plantations forestières tropicales) est un autre exemple de mise à profit d'un effet facilitateur en système agroforestier, mais où cette fois-ci, c'est la culture qui facilite l'installation des arbres grâce au désherbage qui réduit la compétition des adventices sur le développement des jeunes arbres (Schroth and Sinclair, 2003). Certaines associations agroforestières peuvent également améliorer la disponibilité pour certains nutriments, en favorisant la mise en place d'interactions écologiques avec d'autres microorganismes du sol, soit par fixation symbiotique de l'azote atmosphérique chez les légumineuses (Querné et al., 2017), soit par augmentation du potentiel d'acquisition de nutriments dans le cadre d'une association mycorhizienne (Battie-Laclau et al., 2019).

3.3 Réponses écophysiologiques de la culture intercalaire agroforesterie

Le cadre d'analyse offert par l'écologie est intéressant car il est intégrateur et permet donc de faire face à la complexité des interactions écologiques au sein des systèmes agroforestiers. Cependant, l'analyse de la productivité de la culture intercalaire peut également s'envisager sous l'angle de l'écophysiologie végétale, dont quelques notions sont succinctement présentées ici.

La réduction de la lumière disponible pour la culture intercalaire limite le potentiel de production de biomasse pour une plante individuelle par réduction de l'activité photosynthétique intégrée au cours de son cycle de développement. Au niveau d'un couvert végétal, une relation entre la biomasse produite (Δ DM) et le flux de lumière incident a été proposée par Monteith (1972, 1977) selon l'équation suivante :

$$\Delta DM = \int_{t_1}^{t_2} PAR_{inc}(t) \cdot RIE(t) \cdot RUE(t) \cdot dt$$

où PAR_{inc} est le flux incident de rayonnement photosynthétiquement actif (PAR - *Photosynthetically Active Radiation*), RIE est l'efficience d'interception du rayonnement (RIE - *Radiation Interception Efficiency*), à savoir la proportion de lumière incidente interceptée par la surface foliaire de la culture, et RUE est l'efficience de conversion du rayonnement (RUE - *Radiation Use Efficiency*), à savoir la quantité de biomasse produite par unité de radiation interceptée par la culture. Les termes de cette équation permettent donc de comprendre les processus physiques impliqués dans le bilan radiatif de la culture. Cette équation est descriptive, et ne permet pas de comprendre quels sont les processus physiologiques impliqués dans la production de biomasse de la plante. Elle ne prend pas en compte non plus l'indice de récolte. Par exemple, des stress hydriques ou thermiques intenses peuvent altérer des processus spécifiques lors du remplissage du grain, ce qui peut se traduire par une réduction de la RUE apparente. De même, des conditions de croissance particulières au cours du développement de la plante pourront également influencer les processus relatifs lors du développement foliaire, affectant alors la RIE. Cette équation est générique et constitue la base mathématique de la plupart des modèles de cultures dits "mécanistes", tel que STICS (Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard) développé au sein de l'INRA depuis 1995 (Brisson et al., 2009). Dans ces modèles, des formalismes supplémentaires permettent de simuler les effets des conditions environnementales et des itinéraires techniques sur le développement de la culture en modifiant la dynamique de la RIE et de la RUE (Brisson et al., 2009).

Outre la réduction du potentiel de production de biomasse par la diminution de la lumière incidente, le potentiel de biomasse peut également être réduit par réduction de la disponibilité en eau, en nutriment ou encore du fait de maladies ou de ravageurs de cultures : on parle alors de stress. Lambers et al. (2008b) définit un stress comme un facteur environnemental (ou en d'autres termes, une contrainte environnementale) qui interfère avec le déroulement de certains processus physiologiques et réduit ainsi le potentiel de production que la plante pourrait autrement atteindre. On

distingue une multitude de stress, d'ordre biotique (*e.g.* une maladie foliaire) ou abiotique (*e.g.* contrainte hydrique lors d'une sécheresse). Bien souvent, la notion de stress en conditions de culture en plein champ est complexe à aborder, car les conditions de culture sont rarement optimales au sens strict du terme, puisqu'il est rare que les ressources soient disponibles dans des quantités et des proportions suffisantes (*e.g.* des antagonismes existent au niveau des prélèvements des éléments minéraux du sol). Lorsque l'on tente de définir un stress, il est donc important de définir sa nature, son intensité, le moment de son apparition et sa durée par rapport au cycle de la culture. Dans le cadre d'un stress hydrique, la nature de la contrainte hydrique peut survenir à la fois par une réduction de l'eau disponible pour la plante (définie globalement comme l'eau du sol accessible par le système racinaire de la plante) et/ou par une augmentation de la demande évaporative. Les réponses physiologiques à l'échelle de la plante se traduisent alors par une modification des signaux hormonaux (Davies et al., 1994) et des échanges de matière au sein de la plante elle-même (*e.g.* processus osmotique) et entre la plante et son environnement (*e.g.* échange gazeux par contrôle stomatique). A l'échelle cellulaire, ce sont à la fois les processus de division cellulaire et les processus d'élongation cellulaire qui sont affectés (Tardieu et al., 1999), avec pour conséquence une modification des traits aériens et racinaires à l'échelle de la plante (Lozano et al., 2020). La notion de stress lumineux semble être de nature tautologique de prime abord puisque la quantité de lumière est directement liée à l'activité photosynthétique potentielle d'une plante. Malgré tout, l'étude de la courbe de saturation de la photosynthèse révèle que chaque espèce végétale diffère quant à sa capacité à maintenir une activité photosynthétique nette en fonction du flux lumineux incident (Arenas-Corraliza et al., 2019). Par ailleurs, l'environnement lumineux affecte les processus photosynthétiques en fonction de la nature optique du rayonnement, définie entre autres par son spectre lumineux (*e.g.* proportion de rayons UV), par les caractéristiques de propagation de la lumière (*e.g.* proportion du rayonnement direct/diffus) et par l'intensité du flux lumineux (Yang et al., 2019), ainsi que par des phénomènes de photomorphogénèse (effet de la composition spectrale sur l'architecture des plantes), qui modifient la capacité d'interception de la lumière par une plante du fait de la présence d'autres plantes (Gautier and Varlet-Grancher, 1996). A l'échelle de la feuille, la dynamique de l'ombrage affecte l'ouverture stomatique et donc la dynamique des échanges gazeux (Kirschbaum et al., 1988). Enfin, à l'échelle de la plante, on observe une modification des traits foliaires (*e.g.* modification de la surface foliaire spécifique), qui compense en partie la réduction de lumière en augmentant la surface d'interception (Arenas-Corraliza et al., 2018). Dans un cadre d'analyse agronomique, la notion de stress lumineux mobilise plus spécifiquement la notion de période critique, qui définit une période de sensibilité particulière (*e.g.* la floraison) pendant laquelle le rendement (*e.g.* uniquement la fraction récoltée de la plante) sera fortement impactée lors d'une réduction de l'intensité lumineuse (Lake and Sadras, 2014). Dans ce cas, la notion de stress lumineux se focalise donc essentiellement sur les processus d'allocation de la biomasse à l'échelle de la plante.

En contexte agroforestier, la caractérisation de la réponse physiologique à l'échelle des cultures intercalaires est complexe car les conditions environnementales sont d'une part hétérogènes et fluctuantes, et d'autre part radicalement différentes des conditions en plein soleil. L'introduction

d'une strate arborée au sein d'une parcelle agricole modifie à la fois les flux de matière et d'énergie, au niveau souterrain et aérien, avec pour conséquence la multiplication des facteurs qui influencent le développement des plantes à l'ombre. L'impact des conditions agroforestières sur les cultures intercalaires est de plus en plus documenté. L'analyse des composantes du rendement montre par exemple que la diminution du nombre de grains produit par les cultures intercalaires est un aspect physiologique important (Abbasi Surki et al., 2020; Dufour et al., 2020; Poschen, 1986; Temani et al., 2021; Yang et al., 2019), bien que des exceptions soient parfois rapportées (Rivest et al., 2013a). Des expérimentations parallèles menées avec des ombrières imitant artificiellement la dynamique d'ombrage des arbres concluent également à des réductions du nombre de grains malgré l'absence de compétition souterraine (Artru, 2017; Dufour et al., 2013). La mobilisation des connaissances écophysiologiques est donc pertinente pour expliquer la réponse des cultures en agroforesterie. Cependant, cela nécessite une bonne caractérisation du système étudié, tant au niveau des conditions de culture que des traits physiologiques observés à l'échelle de la plante.

3.4 Incertitudes concernant l'agroforesterie en tant que levier d'adaptation au changement climatique

Dans un contexte de changement climatique, la dynamique des interactions au sein d'un système agroforestier est difficile à prévoir. La recherche en agroforesterie a principalement mis l'accent sur la compréhension des effets de compétition et de complémentarité, mais moins sur les aspects de facilitation (Wolz and DeLucia, 2018). Certaines études suggèrent que la complémentarité spatiale des prélèvements en eau pourrait être maintenue en conditions arides ou de sécheresse extrême (Gao et al., 2018; Smith et al., 1997), mais ces études concernent des lieux où la profondeur de sol disponible est conséquente. Par ailleurs, il existe très peu de recul sur la dépendance des effets de complémentarité pour le prélèvement en eau pour différentes essences d'arbres. On ne peut pas exclure que dans certaines situations, les effets de compétition pourraient être exacerbés. Les effets de facilitation pourraient également jouer un rôle important au niveau de la culture intercalaire dans un contexte de sécheresse ou de forte chaleur. Dans des systèmes denses et/ou agés, de fortes réductions des températures de l'air ont été reportées (Gosme et al., 2016; Lott et al., 2009) et de meilleurs rendements observés en systèmes agroforestiers denses ont été attribués à une réduction des températures pendant des stades sensibles d'élaboration du rendement chez les céréales (Arenas-Corraliza et al., 2018). Cependant, on connaît encore mal quelles sont les situations où ces effets facilitateurs pourraient compenser les effets de compétition pour les ressources entre l'arbre et les cultures. En dehors du contexte pédoclimatique, l'équilibre entre les effets de compétition et de facilitation est probablement dépendant du design agroforestier et des interventions de gestion des cultures et des arbres.

Par conséquent, de nombreuses questions restent donc non-élucidées pour le moment, telles que : "*Quel rôle jouent les conditions pédoclimatiques dans le maintien de la fonction de production d'un système agroforestier en contexte de changement climatique ?*" "*Dans quelle mesure la mise en place d'un système agroforestier permet-elle de maintenir, voire d'améliorer, le rendement d'une*

culture intercalaire dans un contexte de changement climatique ?" "*Les itinéraires techniques de gestion des cultures et des arbres représentent-ils des leviers supplémentaires au sein d'un système agroforestier pour s'adapter au changement climatique ?*" Ces questions sont trop générales pour pouvoir espérer une réponse simple et valable dans de nombreux contextes pédo-climatiques. Mais elles traduisent néanmoins le questionnement actuel des agriculteurs, des techniciens et des chercheurs intéressés ou curieux vis-à-vis de ces systèmes. La diversification de la production, la complexité des mécanismes de régulation interne et l'hétérogénéité des conditions rencontrées au sein des systèmes agroforestiers sont soit perçues comme un atout pour faire face à un climat de plus en plus instable, soit comme un désavantage dans une situation qui s'annonce complexe en termes de gestion.

Les projets de recherche en agroforesterie se heurtent à la rareté des parcelles agroforestières et des sites expérimentaux disponibles pour les projets de recherche. Si l'on observe globalement un engouement de plus en plus important de la part des agriculteurs, des conseillers et des politiques, le recul reste limité vis-à-vis de ces systèmes de culture. En climat tempéré ou méditerranéen, les arbres agroforestiers restent encore jeunes et/ou peu développés au sein de la majorité des parcelles agroforestières installées et suivies, et le degré d'interaction entre les arbres et les cultures reste donc limité. Cet aspect limite fortement le recul et la compréhension des interactions écologiques au sein d'un système agroforestier et des processus écophysiologiques à l'échelle de la plante, notamment en conditions fortement ombragées. La mise en place d'une parcelle agroforestière étant un investissement coûteux et dont la rentabilité s'établit sur le long-terme, il est nécessaire que la recherche imagine des solutions afin de collecter des données permettant d'évaluer si les systèmes agroforestiers avec des arbres bien développés représentent un potentiel d'adaptation crédible face au changement climatique.

4 Problématique et questions de recherche

Le présent travail de thèse s'inscrit dans une logique d'approfondissement des connaissances sur le fonctionnement des systèmes agroforestiers, et sur leur modification par le changement climatique. L'exposé en introduction a rappelé que le changement climatique se traduit par une évolution complexe d'un ensemble de facteurs climatiques. Dans le cadre d'une expérimentation au champ, il est nécessaire de faire des choix de facteurs à tester. Ce travail de thèse va être consacré aux effets de la sécheresse de printemps sur la culture intercalaire en agroforesterie. En effet, les systèmes agroforestiers avec des arbres bien développés offrent un environnement potentiellement bénéfique pour la culture associée en conditions de sécheresse, avec de nombreux processus de facilitation potentielle : réduction de la demande évaporative, protection contre les excès de température, etc. Cependant, ces effets bénéfiques liés surtout à l'amélioration du microclimat pourraient être contrebalancés par les effets de compétition entre l'arbre et la culture associée pour les ressources aériennes et souterraines. Il est difficile de prévoir a priori le résultat final de ces aspects de compétition et de facilitation sur la production de la culture.

Dans la première partie de ce travail de recherche, on réfléchira aux approches méthodologiques pertinentes pour étudier la réponse des systèmes agroforestiers à des épisodes de sécheresse. On cherchera à tester l'hypothèse suivante :

"*Les expérimentations de manipulation du régime de pluie au champ peuvent permettre de comprendre les processus impliqués dans la productivité des systèmes agroforestiers face à des épisodes de sécheresse*"

Dans une seconde partie du travail de recherche, on approfondira la réponse écophysiologique de la culture intercalaire et on testera l'hypothèse suivante :

"*La modification de l'élaboration du rendement de la culture intercalaire en conditions agroforestières permet de mieux résister à un épisode de sécheresse printanière*"

Après cette étude sur l'élaboration du rendement de la culture, on cherchera ensuite à comprendre comment étudier la réponse de la culture à un épisode de sécheresse en considérant le caractère dynamique des conditions de culture et de son développement. On testera l'hypothèse suivante :

"*Les conditions agroforestières diminuent le stress hydrique de la culture intercalaire lors d'un épisode de sécheresse et maintiennent la production globale de biomasse.*

Afin de tester ces hypothèses, nous avons conçu des dispositifs mobiles permettant d'exclure certains épisodes pluvieux et nous les avons mis en œuvre sur la parcelle A2 de la plateforme de recherche en agroforesterie du Domaine de Restinclières (Prades-le-Lez, Hérault, France). L'utilisation des dispositifs d'exclusion de pluie ayant été difficile, avec des aléas techniques et climatiques, l'ensemble des résultats de terrain présentés dans ce manuscrit de thèse (chapitres 2 et 3) concerneront essentiellement la seconde année d'expérimentation (2018-2019), au cours de laquelle une culture de pois d'hiver a été semée.

Deuxième partie

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Matériels et méthodes

1. Site expérimental
2. Dispositif d'exclusion de pluie et design expérimental
3. Caractérisation des conditions de culture en contexte agroforestier
4. Suivi de la culture et de son itinéraire technique
5. Mesure du rendement et de ses composantes
6. Indicateurs de stress physiologique retenus
7. Synthèse des indicateurs sélectionnés pour les chapitres et la discussion

1 Site expérimental

1.1 Domaine de Restinclières - plateforme historique de la recherche agroforestière en France

Depuis 1995, une plateforme de recherche en agroforesterie a été installée au sein du domaine départemental de Restinclières, à Prades-le-Lez (Hérault). Au total, 45 ha sont cultivés en agroforesterie (Figure 9). Le domaine se compose de parcelles viticoles au Nord (sur sols marno-calcaires caillouteux) et des parcelles de grandes cultures au Sud (sols alluviaux situés le long de deux rivières, le Lez et le Lirou). Avec maintenant plus de 25 ans de suivi, le site de Restinclières est considéré comme l'un des sites expérimentaux les plus anciens d'Europe pour l'étude des systèmes d'agroforesterie intra-parcellaire. Depuis 1995, l'étude de la productivité des systèmes agroforestiers s'est déclinée sous la forme de nombreuses thématiques de recherche telles que l'étude de la dynamique racinaire des arbres (Cardinael et al., 2015b; Germon et al., 2016; Mohamed et al., 2018, 2020; Mulia and Dupraz, 2006), les effets de compétition lumineuse (Dufour et al., 2013; Inurreta-Aguirre et al., 2018), les flux azotés (Andrianarisoa et al., 2016; Mahieu et al., 2016; Querné et al., 2017), les effets de facilitation microclimatique (Gosme et al., 2016; Grimaldi, 2018), l'impact de la gestion des itinéraires sylvicoles sur la productivité de la culture (Dufour et al., 2020; Inurreta-Aguirre, 2018), le potentiel de stockage de carbone (Cardinael et al., 2015a, 2018), le fonctionnement microbiologique du sol (Guillot et al., 2019), les services de support ou de régulation biologique (Boinot et al., 2019a; Cardinael et al., 2019; Mézière et al., 2016; Smits et al., 2012) et enfin le développement du modèle agroforestier Hi-sAFe (Talbot and Dupraz, 2012; Talbot, 2011; Dupraz et al., 2019). Le site a également alimenté des réflexions liées à la notion de témoin dans les designs expérimentaux en agroforesterie (Dupraz, 1999) ou plus largement sur la mise en place de plateformes expérimentales en agroforesterie tempérée (Lovell et al., 2017).

1.2 Climat

Le climat au domaine de Restinclières est de type méditerranéen à étés chauds selon la classification de Köppen. D'après les données météorologiques locales collectées depuis 1995, le climat annuel moyen est caractérisé par un cumul pluviométrique de 853 mm et une température de 14.1°C. Le climat mensuel moyen est présenté en Figure 10. Les précipitations sont importantes à partir de l'automne jusqu'au printemps. Durant l'automne, des épisodes pluvieux plus intenses sont observés, avec des cumuls journaliers parfois extrêmes (*i.e.* > 100 mm). Les températures mensuelles moyennes varient de 6.2°C (mois de janvier) à 23.0°C (mois de juillet). Le risque de gel est globalement limité (en moyenne 64 jours par an avec une température journalière minimale < à 0°C), alors que le nombre de jours chauds est élevé (en moyenne 122 jours par an avec une température journalière maximale > à 25°C). Ces jours chauds sont essentiellement distribués sur les mois de Juin à Septembre (80% des journées chaudes de l'année).

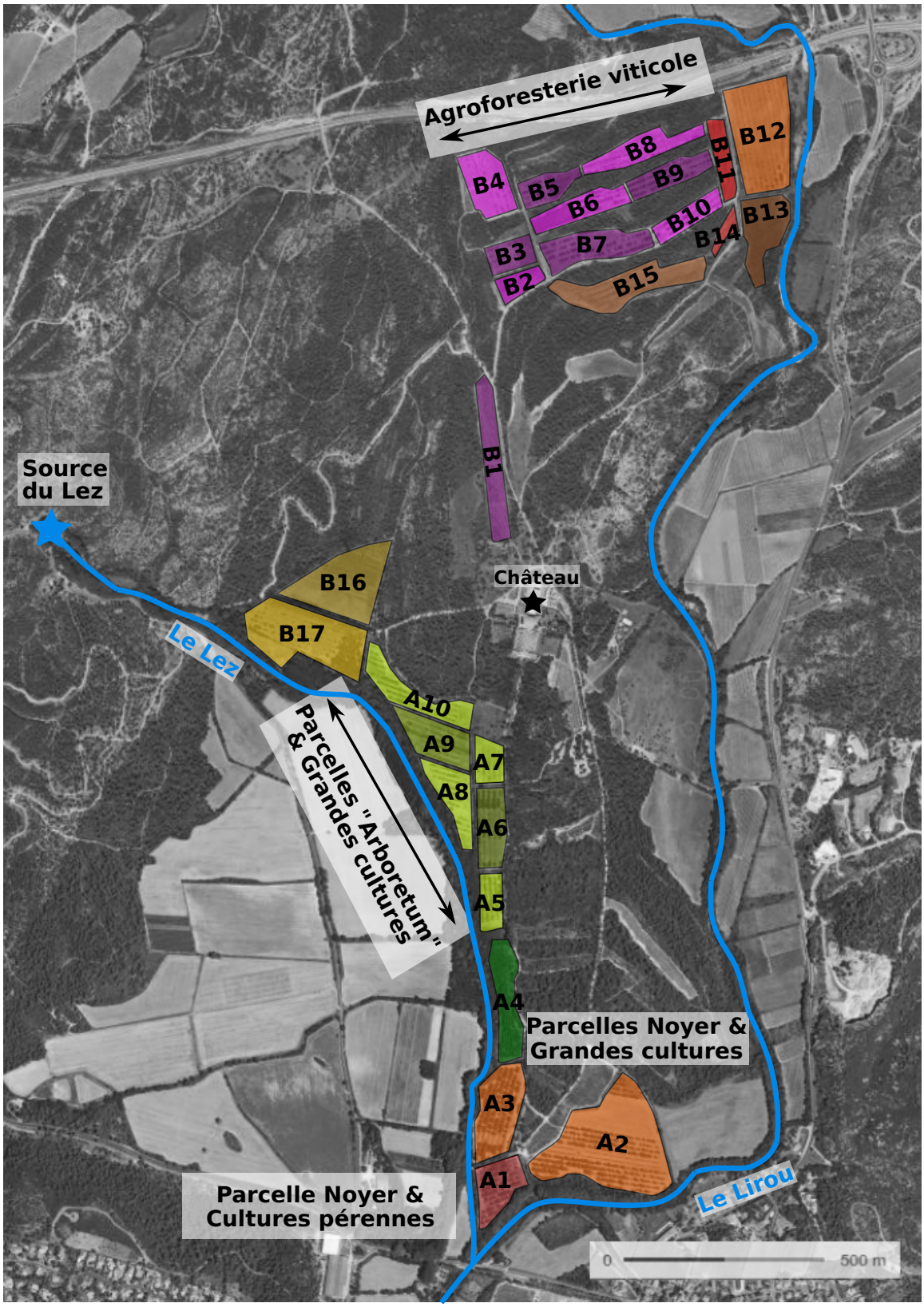


Figure 9 Carte des parcelles agroforestières du Domaine de Restinclières à Prades-le-Lez (Hérault, France). Crédit de la photographie aérienne : Géoportail (©IGN, Juin 2018)

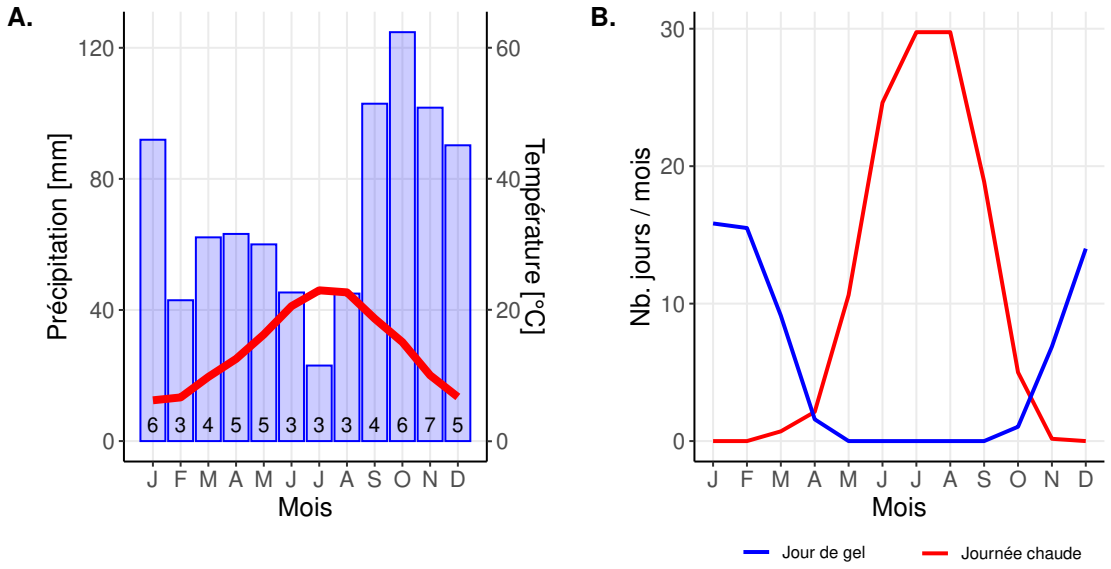


Figure 10 Climat moyen mensuel du Domaine de Restinclières (1994 - 2019), selon le diagramme climatique (A) et le nombre moyen de jours de gel (température minimale journalière < 0°C) et de journées chaudes (température maximale journalière > 25°C) (B). En A, les chiffres indiquent le nombre moyen de journées pluvieuses par mois.

1.3 La parcelle A2

La parcelle A2 est une des parcelles situées au Sud du domaine de Restinclières (Figure 11). Cette parcelle est divisée en trois : au nord, un témoin forestier (noyers à 200 arbres.ha^{-1} sans culture intercalaire), au centre une parcelle agricole (TA) et au Sud une parcelle en agroforesterie (AF). En AF, les lignes d'arbres sont espacées de 13 m et orientées Est-Ouest. A l'origine, la densité de plantation était de 200 arbres.ha^{-1}, avec un arbre planté tous les 4 m sur la ligne. La densité des arbres a été réduite en 2004 à 95 arbres.ha^{-1} par une coupe sélective (afin de conserver les arbres les plus beaux) si bien que l'agencement des arbres est maintenant plus irrégulier, avec des espacements entre les arbres sur la ligne de plantation allant de 4 à 12 m.

La parcelle A2 est une parcelle typique des sols alluviaux présents le long des cours d'eau dans la région. Le sol y est limoneux et particulièrement profond (entre 2.5 et 6 m). Une nappe phréatique est accessible en profondeur (à plus de 2.5 m de profondeur en général, et donc uniquement accessible par les arbres) sur la majeure partie de la zone Sud, et les relevés piézométriques suggèrent qu'elle peut disparaître pendant une partie de l'été. La parcelle A2 présente une homogénéité texturale relativement bonne au niveau des horizons de surface colonisés par la culture, tant au niveau du témoin agricole que de la modalité agroforestière comme l'ont révélé des analyses texturales spatialisées issues du travail de thèse de Cardinael (2015). Un léger gradient textural existe puisque la texture tend à devenir plus sableuse en se rapprochant du Lirou (Cardinael, communication personnelle). Globalement la variabilité texturale reste similaire en TA et en AF jusqu'à 100 cm (voir Figure D.1 en annexe).

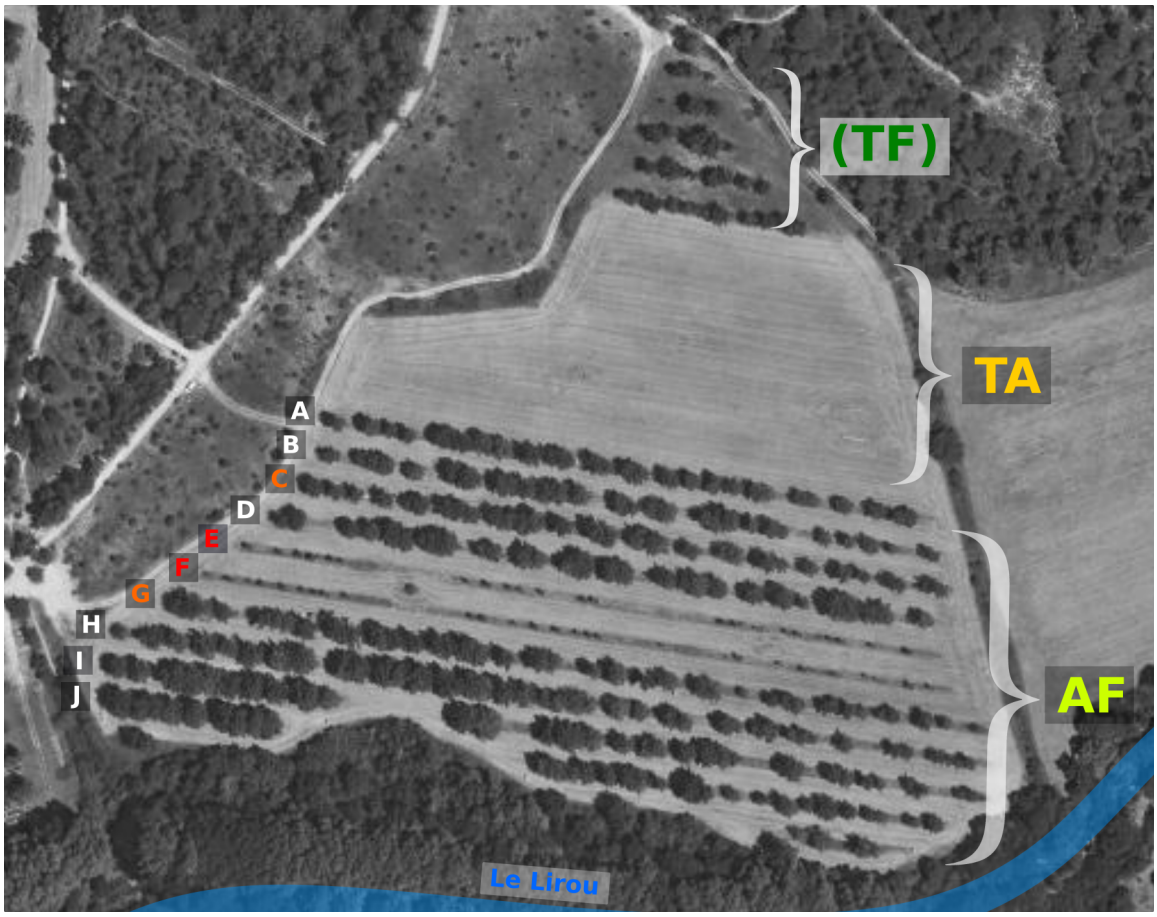


Figure 11 Plan de la parcelle A2 du Domaine de Restinclières. On retrouve les trois systèmes de production : un témoin forestier (TF), un témoin agricole (TA) et une modalité agroforestière (AF). En AF, différentes modalités de gestion du houppier ont été testées sur certaines lignes d'arbres. Ces modalités sont indiquées par la couleur de la lettre : en blanc, le houppier est élagué à 4 m de hauteur ; en orange, le houppier est élagué à 6 m de hauteur et en rouge, le houppier est taillé en trogne. Crédit de la photographie aérienne : Géoportail (©IGN, Juin 2018)

2 Dispositif d'exclusion de pluie et design expérimental

2.1 Choix du concept technique pour les dispositifs d'exclusion de pluie

Initialement, deux dispositifs pour exclure totalement des épisodes de pluie ont été construits au sein de la parcelle A2 afin d'étudier à la fois la réponse de l'arbre et de la culture face à des épisodes de sécheresse (Figure 12). Dans la modalité agroforestière, le dispositif couvre l'intégralité de deux allées cultivées[9], sur une longueur totale d'environ 35 m de long, soit une surface couverte d'environ 900 m^2. Au sein du témoin agricole, la surface couverte est plus modeste, et représente environ 80 m^2.

Cependant, la mise en œuvre de ces dispositifs d'exclusion fut difficile pendant la première année de thèse, en raison d'un contexte climatique défavorable, caractérisé par un pluviométrie élevée et des épisodes orageux (fortes intensités de pluie associées à des vents conséquents). Cela a engendré des contraintes logistiques et techniques particulièrement importantes (*e.g.* besoin d'une présence quasi-permanente pendant les exclusions, la nuit comme le week-end ; réparations récurrentes au niveau des bâches et des gouttières, entrée d'eau latérale importante pour le dispositif en TA,...), qui ont mis en lumière une inadéquation des dispositifs d'exclusion proposés avec i) la nature des évènements pluvieux et ii) les moyens logistiques que l'équipe de recherche pouvait déployer. Ces éléments ont motivé la mise au point de dispositifs d'exclusion de pluie alternatifs plus petits (15 m^2 par dispositif) qui ont été "prototypés" pendant la première année de thèse (Figure 12). Ces dispositifs d'exclusion ont utilisé les mêmes structures métalliques que les ombrières utilisées par Dufour et al. (2013). Au cours de la deuxième années de thèse, ces dispositifs d'exclusion ont été améliorés (*e.g.* choix d'une bâche translucide), répliqués plus largement et utilisés avec succès pendant le printemps 2019. Les résultats présentés dans les chapitres 2 et 3 ont été obtenus avec ce dispositif expérimental alternatif. La suite de ce chapitre "*Matériel et Méthodes*" décrit uniquement la méthodologie adoptée avec ce dispositif.

Les grands dispositifs d'exclusion ont été maintenus en parallèle des dispositifs alternatifs pendant la seconde année de thèse sous l'impulsion de Christian Dupraz et avec le soutien du reste de l'équipe de recherche. Certains résultats obtenus sous le grand dispositif seront utilisés pour nourrir la discussion, mais ne font pas l'objet d'une description détaillée au niveau méthodologique. Les réflexions autour des aspects techniques et de la réorganisation du travail de terrain ont motivé la rédaction du chapitre 1 de cette thèse.

[9] A l'exception de quelques zones non couvertes, notamment au niveau de la ligne d'arbre et du centre de l'allée cultivée.

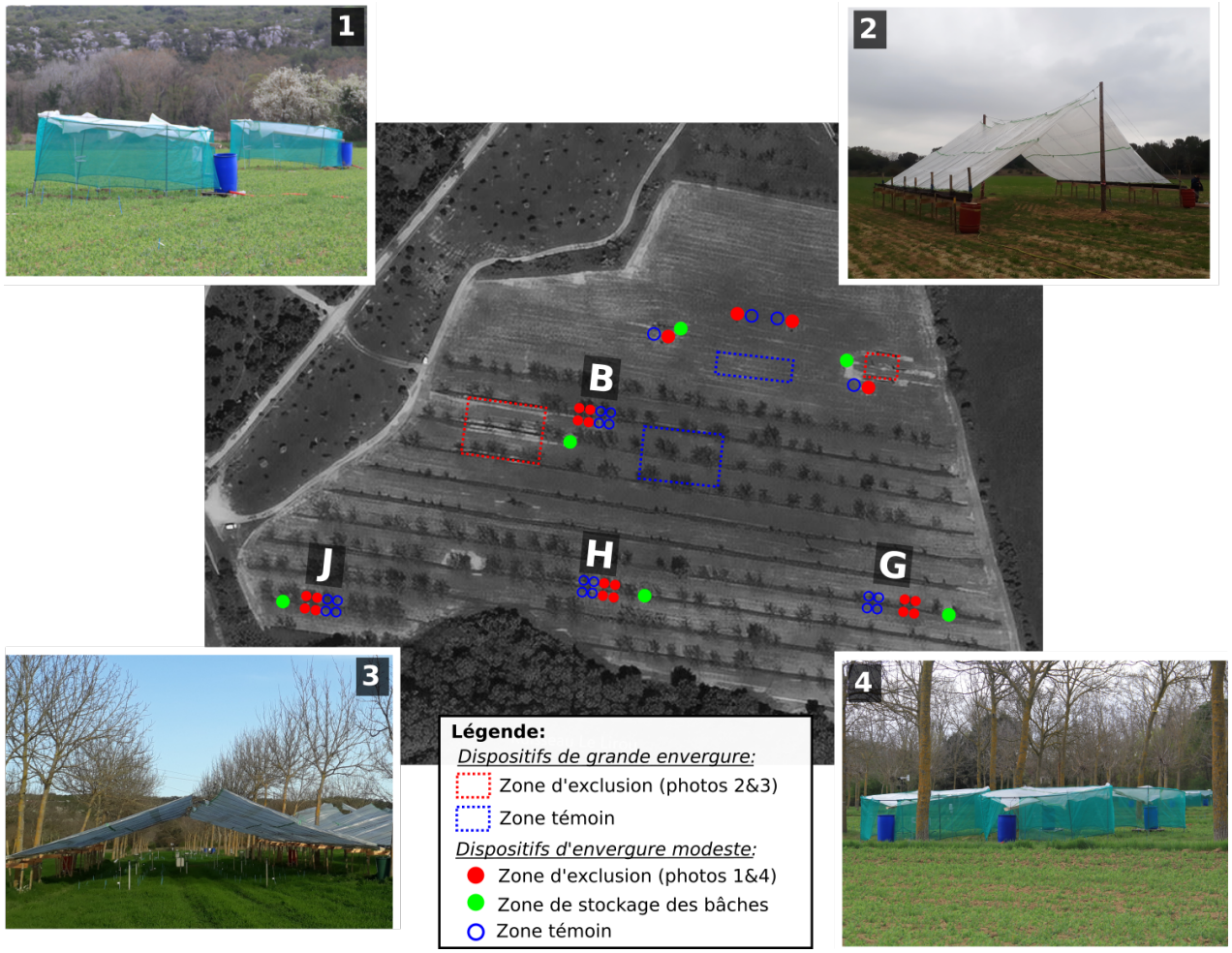


Figure 12 Schéma général des dispositifs d'exclusion de pluie installés au sein de la parcelle A2. Les grands dispositifs ont été utilisés pendant deux saisons culturales (2017-2019) et les petits dispositifs ont été utilisés au cours de l'année 2018-2019.

2.2 Design expérimental

2.2.1 Présentation générale du design expérimental

La surface limitée (*ca.* 15 m^2) des petits dispositifs d'exclusion de pluie ne permet pas d'explorer la réponse de la culture sur l'ensemble de l'allée agroforestière, sauf à mettre en place de très nombreux dispositifs. Nous avons choisi de les positionner uniquement là où nous attendions les interactions arbre-culture les plus fortes : à proximité des arbres. Nous les avons disposés au nord et au sud des arbres, pour bénéficier de situations contrastées. Les dispositifs d'exclusion ont également été déployés dans le TA. Le plan général est présenté en Figure 12. Au sein de chaque modalité culturale (TA et AF), 4 blocs expérimentaux ont été définis. Au sein de chaque bloc, on retrouve deux modalités juxtaposées de manipulation du régime de pluie, avec des placettes où certaines pluies sont exclues et des placettes en régime pluvial normal.

2.2.2 Choix réalisés lors de la mise en place du design expérimental

Malgré la présence d'autres parcelles agroforestières au sein du domaine de Restinclières, seule la parcelle A2 du Domaine de Restinclières a été équipée avec des dispositifs d'exclusion de pluie. La reconception des dispositifs d'exclusion de pluie aurait pu permettre d'élargir l'expérimentation à d'autres parcelles. On justifie cependant ce choix par i) la logistique contraignante de ce type d'expérimentation, ii) la nature des autres parcelles du domaine. La logistique d'une expérience d'exclusion totale des pluies est particulièrement lourde, en particulier lorsque les dispositifs d'exclusion sont manuellement mis en place avant et après un événement pluvieux ciblé. Afin de pouvoir réagir suffisamment vite face à des prévisions météorologiques incertaines, nous avons souhaité limiter le temps de mise en place des dispositifs d'exclusion (20 au total) à environ 2 heures de temps pour deux personnes. Équiper une autre parcelle aurait considérablement alourdi la logistique. Par ailleurs, les autres parcelles agroforestières du domaine de Restinclières présentent des designs expérimentaux différents (*e.g.* en termes d'orientation des lignes d'arbres, d'essence d'arbres) et un témoin agricole n'est pas toujours présent. Cela aurait augmenté le nombre de facteurs à prendre en compte.

L'expérimentation proposée repose donc sur des pseudo-réplications au sein de chaque modalité culturale, il s'agit d'un choix assumé. De façon générale, c'est une limite récurrente dans les dispositifs expérimentaux proposés jusqu'ici dans le cadre de la recherche en agroforesterie. Par ailleurs, proposer des réplications au sein d'une ou plusieurs parcelles avec les deux modalités culturales ne permet pas non plus de s'affranchir systématiquement des effets indésirables liés à la variabilité spatiale des conditions pédologiques et/ou des effets de bord et de voisinage liés à la présence des arbres (Langton, 1990). Lorsque l'on regarde les photos aériennes de la parcelle A2 disponible depuis sa plantation (voir Figure B.1 en annexe), on s'aperçoit que la croissance des noyers devient progressivement contrastée entre les différentes zones de la parcelle. Cela souligne la difficulté que représente la prise en compte de l'hétérogénéité environnementale à une large échelle (*i.e.* pédologique, géologique, hydrologique) dans le cadre de la mise en place des

expérimentations en agroforesterie.

Pour pallier les limites expérimentales, le travail de recherche s'est donc centré sur la réponse écophysiologique de la culture intercalaire. Par conséquent, une caractérisation fine de l'environnement agroforestier et de l'hétérogénéité des conditions de culture a été réalisée. Cette caractérisation a permis de définir plusieurs blocs expérimentaux, dans lesquels les conditions de cultures ont été jugées similaires afin de faciliter la comparaison de la réponse de la culture avec ou sans exclusion de pluie.

L'identification des emplacements jugés similaires s'est faite en plusieurs étapes. Dans un premier temps, nous avons caractérisé l'hétérogénéité des conditions de culture au sein de la parcelle. Dans un second temps, une liste de critères a été établie afin de définir des blocs expérimentaux permettant de réduire la variabilité des conditions de culture. Enfin, ces critères ont été appliqués afin d'identifier les emplacements éligibles à la mise en place des dispositifs d'exclusion de pluie.

2.2.3 Caractérisation de l'hétérogénéité de la parcelle A2

Lors de la caractérisation de l'hétérogénéité des conditions de culture au sein de la parcelle, nous avons identifié :

1. *des effets liés à l'hétérogénéité du sol et du sous sol.* Cette hétérogénéité se traduit notamment par une croissance différenciée des arbres (variation dans le diamètre et la hauteur des noyers) selon des patrons spatiaux à l'échelle de la parcelle. Des hétérogénéités sont suspectées au niveau de la profondeur du sol et de l'accessibilité à la nappe phréatique. Ces effets peuvent être appréhendés par l'analyse des images aériennes disponibles de la parcelle (voir Figure 11 et Figure B.1, encart C, en annexe).

2. *des effets liés aux itinéraires techniques sylvicoles.* Cela a notamment un impact sur les conditions lumineuses, dont l'hétérogénéité résulte de 1) la répartition irrégulière des arbres, résultat de l'éclaircie en 2004 et 2) des pratiques d'élagage (*i.e.* émondage, hauteur d'élagage de la base du houppier à 4 ou 6 m selon les lignes d'arbres).

3. *des effets liés à la variabilité intrinsèque des arbres.* Chaque arbre diffère en termes de forme du houppier ou de phénologie (la précocité du débourrement des arbres varie de presque un mois au sein de la parcelle entre les plus précoces et les plus tardifs), ce qui augmente également l'hétérogénéité de la dynamique des conditions lumineuses.

4. *des effets liés aux itinéraires techniques agricoles.* On sait que les agriculteurs de la parcelle ont toujours pratiqué deux apports d'engrais par an lorsqu'une céréale était présente (blé ou orge). Lors des épandages, le passage du tracteur se faisait une allée sur deux, avec une inversion des allées lors du second passage. L'agriculteur a toujours considéré que c'était équivalent à un passage au sein de chaque allée et à chaque apport car l'angle de dispersion de son épandeur était suffisamment large pour couvrir deux allées à la fois. Or, l'analyse des

images aériennes (voir Annexes - Figure B.1, encart E), et des mesures de terrain en 2017-2018 ont montré que cela n'était pas le cas, avec un risque d'hétérogénéité supplémentaire.

L'identification de ces facteurs d'hétérogénéité à un niveau local a permis d'établir une liste de critères permettant de définir la notion de bloc expérimental en AF.

2.2.4 Critères pour définir un bloc expérimental

En témoin agricole (TA), la détermination d'un bloc expérimental s'est limitée à la prise en compte d'une variabilité spatiale liée à la texture du sol et une possible hétérogénéité liées aux itinéraires techniques. Les zones concernées par l'exclusion de pluie (EXC - "*excluded*") et les zones "témoins", en régime pluvial (CTL - "*control*") ont été agencées en prenant en compte le passage des roues. Ainsi, on facilite la logistique liée à la présence des dispositifs d'exclusion (le socle du dispositif peut rester en place sans perturber la réalisation des itinéraires techniques) et on limite le risque d'hétérogénéité liée à un gradient d'épandage (fertilisation ou produit phytosanitaire). 4 blocs ont été mis en place, dans une zone centrale de la parcelle TA, considérée comme la plus homogène.

En agroforesterie (AF), la définition de bloc expérimental est plus complexe, car elle nécessite la détermination de "paires d'arbres", où l'on retrouve les deux régimes de pluie contrastés. Par ailleurs, les blocs doivent permettre de garantir une relative homogénéité des interactions arbre-culture au sein des placettes suivies. Au niveau des interactions souterraines, on a considéré que celles-ci seraient équivalentes si l'on étudiait la culture à une distance fixe de l'arbre et si les arbres sélectionnés au sein d'une paire présentent une morphologie et un voisinage similaires.

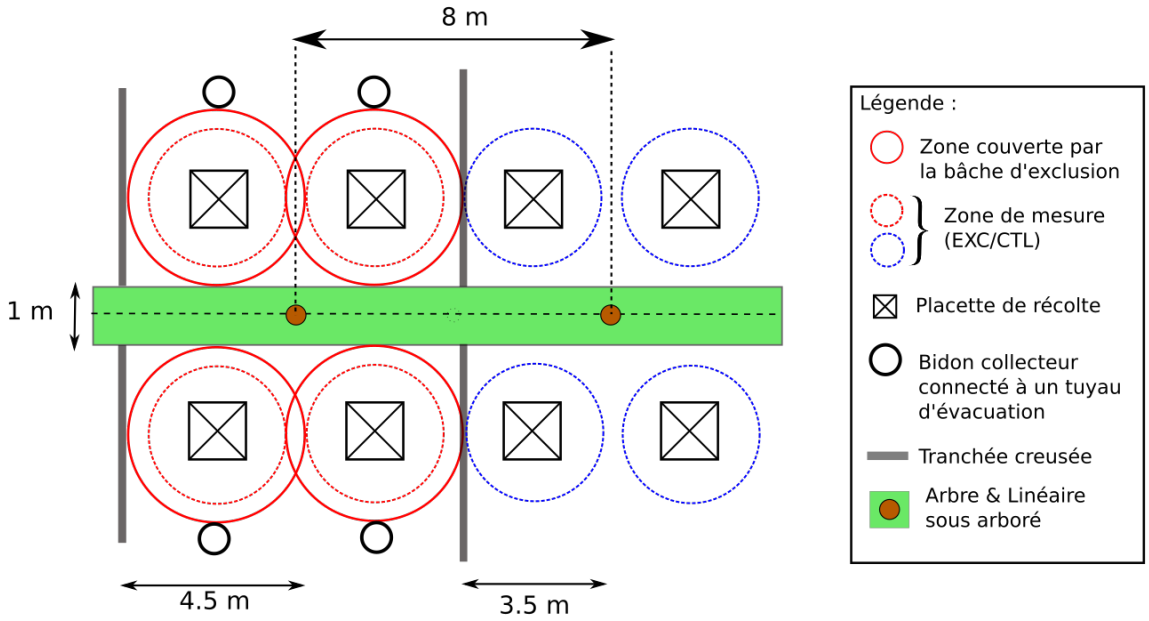


Figure 13 Schéma d'implantation des placettes de suivi et des dispositifs d'exclusion de pluie au sein d'un bloc expérimental en contexte agroforestier.

Au niveau des interactions aériennes, la géométrie de la canopée et la phénologie des arbres ont également été considérées. La disposition des placettes de suivi a été imaginée en considérant un motif d'agencement centré sur l'arbre, et on a vérifié que l'écartement entre les arbres laissait suffisamment d'espace pour installer les dispositifs d'exclusion. Les critères retenus pour définir un bloc expérimental sont les suivants :

- Il existe une distance minimale de 8m entre les arbres d'une même paire afin de garantir suffisamment d'espace pour la mise en place des dispositifs d'exclusion de pluie à côté de placettes témoin (Figure 13)
- La distance maximale entre les arbres d'une paire est fixée à 20 m, afin de limiter le risque d'hétérogénéité au niveau du sol
- Les arbres au sein d'une paire sont idéalement situés sur la même ligne d'arbres, afin de garantir une homogénéité dans l'exécution des itinéraires agricoles et sylvicoles
- Les arbres au sein d'une paire sont de dimension similaire (*e.g.* DBH et hauteur) - les arbres trop petits (DBH < 20 cm) ont systématiquement été exclus de l'analyse pour conserver des arbres représentatifs du peuplement moyen de la parcelle
- Les arbres au sein d'une paire ont une densité de voisinage similaire - en considérant que des densités d'arbres différenciées sur une même ligne pourrait avoir des conséquences sur les interactions arbre-culture au sens large
- Les arbres au sein d'une paire ont une phénologie similaire. L'évaluation a été réalisée *ex-ante* en utilisant conjointement des photographies aériennes et des notations réalisées sur des arbres de la parcelle (voir Annexes - Figure B.2). Par ailleurs, on a fait l'hypothèse que la précocité relative entre les arbres est conservée d'une année sur l'autre (Delpierre et al., 2017). Cette approche s'est révélée fructueuse (Figure 14).
- La réduction de la lumière est globalement similaire entre les placettes EXC et CTL. Cet aspect a été quantifié *ex-ante* en analysant des photos hémisphériques.

Enfin, une dernière hétérogénéité spécifique à la parcelle A2 a également été prise en compte. Avant la mise en place de l'essai en AF, la parcelle A2 était recouverte d'un verger de pommier (voir Annexes - Figure B.1., encarts A, B et C). Au cours des années 1980, ce verger a été arraché, et les pommiers ont été entassés en des points spécifiques de la parcelle, puis brûlés. On observe encore des "ronds de charbons" aujourd'hui, caractérisés par une présence accrue de matière organique carbonisée. Le design proposé a donc pris en compte la présence de ces ronds, en les évitant autant que possible[10].

[10] En réalité, le bloc G est partiellement impacté par la présence d'un de ces ronds de charbon, présent sur le centre d'une allée, mais l'effet a été jugé acceptable.

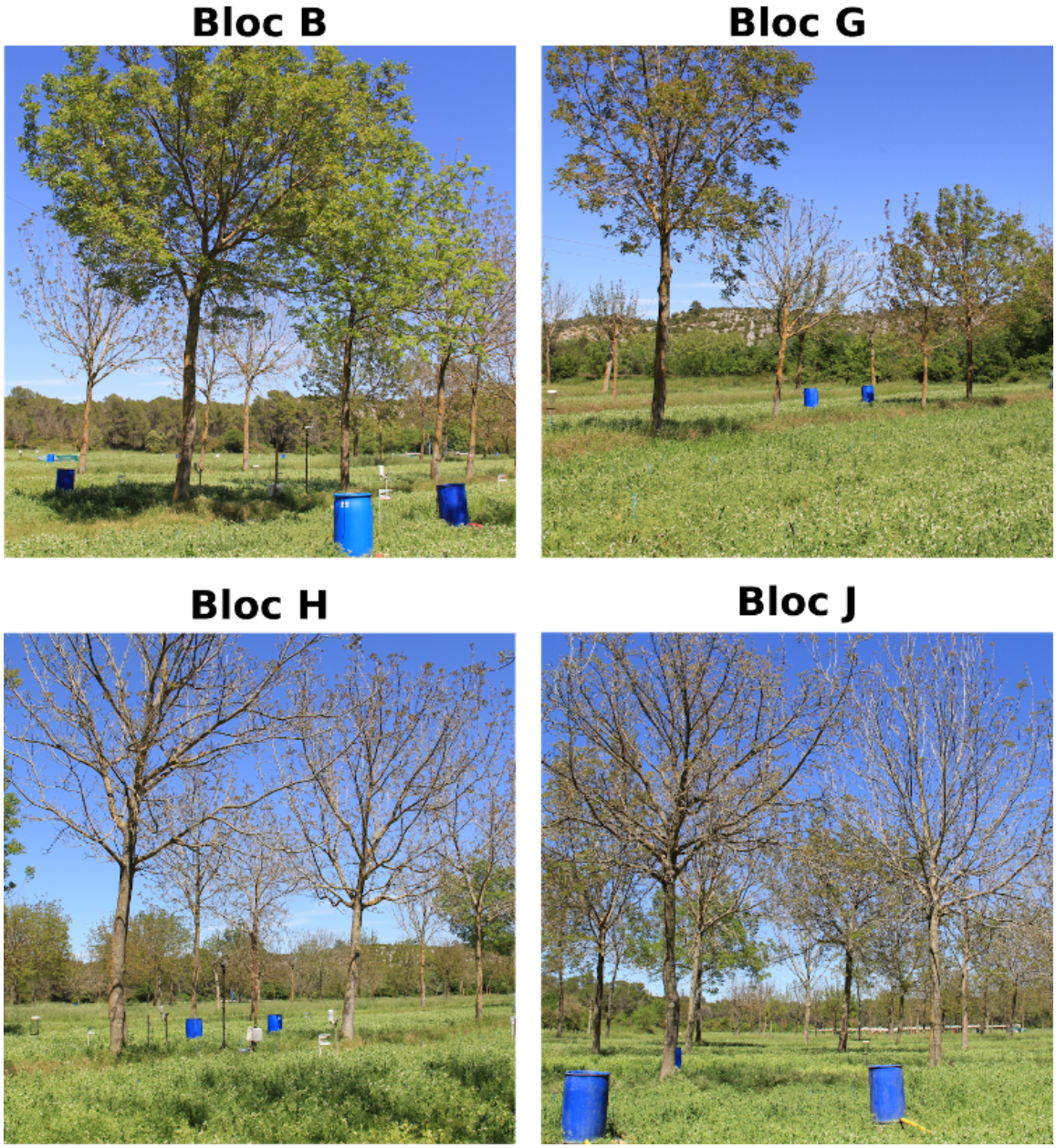


Figure 14 Illustration de la variabilité phénologique des arbres entre les blocs au 15 Mai 2019. Le débourrement des arbres reste homogène au sein de chaque paire d'arbres.

2.2.5 Identification des blocs expérimentaux

Certaines zones de la parcelle ont été exclues d'office lors de l'étape d'identification des blocs expérimentaux, car la position des arbres ou leur gestion a été jugée trop atypique. Nous avons systématiquement exclu 1) les arbres de bordure, *i.e.* sans vis-à-vis avec un autre arbre[11], ii) les deux lignes d'arbres émondées (type "trogne") au centre de la parcelle (lignes E et F) et iii) les zones sur lesquelles un cernage racinaire a été pratiqué en Octobre 2016 dans le cadre du travail de thèse

[11] Nous pourrions considérer que le bloc J transgresse cette règle. Malgré tout, la présence des arbres de ripisylve au bord du Lirou font que le Sud de la ligne d'arbres peut être assimilée à une allée agroforestière - la situation a été jugée acceptable.

de Daniel Inurreta-Aguirre (2018). Nous justifions l'éviction des arbres de bordure afin d'éviter un effet de bord, notamment vis-à-vis de la compétition souterraine. Nous supposons en effet que les systèmes racinaires des arbres à Restinclières traversent maintenant les allées cultivées dans leur intégralité, tout en étant possiblement entremêlés. Une zone sans vis-à-vis arboré pourrait induire un accès différent aux ressources souterraines ou des conditions microclimatiques différentes. On justifie l'éviction des trognes par le fait qu'une telle gestion de l'arbre a un impact fort à la fois sur l'intensité et la dynamique de la lumière. Dufour et al. (2020) montrent par exemple que l'ombrage est plus intense du fait d'un feuillage plus dense, mais aussi que cet ombrage est plus tardif du fait d'un débourrement retardé. Enfin, nous justifions l'éviction des zones cernées par le fait que cette pratique impacte la disponibilité de l'eau dans le sol (Inurreta-Aguirre, 2018; Jose et al., 2000) et que l'on connaît mal la durée de cet effet sur la compétition racinaire (les zones concernées avait été cernées 2 ans plus tôt). Les pratiques de cernage racinaire et d'émondage modifient l'équilibre fonctionnel de l'arbre et influencent la compétition entre l'arbre et la culture (Ong et al., 2002). Par ailleurs, la présence d'autres projets scientifiques a été pris en compte afin de ne pas créer de conflits d'usage entre les équipes de recherche.

Au final, il ressort que sur les 323 arbres encore présents au sein de la parcelle A2, seules 5 paires d'arbres (soit 10 arbres au total) répondaient à l'ensemble des critères précédemment cités (Figure B.4). Parmi les 5 paires d'arbres, le choix a finalement été restreint à 4 paires d'arbres (pour 16 dispositifs d'exclusion au total) afin de couvrir la modalité agroforestière au maximum. La "qualité du pairage" des placettes vis à vis de la lumière est présentée en annexe (Figure B.5).

2.3 Choix du scénario d'exclusion de pluie

Dans le cadre d'une expérimentation d'exclusion des pluies telle que proposée ici, le scénario d'exclusion modifie à la fois la moyenne et la distribution du cumul de précipitation. Différentes configurations sont donc possibles (et discutées plus amplement dans le cadre du chapitre 1) en fonction des objectifs de recherche et du contexte local.

Pour cette étude, le scénario d'exclusion visait les pluies printanières qui coincide avec la floraison du pois. Le scénario a aussi été défini de facon "pragmatique" car l'installation de nos dispositifs d'exclusion est manuelle. Le choix d'un scénario d'exclusion s'inscrit dans un contexte climatique difficilement prévisible, malgré des tendances saisonnières connues (Figure 10). L'analyse des cumuls pluviométriques mensuels révèle que l'automne et le début du printemps sont deux périodes pluvieuses. Elles semblent donc stratégiques pour la réalisation des exclusions de pluie. Toutefois, la réalisation d'exclusion de pluie en automne a été écartée car les cumuls de pluie sont très importants, les conditions d'interception difficiles, et les dispositifs d'exclusion étaient encore en cours d'assemblage. L'interception des pluies a donc été planifiée sur les mois printaniers (Avril - Mai) et nous avons pu profiter d'un hiver relativement sec pour allonger la période sans pluie jusqu'à début Mai (voir Figure II.2 dans Chapitre 2). Par crainte de faire "mourir" prématurément la culture de pois, sensible au stress hydrique, un épisode de pluie conséquent (> 20 mm) n'a pas été intercepté à la mi-Mai. Les exclusions ont ensuite repris. Au total, 135 mm de pluie ont ainsi

été exclus sur un total pluviométrique de 628 mm (entre le mois de Septembre 2018 et le mois de Juin 2019).

2.4 Prise en compte des prévisions météorologiques

La gestion manuelle des dispositifs d'exclusion nécessite la mise au point de règles de décision à partir des prévisions météorologiques. Les prévisions de précipitations dans la région de Montpellier sont assez incertaines[12]. Le contexte méditerranéen et les reliefs avoisinants sont propices aux épisodes pluvieux intenses et localisés (Figure 15). Nous avons donc établi des règles de décisions en considérant les cumuls de pluie, l'intensité horaire des pluies et le vent prévu par les services météorologiques. Nous avons considéré le caractère incertain des prévisions en favorisant l'analyse d'un ensemble de prévisions fournies par plusieurs modèles météorologiques[13] et de la situation météorologique juste avant les pluies annoncées.

Bien que les modèles météorologiques indiquent une probabilité de confiance, nous avons modéré cette confiance par l'analyse empirique de la situation météorologique. Dans le cas d'une circulation de type océanique (vent d'ouest), les cumuls sont généralement faibles par effet de foehn sur les reliefs de la Montagne Noire ou des causses. Avec des vents du Sud-Ouest, l'effet orographique de soulèvement de la masse d'air par les reliefs cévenols est limité, ce qui donne généralement des cumuls pluviométriques modestes, sauf présence de cellules convectives orageuses à déplacement lent. En revanche, les flux venant du Sud et du Sud-Est sont particulièrement propices à des épisodes de pluie intense, du fait de masses d'air chaudes et humide en provenance de la Méditerranée qui se soulèvent contre le massif des Cévennes. Lorsque l'intensité des pluies est forte, on parle d'"épisode cévenol". Ces épisodes provenant du Sud entraînent des cumuls de pluie importants et leur exclusion est indispensable pour générer des stress hydriques importants. Leur localisation exacte est malheureusement difficile à prévoir par les services météorologiques. Ces épisodes cévenols s'accompagnent aussi de vents souvent tempétueux.

En plus des prévisions météorologiques et des règles de décisions empiriques établies au sein de l'équipe, nous avons confronté les prévisions avec les observations radar disponibles en ligne. Il s'agit d'un dernier recours pour éviter qu'un épisode pluvieux intense et imprévu annule le stress hydrique généré lors d'une exclusion précédente. Globalement, la mise en place manuelle des dispositifs d'exclusion exige une vigilance constante pendant toute la période d'exclusion.

[12] De façon générale, cela s'étend à tout le pourtour méditerranéen français

[13] A ce propos, les guichets en ligne pour l'accès aux prévisions météorologiques tel que MétéoCiel ou MeteoBlue s'avèrent extrêmement précieux à l'échelle de la France

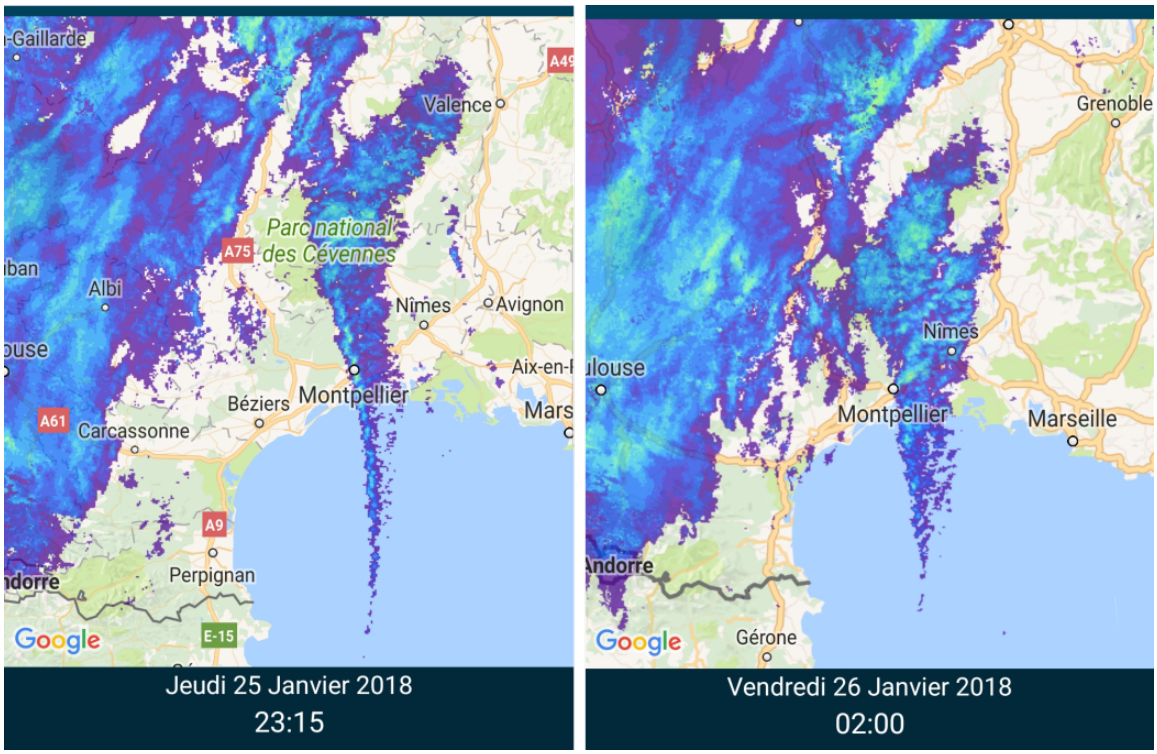


Figure 15 Image radar d'un épisode orageux

2.5 Aspects de gestion supplémentaires

Les expérimentations d'exclusion de pluie étant contraignants, nous avons anticipé le fait que la faune sauvage représentait un risque de défaillance supplémentaire pour l'expérimentation. Des dégâts de sanglier ont auparavant été observés sur le domaine, en particulier sur des cultures de pois. Nous avons donc équipé intégralement le pourtour de la parcelle expérimentale avec une clôture électrique à double fil. Malgré tout, nous avons été surpris par des pigeons, dont la présence s'est avérée problématique à partir de la fin du mois de Mai. Les placettes de suivis ont été très rapidement équipées de filets anti-oiseaux.

3 Caractérisation des conditions de culture en contexte agroforestier

3.1 Caractérisation des précipitations

Les précipitations ont été caractérisées à l'aide de pluviomètres à lecture visuelle, et d'un pluviographe, connecté à la station météorologique. Nous avons installé des pluviomètres au sein de chaque bloc expérimental, avec un quadruple objectif : i) évaluer le fait que la présence des noyers ne réduit pas les précipitations incidentes, ii) s'assurer de la qualité des mesures du pluviographe à augets et de l'homogénéité des précipitations à l'échelle de la parcelle, iii) quantifier la quantité de

pluie interceptée à l'aide des dispositifs d'exclusion et iv) quantifier les entrées latérales de pluie.

Les mesures ont confirmé un effet négligeable de l'interception de la pluie par les noyers. Les données du pluviographe ont été corrigées à l'aide des données des pluviomètres, notamment lors d'épisodes de pluies intenses et ventées, lors d'un épisode de grêle ou encore lors d'un épisode de neige. En dehors de ces épisodes particuliers, les corrections restent mineures malgré tout (<10mm distribuée sur toute la saison de culture).

La proximité des pluviomètres avec les dispositifs d'exclusion s'est avérée utile pour quantifier la pluie interceptée à l'aide des dispositifs. Lors de la mise en place des dispositifs d'exclusion et du repliement, les pluviomètres ont été vidés. Pendant l'interception, la lecture directe de la quantité de pluie interceptée facilite la gestion des dispositifs d'exclusion de pluie. En fonction du cumul intercepté et des prévisions météorologiques, ces données ont été prises en compte pour décider de ranger ou non les dispositifs d'exclusion.

La première saison (2017-2018), nous avons installé des pluviomètres sous tous les dispositifs d'exclusion, en plusieurs points, afin de quantifier les entrées latérales d'eau et les artefacts associés. Ces mesures restent cependant indicatives. Il aurait fallu installer des pluviomètres avec une hauteur ajustable (afin de suivre la hauteur du couvert) pour une quantification précise de ces entrées.

3.2 Caractérisation de l'environnement lumineux

Afin de caractériser l'environnement lumineux en conditions agroforestières, nous avons employé deux méthodes de caractérisation de l'environnement lumineux :

1. l'analyse de photographies hémisphériques
2. l'analyse de mesures issus de capteurs PAR

3.2.1 Analyse avec des photographies hémisphériques

Des photographies hémisphériques ont été prises régulièrement afin de capturer la dynamique globale de l'interception lumineuse pour caractériser l'environnement lumineux sur toutes les placettes suivies en AF. Les principes sous-jacents à la quantification du rayonnement incident à l'aide de photographies hémisphériques a déjà fait l'objet d'une littérature importante (se référer à Fournier and Hall (2017) pour une vue d'ensemble). En quelques mots, la quantification du flux de lumière incident sous un couvert arboré se base sur l'analyse conjointe d'un masque aérien (fourni par la photographie hémisphérique), et d'un calcul de la trajectoire du soleil déterminé en fonction de la position géographique et du moment de l'année considéré.

Afin de prendre en compte l'effet de la dynamique de développement foliaire des noyers sur le flux de lumière incident, nous avons réalisés des interpolations linéaires à partir de plusieurs photographies hémisphériques. Pour chaque placette, trois photographies ont été réalisées : 1) avant

Tableau 3 Phénologie des arbres considérée au sein de chaque bloc expérimental en agroforesterie.

Bloc AF	Débourrement (t_d)	Fin de la pousse des rameaux courts (t_{rc})	Fin de la pousse des rameaux longs (t_{rl})
B	17 Avril 2019	11 Juin 2019	17 Juillet 2019
G	25 Avril 2019		
H	6 Mai 2019		
J	6 Mai 2019		

débourrement (instant dénommé t_d), lorsque le houppier de l'arbre est dépourvu de feuilles (photographie dénommée "*branche*"), 2) à la fin de la pousse des rameaux courts (instant dénommé t_{rc} ; photographie dénommée "*ram. courts*") et 3) à la fin de la pousse des rameaux longs (instant dénommé t_{rl} ; photographie dénommée "*ram. longs*") (Figure 16). La date de débourrement a été considérée dès que les premiers bourgeons éclos ont été aperçus au sein d'une paire d'arbres. Les observations phénologiques des arbres sont présentées dans le Tableau 3. Chaque photographie a été analysée à l'aide du logiciel WinScanopy (Regent Instrument Inc., QC, Canada) et deux variables ont été extraites : le flux de lumière photosynthétiquement actif (PAR)[14] (exprimé en $W.m^{-2}$) au-dessus de la canopée et un flux de PPFD ("*Photosynthetic Photon Flux Density*") incident. Ces flux de lumière sont des flux théoriques dans le sens où l'algorithme de calcul de WinScanopy considère un ciel clair et dégagé. Ces flux ont ensuite été intégrés à la journée en une somme de PAR (exprimée en $MJ.m^{-2}.jour^{-1}$, avec respectivement PAR_0 et PAR_{inc}) en considérant le niveau de discrétisation définie dans l'analyse avec WinScanopy (fixée à 10 min). Une fois les analyses réalisées pour chacune des placettes et pour chacune des photographies, une série temporelle composite a été établi par interpolation linéaire par morceaux, en considérant les trois dates phénologiques caractéristiques de chaque arbre pour reproduire l'impact progressif de la dynamique de développement de la canopée sur la lumière incidente au niveau de chaque placette. Pour une journée t, on considère :

$$\begin{cases} PAR_{\text{inc}}(t) = PAR_{\text{inc,branche}}(t) & t \leq t_d \\ PAR_{\text{inc}}(t) = \left(1 - \frac{t-t_d}{t_{\text{rc}}-t_d}\right) \cdot PAR_{\text{inc,branche}}(t) + \left(\frac{t-t_d}{t_{\text{rc}}-t_d}\right) \cdot PAR_{\text{inc,ram. courts}}(t) & t_d < t \leq t_{\text{rc}} \\ PAR_{\text{inc}}(t) = \left(1 - \frac{t-t_{\text{rc}}}{t_{\text{rl}}-t_{\text{rc}}}\right) \cdot PAR_{\text{inc,ram. courts}}(t) + \left(\frac{t-t_{\text{rc}}}{t_{\text{rl}}-t_{\text{rc}}}\right) \cdot PAR_{\text{inc,ram. longs}}(t) & t_{\text{rc}} < t \leq t_{\text{rl}} \end{cases}$$

[14] Par simplification, c'est le flux total qui a été choisi, sans faire de distinction entre le flux diffus et direct

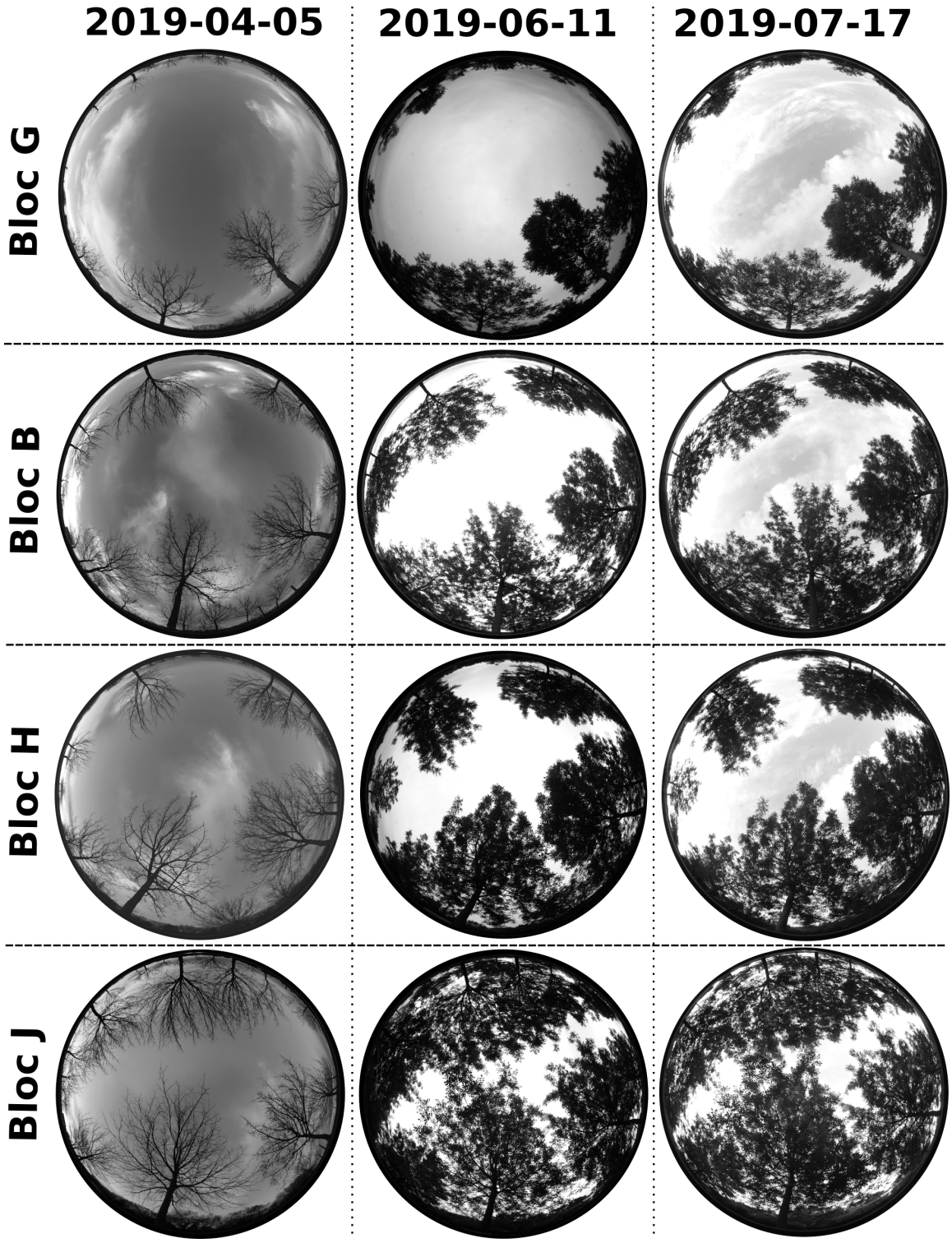


Figure 16 Illustration de la variabilité spatiale et temporelle de la canopée des arbres au sein des blocs expérimentaux. Les photographies hémisphériques présentées sont prises depuis des placettes de suivi au Nord des arbres.



Figure 17 Capteurs PAR installés à la parcelle pour quantifier le flux de lumière incident et intercepté.

La période après la pousse des rameaux longs n'est pas considérée puisqu'elle est en dehors de la période de culture. On définit également la transmissivité lumineuse (RTE - pour *radiation transmissivity efficiency*) pour une placette donnée comme le rapport entre le PAR au dessus et en dessous de la canopée :

$$RTE(t) = \frac{PAR_{\text{inc}}(t)}{PAR_0(t)} \tag{1}$$

La transmissivité est utile pour affiner l'estimation de la lumière incidente (PAR_{inc}), car elle permet de mieux prendre en compte les fluctuations de PAR_0 en fonction de la couverture nuageuse. Si un capteur PAR est disponible sur le terrain, à l'écart des arbres, on peut écrire :

$$PAR_{\text{inc}}(t) = PAR_{0,\text{capteur}}(t) \cdot RTE(t) \tag{2}$$

La méthode de calcul du PAR incident au sein des placettes diffère entre les chapitres 2 et 3. Dans le chapitre 2, l'estimation de PAR_{inc} se base uniquement sur les données théoriques des photographies hémisphériques (la différence entre les estimations et les mesures est présentée en annexe, Figure D.2), tandis que l'estimation du PAR_{inc} dans le chapitre 3 intègre la correction présentée dans l'équation 5 (voir Annexes - Figure D.2 et Figure E.3).

3.2.2 Analyse avec des capteurs PAR

Nous avons installés des capteurs PAR afin de répondre à deux objectifs 1) établir un bilan radiatif au niveau du couvert végétal (*objectif principal*), 2) quantifier les artefacts que les dispositifs d'exclusion de pluie engendrent au niveau de la culture et 3) comparer les estimations faites à partir des photographies hémisphériques avec des données issues de capteur. Dans cette optique, des "triplets" de capteurs ont été installés sur la parcelle (Figure 17) au sein de chaque modalité culturale et de régime de pluie au début du mois de Mars, avant que la surface foliaire du pois ne



Figure 18 Mise en place des sondes TDR profondes en Octobre 2018.

se développe beaucoup. La méthodologie globale appliquée dans le cadre de la mise en place des capteurs est présentée au sein de la section dédiée à l'estimation du bilan radiatif à l'échelle du couvert.

3.3 Caractérisation du sol

3.3.1 Disponibilité en eau

La disponibilité de l'eau dans le sol a été caractérisée à l'aide de sondes TDR (CS650, Campbell Scientific, USA). Les sondes profondes (50, 150 et 250 cm) ont été installées pendant le mois d'Octobre 2018, pendant la période automnale pluvieuse afin de permettre au sol de se tasser ensuite avant les travaux de labour et de semis. Des fosses ont été creusées jusqu'à 2.5 m afin de mesurer les variations d'humidité dans les horizons de sol profonds (Figure 18). Nous avons pris en compte la disposition prévue des petits dispositifs d'exclusion lors de l'excavation des fosses, afin que les sondes soient placées au centre de chaque modalité, en CTL et en EXC. Les broches des sondes ont été insérées à l'horizontale dans l'horizon désiré après réalisation de pré-trous à l'aide d'un guide. Les sondes ont été placées dans la partie non remaniée du sol, vers la ligne d'arbre, afin que celles-ci soient situées vers la partie du système racinaire de l'arbre qui n'a pas été touché par les travaux d'excavation. Des cylindres de sol ont également été prélevés afin de mesurer la densité apparente du sol et de réaliser une mesure physique de l'humidité volumique du sol lors de la mise en place des sondes. Des sondes TDR ont également été installées dans la zone travaillée (à 20 cm de profondeur), après labour. Des mesures d'humidité du sol par gravimétrie ont également été réalisées lors des prélèvements en azote (décrits ci-après). Toutes ces données ont été utilisées pour effectuer un premier calage des signaux des sondes TDR. Malgré tout, des différences irréalistes de signaux entre les capteurs ont parfois été observées. Pour vérifier la plausibilité du signal

obtenu, nous avons mis à profit les épisodes de pluie intense en comparant la valeur de la capacité au champ prédite par l'équation de Rawls et al. (2003)[15], qui se base sur les données de texture et de matière organique, et une valeur estimée à partir des points d'inflexion observés au cours de la dynamique de dessèchement du sol, telle que mesurée par les sondes TDR (Bean et al., 2018)[16]. En cas de différence trop importante entre les deux, les signaux ont été corrigés en décalant le signal des sondes pour que le point d'inflexion corresponde à la valeur théorique fournie par Rawls et al. (2003). Cette approche a été choisie comme un compromis dans le cadre de l'analyse des signaux TDR, permettant de standardiser l'analyse de la dynamique de l'humidité du sol entre les modalités par rapport à une valeur de référence (la capacité au champ).

3.3.2 Disponibilité en azote

Des prélèvements de sol ont été réalisés afin de caractériser la différence de disponibilité en azote du sol entre l'AF et le TA, ainsi qu'au sein des modalités d'exclusion de pluie. Les mesures ont été réalisées à trois dates différentes : 1) avant le semis, 2) au moment de la période de développement foliaire maximal et 3) après la récolte (mesure des reliquats). Dans le cadre du premier et du dernier prélèvement, une carotteuse à percussion a été utilisée afin d'obtenir des échantillons de sol jusqu'à 1m50 de profondeur. Le second prélèvement a été réalisé à l'aide d'une tarière jusqu'à la profondeur de 50 cm. A chaque prélèvement, des échantillons composites de terres ont été établis à partir de 5 échantillons de terre au sein de chaque modalité, immédiatement placés ensuite dans une glaciaire, puis rapidement stockés dans un congélateur à -20°C. L'azote minéral (NO_3 et NH_4) de ces échantillons a ensuite été analysé en laboratoire (Célesta-lab, Mauguio, France). Ces prélèvements ont été réalisés dans le but de i) vérifier l'homogénéité globale des conditions expérimentales, ii) initialiser et calibrer des simulations numériques envisagées (initialement) avec le modèle agroforestier Hi-sAFe. Une visualisation de ces mesures est proposée en annexe (Figure B.7).

3.3.3 Colonisation racinaire

Lors de la mise en place des sondes TDR, la colonisation par les racines des arbres au sein des horizons explorés par la culture a été évaluée par mesure des impacts racinaires. Les racines fines et grossières ont été distinguées sur la base de leur diamètre apparent (limite fixée à 2 mm). Une visualisation de ces mesures est proposée en annexe (Figure B.6).

Une mesure unique de la profondeur d'enracinement du pois a été réalisée en témoin agricole en creusant une fosse jusqu'à 1 m de profondeur à la fin du mois de Mai 2019. Cette mesure a été réalisée en dehors des zones suivies, afin de connaître la profondeur du front de colonisation racinaire du pois, en régime pluvial. Au niveau de la fosse, les racines de pois les plus profondes observées étaient situées à 90 cm de profondeur, bien que la densité racinaire au niveau de cet

[15] Rawls et al. (2003) considère la capacité au champ comme la teneur en eau volumique au moment où le potentiel hydrique du sol est de pF1.5.

[16] Cette approche retranscrit mathématiquement le concept de capacité au champ, qui stipule que la capacité au champ correspond à la quantité d'eau retenue par un sol 48 heures après avoir été gorgée d'eau.



Figure 19 Bac d'évaporation de classe A installé en AF (bloc B) pendant la période estivale.

horizon fût très faible. Ces données ont permis de savoir quels étaient les capteurs d'humidité influencés par la colonisation racinaire. Cette donnée était également nécessaire pour les travaux de modélisation initialement envisagés.

3.4 Caractérisation du microclimat

Un suivi microclimatique a été réalisé en plusieurs points de la parcelle à l'aide de capteurs électroniques. Une station météorologique est en place depuis 1996 au sein du témoin agricole et permet un suivi des variables climatiques générales (rayonnement global incident, température et humidité de l'air, vitesse et direction du vent) avec une influence minimale de la part des arbres. Des centrales d'acquisition supplémentaires (CR1000, Campbell Scientific, USA) ont été placées en agroforesterie au sein des blocs B et H, et équipées avec des capteurs similaires pour pouvoir comparer les conditions climatiques avec celle du témoin agricole.

Un bac d'évaporation de classe A a également été installé sur la parcelle dans le but de comparer l'évapotranspiration potentielle (ETP) en témoin agricole et en agroforesterie (Figure 19). Ce bac a d'abord été installé au sein du témoin agricole (de Mars à Juin 2019) puis sur la ligne d'arbres au sein du bloc B en AF (de Juillet à Septembre 2019). La mise en place de bac d'évaporation suit les recommandations établies par la WMO (World Meteorological Organization). Un seul bac étant à disposition, une comparaison par mesure simultanée en TA et AF n'a pas été possible. Pour pallier ce problème, les données d'évaporation du bac en TA et AF ont été comparées en

effectuant une régression linéaire entre i) les mesures journalières d'ETP selon les données du bac et ii) les mesures journalières d'ETP selon les données des capteurs, estimées respectivement selon la méthodologie proposée par la FAO (Allen et al., 1998). Un filtrage des données issues du bac d'évaporation a également été réalisé afin de considérer uniquement les mesures réalisées dans des conditions d'utilisation du bac valables (*e.g.* hauteur dans d'eau suffisante dans le bac, journée sans pluie ni approvisionnement en eau,...). Les résultats issus de ces mesures sont présentés dans la discussion générale de la thèse.

4 Suivi de la culture et de son itinéraire technique

4.1 Le pois d'hiver comme cas d'étude

Sur les parcelles de grande culture du domaine de Restinclières, le choix de la culture et des itinéraires techniques est fait par l'agriculteur, Monsieur Henry Breton, en concertation avec les chercheurs de l'INRAé. La rotation de culture ces 10 dernières années est une rotation triennale : blé dur - orge brassicole - pois protéagineux. Des cultures d'hiver sont cultivées car ce sont les plus adaptées au climat méditerranéen. Elles bénéficient au maximum des effets de complémentarité pour la lumière avec les noyers, qui restent sans feuilles jusqu'à la mi-avril. Il était initialement prévu d'étudier une céréale d'hiver (orge d'hiver - saison 2017-2018) et une légumineuse (pois d'hiver - saison 2018-2019). Du fait des difficultés techniques et des aléas rencontrés avec le dispositif, l'analyse des résultats ne concerne que les résultats obtenus avec le pois d'hiver (*Pisum Sativum cv. Dexter*).

Le pois d'hiver est une légumineuse dont la floraison est de nature partiellement indéterminée, c'est-à-dire que le nombre de fleurs émises et la durée de la floraison sont variables, et dépendent des conditions de culture. L'ouvrage rédigé par Munier-Jolain et al. (2010) constitue une référence pour comprendre la physiologie du pois. Un certain nombre d'aspects liés au développement physiologique du pois seront mobilisés dans les discussions des résultats. Parmi les variétés de pois, la variété DEXTER est considérée comme une variété productive à floraison longue, mais aussi comme une variété sensible aux maladies (documentation technique de RAGT Semences).

4.2 Itinéraire technique

L'itinéraire technique a été mis en œuvre par Monsieur Breton au cours de l'année d'expérimentation (Figure 20). Un travail du sol profond (30 cm) a été réalisé le 10/12/2018. Le semis de la culture a été réalisé le lendemain. Un unique passage de traitement fongicide (AMISTAR, fongicide à large spectre à base d'azoxystrobine) a été réalisé le 30/04/2019. Enfin, la parcelle a été entièrement moissonnée le 21/06/2019.



Figure 20 Illustration des principales étapes de l'itinéraire technique. La mise en place et la gestion des dispositifs d'exclusion de pluie nécessitent d'intégrer la taille des machines agricoles.

4.3 Suivi dynamique de la culture

4.3.1 Phénologie

Un suivi régulier de la phénologie du pois a été réalisé pour chaque placette de suivi en effectuant un relevé i) toutes les 2 semaines de l'émergence à la floraison, et ii) toutes les semaines (a minima) pendant la période de floraison. Les notations sont basées sur l'échelle BBCH (Hack et al., 1992). Enfin, les observations sur du pois et/ou du pois-chiche à Restinclières au cours des années précédentes ont révélé des décalages dans la dynamique de sénescence de la culture à proximité des arbres (Gaborit-Varlet, 2010; Mahieu et al., 2016; Villalba Gonzalez, 2009). Un suivi dynamique du NDVI fut entrepris sur toutes les placettes à partir de la floraison à l'aide d'un Greenseeker (Trimble, Sunnyvale, CA, USA) afin de suivre la dynamique de sénescence de la culture.

4.3.2 Suivi dynamique de l'indice de surface foliaire

Le suivi dynamique de l'indice de surface foliaire (LAI - *Leaf Area Index*) et de la biomasse peut représenter une difficulté méthodologique dans les expérimentations d'exclusion de pluie, du fait de la faible disponibilité de matériel végétal à disposition sous les dispositifs (Beier et al., 2012). Nous avons mesuré la dynamique du LAI avec deux méthodes non destructrices.

De l'émergence du pois jusqu'à la fermeture du couvert (*i.e.* taux de couverture > 80%), nous avons utilisé le taux de couverture du pois comme proxy du LAI. Nous avons établi une régression linéaire entre le taux de couverture et le LAI avec des mesures destructrices faites sur des placettes additionnelles, situées en dehors du dispositif expérimental. A l'aide d'un appareil photo monté sur trépied (Canon EOS 60D), nous avons photographié le couvert au centre de chaque placette de suivi, en délimitant une zone de 0.25 m^2 (50 x 50 cm) à l'aide d'un cadre en bois (Figure 21). Les images ont ensuite été traitées à l'aide du logiciel Gimp (The GIMP Development Team, 2019), puis analysées à l'aide du logiciel ImageJ (Schneider et al., 2012) pour en déterminer le taux de couverture. Sur les échantillons supplémentaires, nous avons déterminé la surface foliaire du pois en scannant à 400 dpi les folioles sessiles (scanner Epson Perfection V600). Au final, chaque placette

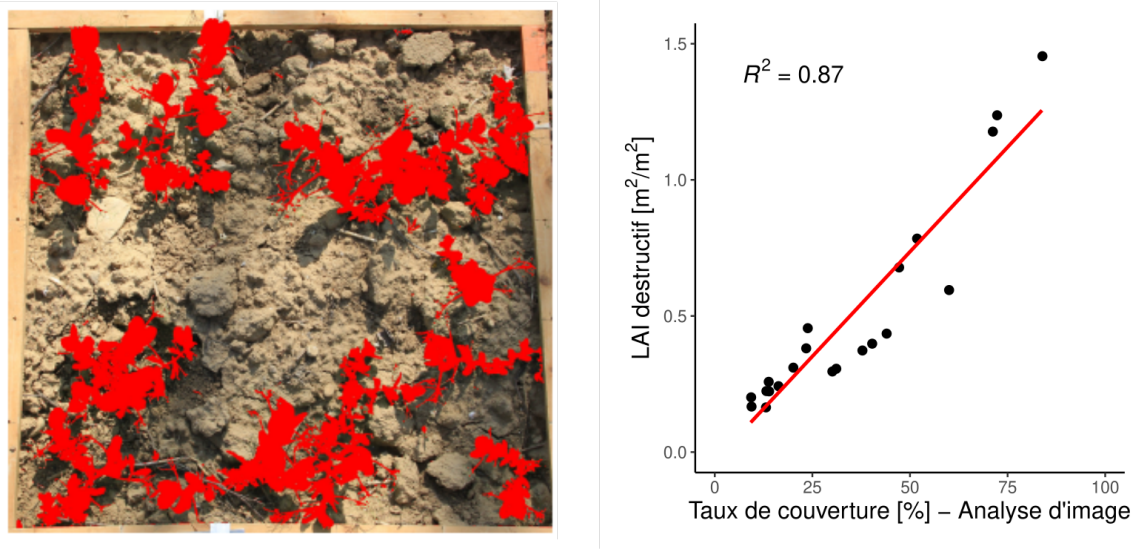


Figure 21 Estimation du LAI du pois selon la méthode du taux de couverture (avant fermeture du couvert) et régression linéaire établie entre le taux de couverture et les mesures de LAI destructives.

de suivi fut photographiée à 4 dates (de mi-Mars à fin Avril) et les prélèvements de calibration réalisés sur 3 de ces dates pour couvrir une gamme de taux de couverture suffisante.

Une fois le couvert refermé, nous avons mesuré le LAI du couvert à l'aide d'un LAI 2200 (LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska). Ce capteur permet d'estimer le LAI d'un couvert végétal selon une méthode optique basée sur le principe du gap fraction. L'estimation du LAI résulte de deux mesures : une première sous le couvert et une seconde au-dessus de ce couvert. Différents caches optiques sont également proposés afin de prendre en compte l'hétérogénéité géométrique du couvert. Pour le pois, le cache choisi fut celui en demi-lune, compte tenu de la nature géométrique relativement hétérogène du couvert de pois.

Par manque de temps, nous n'avons pas comparé les valeurs mesurées avec le LAI 2200 avec des mesures destructrices, bien qu'un point méthodologique spécifique aurait été idéalement nécessaire. Du fait de la nature optique de la méthode, un point de vigilance fut porté quant à la validité du LAI 2200 dans les conditions agroforestières, où la canopée des arbres pourrait interférer avec la méthode. Nous avons vérifié sous un gradient de masque aérien des arbres (*i.e.* à des endroits où la canopée des arbres était plus ou moins développée) le fait que le LAI 2200 retourne une valeur nulle lorsque l'on fait une mesure à plusieurs hauteurs, mais sans couvert de pois. Par ailleurs, nous avons également vérifié que la dynamique temporelle du LAI pour chaque placette était cohérente avec les observations de terrain, et reflétait bien une phase de développement foliaire maximal, suivi d'une période plateau avec une surface foliaire maximale, puis une éventuelle réduction du LAI lors de la sénescence. Cela ne garantit cependant pas que la variabilité de la mesure n'ait pas augmenté du fait des conditions de sous-bois ou de l'hétérogénéité du couvert. Encore une fois, il s'agit d'un compromis entre la nécessité de disposer d'une mesure non destructrice (*i.e.* une contrainte expérimentale) et le temps disponible. Pour réaliser ce choix, nous avons réalisé un travail d'analyse des méthodes appliquées (essentiellement en AF) pour quan-

Tableau 4 Synthèse des méthodes identifiées pour l'estimation du LAI de cultures annuelles en conditions agroforestières (*i.e.* sous la canopée des arbres).

Caractère de la mesure	Méthode d'estimation	Exemple de références
Destructrice	Directe (*e.g. scanner ou planimètre*)	Singh et al. (1989)
	Indirecte (*e.g. déduit via la mesure du SLA*)	Zamora et al. (2008)
Non-destructrice	Allométrie avec les traits foliaires	Lott et al. (2000) Wang et al. (2016) Zhang et al. (2018)
	Gap fraction (*e.g. LAI 2200*)	Inurreta-Aguirre et al. (2018)

tifier le LAI. Une synthèse est présentée au sein du Tableau 4. Le recul vis-à-vis des méthodes non-destructrices quant à l'estimation de la dynamique du LAI d'une culture intercalaire annuelle en condition agroforestière "encombrée" reste actuellement encore limité.

4.3.3 Suivi dynamique de la biomasse

Des prélèvements intermédiaires ont été réalisés à 3 dates, à savoir une mesure en sortie d'hiver (fin Mars), une mesure dès le début de la floraison (fin Avril) et une mesure à la fin du stade limite d'avortement (FSSA - *Final Seed Stage Abortion*) (à 2 dates différentes, à la fin du mois de Mai pour tenir compte des effets liés au régime de pluie testé). La dynamique de biomasse entre la floraison et le FSSA est considérée comme un paramètre clé pour prédire le nombre de grains et le rendement d'une culture de pois (Munier-Jolain et al., 2010). Cependant, la détermination de ce dernier stade phénologique n'est pas aisée et des décalages phénologiques importants entre les différentes modalités de culture (régime de pluie, système de culture et position vis-à-vis de la ligne d'arbres) n'ont pas facilité sa détermination. Par conséquent, nous restons prudents quant à l'analyse possible à partir des mesures de biomasse faites au FSSA. Par ailleurs, du fait de la quantité limitée de matériel végétal disponible à l'intérieur des dispositifs d'exclusion, les mesures intermédiaires furent toutes réalisées sur une zone de 0.25 m^2 (50 cm x 50 cm) à proximité directe de la placette de suivi (en maintenant un écart de l'ordre de 20 à 30 cm depuis le bord de la placette afin de ne pas créer un effet de bord sur la placette centrale).

4.3.4 Suivi sanitaire de la culture

Les observations de terrain ont révélé une pression de maladie non négligeable (oïdium) à partir de la fin du mois de mai. Une évaluation visuelle du taux d'incidence a donc été réalisée au sein des deux systèmes de cultures et des modalités d'exclusion de pluie. Cette évaluation a été réalisée uniquement sur les placettes de suivi relative à l'expérimentation du grand dispositif lors de la journée du 4 juin 2019 par Valentin Lhuillery, alors stagiaire en charge du suivi des placettes sous le grand dispositif. Par manque de temps, cette évaluation n'a pas été réalisée au sein des placettes de suivi sur les petits dispositifs. Les placettes du grand dispositif ayant été perturbées par des

fuites et des entrées d'eau latérales lors des exclusions, l'analyse s'est uniquement portée sur les placettes les moins touchées situées dans la partie la plus centrale du grand dispositif.

4.4 Évaluation du bilan radiatif solaire à l'échelle du couvert

Pour évaluer la dynamique de biomasse en fonction d'un bilan radiatif établi à partir des données de LAI, des triplets de capteurs PAR ont été installés au sein de la parcelle au niveau de 2 blocs, en TA et en AF respectivement, avec enregistrement sur des centrales d'acquisition (CR1000, Campbell Scientific, USA). La caractérisation du bilan radiatif à l'échelle du couvert végétal peut se réaliser à l'aide de mesures du flux lumineux à différents niveaux (*e.g.* au-dessus du couvert, ou en dessous au niveau du sol) et selon différentes orientations (capteur orienté vers le ciel ou vers le sol) (Varlet-Grancher et al., 1989). In-fine, la caractérisation du bilan radiatif permet de mieux comprendre les processus photosynthétiques à l'échelle de la plante en estimant la fraction interceptée (RIE - *radiation interception efficiency*) ou absorbée, et les cumuls correspondants, ce qui permet de déduire l'efficience de conversion de la lumière (RUE - *radiation use efficiency*).

L'estimation du PAR intercepté peut être réalisée à l'aide de deux capteurs en mesurant le différentiel de flux lumineux tel que :

$$PAR_{\text{int}} = PAR_{\text{inc}} - PAR_{\text{trans,sol}} \tag{3}$$

où PAR_{inc} est la quantité de lumière (PAR) reçue par la culture, et $PAR_{\text{trans,sol}}$ est la quantité de lumière transmise au niveau du sol. Dans cette configuration, on néglige les aspects de réflexion par le sol et par la culture. Cette approche est généralement considérée comme valable dans le cas où le couvert de culture est suffisamment développé pour représenter un couvert aux propriétés optiques homogènes. L'estimation du PAR absorbé peut être réalisée au terrain à l'aide de quatre capteurs. On considère généralement :

$$PAR_{\text{abs}} = PAR_{\text{inc}} - PAR_{\text{trans,sol}} - PAR_{\text{reflec,couv+sol}} + PAR_{\text{reflec,sol}} \tag{4}$$

où les flux supplémentaires $PAR_{\text{reflec,sol}}$ et $PAR_{\text{reflec,couv}}$ correspondent au flux réfléchi par le sol et par l'ensemble "sol-couvert cultural" respectivement. La mise en place de trois capteurs s'inspire directement du dispositif expérimental mis en place par Bedoussac and Justes (2010) afin d'estimer le PAR absorbé par le couvert de la culture. En l'absence de capteurs PAR orienté vers le sol, le flux réfléchi peut être estimé en considérant l'albédo du sol, dont des valeurs moyennes peuvent être trouvées dans la littérature pour des textures et des humidités de sol différentes (*e.g.* Cellier et al. 1996). Du fait de la présence de deux modalités de régime pluviométrique, l'albédo du sol a probablement été impacté. Un oubli lors de la mise en place des capteurs a contraint à abandonner les mesures réalisées à l'aide du troisième capteur (au-dessus du couvert, orienté vers le sol), et seulement le PAR intercepté a été utilisé dans nos analyses.

Enfin, une intercalibration des capteurs a été réalisée avant et après la période de mesure au

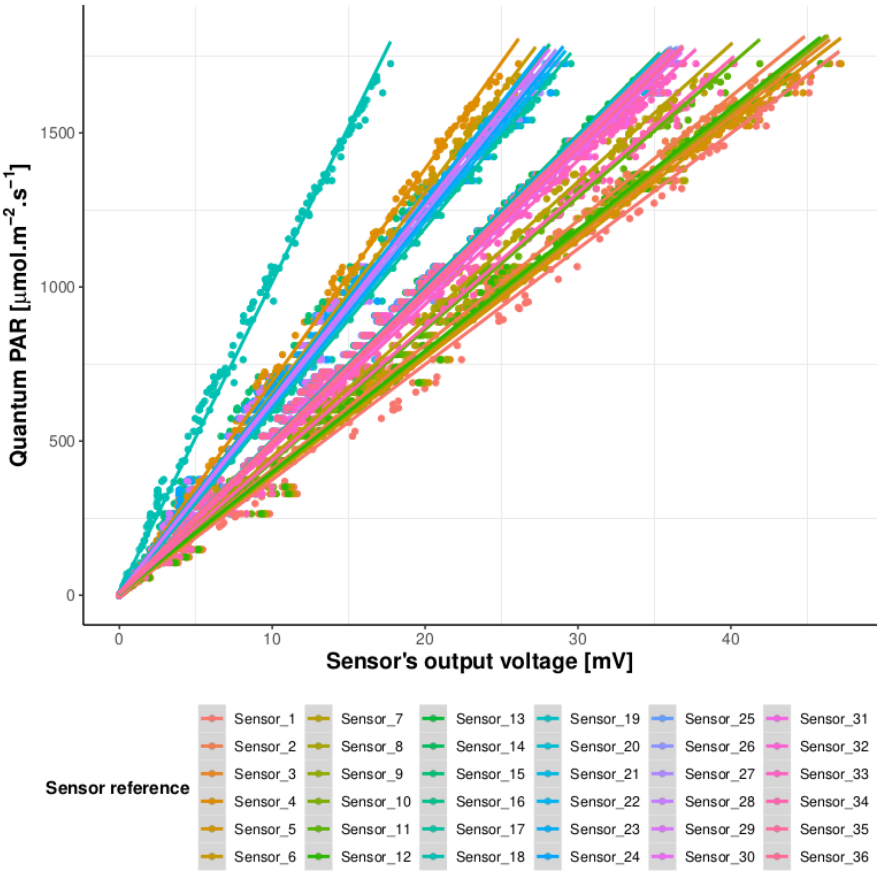


Figure 22 Régression linéaire établie pour chaque capteur PAR dans le cadre de la procédure d'intercalibration des capteurs.

champ : pendant deux semaines en hiver (décembre) et en été (mi-juillet/mi-août), les capteurs ont été placés sur le toit du bâtiment de recherche (afin d'éviter toute interférence potentielle avec l'ombrage d'un arbre ou d'un bâtiment) et leur réponse a été comparée avec un capteur de "référence". Ces mesures ont permis d'établir des régressions spécifiques à chaque capteur (Figure 22).

4.5 Mesure du rendement et de ses composantes

4.5.1 A l'échelle du couvert

L'évaluation de la productivité de la culture de pois a été déterminée au sein de chaque placette centrale (Figure 13), sur 1 m^2. Le nombre de plants par placette de suivi a été homogénéisé à 80 plantes.m^{-2} après la levée du pois, afin de réduire les effets d'hétérogénéité lors du semis (*e.g.* densité et profondeur de semis) ou d'autres effets relatifs aux conditions de germination entre les deux systèmes de cultures étudiés[17]. La date de prélèvement à la récolte a été déterminée en fonction de la maturité apparente du grain, à partir de sa couleur et de sa dureté, et a été différente

[17] A notre connaissance, aucune étude ne mentionne un effet des conditions AF sur la germination et la levée d'une culture intercalaire, mais on ne peut pour autant exclure des effets à ce niveau

pour chaque condition de culture. Nous avons mesuré les biomasses de grain et de paille. Les composantes du rendement à l'échelle du couvert ont été obtenues par mesure du nombre total de gousses et de grains par placette. Les exclusions de pluie ont raccourci le cycle de culture de plusieurs jours, et quelques placettes ont été attaquées par des pigeons. Bien que les effets aient été limités par l'utilisation de filets de protection, nous avons corrigé les valeurs de rendement pour en tenir compte. Les gousses tombées au sol à cause des pigeons ont été comptées, en distinguant les gousses vides et les gousses pleines, ainsi que le nombre de grains tombés au sol et non contenus dans des gousses. Par proportionnalité avec les gousses non ouvertes, le nombre et le poids des grains a été corrigé.

4.5.2 A l'échelle de la plante

Nous avons également fait des mesures complémentaires à l'échelle de la plante en prélevant deux plants de pois à proximité de chaque placette. Les gousses ont été mises en sachet en notant précisément la position du nœud reproductif, en les numérotant à partir du premier pédoncule floral observé. Le nombre de gousses, le nombre de graines et le poids des graines ont été mesurés pour chaque noeud afin d'obtenir les profils de composantes de rendement à l'échelle de la plante.

4.6 Indicateurs de stress physiologique retenus

La quantification des stress physiologiques induits par l'exclusion de pluie a été réalisée à l'aide de deux mesures : une mesure de température foliaire et une mesure de conductance stomatique.

Les mesures de température des feuilles sont considérées comme des indicateurs de stress hydrique, car les écarts entre la température de l'air et la température de la feuille reflètent indirectement la capacité de la plante à transpirer. Les mesures de températures foliaires ont été réalisées 2 semaines après le début de la floraison, qui correspond chez le pois à une période sensible, pendant laquelle on observe à la fois un accroissement de la surface foliaire et la mise en place des organes reproducteurs (fleurs, gousses, grains). Deux méthodes de mesures ont été utilisées pour quantifier les températures foliaires : une méthode par mesure infrarouge (IR120, Campbell Scientific, USA) et une méthode par capteur de température électrique (thermocouples de type T, cuivre-constantan). Les deux méthodes de mesure sont réalisées à l'aide de centrales d'acquisition installées sur le terrain (CR1000, Campbell Scientific, USA). Les deux méthodes permettent de réaliser un suivi dynamique de la température du couvert, mais elles diffèrent par la zone considérée au sein du couvert végétal. La méthode par infrarouge mesure la température d'une surface donnée, qui dépend de la distance entre le capteur et la surface étudiée et de l'angle solide couvert par le capteur. En revanche, la mesure à l'aide d'un thermocouple est une mesure ponctuelle. Elle ne concerne que la température au niveau du point de soudure entre les deux métaux (on parle de point de soudure chaud). La mise en place de thermocouples est plus sensible, car elle nécessite de réaliser de nombreuses mesures au sein de plusieurs plantes (pour compenser le caractère très localisé de la mesure). Par conséquent, il est aussi préférable d'installer un grand nombre de capteurs, ce qui alourdit le travail de mise en place (mise en place de multiplexeurs sur les centrales

d'acquisition, intégration de la contrainte des nombreux branchements, vérification de la qualité de contact entre le capteur et la plante...). La présence du thermocouple peut également perturber la température de l'organe mesuré, par un effet d'inertie thermique et/ou de modification du bilan local de rayonnement. Les données récoltées ont révélé une différence assez importante entre les deux mesures, notamment dans les zones où l'exclusion de pluie a lieu. Le développement foliaire du pois a été fortement réduit par les exclusions, limitant le taux de couverture. Des portions de sol sont restées apparentes. Malgré un ciblage des zones afin de limiter l'influence sur la mesure de température, la comparaison des mesures infrarouges avec celles des thermocouples a montré des différences. Les mesures de thermocouples ont finalement été préférées car i) elles permettent de limiter l'influence d'un biais de température liée à la proportion de sol apparent dans l'angle de visée du capteur infrarouge et ii) elles étaient réalisées sur l'ensemble des modalités expérimentales (TA, AF-S et AF-N).

La conductance stomatique est un second indicateur de stress hydrique qui a été utilisé pour quantifier le stress hydrique. Le pois est une culture particulièrement sensible au stress hydrique et sa conductance stomatique réagit fortement au déficit hydrique (Lecoeur and Sinclair, 1996). Cet indicateur sensible a donc été retenu pour une mesure autour du midi solaire, au moment où la contrainte hydrique est la plus forte et où les conditions d'ombrage sont particulièrement contrastées. Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un poromètre (SC-1, Decagon Devices Inc., USA). Ces résultats sont partiellement mobilisés dans le cadre du chapitre 3 (voir Annexes - Figure E.10).

5 Synthèse des indicateurs sélectionnés pour les chapitres et la discussion

Le Tableau 5 synthétise l'ensemble des indicateurs retenus pour les chapitres 2 et 3, ainsi que pour la discussion générale.

Tableau 5 Synthèse des indicateurs mobilisés pour les chapitres de résultats 2 et 3, ainsi que pour la discussion.

Indicateurs	Chapitre 2	Chapitre 3	Discussion Générale
Mesures hydriques			
Pluviométrie	×	×	
Humidité du sol (sondes TDR)	×	×	
Flux lumineux			
PAR_{inc} - Photos hémisphériques	×	×	
PAR_{inc} - Capteurs		×	
PAR_{int} - Capteurs		×	
Suivi du développement de la culture			
Phénologie	×	×	
LAI	×	×	
NDVI		×	
Observations oïdium			×
Mesures de biomasse			
Mesures intermédiaires de biomasse		×	
Mesures à la récolte	×	×	
Rendement et composantes	×		
Indicateurs de stress physiologique			
Température de culture		×	
Conductance stomatique		×	
Mesures microclimatiques			
Température de l'air			
– *en TA*	×	×	×
– *en AF*		×	×
Humidité relative			×
Bac d'évaporation de classe A			×

Synthèse des indicateurs sélectionnés pour les chapitres et la discussion

Troisième partie

RÉSULTATS

Chapitre 1 : L'agroforesterie peut-elle permettre de s'adapter à des épisodes de sécheresse ? Apports des expérimentations par manipulation du régime de pluie

Dans ce chapitre, nous cherchons à établir dans quelle mesure les expérimentations de manipulation du régime de pluie peuvent permettre de mieux comprendre le fonctionnement des systèmes agroforestiers vis-à-vis d'épisodes de sécheresses. Nous réalisons dans un premier temps un état de l'art quant à la mise en place de ce type d'expérimentation au sein de systèmes agricoles et forestiers. Dans un second temps, nous analysons les spécificités des systèmes agroforestiers qui nécessitent d'être prises en compte lors de la mise en place de ce type d'expérimentation. Enfin, nous réalisons une analyse comparative des deux dispositifs d'exclusion de pluie mis en place à Restinclières.

Ce chapitre est l'ébauche d'un article à publier ultérieurement.

1 Introduction

Le changement climatique menace la production agricole et forestière dans la majeure partie du globe, du fait de l'accroissement des températures hivernales, de l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur ou de la plus grande variabilité de la répartition de la pluviométrie (IPCC, 2014). En ce qui concerne la pluviométrie, les projections climatiques pour les cumuls annuels de précipitations ne permettent pas de conclure quant à une modification moyenne à l'échelle du globe (Dore, 2005). En revanche, il est admis que la variabilité inter- et infra-annuelle augmentera avec l'augmentation de la température du globe (Pendergrass et al., 2017), accentuant le risque de sécheresse ou d'épisodes pluvieux intenses (Pendergrass and Knutti, 2018). Malgré tout, une diminution des précipitations annuelles semble se dégager plus précisément pour certaines régions de la planète. C'est notamment le cas autour du bassin méditerranéen où une diminution des cumuls pluviométriques est déjà observée pour le XXème siècle (Dore, 2005; Lionello and Scarascia, 2018). A l'échelle de la planète, l'augmentation du déficit hygrométrique (VPD - *vapor pressure deficit*) est également une préoccupation majeure car elle conditionnera également la réponse des écosystèmes terrestres (Grossiord et al., 2020; Vicente-Serrano et al., 2014). Yuan et al. (2019) montre que la croissance des végétaux à l'échelle mondiale tend à décroitre depuis la fin des années 1990 et suggère un lien avec la forte augmentation du VPD sur cette même période. Les effets du changement climatique sur les écosystèmes terrestres concernent donc à la fois la disponibilité de la ressource en eau et la demande évaporative. Parmi les nombreux services fournis par les écosystèmes terrestres, les terres agricoles, les prairies ou les forêts garantissent une part très importante de la production de nourriture, de matériaux ou d'énergie nécessaire aux êtres humains. Il est donc nécessaire que les systèmes agricoles et forestiers puissent s'adapter aux

changements climatiques, et en particulier à une pluviométrie réduite ou du moins irrégulière et à l'augmentation du déficit hygrométrique, afin de garantir un niveau de productivité suffisant.

Pour approfondir la compréhension des effets d'une modification du régime pluviométrique sur la productivité des systèmes agricoles et forestiers, les chercheurs ont proposé de mettre en place des expérimentations de manipulation de la ressource en eau. Les conséquences néfastes du stress hydrique sur les productions agricoles ont stimulé très tôt les agronomes à développer des dispositifs techniques permettant l'étude de la réponse des cultures arables en plein champ à des situations contrastées de disponibilité en eau, où les apports sont contrôlés soit par irrigation, soit par exclusion de pluie (Bruce and Shuman, 1962; Fletcher and Maurer, 1966; Horton, 1962). Dans les systèmes prairiaux ou forestiers, ces dispositifs ont été mobilisés plus tardivement, initialement pour mieux comprendre les effets des pluies acides sur les peuplements forestiers (Gundersen et al., 1995, 1998) puis pour mieux comprendre l'impact d'une modification de la productivité de ces écosystèmes vis à vis du cycle du carbone global de la planète (voir par exemple les méta-analyses réalisées par Song et al. (2019) et Wu et al. (2011)). L'étude du maintien de la productivité des systèmes écologiques face à une perturbation est complexe, puisqu'elle nécessite d'analyser une large gamme de processus sous-jacents, tels que les processus microbiens du sol, les processus écophysiologiques à l'échelle de la plante, la structure des communautés végétales et la dynamique des populations pour les systèmes les plus pérennes.

Les systèmes agricoles et forestiers sont des écosystèmes totalement ou partiellement gérés, où les leviers de gestion peuvent permettre de maintenir la productivité face à des épisodes de sécheresse de plus en plus fréquents. Pour évaluer le rôle de ces leviers de gestion, les expérimentations de manipulation du régime de pluie peuvent être mobilisés. Le développement de variétés tolérantes à la sécheresse constitue actuellement un axe de recherche très fort au sein des systèmes arables (Okono et al., 2013) et des plateformes de phénotypage ont été proposées pour tester en plein champ la tolérance des variétés sélectionnées au stress hydrique (Beauchêne et al., 2019; Kant et al., 2017). Pour les systèmes agricoles en régime pluvial, d'autres leviers agronomiques ont également été proposés pour faire face à des aléas de sécheresse. La diversification des cultures (Duru et al., 2015; Malézieux et al., 2009) et/ou l'application des principes de l'agriculture de conservation (Michler et al., 2019) constituent des leviers envisageables à l'échelle de la parcelle. Le rôle de la diversification de la rotation de culture (Degani et al., 2019), de la pratique de l'agriculture de conservation (Steward et al., 2019) ou de la mise en place d'associations de cultures (Renwick et al., 2020) sont de plus en plus étudiés à l'aide de dispositifs d'exclusion de pluie. Au sein des systèmes prairiaux, des liens entre la diversité floristique d'une prairie et sa résilience à la sécheresse ont été mis en évidence. Cela suggère qu'une gestion de cette diversité, en ajustant correctement le régime de fertilisation ou le chargement parcellaire est envisageable pour mieux résister aux effets de la sécheresse (Carlsson et al., 2017; Souther et al., 2020). Des études de manipulation du régime de pluie montrent le rôle du régime de fauche (Vogel et al., 2012; Zwicke et al., 2013) ou l'effet du pâturage (Deléglise et al., 2015; Heitschmidt et al., 1999) vis-à-vis de la sécheresse. Dans les systèmes forestiers, l'état nutritionnel du peuplement forestier et sa densité ont été identifiés comme des caractéristiques importantes pour faire face à des sécheresses. La mise en place de stratégie

de gestion par apport potassique (Battie-Laclau et al., 2014, 2016) ou par éclaircie du peuplement forestier (Gavinet et al., 2019, 2020) sont aussi des pistes qui ont été étudiées à l'aide de dispositifs d'exclusion de pluie.

L'agroforesterie a également été proposée comme une voie d'adaptation de l'agriculture au changement climatique (Schoeneberger et al., 2012; Verchot et al., 2007) et le dernier rapport du GIEC mentionne explicitement les systèmes agroforestiers comme une stratégie de lutte et d'atténuation pour les zones particulièrement exposées à des aléas de sécheresse (IPCC, 2014). En effet, outre le lien entre diversité spécifique et résilience à la sécheresse, les modifications microclimatiques observées au sein des systèmes agroforestiers peuvent avoir un effet facilitateur sur la croissance des cultures par limitation de l'évaporation de l'eau du sol (Jackson and Wallace, 1999) ou réduction de la demande évaporative (Kanzler et al., 2018). La température des cultures peut ainsi être réduite de plusieurs degrés Celsius pendant les heures les plus chaudes de la journée en conditions ombragées (Lott et al., 2009), diminuant également le risque de stress thermiques intenses lors de stades particulièrement sensibles (Arenas-Corraliza et al., 2018). Lors d'une sécheresse intense, l'enracinement profond des arbres leur permet de prélever l'eau en profondeur, contribuant ainsi à limiter la compétition avec les cultures associées lorsque la ressource hydrique est moins disponible (Gao et al., 2018). Cependant, les effets de complémentarité spatiale au niveau des prélèvements restent dépendants du contexte. Si le sol est trop peu profond ou si la nappe phréatique est inaccessible, les prélèvements de l'arbre auront lieu au niveau des horizons de sol plus superficiels, avec un risque accru de compétition pour la ressource en eau avec la culture (Smith et al., 1997). En contexte de savane, Belsky (1994) montre aussi que l'intensité de la compétition entre les arbres et la strate herbacée est plus forte dans les sites humides, où les densités racinaires sont importantes à proximité des arbres, que les sites plus secs, où les systèmes racinaires des arbres sont plus étendus. Rivest et al. (2013b) montrent que ce phénomène semble être dépendant des caractéristiques fonctionnelles des arbres considérés. Malgré tout, l'état actuel des connaissances sur les systèmes agroforestiers ne permet pas encore d'identifier clairement dans quels contextes les effets de facilitation et de complémentarité contrebalancent les effets de compétition.

Il est donc nécessaire de poursuivre les études sur les relations de compétition et de facilitation entre arbres et cultures dans différents systèmes agroforestiers sous contrainte hydrique plus ou moins marquée. Les expérimentations de manipulation du régime des pluies représentent une opportunité pour étudier l'effet de la ressource en eau. L'objectif de ce chapitre est de proposer des méthodologies pour mener à bien de telles expérimentations. Dans un premier temps, nous réaliserons une synthèse concernant la méthodologie scientifique et technique déployée pour manipuler expérimentalement le régime pluviométrique en agriculture et en foresterie. A travers cette synthèse, nous chercherons à répondre aux questions suivantes : Quelles sont les approches existantes pour définir un scénario de manipulation du régime des pluies ? Quels sont les types de dispositifs existants ? Quelles sont les contraintes techniques et logistiques au sein des systèmes agricoles et forestiers ? Dans un second temps, on étudiera plus précisément comment ces dispositifs de manipulation du régime de pluie peuvent être mobilisés pour étudier la productivité des systèmes agroforestiers en conditions de sécheresse. En s'appuyant sur les premières études de manipu-

lation du régime des pluies mises en œuvre au sein de systèmes agroforestiers, on discutera des spécificités propres aux systèmes agroforestiers qui impactent ce type d'expérimentation. Enfin, un retour d'expérience concernant deux dispositifs d'exclusion de pluie développés sur le Domaine de Restinclières (Hérault, France) illustreront les défis scientifiques, techniques et logistiques que ce type d'expérimentation peut représenter.

2 Partie I - Manipuler le régime des pluies au sein de systèmes agricoles et forestiers - état de l'art

2.1 Choisir un scénario expérimental de manipulation de régime de pluie

Une première étape lors d'une expérimentation de manipulation du régime de pluie consiste à établir un scénario de pluviométrie. La pertinence qu'il y aurait à essayer de simuler des scénarios pluviométriques futurs probables par des manipulations in situ fait l'objet de débats (De Boeck et al., 2020; Korell et al., 2020a,b; Muller et al., 2020). Les projections de changement climatique vis-à-vis de la pluviométrie restent empreintes d'une grande incertitude. Bien que des tendances soient établies pour certaines régions, les modèles climatiques concluent dans l'ensemble à une augmentation de la variabilité des précipitations allant de pair avec l'augmentation globale des températures, quelle que soit l'échelle temporelle considérée (Pendergrass et al., 2017). Par ailleurs, la réponse des écosystèmes terrestres à une modification du régime des pluies est fortement influencée par d'autres facteurs climatiques (*e.g.* température et teneur en CO_2 de l'air) et pédologiques. Pour les systèmes agricoles et forestiers, les aspects de gestion représentent également un aspect supplémentaire à prendre en compte, puisqu'ils ont notamment une influence sur la disponibilité en nutriments. Par conséquent, il existe une infinité de combinaisons de scénarios à tester dans l'étude de la réponse des écosystèmes terrestres (Kreyling and Beier, 2013).

L'analyse de la littérature permet d'identifier deux approches pour établir un scénario de manipulation des pluies à réaliser, selon qu'on se place dans un contexte climatique particulier ou qu'on génère un scénario climatique en fonction de seuils physiologiques des cultures. La première approche consiste à centrer le scénario de régime de pluie selon un référentiel climatique défini a priori, en amont de l'expérimentation, et établi à partir d'une analyse fréquentielle de la pluviométrie dans une région donnée (*climate-based scenario* - CBS). La deuxième approche consiste à étudier spécifiquement la réponse de certains processus écologiques, pour lesquels des conditions de sécheresse sont jugées critiques d'après la littérature scientifique disponible ; dans ce cas, la contextualisation des régimes de pluie, si elle a lieu, est réalisée a-posteriori (*process-based scenario* - PBS)

2.1.1 Scénarios établis à partir d'une analyse fréquentielle de la pluviométrie

L'analyse fréquentielle réalisée en amont des CBS permet de définir dans un premier temps le référentiel temporel et climatique dans lequel l'expérimentation souhaite s'inscrire. Cette analyse s'appuie sur les données climatiques locales disponibles afin de recontextualiser la fréquence d'occurrence de la perturbation testée au niveau de la pluviométrie, en ajustant une fonction de distribution cumulative. La longueur des séries climatiques à disposition influence directement la qualité de l'analyse fréquentielle, en particulier au niveau de la prise en compte des années/évènements extrêmes, pour lesquelles une période de 100 ans est jugée idéale (Jentsch et al., 2007; Knapp et al., 2017). Dans le cas des plantes pérennes, l'analyse fréquentielle est généralement réalisée à l'échelle de l'année calendaire car on considère que le développement de la plante est affecté par l'ensemble des processus physiologiques mobilisés au cours de toute la saison. En revanche, pour les systèmes arables où les plantes annuelles sont majoritaires, la fenêtre d'analyse peut varier afin de couvrir la période de développement de la culture (*e.g.* Temani et al. 2021). Pour certaines régions où le régime pluviométrique présente une forte variabilité inter-mensuelle (*e.g.* pourtour méditerranéen), il peut être également intéressant de considérer la période de référence en amont de la période de semis, puisque les épisodes pluvieux avant le semis peuvent être importants pour restaurer la réserve utile du sol qui sera mobilisée au cours du cycle de développement de la culture. Enfin, l'analyse fréquentielle est particulièrement importante dans les cas où le scénario de référence est un régime de pluie entièrement contrôlé pour correspondre à une pluviométrie standardisée, identique chaque année (*e.g.* Jentsch et al. 2007). Des outils d'analyse spécifiquement dédiés ont été développés pour faciliter ces analyses (*e.g.* Lemoine et al. 2016).

La manipulation expérimentale du régime de pluie est ensuite définie et planifiée à partir de l'analyse fréquentielle. On propose de distinguer trois grandes approches en fonction de la manipulation réalisée au niveau de la distribution des pluies, définies à partir des notions i) de tendance, ii) d'aléas et iii) d'extrêmes climatiques. Les scénarios basés sur une modification de la tendance climatique ciblent la moyenne des cumuls de pluie, sans trop modifier la distribution des pluies de la période de référence. Les scénarios spécifiquement conçus pour étudier la notion d'aléas ne modifient pas nécessairement le cumul de pluie moyen ou médian mais bien la distribution temporelle des pluies. Enfin, plusieurs équipes de recherche ont souligné la nécessité d'aller explorer de nouveaux extrêmes (*e.g.* Jentsch et al. 2007; Knapp et al. 2017), considérant que les extrêmes définis actuellement ne seront pas les extrêmes prédits par les projections climatiques pour la fin du XXIème siècle. La notion d'extrême pluviométrique diffère entre les études, mais elle concerne généralement des cumuls pluviométriques avec une période de retour de l'ordre de 10 ans (10ème percentile), 20 ans (5ème percentile) ou 100 ans (1er percentile) (Knapp et al., 2017). Jentsch et al. (2007) suggèrent également d'adapter la notion d'extrême en fonction de la durée de vie de la plante considérée. Ces expérimentations visent à explorer les conséquences des extrêmes actuels, afin d'évaluer si des seuils écologiques seront atteints, vis-à-vis du fonctionnement physiologique des plantes pérennes (Hoover et al., 2018; Knapp et al., 2008) ou au niveau de communautés de plantes (*e.g.* Felsmann et al. 2018; Gimbel et al. 2015).

2.1.2 Scénarios pour l'étude de processus spécifiques

Une autre approche consiste à planifier le scénario de manipulation du régime de pluie pour étudier de façon ciblée un ou des processus jugés clés pour le fonctionnement ou la productivité des systèmes agricoles ou forestiers. La contextualisation de la manipulation du régime de pluie par rapport à la pluviométrie locale ou les projections climatiques n'intervient qu'en second plan, et elle est réalisée a posteriori (voire reste absente). Le processus ciblé détermine le type de scénario (réduction de la pluviométrie moyenne sur plusieurs années ou simulation d'une sécheresse à un moment clef du cycle de la plante).

Ainsi, les études réduisant le cumul moyen de précipitation de l'année ou de la saison culturale permettent de caractériser les réponses structurelles et fonctionnelles des communautés microbiologiques du sol essentielles dans le maintien de la fertilité du sol. Par exemple, Ullah et al. (2020) étudient les processus de minéralisation de l'azote dans le sol d'une prairie, en fonction du régime de fertilisation (compost ou fertilisation minérale) en réduisant 80% des précipitations. En mobilisant des techniques de marquage isotopique de l'azote, ils montrent qu'une meilleure synchronicité entre les besoins de la plante et la minéralisation de l'azote est observée lorsque du compost est employé, ce qui améliore le statut azoté de la prairie et limite les pertes en azote. Kundel et al. (2020) ont également étudié la réponse à la sécheresse des communautés bactériennes et fongiques du sol entre des systèmes gérés selon des principes de fertilisation conventionnelle ou un système en biodynamie. Pour cela, ils ont imposé une réduction de 65% des pluies printanières à partir de la sortie d'hiver (*i.e.* avant l'élongation des tiges) jusqu'à la récolte du blé. Ils n'observent pas d'effet significatif sur le rendement, mais ils montrent que la sécheresse stimule la présence de champignons mycorhiziens arbusculaires, et que cet effet est d'autant plus visible au sein du système géré en biodynamie qu'au sein du système conventionnel.

Au contraire, les études qui visent à comprendre l'impact d'un stress hydrique au moment des étapes critiques d'élaboration du rendement des cultures annuelles nécessitent de simuler des sécheresses à des moments précis dans l'année. En effet, la période d'incidence d'un stress hydrique peut modifier l'allocation de biomasse à l'échelle de la plante au sein d'une large gamme de cultures annuelles (Jamieson et al., 1995; Martin and Jamieson, 1996). Pour simplifier l'analyse des stress sur le rendement, des "périodes critiques" pour l'élaboration du rendement ont été définies, en particulier chez les cultures annuelles où les périodes de floraison ou de formation des épis sont des stades particulièrement sensibles (*e.g.* Arisnabarreta and Miralles 2008; Lake and Sadras 2014). Un scénario peut ainsi viser à comprendre spécifiquement les effets d'un stress hydrique pendant cette période sensible. Par exemple, Renwick et al. (2020) ont ciblé spécifiquement la période de floraison du maïs pour étudier si sa culture en association avec une légumineuse (pois d'angole) pouvait contribuer à limiter la baisse de production globale du système de culture lors d'une sécheresse au timing critique.

Pour les cultures pérennes, l'existence d'effets mémoire pluriannuels complexifie l'étude des périodes critiques puisque les effets d'un stress survenu pendant une période donnée de l'année *n* nécessite d'être réalisée en analysant la réponse de la culture pendant les années *n+1*, *n+2*,... Des

expérimentations de manipulation du régime de pluie ont déjà permis d'approfondir les connaissances quant à l'influence d'un stress hydrique sur une période spécifique chez différentes cultures pérennes. Par exemple, Bonada et al. (2020) ont étudié l'effet spécifique d'une réduction des pluies sur la vigne pendant l'hiver (*i.e.* période de dormance) et montrent qu'une disponibilité réduite en eau pendant cette période retarde la date de débourrement ainsi que la reprise de végétation de la vigne, avec un effet négatif sur le rendement. Hahn et al. (2020) montrent que des sécheresses estivales ou automnales ont un impact plus fort qu'une sécheresse printanière sur la productivité annuelle d'un système prairial, mais que des effets de mémoire "positifs" permettent de maintenir la reprise de végétation l'année suivante.

2.2 Typologie des dispositifs expérimentaux existants

Le choix du scénario de régime de pluie à appliquer détermine en partie le type de dispositif à mettre en place pour le réaliser. Au sein des expérimentations de manipulation du régime des pluies, la disponibilité de la ressource en eau est modifiée en travaillant par irrigation, par exclusion ou en mobilisant les deux. Dans le cas de l'exclusion de pluie, il existe des sous-catégories de dispositifs selon qu'on exclut tout ou une fraction des épisodes pluvieux ciblés.

Si les conditions expérimentales le permettent, les dispositifs d'irrigation sont couramment utilisés pour étudier la réponse des systèmes gérés et cultivés à un stress hydrique. Dans le domaine des sciences agronomiques, il existe un vaste corpus d'études sur la réponse des cultures aux apports par irrigation, qui mobilise un large panel de techniques d'irrigation. Des différences existent entre les techniques d'irrigation, notamment au niveau du contrôle des apports d'eau à la plante. Le contrôle du flux constitue un élément critique dans le cadre des expérimentations de manipulation du régime des pluies, et une attention particulière est portée au contrôle i) de la dose apportée et ii) de la répartition spatiale des apports. Par conséquent, les techniques d'irrigation localisée semblent privilégiées, telles que les systèmes goutte-à-goutte (Temani et al., 2021) et/ou par aspersion à déplacement latéral (Bonada et al., 2020), car elles garantissent un bon contrôle de la zone irriguée.

A l'opposé, les dispositifs travaillant par exclusion des pluies sont moins fréquents car cela peut être plus contraignant. La littérature fait cependant état d'une vaste déclinaison de dispositifs d'exclusion de pluie sur le plan technique. Une typologie est proposée dans le Tableau I.1. La nature de l'interception des évènements pluvieux est un premier critère de distinction, puisqu'il influence directement le scénario climatique expérimenté. Une exclusion de pluie est dite "partielle" si une fraction seulement d'un événement pluvieux est exclue par la structure d'interception partiellement couvrante (*e.g.* une gouttière) (types "P.."), tandis qu'elle est qualifiée de "totale" si toutes les précipitations d'un événement sont exclues à l'aide d'une structure d'interception intégralement couvrante (*e.g.* un toit) (types "T…"). La position par rapport au couvert végétal ciblé par l'exclusion de pluie et la mobilité de la structure d'interception sont deux critères de distinction supplémentaires qui ont une influence importante au niveau de la prise en compte des artefacts expérimentaux. Une majorité de dispositifs exclut les pluies en interceptant

les pluies au-dessus du couvert (type ".a..")[1] mais il existe également des dispositifs placés sous le couvert végétal lorsque c'est possible (type ".b..")[2]. C'est un critère qui conditionne beaucoup quel type de dispositifs peut être mis en place au sein des systèmes agricoles et forestiers car certains types de dispositifs peuvent être incompatibles ou difficiles à mettre en œuvre. Par exemple, la mise au point d'un dispositif d'exclusion partielle sous le couvert végétal (type "Pb.") est irréaliste en système prairial, du fait de la densité importante et de la faible hauteur du couvert végétal. A contrario, l'installation d'un dispositif d'exclusion total au-dessus du couvert végétal (type "Ta..") en système forestier nécessite un dispositif d'exclusion de grande envergure et en hauteur (*e.g.* Misson et al. 2010, 2011). La mise en œuvre de ce type de dispositif est lourde et a uniquement été réalisée sur le site de Puéchabon (France) en forêt basse, où le dispositif n'est actuellement plus en service. En forêt haute, ce type de dispositif n'est envisageable, et on observe soit des dispositifs sous la canopée en exclusion partielle (type "Pb..") ou totale (type "Tb.."). Pour les dispositifs d'exclusion totale, le caractère mobile des structures d'interception est un autre critère de distinction. Il existe des dispositifs où c'est une structure fixe et rigide qui est mobile (type "..mr") et où la mobilité est garantie soit par des rails (la mise en place est généralement automatisée) soit par une facilité d'assemblage et de démontage (l'installation est alors manuelle). Ces dispositifs nécessitent malgré tout de prévoir des aires de stockage dédiées en dehors des périodes d'exclusion. Pour pallier ce problème, des dispositifs avec des structures d'interception souples (généralement des bâches) ont également été proposés (type "..mp").

Les dispositifs d'exclusion de pluie et d'irrigation peuvent être complémentaires, ce qui représente également une opportunité pour renforcer le contraste hydrique entre des modalités expérimentales ou pour différer des apports. Zhang et al. (2020) juxtaposent ainsi directement les modalités d'exclusion et d'irrigation afin de redistribuer directement l'eau exclue dans une modalité plus irriguée. Gherardi and Sala (2013) proposent d'ajouter des éléments de collecte et de stockage d'eau pour une redistribution ultérieure. Ces aménagements techniques peuvent permettre de gagner une marge opérationnelle supplémentaire pour mettre en place des scénarios de manipulation de pluie dans des lieux où l'adduction d'eau est irréaliste sur le plan technique. Enfin, des dispositifs d'irrigation peuvent également être installés sous un dispositif d'exclusion totale des pluies pour contrôler très précisément le régime pluviométrique testé (Beauchêne et al., 2019) ou dans le but de bénéficier d'un témoin climatique, à savoir une modalité expérimentale visant à recréer le climat local moyen pendant toute la durée de l'expérimentation (Jentsch et al., 2007).

[1] Lettre **a** pour "**a**bove (canopy)"
[2] Lettre **b** pour "**b**elow (canopy)"

Tableau I.1 Typologie des dispositifs d'exclusion de pluie identifiés dans la littérature.

Type	Nature de l'exclusion	Structure d'interception			Type de système cultivé/géré	Exemple de référence[2]
		Position par rapport au couvert végétal	Mobilité	Surface[1]		
Pbf	Partielle (P)	En-dessous (b)	Fixe(f)	Petite	Arable	1
				Moyenne à grande	Forestier	2
Paf	Partielle (P)	Au-dessus (a)	Fixe (f)	Petite à moyenne	Arable	3
Tbf	Totale (T)	En-dessous (b)	Fixe (f)	Grand	Forestier	4
Tbmp	Totale (T)	En dessous (a)	Mobile pliable (mp)	Moyen	Forestier	5
Taf	Totale (T)	Au-dessus (b)	Fixe (f)	Moyenne à grande	Arable	6
Tamr	Totale (T)	Au-dessus (a)	Mobile rigide (mr)	Grande	Prairial	7
				Grande	Arable	8
				Grande	Viticole	9
				Grande	Forestier	10
Tamp	Totale (T)	Au-dessus (a)	Mobile pliable (mp)	Moyenne à grande	Arable	11

[1] Petite < $10m^2$; $10m^2$ < Moyenne < $100m^2$; Grande > 100 m^2

[2] 1 : Gagné et al. (2019) ; 2 : Limousin et al. (2009) (gouttière rigide) ; Battie-Laclau et al. (2014) (gouttière en toile) ; 3 : Kundel et al. (2018), Nasielski et al. (2015), Renwick et al. (2020) (gouttière translucide) ; 4 : Gimbel et al. (2015), Gundersen et al. (1995) (toit rigide) ; 5 : Cranston et al. (2020) (jupe en toile) ; 6 : Fay et al. (2000) ; 7 : Fariaszewska et al. (2020), Projet SICLEX INRAé (2019) ; 8 : Arkin et al. (1976); Beauchêne et al. (2019); Bruce and Shuman (1962) (fondation ancrée) ; Kant et al. (2017) (fondation mobile) ; 9 : Bonada et al. (2020) ; 10 : Misson et al. (2010, 2011) ; 11 : Hatfield et al. (1990) (structure câblée) ; Erbs et al. (2012) (structure rigide).

Outre le type de scénario pluviométrique désiré et le type de couvert végétal étudié, le climat local et la durée de l'expérimentation elle-même ont aussi un impact sur le choix du dispositif. Les expérimentations de manipulation des pluies sont réalisées dans un contexte climatique donné et souvent difficilement prévisible à l'avance. En fonction des objectifs de recherche, il peut être nécessaire d'irriguer ou d'exclure la pluie sur une période donnée. L'incertitude vis à vis du climat peut modifier les objectifs d'un projet de recherche de courte durée (*e.g.* moins de 2 ou 3 ans). Une année climatique extrême (très humide ou très sèche) est une éventualité à considérer lors de la planification du projet de recherche. Dans le cadre d'une année avec des cumuls de pluie importants, la manipulation du régime de pluie par irrigation peut devenir complètement inadéquate si la réserve utile est déjà saturée par la pluie "naturelle". De même, des exclusions de pluie partielles peuvent s'avérer insuffisantes pour générer un contraste hydrique marqué au niveau du sol si les cumuls de pluie au cours d'un épisode pluvieux saturent très largement les horizons de sol supérieur. A contrario, dans le cas d'années particulièrement sèches, l'exclusion risque de conduire à des sécheresses létales pour les plantes, limitant la possibilité d'étudier d'autres processus que la seule mortalité des plantes.

2.3 Limites et contraintes expérimentales au sein des systèmes agricoles et forestiers

Les expérimentations de manipulation du régime des pluies sont réalisées en conditions extérieures afin de mesurer une réponse du système à une perturbation pluviométrique la plus fiable possible. Ces dispositifs expérimentaux sont identifiés comme une solution pour transposer des résultats écophysiologiques obtenus en laboratoire à des conditions extérieures (Poorter et al., 2016), pour étudier des plantes qui ne pourraient pas l'être en laboratoire (e.g un arbre), ou des effets complexes (*e.g.* cumulatifs au sein d'un système). Elles font malgré tout face à des problèmes expérimentaux prévisibles et imprévisibles. Parmi les problèmes expérimentaux prévisibles, on distingue les effets liés à la nature intrinsèque du dispositif, qui regroupent les artefacts expérimentaux et les effets de bords. L'intégration des itinéraires techniques (agricoles et/ou sylvicole) constitue également une contrainte logistique supplémentaire à anticiper et peut générer des artefacts expérimentaux supplémentaires. Enfin, les expérimentations de manipulation n'échappent pas à des problèmes expérimentaux imprévisibles du fait d'aléas de nature climatique et/ou biotique, l'objectif pour l'expérimentateur étant alors de minimiser les impacts de ces aléas sur le dispositif utilisé.

Les artefacts expérimentaux se définissent comme des effets indésirables et indissociables de la présence du dispositif expérimental, qui entachent les mesures d'une erreur. Dans le cadre des exclusions de pluie, les artefacts expérimentaux résultent principalement de la présence des éléments d'interception. Lorsque l'interception de pluie est réalisée au-dessus du couvert végétal (type "Pa.." et "Ta.."), des modifications microclimatiques involontaires et importantes peuvent apparaître (Vogel et al., 2013). En particulier, la lumière disponible, la température ou l'humidité de l'air peuvent être affectées par la présence d'une structure couvrante et il est nécessaire de

les quantifier pour pouvoir caractériser le stress hydrique (Kreyling et al., 2017). En présence de structure latérale (*e.g.* pour limiter les effets de bords, cf. ci-dessous), des modifications de flux d'air conséquentes peuvent également être observées (Boeck et al., 2012). Cela peut conduire à des effets confondants et indésirables tels que des stress thermiques non désirés. Au contraire, lorsque les éléments d'interception sont placés sous le couvert végétal (types ".b.."), les effets sur les processus photosynthétiques des plantes sont plus limités, mais des effets sur le cycle biogéochimiques au niveau du sol peuvent être observés (Gundersen et al., 1998; Vogel et al., 2013). Les expérimentations de manipulation du régime des pluies par irrigation sont également assujetties à des artefacts expérimentaux notamment vis-à-vis de l'hétérogénéité de la distribution de l'eau sur la surface considérée ou des apports en nutriments par l'eau d'irrigation. Le mode d'irrigation peut par ailleurs avoir un impact sur la prise en compte d'effets liés à l'humectation foliaire pendant les épisodes de pluie, tels que l'évaporation par interception du couvert (Gundersen et al., 1998) ou encore le risque de maladies chez les cultures annuelles (Rotem and Palti, 1969). Dans les systèmes arables, la présence de structures permanentes pose un véritable défi pour l'intégration des itinéraires techniques. Leur présence peut entraver le passage de machines volumineuses, avec des conséquences sur l'homogénéité du semis ou l'épandage des engrais et/ou des produits phytosanitaires. Pour limiter les artefacts autant que possible, des solutions ont été proposées par (Beier et al., 2012) en systèmes prairiaux et forestiers. Deux stratégies principales semblent ressortir et consistent à i) minimiser les artefacts en assurant une mobilité du dispositif expérimental ou à ii) quantifier les artefacts en installant un témoin spécifique.

Les effets de bords restreignent la zone d'expérimentation où l'effet de la manipulation du régime de pluie est homogène et répond à l'objectif de modification de la ressource en eau visé par le dispositif. Les effets de bords dépendent des dimensions du dispositif. En particulier, la surface totale et la géométrie des dispositifs expérimentaux influencent la fraction de surface concernée par les effets de bords. La hauteur des structures d'interception par rapport au sol ont une influence pour les dispositifs d'exclusion, notamment vis-à-vis des entrées latérales d'eau en cas de pluie ventée. Les effets de bords sont directement liés à la capacité de contrôle des flux d'eau, que ce soit au niveau aérien (*e.g.* pluie ventée, irrigation par aspersion) et au niveau du sol, tant en surface (*e.g.* ruissellement de surface important en cas de sol induré ou de croûte de battance) que dans les horizons du sol (*e.g.* diffusion importante en fonction de la texture du sol). L'importance relative des effets de bords varie également en fonction des plantes considérées. C'est à la fois i) la nature du développement des systèmes racinaires dans l'espace (*e.g.* système racinaire pivotant ou fasciculaire) et dans le temps (*e.g.* plante pérenne ou annuelle) et ii) la hauteur du couvert végétal (*e.g.* réduction de la différence de hauteur avec une structure d'exclusion ou d'irrigation par aspersion) qui influencent l'importance spatiale des effets de bord. Outre l'augmentation de la taille des dispositifs (pour réduire le rapport entre surface concernée par les effets de bord et surface totale du dispositif), plusieurs solutions techniques peuvent être envisagées pour les limiter. Dans le cadre d'une manipulation par irrigation, la prise en compte des effets de bords consiste à s'assurer que l'irrigation concerne bien toute la surface de la modalité en question et qu'il n'y a pas de risque d'interférence avec les modalités non irriguées en cas de proximité. Dans le cadre

d'une manipulation par exclusion de pluie, l'eau interceptée doit être évacuée suffisamment loin de la zone de manipulation, à l'aide de structure d'évacuation (*e.g.* gouttières ou tuyaux) en profitant de la microtopographie locale (*e.g.* légère pente), ou en installant des collecteurs qui stockent l'eau et/ou autorisent une infiltration préférentielle et localisée en dehors de la zone d'étude. Les écoulements de surface peuvent être limités en installant une barrière physique en surface créée à l'aide de matériaux externes (*e.g.* planche) (Alba et al., 2017) ou en construisant une tranchée et/ou une diguette. Enfin, les entrées latérales d'eau de pluie peuvent être limitées en installant des structures latérales, tels que des filets fins ou des bâches. La dimension des dispositifs reste un critère important, puisque face à des évènements pluvieux intenses, des écoulements de surface non maîtrisés peuvent compromettre les mesures expérimentales malgré des mesures de protection supplémentaires (Kundel et al., 2021). La gravité de ces débordements dépendra en partie de la taille des dispositifs : si le dispositif est grand, il peut être jugé acceptable de conserver certaines placettes si cet aléa est exceptionnel et bien caractérisé.

Enfin, dans le cas des exclusions de pluie, la lourdeur des dispositifs invite à identifier les risques expérimentaux possibles en amont. Des conditions climatiques extrêmes peuvent endommager les éléments de structure. Le vent est un problème majeur, en particulier pour les dispositifs d'exclusion totale au-dessus du couvert (type "Ta"). Cela nécessite de prendre en compte la prise au vent des structures d'interception selon leur profil, leur hauteur et leur ancrage dans le sol (Foale et al., 1986). Les épisodes de pluie très intense ou de grêle peuvent menacer des dispositifs avec des structures légères, à base de bâche, car elles peuvent se déformer (*i.e.* formation de poches d'eau avec fuites) ou fortement se détériorer (voir en annexe - Figure C.7). Pour les dispositifs à base de bâches repliables, il est nécessaire qu'elle puisse être mise suffisamment sous tension à l'aide d'une structures rigide (*e.g.* Erbs et al. 2012). Pour des raisons de coût ou de disponibilité locale des matériaux, les structures en bois peuvent être intéressantes. Des dégâts liés à la présence d'insectes xylophages (*e.g.* termites) représentent un risque, notamment en région tropicale (Kerr, 2012). Enfin, des contrastes de sénescence peuvent émerger entre les modalités expérimentales, accentuant le risque de prédation (*e.g.* oiseaux) et/ou de perte prématurée des grains (*e.g.* Blanchet et al., in prep)[3] s'ils ne sont pas correctement anticipés.

En fonction des objectifs de recherche envisagés, le risque de défaillance doit être appréhendé en fonction de la durée d'expérimentation planifiée. Dans le cadre d'expérimentation de "courte" durée (*e.g.* 1 à 3 ans), les risques de défaillance peuvent être limités en i) distribuant le risque d'aléas au sein de plusieurs répétitions ou ii) en sécurisant l'obtention d'un contraste de disponibilité en eau quel que soit le contexte climatique de l'année (*i.e.* en manipulation à la fois par exclusion et par irrigation). Malgré tout, ces choix nécessitent d'être soupesés au regard des moyens logistiques et financiers à disposition. Immanquablement, la mise en place d'expérimentation de manipulation du régime de pluie génère des dilemmes, dont un certain nombre est identifié par Beier et al. (2012).

[3] Chapitre 3 de ce manuscrit de thèse.

3 Partie II - Manipuler le régime des pluies au sein des systèmes agroforestiers

Les dispositifs de manipulation du régime de pluie constituent une opportunité pour améliorer la compréhension des processus qui gouvernent la productivité des systèmes agroforestiers dans un contexte de changement climatique. La mise en place de tels dispositifs expérimentaux nécessite de considérer un certain nombre de spécificités propres au fonctionnement complexe des systèmes agroforestiers. Ces spécificités restreignent le domaine de validité des résultats obtenus et peuvent compliquer la mise en œuvre des dispositifs expérimentaux. Ces éléments sont discutés à partir des études identifiées au sein de la littérature actuelle Tableau I.2.

3.1 Spécificités des systèmes agroforestiers et conséquences sur la mise en place d'expérimentation de manipulation du régime des pluies

Etant donné les connaissances limitées quant au fonctionnement des systèmes agroforestiers, les expérimentations de manipulation du régime des pluies sont pertinentes pour étudier la contribution de processus spécifiques sur la productivité des cultures en contexte agroforestier. Cela nécessite d'appréhender le développement des cultures dans un contexte de stress multiples et au sein d'un environnement particulièrement fluctuant, dont les effets sur le développement des plants restent relativement méconnus (Valladares et al., 2016). Nasielski et al. (2015) montrent que la fixation symbiotique de l'azote chez le soja reste plus importante en conditions agroforestières qu'en plein soleil malgré une réduction de 80% des précipitations et suggèrent que cela contribue à limiter les pertes de rendement. Blanchet et al. (2021) montrent également qu'en cas de sécheresse précoce, l'élaboration du rendement d'une culture de pois d'hiver change et limite les pertes de rendement le long d'un gradient d'ombrage. Dans le cas d'une sécheresse intense, le maintien de la complémentarité spatiale des prélèvements en eau par les arbres et les cultures pourrait aussi contribuer à limiter les effets de compétition (Gao et al., 2018). Mais cet effet reste peu étudié et est dépendant des ressources en eau disponibles et accessibles dans le sol (Smith et al., 1997). Au sein d'un système agroforestier cacaoyer, Schwendenmann et al. (2010) montrent que la complémentarité spatiale des prélèvements entre des cacaoyers et des arbres (Gliricidia sp.) n'est pas modifiée après une réduction des pluies de 80% sur 13 mois, ce qui n'accentue pas les effets de compétition entre les deux espèces associées et contribue ainsi à limiter l'impact de la sécheresse sur le rendement des cacaoyers. Certaines périodes spécifiques de la rotation agroforestière peuvent être sensibles aux conditions de pluviométrie, notamment lors de la phase d'installation du système. Kerr (2012) a comparé le taux de croissance et le taux de survie de jeunes plants de Gliricidia Sepium et de Tephrosia Candida en présence ou non d'une culture de maïs lors de la phase d'implantation du système afin d'étudier si les aspects de compétition sont exacerbés en conditions de sécheresse ou si les effets de facilitation prévalent. Ces premières études sont informatives quant

à la réponse de processus spécifiques, mais elles ne concernent pas toujours le système dans sa globalité.

L'analyse de la productivité globale d'un système agroforestier par manipulation du régime des pluies est complexe, car cela nécessite de mobiliser plusieurs témoins. L'avantage productif des systèmes de cultures associées est évalué en mesurant la surface équivalente assolée (land equivalent ratio - LER), qui nécessite une comparaison avec des témoins en culture pure (Mead and Willey, 1980). Pour étudier la productivité du système en fonction du régime des pluies, il est nécessaire de manipuler de la même façon la ressource en eau au sein de chaque modalité culturale, ce qui augmente très rapidement le nombre de dispositifs expérimentaux à mettre en place (*e.g.* voir Renwick et al. 2020). Il est donc nécessaire de réaliser la même manipulation du régime des pluies au sein de trois systèmes différents, à savoir un système agroforestier, un système forestier et un système agricole. Jusqu'ici, seuls Temani et al. (2021) sont parvenus à proposer un tel dispositif, en irriguant. Étant donné la complexité logistique que cela représente, la majorité des expérimentations réalisées jusqu'ici ont étudié la réponse d'une sous-partie du système agroforestier, en analysant seulement la productivité partielle (*e.g.* le rendement d'une culture annuelle). Cette approche simplifie la mise en place expérimentale, puisqu'il est alors nécessaire d'équiper seulement deux systèmes de cultures (agroforestier et un témoin en culture pure).

Tableau I.2 Comparaison des études de manipulation du régime des pluies au sein de systèmes agroforestiers. Certains dispositifs peuvent être visualisés en annexe (Figure C.1)

Système AF[1] (densité d'arbres)	**Leviers de gestion testés**	**Témoin monoculture**	**Nature de la manipulation**	**Type de dispositif**	**Surface/unité [m^2] (Nb. unité)**	**Niveau d'évaluation**	**Etude**
Mélange de feuillus - **soja** (50 arbres/ha)	Cernage racinaire (AF)	Oui	Exclusion	Partielle (type Pbf, 50%)	3.6 (48)	Processus Productivité partielle	Gagné et al. (2019)
Mélange de feuillus - **soja** (*ca.* 170 arbres/ha)	-	Oui	Exclusion	Partielle (type Paf, 80%)	2.75 (8)	Processus	Nasielski et al. (2015)
Gliricidia - **Maïs/Pois d'angole** (625 arbres/ha)	1) Association culturale 2) Fertilisation	Oui	Exclusion	Partielle (type Paf, 50%)	9 (30)	Productivité partielle	Renwick et al. (2020)
Gliricidia/Cocotier - **Cacaoyer** (*ca.* 350 arbres/ha)	-	Oui	Exclusion	Partielle (type Pbf, 80%)	1400 (3)	Processus Productivité partielle	Schwendenmann et al. (2010)
Gliricidia - **Maïs** (7400 arbres/ha)	Fertilisation	Non	Exclusion	Totale (type Taf)	30 (18)	Processus Productivité partielle	Kerr (2012)
Gliricidia/Tephrosia - Maïs (7400/14800 arbres/ha)	Date de semis	Oui	Exclusion	Totale (type Taf)	55 (18)	Processus	
Noyer - **Pois d'hiver** (95 arbres/ha)	-	Oui	Exclusion	Totale (type Tamr)	4 x 15 (4) - AF 15 (4) - TA	Processus	Blanchet et al. (2021)
Noyer - **Grandes cultures** (95 arbres/ha)	-	Oui	Exclusion	Totale (type Tamp)	900 (1) - AF 81 (1) - TA	Processus Productivité partielle	Domaine de Restinclières[2]
Olivier - **grandes cultures** (200 arbres/ha)	-	Oui	Irrigation	Goutte à goutte (3 niveaux)	490 (18) - AF 245 (12) - TA	Productivité globale	Temani et al. (2021)

[1] La police de texte en gras indiquent la ou les plantes ciblées par la manipulation du régime de pluie
[2] Dispositif présenté dans cette étude

L'hétérogénéité spatiale des systèmes agroforestiers complique également les expérimentations de manipulation du régime de pluies. Parmi les systèmes de cultures associées, les systèmes agroforestiers sont considérés comme les systèmes de culture les plus diversifiés et hétérogènes à l'échelle de la parcelle (Duru et al., 2015; Malézieux et al., 2009). Cette hétérogénéité apporte une difficulté supplémentaire aux expérimentations de manipulation du régime de pluie, dans lesquelles on ne peut plus se contenter de placettes de suivi comme pour l'étude des couverts homogènes. Il devient nécessaire d'appliquer les modalités expérimentales (irrigation ou exclusion) soit sur une surface suffisamment grande pour couvrir cette hétérogénéité, soit de disposer plusieurs dispositifs aux dimensions proches des placettes de suivi afin que l'ensemble soit représentatif de la diversité des conditions au sein d'un système agroforestier. Dans les deux cas, il est nécessaire d'appréhender cette hétérogénéité et en particulier de définir ce que Rafflegeau et al. (in prep) ont nommé le motif fonctionnel de services écosystémiques (ESFM - *Ecosystem Services Functional Motif*). L'ESFM se définit comme la plus petite unité spatiale représentative nécessaire pour comprendre les processus impliqués dans la fourniture d'un ensemble de services écosystémiques. Dans le cadre de la mise en place d'un design expérimental, cette approche est intéressante car elle permet i) de préciser un cadre de recherche structuré autour de la notion des services écosystémiques et ii) de questionner la spatialité des processus impliqués et du domaine de validité des résultats obtenus. En fonction des questions de recherche, les placettes sur lesquelles on applique la manipulation du régime de pluie nécessitent ou pas de couvrir l'ensemble de la zone influencée par la présence des arbres. Ainsi, il est possible de proposer un design expérimental couvrant partiellement le motif agroforestier si l'on s'intéresse uniquement au lien entre la productivité des cultures et certains processus spécifiques (*e.g.* réponse de la fixation symbiotique chez le soja par Nasielski et al. 2015), tandis qu'il est nécessaire de proposer un design permettant d'être représentatif de l'ensemble du système pour étudier la réponse de la productivité partielle ou globale du système (*e.g.* Temani et al. 2021). Lorsque l'objectif est d'étudier la réponse à la sécheresse non seulement des cultures mais aussi de l'arbre, l'enjeu autour de la symétrie et de la couverture du motif agroforestier est encore plus important. En effet, si un dispositif ne respecte pas ces deux critères, un artefact de type "*split-root*" semble inévitable. On qualifie un artefact de "*split-root*", lorsqu'un fort contraste de disponibilité de ressource existe à l'échelle du système racinaire de la plante et modifie ainsi la dynamique de prélèvement, à l'image de certaines expérimentations en pot (*e.g.* Simonneau and Habib 1994) ou de certaines méthodes d'irrigation (Sadras and Denison, 2009). Pour éviter cet artefact, il faut que le dispositif couvre l'ensemble de la surface explorée par au moins un arbre. L'expansion spatiale des systèmes racinaires des arbres étant souvent inconnue, il est nécessaire de formuler des hypothèses à ce propos. Des dispositifs moins couvrants peuvent être proposés, mais le domaine de validité des résultats obtenus est alors plus restreint.

Les systèmes agroforestiers présentent également la particularité d'associer des plantes avec des cycles de développement très contrastés (*e.g.* pérennes et annuelles), ce qui diversifie l'échelle temporelle des processus impliqués mais complexifie également l'analyse de la réponse de la productivité du système à un changement de régime de pluie. La réponse des plantes annuelles face à un aléa de sécheresse a fait l'objet de nombreuses études agronomiques et un certain nombre

de cadres d'analyse ont été proposés afin d'appréhender quels sont les processus écophysiologiques impliqués (*e.g.* le cadre d'analyse proposé par Wery (2005) pour étudier la réponse des légumineuses). En revanche, la réponse des plantes pérennes à des conditions de sécheresse est caractérisée par des effets mémoires qui se traduisent par des réductions de la croissance ou de la fructification durant plusieurs années après l'épisode de sécheresse (Huang et al., 2018). Dans les cas les plus extrêmes, le fonctionnement physiologique des plantes peut être affecté de façon irréversible et la sensibilité à d'autres épisodes de sécheresse peut être accrue (Hacke et al., 2001). Pour certains arbres fruitiers, tel que l'olivier, des phénomènes d'alternance dans la production fruitière nécessitent l'évaluation du rendement sur deux années. Si la manipulation du régime des pluies vise à étudier l'impact de la productivité globale du système, il est alors nécessaire de réaliser l'expérimentation sur deux années à minima (Temani et al., 2021).

La diversité des designs agroforestiers et de leurs leviers de gestion complexifie l'analyse du rôle de ces leviers de gestion pour s'adapter à des conditions de sécheresse. Un certain nombre de leviers de gestion peuvent être mobilisés lors de l'implantation de la parcelle (*e.g.* densité de plantation, choix des essences et des variétés d'arbres) ou au cours de la rotation agroforestière, à la fois au niveau de la culture (*e.g.* choix variétal, date de semis) et de l'arbre (*e.g.* taille de la canopée, cernage racinaire). Le nombre restreint d'études expérimentales de manipulation du régime de pluie est loin d'être suffisant pour explorer toute la combinatoire de ces leviers et le recul sur l'interaction de ces leviers avec la sécheresse reste donc encore limité. Pour ce problème, les expérimentations de terrain doivent être envisagées de pair avec la modélisation, qui pourrait permettre de tester un plus grand nombre de combinaisons de leviers possibles.

Certaines spécificités des systèmes agroforestiers ne le sont que par rapport aux systèmes plus simples (agriculture seule ou forêt seule). Par rapport aux expérimentations de manipulation du régime des pluies en prairie ou en cultures annuelles, la grande différence est bien entendu la présence d'arbres. Cela pose plusieurs problèmes lors de la mise en place de manipulations du régime de pluies en système agroforestier, notamment vis à vis de la profondeur que peuvent atteindre les systèmes racinaires des arbres et la hauteur des arbres. Ainsi, la présence d'une nappe phréatique réduit la capacité d'une étude à s'inscrire dans une démarche d'analyse des effets du changement climatique par expérimentation au champ. En effet, quelle que soit la manipulation du régime des pluies, les apports ou exclusion d'eau n'auront aucune influence sur la hauteur de la nappe phréatique, qui dépend elle d'un système hydrologique établi à l'échelle du bassin versant. La hauteur des arbres pose des problèmes logistiques (hauteur des structures en lien avec leur prise au vent) et/ou économiques (coût de grandes structures). Par rapport aux systèmes forestiers, les systèmes agroforestiers se caractérisent (i) par l'espacement entre les arbres qui est généralement plus important qu'en forêt, ce qui nécessite des dispositifs de plus grande emprise au sol et (ii) la nécessité de permettre le passage d'engins agricoles pour la réalisation des itinéraires techniques des cultures, ce qui nécessite d'avoir des dispositifs soit de grande hauteur (pour que les engins puissent passer dessous), soit aisément amovibles. Enfin, la mise en place de dispositifs d'exclusion de pluie au sein de différents systèmes de culture nécessite de considérer des différences possibles vis-à-vis des artefacts expérimentaux au sein des modalités de cultures ombragées et en plein



Figure I.1 Dispositifs d'exclusion de pluie de grande envergure déployés juste avant un épisode de pluie.

soleil, en particulier si des dispositifs d'exclusion de pluie avec des structures d'interception fixes (type "P.." "Tbf", et "Taf" , Tableau I.1) sont présents. Ces aspects sont plus amplement illustrés à l'aide d'une étude de cas quant à la mise en place de dispositifs d'exclusion de pluie au sein du Domaine de Restinclières.

3.2 Etude de cas - Dispositifs d'exclusion à Restinclières

Afin d'étudier les effets d'une sécheresse sur la productivité de la culture intercalaire dans un système agroforestier âgé, nous avons conçu et déployé des dispositifs d'exclusion de pluie sur une des parcelles du domaine de Restinclières. Le choix s'est orienté vers des dispositifs mobiles d'exclusion totale des pluies afin de limiter autant que possible les artefacts lumineux et microclimatiques liés à la présence des structures d'interception. Deux types de dispositifs ont été conçus et comparés en termes d'objectifs scientifiques atteignables, de fiabilité, de robustesse et d'artefacts, ainsi que de facilité de mise en œuvre opérationnelle : des dispositifs de grande envergure et des dispositifs de moyenne envergure.

3.2.1 Description des deux types de dispositifs

Les dispositifs d'exclusion de pluie de grande envergure (Figure I.1) ont été mis au point entre 2016 et 2018 au sein du domaine de Restinclières (Hérault, France), et utilisés pendant deux saisons culturales (2017-2018, 2018-2019). Le design des dispositifs proposés a intégré dès le départ la notion de motif agroforestier. Cela explique les différences d'envergure spatiale qui existent entre les dispositifs au sein de chaque modalité culturale (*ca.* 800 m^2 en AF et 90 m^2 en TA). Le dispositif couvre une surface d'environ 800 m^2, répartie sur deux allées culturales adjacentes, de 13 m de large chacune, sur près de 35 m de long. Le dispositif proposé s'apparente à un dispositif de type "Tamr" selon la typologie proposée, mais constitue un système hybride au final, puisque les structures d'interception sont placées au-dessus de la culture intercalaire, mais sous la canopée



Figure I.2 Dispositifs d'exclusion de pluie d'envergure moyenne, en place juste avant un épisode pluvieux.

des arbres. Chaque dispositif d'exclusion de pluie est constitué d'une structure câblée, qui sert de support au déploiement de bâches mobiles lors d'évènements pluvieux. Lorsque les bâches sont déployées, l'eau de pluie interceptée ruisselle vers des gouttières qui acheminent l'eau de pluie dans des bidons, eux même reliés à des tuyaux qui permettent l'évacuation par gravité de l'eau interceptée en dehors de la zone d'expérimentation. Parmi les éléments fixes, on distingue des éléments qui servent i) au déploiement de la bâche, ii) à sa mise sous tension une fois déployée et enfin iii) au maintien d'une pente régulière et suffisante au niveau des éléments collecteurs. Le déploiement de la bâche est réalisé à l'aide de cordages qui permettent de hisser les bâches au-dessus des allées "exclues". Le design du dispositif a été pensé pour procéder au déploiement de la bâche en travaillant intégralement depuis la ligne d'arbre, sans marcher sur l'allée cultivée. Une fois en place, la bâche est mise sous tension à l'aide de tendeurs installés manuellement pour garantir son maintien en cas de vent et pour minimiser la formation de poches d'eau. Des étais amovibles (cannes de bambou surmontées de balles de tennis) judicieusement placés en cours d'exclusion là où la bâche tend à former des poches permettent de limiter leur formation. Des supports en bois sont présents tout le long de la ligne d'arbre, afin i) de garantir une pente suffisante et régulière des gouttières évacuant l'eau collectée par les bâches et ii) de pouvoir replier et stocker la bâche en dehors des périodes d'exclusion de pluie. En témoin agricole (TA), le concept technique est globalement similaire, mais le design a été adapté en installant des poteaux en bois afin de pallier à l'absence d'arbre. Des plans détaillés sont disponibles en annexe (Figure C.3 à Figure C.6).

Les dispositifs d'exclusion de pluie de moyenne envergure (Figure I.2) ont été prototypés au cours de la saison 2017-2018, puis déployés la saison suivante. Comme pour le dispositif de grande envergure, les structures d'interception sont placées au-dessus de la culture intercalaire, mais sous la canopée des arbres. Le design expérimental proposé intègre la notion de motif fonctionnel bien que la surface des dispositifs soit restreinte, puisque la taille des zones exclues diffère en TA (15 m^2) et en AF (60 m^2), et que les dispositifs sont placés en AF de façon à exploiter l'hétérogénéité spatiale inhérente aux systèmes agroforestiers, en se plaçant au Nord et au Sud des arbres (cf ci-dessous). Ces dispositifs d'exclusion de pluie sont constitués d'une structure rigide de 1,8 m de hauteur constituée de tubes de serre maraîchère formant un cercle de 4,5 m de diamètre et montée

sur des montants verticaux, également en tube, qui viennent se ficher sur un deuxième cercle en tubes fixé au sol par des sardines. Le cercle supérieur supporte une bâche tendue sur les tubes et une gouttière placée sur le diamètre du cercle est fixée sur la bâche et permet de créer une double pente dans la bâche. La gouttière aboutit à un bidon qui stocke de façon transitoire l'eau pour faire face à d'éventuelles intensités de pluie conduisant à un débit de sortie trop important pour les tuyaux d'évacuation. Des plans détaillés sont disponibles en annexe (voir en annexe - Figure C.8 et Figure C.9). En AF, quatre dispositifs de 15 m^2 chacun sont placés autour de chaque arbre, à 3,5 m de la ligne d'arbre. Cette disposition vise à minimiser l'effet split-root suite aux exclusions, même si la surface ainsi couverte (environ 60 m^2) ne couvre probablement pas l'ensemble du système racinaire des arbres âgés de 25 ans. En TA, chaque bloc expérimental comporte un seul dispositif d'exclusion, dont la surface (15 m^2) a été jugée suffisante pour affecter uniformément tout le système racinaire des cultures situées au centre des dispositifs.

3.2.2 Objectifs scientifiques des deux types de dispositifs

L'objectif scientifique des dispositifs de grande envergure est de pouvoir étudier la réponse du système agroforestier dans son ensemble (arbres+cultures) à un épisode de sécheresse. Les dimensions du dispositif lui permettent d'exclure la pluie autour de 3 arbres situés au centre des deux allées couvertes, garantissant des exclusions de pluie à l'échelle de l'ensemble de leur système racinaire. Les dimensions spatiales du dispositif d'exclusion en AF visent à assurer une interaction "réaliste" entre les arbres et la culture, minimisant alors le risque d'artefact "split-root". Initialement, le projet avait l'ambition de répliquer les dispositifs d'exclusion au sein de la parcelle, avec 3 dispositifs d'exclusion au sein de chaque modalité culturale (AF et TA) (voir en annexe - Figure C.2). Cependant, les contraintes techniques et logistiques se sont avérées plus importantes que prévues. Au final, un seul dispositif d'exclusion a été construit au sein de chaque modalité culturale, limitant ainsi les possibilités de réplication et de prise en compte de l'hétérogénéité du sol.

La notion de compromis entre les objectifs scientifiques et les aspects de gestion techniques et logistiques a été intégrée dès l'étape de conception des dispositifs de moyenne ampleur. La surface limitée individuelle de chaque dispositif d'exclusion (*ca.* 15 m^2) ne permet pas de couvrir le système racinaire de l'arbre même avec 4 dispositifs placés autour de chaque arbre, les objectifs de recherche ont donc été réduits. En effet, le fait que l'ensemble du système racinaire de l'arbre n'est pas couvert conduit à un artefact de type "*split-root*", ce qui constitue une limite expérimentale qui ne permet pas d'étudier la réponse de l'arbre en interaction avec la culture. Les objectifs de recherche se sont donc focalisés uniquement sur la réponse écophysiologique de la culture intercalaire à un épisode de sécheresse selon un gradient d'ombrage (Blanchet et al., 2021). L'accent a en revanche été mis sur la réplication des dispositifs afin de mieux prendre en compte les aspects liés à l'hétérogénéité du sol et des conditions agroforestières. Les pièces étant génériques (*i.e.* tubes de serres maraichères), la réplication des dispositifs d'exclusion fut aisée, ce qui a permis de répondre aux besoins de réplication des dispositifs au sein du design expérimental proposé. Par ailleurs, les dimensions raisonnables des dispositifs ont permis de mettre en place un design ex-

périmental pairé : les modalités exclues/non exclues forment des paires au sein de chaque bloc en constitués pour être homogènes entre les deux modalités de la paire mais explorant un gradient de conditions de sol et de micro-climat à l'échelle de la parcelle. En effet, afin de prendre en compte l'hétérogénéité des conditions agroforestières, une caractérisation a été réalisée ex-ante à l'aide de photographies hémisphériques pour garantir des conditions de sol et de lumière homogènes entre les deux régimes de pluie testés (distance entre modalités d'une paire < 8m, modalités d'une paire placées autour d'arbres ayant approximativement le même diamètre et la même phénologie). Un gradient d'ombrage a été mis à profit pour étudier la réponse des cultures en tirant parti de i) l'orientation des placettes de suivi par rapport à l'arbre (Nord/Sud) et ii) des volumes de houppiers différents et de la phénologie décalée entre les arbres des différents blocs définis.

3.2.3 Efficacité, robustesse, effets de bord, artefacts des deux types de dispositifs

Lors d'événements pluvieux de faible ou moyenne intensité, les dispositifs de grande envergure ont efficacement intercepté et évacué la pluie, sauf sur une bande d'une cinquantaine de centimètres au centre de l'allée, la souplesse de la bâche rendant impossible de rapprocher suffisamment les deux pans de bâche au faîte du dispositif. Le dimensionnement des bidons de collecte s'est révélé suffisant pour recueillir toute l'eau interceptée et permettre son évacuation hors de la zone même lors de pluies de forte intensité.

Cependant, les dispositifs de grande envergure n'ont pas su résister à des événements pluvieux de forte intensité (>50 mm/h), courants dans la région, du fait de leur conception technique. La souplesse globale de la structure en AF, initialement envisagée pour faire face aux rafales de vents, s'est avérée au final être un défaut de conception majeur. La souplesse de la structure a soumis la bâche, les cordages et les gouttières à des contraintes mécaniques importantes qui ont engendré un endommagement des dispositifs pendant les périodes d'interception. De plus, la souplesse de la structure a limité la mise en tension des bâches, ce qui a généré des poches d'eau (>100L) et des fuites importantes pendant les périodes d'interception, ce qui a généré des conditions d'exclusion hétérogènes spatialement. Lors d'évènements météorologiques extrêmes (*e.g.* pluie intense, grêle), mal prévus par les services météorologiques, ces poches d'eau/de grêle ont pris des proportions telles que les dispositifs se sont affaissés sur les cultures. Cela a eu deux conséquences majeures : i) un écrasement des cultures à certains endroits, exacerbé par le piétinement engendré par ii) la nécessité d'intervenir sur place pour siphonner les poches et réparer l'ensemble du dispositif. La prise en compte de ces aléas techniques sur le développement de la culture n'a pu être faite de façon quantitative et a fortement limité la fiabilité des résultats obtenus. La hauteur importante des dispositifs a augmenté la taille des effets de bords, puisque les larges ouvertures latérales exposent les cultures à des cumuls de pluie incidente en conditions ventées (voir annexes - (Figure C.7 et Figure C.10).

Les dispositifs de moyenne envergure ont prouvé leur efficacité pour intercepter toutes les intensités de pluies, y compris les plus intenses contrairement aux dispositifs de grande envergure. Les dispositifs de moyenne envergure étaient également suffisamment rigides pour faire face à de

Tableau I.3 Comparaison des deux dispositifs d'exclusion de pluie proposés sur la base de critères techniques

Critère technique	Dispositifs de grand envergure	Dispositifs d'envergure modeste
Possibilité de réplication du dispositif	Difficile	Oui
Artefacts sur la culture		
- lumineux	Négligeable	Négligeable
- microclimatique (Tair, RH)	Négligeable	Négligeable
Artefacts sur l'arbre		
- croissance de l'arbre	Possible (câble sur tronc)	Absent
Artefacts au niveau de l'association		
-split-root"	Minimisé	Important
Ampleur des effets de bord (relativement à la taille du dispositif)	AF : limité TA : conséquent	Limité
Sensibilité de la structure aux conditions climatiques		
- vent (vitesse limite : moyenne/rafale)	30 km/h (60 km/h)	30 km/h (60 km/h)
- pluie intense	50 mm/h	Limite non atteinte
- évènements extrêmes (*e.g.* grêle)	Inadapté	Adapté
Risque expérimental	Centralisé sur des dispositifs non répliqués	Distribué entre les dispositifs répliqués

fortes intensités de pluie sans dommage majeur à la structure ni à la bâche ; seul un événement de grêle a causé quelques dégâts. Lors de cet épisode de grêle violent, l'accumulation de grêlons sur la toile a provoqué des fuites d'eau relativement importantes au sein d'un des dispositifs. La placette de mesure a par conséquent été exclue des analyses, mais toutes les autres placettes ont pu être suivies sans aucun doute sur l'efficacité de l'interception. La structure tubulaire des dispositifs leur conférant une grande solidité et du fait de leur hauteur limitée, ces dispositifs se sont révélés stables en conditions ventées. Pour pallier les dimensions réduites du dispositif, des filets latéraux ont été installés autour de chaque dispositif afin de limiter les entrées d'eau latérales en conditions ventées. Cela a fortement limité les effets de bords, ce qui a pu être vérifié grâce à la mise en place de pluviomètres (voir annexe - Figure C.10). Afin de limiter les entrées d'eau par ruissellement de surface ou de sub-surface, deux options ont été testées : i) des bordures de plastique ont été placées tout autour de chaque dispositif et enfoncées de 10 cm dans le sol (saison 2017-2018) et ii) une tranchée de 10 cm de profondeur autour des placettes de suivi (saison 2018-2019). Les deux options ont été jugées équivalentes étant donné la bonne capacité d'infiltration du sol de la parcelle.

Pour les deux dispositifs, la mise en place s'est limitée aux périodes pluvieuses, qui étaient accompagnées d'une couverture nuageuse importante, ce qui a limité (i) la réduction de la photosynthèse sous la bâche (translucide) et (ii) l'augmentation de la température sous les dispositifs.

3.2.4 Aspects logistiques et opérationnels

L'intégration des itinéraires techniques sous les grands dispositifs s'est révélée plus difficile que prévue. En AF, la présence de cordages et de tendeurs (pour hisser la bâche d'interception et la maintenir une fois installée) entravent le passage de la machine agricole classique, bien que les câbles qui constituent la structure principale du dispositif en AF soient installés en hauteur (entre 4 à 6 m de hauteur). Par ailleurs, le dispositif en TA n'est pas adapté pour le passage des machines agricoles du fait de la présence de poteaux en bois fixes insuffisamment espacés. Pour faciliter le passage des machines, des manipulations supplémentaires sont nécessaires, puisqu'il est nécessaire de pousser les cordages et/ou de démonter partiellement le dispositif, mobilisant un nombre conséquent de personnes et augmentant le piétinement des cultures. Enfin, l'équipe de recherche ne disposait pas des outils pour réaliser elle-même les itinéraires techniques de façon similaire au sein des dispositifs à l'aide de machines plus petites (par exemple semoir de précision). L'agencement global des éléments fixes de ce dispositif (poteaux, gouttières latérales, bâche repliée) a également contribué à accentuer l'hétérogénéité dans la réalisation de tous les itinéraires techniques (travail du sol, fertilisation, épandage de produits phytosanitaires) entre les deux régimes de pluie expérimentés.

Enfin, la gestion de ces dispositifs de grande envergure a mis en lumière la nécessité de concevoir des dispositifs d'exclusion de pluie en fonction des capacités organisationnelles et logistiques de l'équipe de recherche. En dehors des aléas techniques, la réalisation des exclusions dépend très fortement de la capacité de l'équipe à se mobiliser collectivement, sur une période d'intervention potentielle de 3 mois (de début Mars à fin Mai), avec une nécessité de disponibilité opérationnelle tous les jours (week-end compris), par toute heure du jour et de la nuit, du fait i) d'une impossibilité d'automatiser ce type de dispositif et ii) d'un défaut d'autonomie globale du dispositif lors d'épisode pluvieux intenses (nécessité de présence permanente pour réajuster les étais et vider les poches d'eau avant qu'elles ne deviennent trop grandes). Ainsi, la mise en place des dispositifs nécessitait deux heures 30 à quatre personnes pour déployer le dispositif, et une permanence d'une ou deux personnes pendant toute la durée de la pluie pour assurer la surveillance du dispositif, et environ deux heures à deux pour replier et ranger le dispositif.

Le caractère amovible et entièrement démontable des dispositifs de moyenne envergure a fortement facilité l'intégration des itinéraires techniques. Les dispositifs ont pu être entièrement installés après les opérations de labour et de semis, et démontés en fin de saison juste avant la récolte. Pendant la saison, les toits d'interception étaient rangés au sein de zones de stockage, en dehors des zones cultivées. Le socle de tubes installées au niveau du sol constituait le seul élément fixe en place pendant la saison culturale. A ras du sol et judicieusement placés par rapport aux passages du tracteur, leur présence n'a pas gêné la réalisation des autres itinéraires techniques au cours de la saison culturale (*e.g.* fertilisation, épandage de produits phytosanitaires).

La gestion de ces dispositifs de moyenne envergure a pu être assurée par deux personnes pendant toute la saison expérimentale. La mise en place nécessitait deux heures (montage des dispositifs et fixation des filets latéraux) à deux personnes du fait du nombre conséquent de dispositifs (20)

et de la distance entre les blocs expérimentaux, et un temps égal pour le démontage. Par contre, une fois les dispositifs installés, ceux-ci se sont avérés globalement autonomes et ont fortement réduit le besoin de surveillance par rapport aux dispositifs de grande envergure. La robustesse des dispositifs a fortement réduit les opérations de maintenance. En cas de maintenance, les réparations ont pu être réalisées à distance de la zone expérimentale, supprimant ainsi le risque de piétinement des placettes expérimentales. La mise en place manuelle de ces dispositifs reste malgré tout une contrainte logistique majeure, qui a maintenu la nécessité d'anticiper les évènements pluvieux à intercepter. Une comparaison des aspects logistiques est proposée en annexe (Tableau C.1 et Tableau C.2).

4 Discussion

La typologie réalisée sur les dispositifs de manipulation du régime de pluie, en combinant la littérature agronomique et forestière, montre que le type de système étudié (cultures herbacées vs. forêts) ainsi que les objectifs scientifiques contraignent fortement le type de dispositif utilisable. Après avoir identifié les spécificités des systèmes agroforestiers qui impactent le choix d'un dispositif de manipulation de pluie et les conditions de réalisation d'une telle expérimentation, nous nous sommes penchés sur le cas concret d'une expérimentation d'exclusion de pluie dans un système noyers/grandes cultures en milieu méditerranéen. La confrontation de la théorie (conception d'un dispositif permettant de répondre à des objectifs scientifiques ambitieux, compatible avec les pratiques agronomiques et limitant les artefacts) et de la pratique du terrain (aspects opérationnels lors de la mise en oeuvre et de la maintenance) a prouvé que des compromis doivent être trouvés, en particulier en contexte de moyens humains et financiers limités). Par ailleurs, pour faciliter la mise au point de dispositifs d'expérimentation adaptés pour une mise en place au sein de différents systèmes de culture, nous rejoignons les propos de Kundel et al. (2021), qui suggèrent de partager les retours d'expériences des dispositifs expérimentaux même si ceux-ci se sont révélés infructueux. Ces retours peuvent faciliter le développement de solutions techniques adaptées aux conditions variées des expérimentations en plein champ.

La diversité des dispositifs, issue de la diversité des systèmes étudiés, des objectifs scientifiques poursuivis et des moyens disponibles, pose la question de la possibilité d'agrégation des résultats des études individuelles pour produire des connaissances génériques. Afin de permettre cette agrégation, via des méta-analyses par exemple, il est crucial d'harmoniser la description de l'environnement et des modalités appliquées. Ainsi, Vicca et al. (2012) soulignent la nécessité d'avoir des informations uniformisées par rapport au statut hydrique dans le sol dans le cadre des expérimentations de manipulation du régime de pluie. Il est également essentiel de décrire le scénario de pluie testé, non seulement en termes de quantité annuelle et de répartition temporelle des pluies, mais aussi de le recontextualiser (approche fréquentielle par rapport au climat de la région, en utilisant des indicateurs climatiques tels que PDSI ou SPEI) et/ou de le replacer dans un scénario de changement climatique. En effet, un débat anime la communauté scientifique sur la caractérisation des propriétés d'une sécheresse (*e.g.* en termes de modification de la demande

et de la disponibilité en eau, en termes d'intensité et d'occurrence spatiale et temporelle, confondus avec la modification d'autres variables climatiques affectées par le changement climatique). Cette nécessité d'harmonisation a conduit les écologues à constituer un réseau, drought-net, visant à coordonner les expérimentations d'exclusion de pluie à travers le monde pour (i) proposer des designs de dispositifs pour la manipulation du régime de pluie et (ii) harmoniser les mesures expérimentales et proposer un ensemble d'indicateurs pertinents.

La recherche sur la résilience des systèmes agroforestiers face au changement climatique aurait tout à gagner à la mise en place d'une initiative de ce genre en agroforesterie. Cependant les spécificités de l'agroforesterie peuvent compliquer cet effort d'harmonisation, non seulement du fait de la diversité des systèmes agroforestiers (diversité des espèces associées, des arrangements spatiaux entre arbres et cultures…) mais aussi de l'hétérogénéité spatiale intrinsèque aux systèmes agroforestiers et aux interactions complexes entre les arbres et les cultures. Par exemple, la simple caractérisation de l'environnement lumineux... n'est pas si simple. En effet la notion d'ombrage en écologie est polysémique, puisqu'elle correspond non seulement à réduction de la lumière incidente, mais implique également des modifications plus globales au niveau des bilans d'énergie locaux, des modifications de la qualité de la lumière impliquant des réponses morphologiques des plantes, ainsi que des interactions de compétition et de facilitation entre l'arbre et les cultures associées (Valladares et al., 2016). Il semble donc nécessaire de stimuler les échanges sur (i) l'harmonisation de la description des conditions environnementales et des modalités testées en agroforesterie, (ii) la conception de dispositifs adaptés aux contraintes supplémentaires que représente l'intégration des itinéraires techniques (iii) l'élaboration d'un cadre d'analyse des résultats expérimentaux de manipulation de la pluie adapté aux spécificités des systèmes agroforestiers.

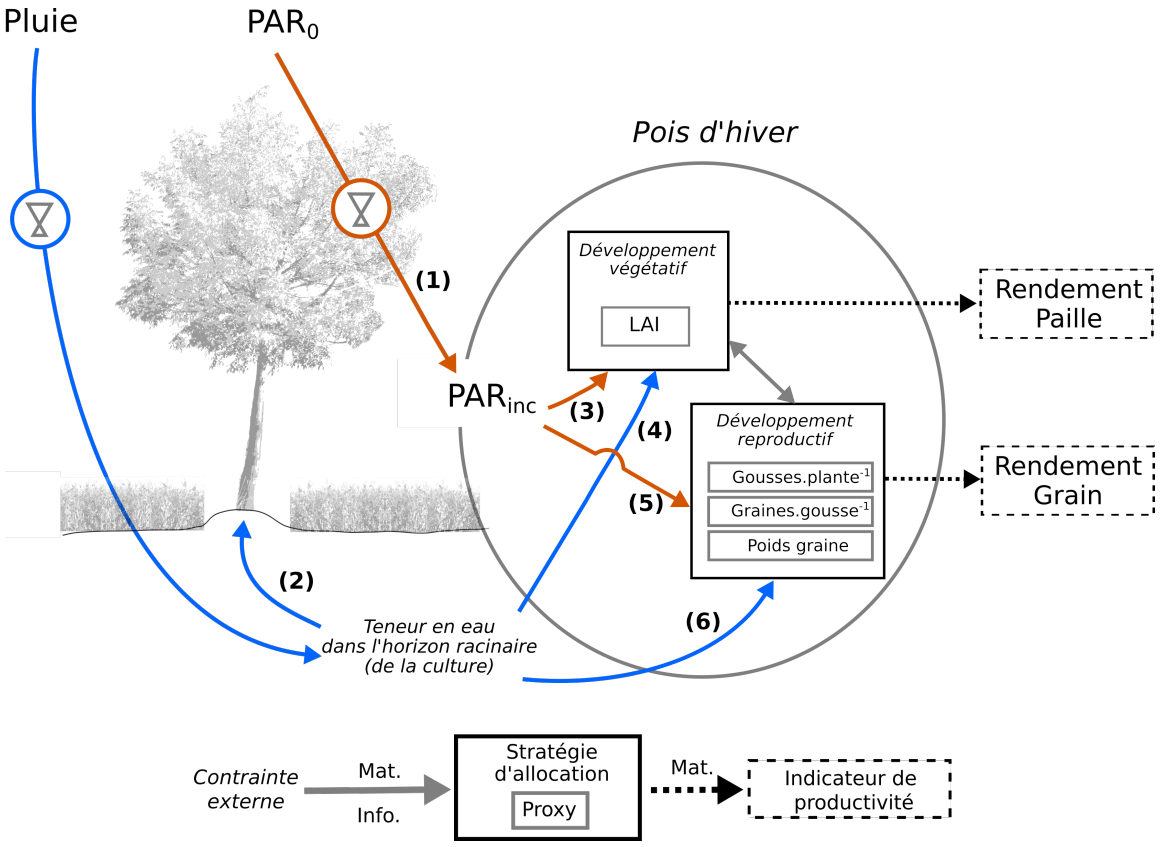
Nous nous sommes attachés dans ce chapitre à discuter l'intérêt et les modalités de réalisation d'expérimentations de manipulation du régime des pluies (par exclusion de la pluie ou par irrigation). Cependant les effets, même en ne considérant que les effets sur le bilan hydrique, du changement climatique ne se limitent pas à la modification de la disponibilité de l'eau : ils modifieront également la demande en eau des plantes, ce qui limite l'applicabilité des résultats portant uniquement sur la disponibilité de l'eau (Grossiord et al., 2020). De plus, la modification de la pluviométrie ne reflète pas l'ensemble des phénomènes hydrologiques. D'une part, la présence d'une nappe régionale (qui serait, à terme, modifiée par la réduction de la pluviométrie) limite les possibilités d'extrapolation de résultats obtenus en modifiant la pluviométrie sur quelques m^2. D'autre part, l'exclusion de la pluie sur quelques m^2 ne permet pas de modifier l'humidité de l'air comme le ferait une exclusion sur plusieurs hectares.

Ces limites semblent insurmontables dans le cadre d'expérimentations en plein champ, on peut d'ailleurs noter qu'aucune des études citées dans l'état de l'art ne soulève ces problèmes. Une solution envisageable serait de passer par la modélisation, qui permettrait par ailleurs de tester un ensemble de situations qu'on ne pourra pas analyser expérimentalement. L'utilisation de modèles permettrait par exemple de tester différents leviers de gestion permettant d'augmenter la résilience des systèmes agroforestiers, en particulier ceux qui semblent a priori bénéfiques, comme le cernage racinaire, mais dont les expérimentations ont montré un impact très limité jusqu'alors

(Inurreta-Aguirre, 2018). La modélisation a par exemple été utilisée pour étudier les interactions entre sécheresse et fertilisation dans des systèmes forestiers à base d'eucalyptus (Christina et al., 2015, 2018). La modélisation permettrait également de tester la résilience dans différentes conditions et face à différents scénarios climatiques, via par exemple la possibilité de tester les interactions entre stress d'occurrence successive, comme la sécheresse et l'ombrage. La modélisation est d'ailleurs au cœur du processus d'analyse des risques encourus avec le changement climatique et l'évaluation des impacts du changement climatique sur les productions agricoles repose essentiellement sur des modèles (Porter et al., 2017).

Malheureusement, les capacités des modèles actuellement existants pour l'agroforesterie restent encore limitées du fait de la complexité des interactions et des processus écophysiologiques à prendre en compte (Luedeling et al., 2016). Entre autres limites, ces modèles ne prennent pas du tout en compte les bioagresseurs, dont la pression est susceptible de changer du fait du changement climatique. Il est donc nécessaire de stimuler les recherches interdisciplinaires pour améliorer nos connaissances sur le fonctionnement des systèmes agroforestiers et pouvoir les modéliser. En attendant, et même ensuite pour valider les modèles, il reste nécessaire de réaliser des expérimentations et d'acquérir des données de terrain pour garantir la validité des résultats et de l'état des connaissances, notamment dans le cadre de pratiques agroécologiques telles que l'agroforesterie.

Chapitre 2: Influence de l'agroforesterie sur l'élaboration du rendement d'une culture de pois en cas de sécheresse printanière



Dans ce chapitre, on teste l'hypothèse que les pertes de rendement en agroforesterie peuvent être réduite en cas de sécheresse printanière, du fait i) d'une bonne complémentarité entre l'arbre et la culture pour l'acquisition des ressources et ii) d'effets de compensation au niveau de la plante.

Dans un premier temps, nous avons analysé l'effet de l'arbre sur les conditions de culture "locale" du pois en quantifiant respectivement les conditions d'ombrage (interception de PAR disponible - flèche 1) et en comparant la disponibilité de l'eau dans les horizons du sol colonisés par la culture (prélèvement de l'eau par l'arbre - flèche 2) en fonction du régime de pluie et des conditions de culture. Dans un second temps, nous avons évalué l'effet de l'ombrage et du régime de pluie sur les performances de la culture de pois, à savoir le rendement en paille et le rendement en grain. Pour mieux comprendre les processus impliqués dans l'élaboration du rendement, nous avons évalué l'effet de l'ombrage et du régime de pluie sur le développement végétatif (flèches 3 et 4) ainsi que sur le développement reproductif (flèches 5 et 6). L'interdépendance entre le développement végétatif et le développement reproductif a également été testée.

Interactions between drought and shade on the productivity of winter pea grown in a 25-year-old walnut-based alley-cropping system

Blanchet G, Barkaoui K, Bradley M, Dupraz C, Gosme M (2021) Interactions between drought and shade on the productivity of winter pea grown in a 25-year-old walnut-based alley cropping system. Journal of Agronomy and Crop Science. doi: 10.1111/jac.12488

Abstract

In the face of climate change, more frequent drought events are expected in the Mediterranean regions. Alley cropping is an agroforestry practice that represents a promising adaptation strategy to sustain yield productivity under drier conditions. However, the presence of trees limits the productivity of the intercrop by reducing light availability and by competing for soil water resources, which could potentially exacerbate the yield losses due to drought conditions. Furthermore, the effects of co-occurring drought and shade stresses on annual crops are still poorly understood. To tackle this issue, we performed a rainfall manipulation experiment on winter pea (*Pisum Sativum L.*) grown in full sun conditions (agricultural control) and under different levels of shade in a 25-year walnut-based alley cropping system located in southern France. We evaluated first the effect of trees on light and water availability and we then studied the effects of early drought (135 mm excluded from April to the end of May) and light conditions on crop performances and yield components. At 3.5 m from the tree line, light availability was reduced on average by 19% at South and 35% at North of trees over the entire crop cycle and mostly after tree budburst. The impact of trees on soil water content in the crop root zone was weak thanks to the good complementarity of the respective root systems. Under normal rainfall conditions, tree shade decreased pea yield from -25% to -77% compared to full-sun conditions. In case of spring drought, pea yield was decreased by -22% in full-sun conditions. The negative effect of tree shade was reduced and decreased pea yield only by -1% to -47%. Under the most intense shade conditions, pea yield was even higher under drought than in normal rainfall conditions. The analysis of crop dynamics and yield components revealed that the vegetative development of pea ceased under drought to the benefit of biomass allocation toward the reproductive organs. Pea yield was less impacted by tree shade under spring drought because yield elaboration relied less on the success of pod set, sensitive to shade, and more on grain filling, improved in case of early drought event. This study supports the hypothesis that agroforestry systems may be more resilient in the case of early drought.

Keywords: agroforestry ; rainfall manipulation ; tree-crop interaction ; yield components ; Mediterranean area ; climate change

1 Introduction

There is a raising concern about agroecosystems sustainability and food security in the context of climate change (Godfray et al., 2010). While the world population is likely to increase until the end of the 21st century (Gerland et al., 2014), crop yields have been stagnating in many regions of the world during the last decades (Brisson et al., 2010; Calderini and Slafer, 1998; Lin and Huybers, 2012). Although climate change is not the unique cause to observed yield stagnation (Ray et al., 2012), there is a large consensus among the scientific community to agree that yield trends and variability are linked to overall climate variability (Moore and Lobell, 2015; Osborne and Wheeler, 2013). Under Mediterranean climates, the more frequent and prolonged drought and heatwave events seriously challenge crop production at the regional level (Ababaei and Chenu, 2020; Cammarano et al., 2019). In response to this challenge, farmers and researchers look for innovative strategies for climate change adaptation (Howden et al., 2007). Diversifying agroecosystems at both national and farm-level may be an adequate solution to sustain and stabilize crop production under increasing climate hazards (Reidsma et al., 2010; Renard and Tilman, 2019).

Agroforestry (AF) is a promising agricultural practice for climate change adaptation and mitigation (Altieri et al., 2015; Verchot et al., 2007; Wolz and DeLucia, 2018). Among the wide diversity of AF designs, alley cropping systems, which combine tree lines and cropped alleys, are gaining attention because they allow conventional mechanized management operations. The introduction of trees inside agricultural fields improves local nutrient budget due to the reduction of nutrient leaching (Wolz et al., 2018), sustains soil organic matter in cropped horizons (Cardinael et al., 2015a, 2017; Pardon et al., 2017), sequesters C on the long term in deep soil horizon (Cardinael et al., 2018) and enhances floral and animal biodiversity (Boinot et al., 2019a,b; Pardon et al., 2019) with potential positive impacts in terms of pest-regulation (Martin-Chave et al., 2019). In addition, alley cropping systems reduce soil evaporation (Jackson and Wallace, 1999; Wallace et al., 1999), atmospheric evaporative demand (Kanzler et al., 2018) and buffer climate extremes (Gosme et al., 2016; Inurreta-Aguirre et al., 2018). In a diachronic study in Spain, Arenas-Corraliza et al. (2018) evidenced a positive influence of alley cropping on barley yield in case of spring heat events, due to an overall reduction of thermal stresses during grain filling.

However, predicting the effects of drought on the functioning of alley cropping systems is particularly challenging because of the complex below- and aboveground interactions between crops and trees (Jose et al., 2004; Ong et al., 2015). From an aboveground perspective, microclimate modification by trees is perceived as an asset for facing drier conditions, but tree shade also becomes a preponderant factor limiting the productivity of the (inter)crop in mature AF systems. From a belowground perspective, the negative effects of competition between trees and crops for soil water resources were revealed by segregating root systems (Jose et al., 2000; Korwar and Radder, 1994; Miller and Pallardy, 2001). But a few studies also revealed positive effects of the spatial complementarity of root systems between trees and crops, especially during dry periods when deep soil water resources are available (Gao et al., 2018; Schwendenmann et al., 2010) and possibly redistributed towards upper horizons (Bayala et al., 2019). According to the stress-gradient hypothesis,

the net balance between competition and facilitation in plant communities shifts towards more facilitative interactions under more stressful conditions (Bertness and Callaway, 1994). Nevertheless, this generic hypothesis has been shown partially false depending on the nature and the intensity of the stresses (Maestre et al., 2009), and under Mediterranean climates, more frequent drought events could also amplify belowground competition under specific circumstances (*e.g.* shallow soil conditions, high tree density), threatening in turn the productivity of the system.

In most cases, drought-shade interaction has a strong impact on crop yield in agroforestry because both drought and shade affect plant biomass allocation differently according to stress timing and intensity. Although annual crops present different tolerance and plasticity to shade (Arenas-Corraliza et al., 2019), little knowledge exists on the effects of its interaction with drought on the productivity of annual cropped species. The analysis of crop yield and its components allows identifying critical periods during crop cycle and eventual compensation effects at the plant level (Fischer, 1985). Improving the knowledge of critical periods could help to better understand yield variation in alley cropping systems. In durum wheat, Inurreta-Aguirre et al. (2018) showed that the number of grains per spike varied according to the position relative to tree lines, mostly because of contrasting shade conditions before anthesis (Savin and Slafer, 1991). Studies with shade application during the crop cycle revealed that development stages around flowering are critical for most of the annual crops because a limited supply of assimilates during this stage reduces the number and/or the weight of grains (Kirkegaard et al., 2018; Lake and Sadras, 2014; Lake et al., 2019; Sandaña et al., 2009). While drought magnitude affects the overall plant biomass, drought timing profoundly affects the biomass allocation between vegetative and reproductive organs whether it occurs early or late during the crop development cycle (Wery, 2005). Rainfall manipulation experiments revealed that the harvest index of field pea and barley was improved under early drought events because of a restricted vegetative development but a sustained (or sometimes improved) reproductive development, while late drought events only impacted the reproductive stages (Day et al., 1978; Martin and Jamieson, 1996).

To assess the interactive effects of shade and drought on crop productivity in a mature alley cropping system, we performed a rainfall manipulation experiment and compared full-sun conditions to different shade levels in AF. As a case study crop, we chose winter pea (*Pisum Sativum L.*), a legume crop with indeterminate growth and particularly sensitive to drought conditions (Munier-Jolain et al., 2010). We expected that well-developed trees would alter crop development and yield elaboration essentially through the reduction of light and water availability. We hypothesized that:

1. large walnut-trees strongly reduce light and soil water availability for winter pea compared to a full sun situation due to tree-crop competition
2. early spring drought impacts more strongly the vegetative development of winter pea than tree shade
3. pea yield is less impacted by agroforestry conditions under drought

2 Materials and methods

2.1 Study site

The experimental site is located in the South of France (Prades-le-Lez, 43°42'15.9" N, 3°51' 4" E, Figure II.1), at the Restinclières Farm Estate, one of the oldest agroforestry research site in Europe. Within the same parcel, two cropping systems are compared: agroforestry (AF) in the southern part and an agricultural control (AC), in the northern part. Although parcel design did not offer a randomized design between AF and AC (which is a known limitation of this experimental site), soil texture was spatially characterized in 2012 (Cardinael, 2015) and revealed overall homogenous conditions between respective cropping systems (Figure D.1). The soil is a deep alluvial Fluvisol (IUSS Working Group WRB, 2007), with a loam texture (41.0% of silt and 41.5% of sand) in the plough layer, and a more clayey texture in deeper horizons (Cardinael et al., 2015a). The soil is 4 to 10 m deep until the limestone bedrock. A water-table connected to the local intermittent river is usually deeper than 6 m, but may rise to 3 m during floods, and disappears in summer when the river stops flowing. The spatial variation of the current tree size probably reflects the soil depth heterogeneity (Figure II.1).

Hybrid walnuts (*Juglans regia* × *nigra, cv. NG23*) were planted in 1995 at 13 x 4 m spacing on East-West oriented lines, separating cropped alleys. Stand density was 192 trees.ha^{-1} originally but, in order to limit tree-crop competition, tree density was reduced by half in 2004 after a selective tree thinning. In 2017, tree height averaged 10.9 m, yielding to a mean height-to-alley width ratio of 0.84, reflecting that significant tree-crop interactions prevailed during this study (Dupraz and Liagre, 2008). Tree roots now occupy the entire cropped alleys, as revealed by soil pits. Tree roots explore the soil at least up to 6 m deep (observed through soil coring techniques), but the maximum depth of the root system is unknown. The water table ceiling probably limits it at approximately 6 m depth in winter.

Crop rotation is mainly based on winter crops (Durum Wheat - Winter Barley - Winter Pea) since 1995. In 2018-2019, the experimental field was ploughed on the 11th of December to 30 cm depth and a semi-leafless winter pea variety (*P. Sativum cv. Dexter*) was sown. Plant density was standardized at 80 plants.m^{-2} in observation quadrats by removing extra plants by hand at the end of winter to avoid any effect related to sowing density. No fertilization was added and only one fungicide was applied right after the beginning of flowering. Weeding was performed by hand in all quadrats until complete closure of pea canopy was reached.

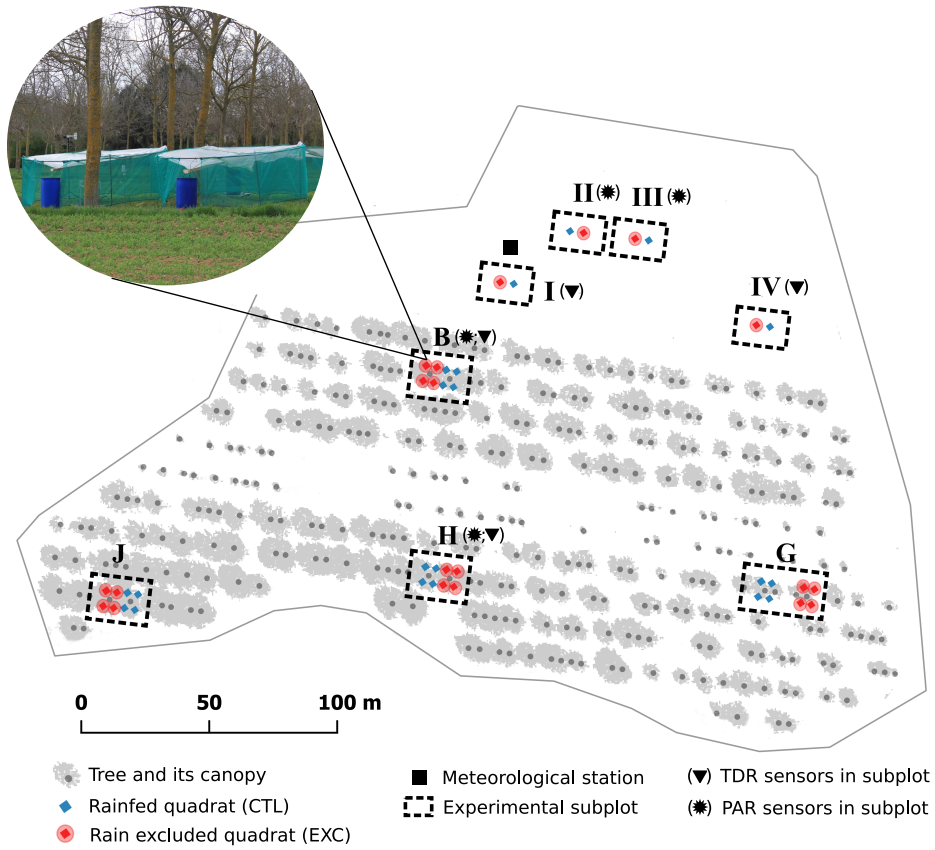


Figure II.1 Spatial layout of experimental design at parcel A2 at the Restinclières Farm Estate (France)

2.2 Experimental design

The rainfall manipulation experiment was conducted in a paired design (with/without rain exclusion) within 8 subplots, distributed over the two cropping systems (4 in AF and 4 in AC) (Figure II.1). Each AF subplot comprised two adjacent trees and one of them was randomly chosen for rainfall exclusion. Subplot locations were chosen to ensure that trees had similar diameter at breast height, height, earliness of budburst, pruning management and local tree neighborhood (number of adjacent trees on the same line). Homogeneity of light conditions within the pairs of trees was also controlled by measuring light interception by the canopy with hemispherical photographs. Monitored quadrats were located 3.5 m from the tree line, both North and South, to have comparable intensity of belowground competition between trees and crops.

In total, 40 monitored quadrats (1 m^2) were distributed in AC (8) and AF (32). In AF, we took advantage of the East-West orientation of tree lines and the heterogeneity of trees in the plot to measure the impact of contrasting light conditions, *i.e.* in quadrats lying North (very shady) or South (sunnier) of the tree lines and situated in subplots with small or large trees with early or late phenology. The rainfall regime was manipulated using mobile rainout shelters over half of the quadrats.

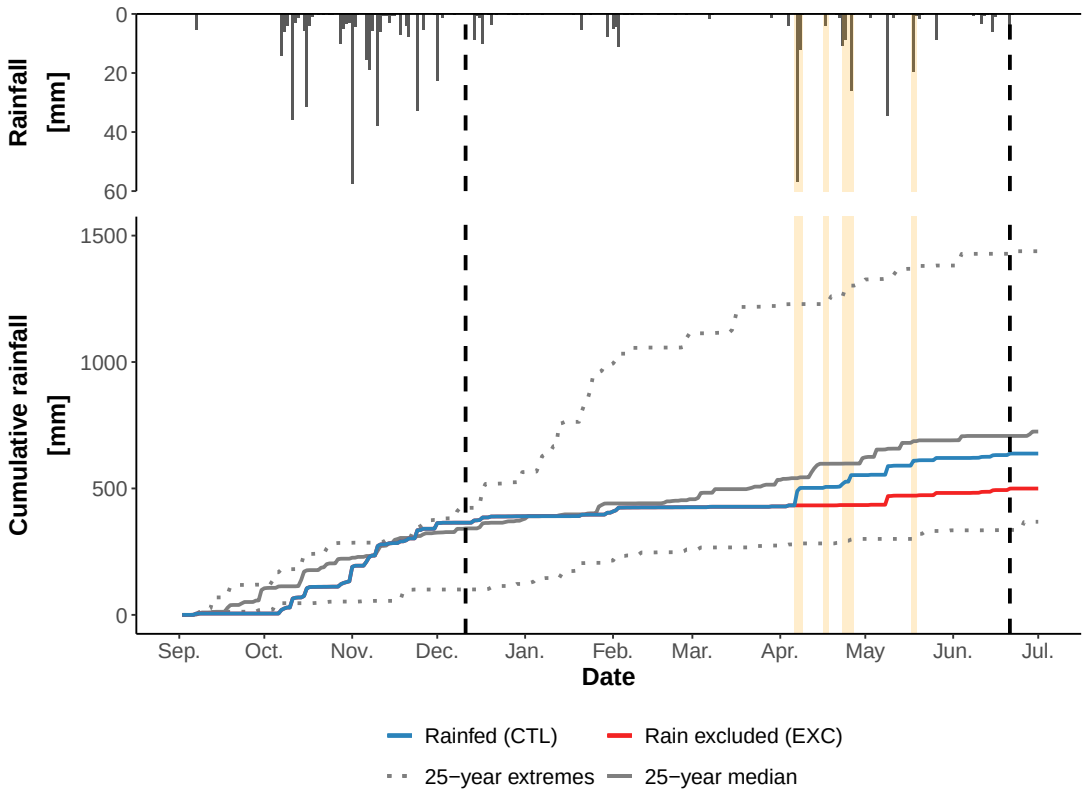


Figure II.2 Rainfall regimes according to cumulative rainfall. Rainfall interception periods are represented with orange filled areas. Vertical dashed lines represent sowing and harvest dates during experiment year.

2.3 Rainout shelters design and operation

The set-up of rainout shelters aimed at limiting the artifacts inherent to any rainfall manipulation experiment (Beier et al., 2012). Rainfall exclusions were conducted only for rainfall events forecasted to be more than 10 mm of rain. We did so to i) minimize the impacts of light interception by rainout shelters and ii) avoid any permanent obstacle on the field to ease the technical management of the crop and ensure homogeneity of cropping conditions. Rainout shelters were composed of steel tubes from greenhouse structures and a movable roof made of a translucid tarpaulin (Figure II.1). The tube structure was circular and covered 15 m^2 (diameter of *ca.* 4.5 m). Four rainout shelters were located around each tree and covered a total area of 60 m^2 (estimated as 60% of the total soil area exploited by a tree). This layout was chosen to reduce the bias that could result from a split-root effect on the tree, with a part of the root system in drier soil (under the shelters) than the other part (outside the shelters).

All tarpaulin roofs were stored in the vicinity of experimental plots and could be quickly assembled just before rain events. During rainfall exclusion, a rain gutter attached to the tarpaulin collected rain into a tank, itself connected to an outlet pipe for water evacuation far from the rain-excluded areas. Monitored quadrats were placed at the centre of each covered areas. We limited

edge effects related to external water flows by i) trenching surface soil around rain-excluded areas to avoid inflows from run-off and ii) by setting up a fine-meshed net on the side of rainout shelters to intercept lateral rainfall in windy conditions. Spatial measurements of rainfall and soil water content during the prototyping year of rainout shelters revealed that edge effects were negligible from 50 cm inwards the border of the rain-excluded area. One quadrat was excluded from the study due to leaking issues in the centre of one rainout shelter during an intense hail event.

2.4 Climate context and rainfall manipulation scenario

The study site has a sub-humid Mediterranean climate with an average cumulated rainfall of 853 mm and an average temperature of 14.1 °C over the past 25 years. Rainfall distribution is bimodal, with precipitations mostly distributed over fall and spring. Fall thunderstorms are typical in the region (Vautard et al., 2015) and usually replenish the soil to field water capacity after dry summers. Therefore, the different rainfall regimes were compared between years based on cumulative rainfall from the 1st of September to June (*i.e.* end of harvest period). Cumulative rainfall in rainfed conditions (CTL) reached 628 mm between September 2018 and June 2019, which was just below the median according to the past 25 years (Figure II.2). Rainfall events during Fall and Winter were above the median scenario, while conditions became relatively dry over the end of winter and spring. Rainfall exclusion was performed during four rainfall events (>10 mm) from April to May, reducing cumulated rainfall by 135 mm (20% of the total) in rain-excluded (EXC) quadrats. Considering the distribution of cumulative rainfall over the past 25 years, rainfall exclusion performed in EXC mimicked a scenario drier than the 2nd driest year (in 2005, with 574 mm from September to June), with an unusual dry spring (only 75 mm in EXC between the period from the 21st of March to the 21st of June, which is close to the 2nd driest spring observed in 2014, with 69 mm).

During the crop cycle, air temperature was unusually cold for the region, especially during the spring period with both mean and maximal air temperature of 0.7 and 1.3°C below the average. Mean daily air temperature remained below 25°C during the whole crop cycle, preventing crop yield reduction due to flower or seed abortion induced by thermal stress above this threshold (Guilioni et al., 1997; Jeuffroy et al., 1990).

2.5 Environmental monitoring

Local air temperature and relative humidity were measured using HMP 155 probes (Campbell Scientific, USA) at a meteorological station located in AC (near subplot I) (Figure II.1). Incident and intercepted rainfall were recorded with a tipping-bucket rain gauge (ARG100, Campbell Scientific, USA) and standardized rain gauges located next to rainout shelters in each subplot. Light conditions were documented with hemispherical photographs (HPs). To capture the impact of tree canopy dynamics on local light availability, HPs were shot on each quadrat and repeated at three different dates: before tree budburst, at the end of the growth of tree short shoots and at the end

of the growth of tree long shoots. HPs were processed with the WinSCANOPY software (Regent Instruments Inc., QC, Canada) and daily PAR radiation [$MJ.day^{-1}$] were estimated assuming a solar constant of 1370 $W.m^{-2}$, a spectral fraction of 0.51, an atmospheric transmissivity of 0.6 and a diffuse radiation fraction of direct radiation of 0.15. For diffuse radiation flux, the model of clear sky was selected.

At each quadrat, composite time series of daily PAR reaching the crop were established by i) considering PAR estimated from a picture of leafless trees before budburst and ii) by applying linear interpolation on PAR estimates according to the time between budburst (or the last picture) and pictures shooting dates. To ensure the validity of the method, 12 additional sensors (PAR-80, Decagon Devices, Pullman, WA) were distributed in AC (4) and AF (8). Sensors were set up in late February until harvest and post-calibrated. Estimations from HPs and measurements from PAR sensors showed good agreement overall (r^2 = 0.95), although HPs overestimated slightly cumulated PAR_{inc} in all cropping conditions due to inadequate consideration of daily cloudiness (Figure D.2). Transmittance, defined as the ratio of incoming light in the understory over incoming light in a treeless situation, was computed daily to evaluate shade dynamics. Estimated incident PAR (PAR_{inc}) was cumulated over the whole crop cycle, from sowing to harvest, as a proxy of local light availability.

Soil water content (SWC) measurements were performed using time-domain reflectometers (TDR) sensors (CS650, Campbell Scientific, USA) in AC and AF. TDR probes were installed horizontally at three depths (50; 150; 250 cm) by digging soil pits in four subplots (I, IV, B and H), with sets of sensors under both rainfall regimes. Additional sensors were installed in the plough layer (20 cm) after crop sowing in early January. At sensor set-up, volumetric soil content of the monitored soil layer was independently measured by gravimetry on undisturbed soil samples close to each probe. Theoretical values of field capacity (FC) and permanent wilting point (PWP) were computed using the pedotransfer function proposed by (Rawls et al., 2003). TDR signals were corrected using field measurements from soil cylinders, and signal consistency was visually assessed for every sensor in relation to rainfall dynamics and signal position in comparison to field capacity and permanent wilting point. SWC records at 150 and 250 cm showed only minor fluctuations during this period, and maximal pea rooting depth reached down to 100 cm this year (evaluated at maximal crop development, at the end of May), so only SWC dynamics at 20 and 50 cm were considered in this study.

2.6 Crop growth monitoring

Phenological development was evaluated every week according to the BBCH scale (Hack et al., 1992), from emergence to harvest, with an emphasis during the flowering period. Data were summarized according to 3 periods: i) vegetative growth, from emergence to maximal LAI measurement ; ii) flowering period, from the opening of flowers (stage 61) to flower decay (stage 69) and iii) fruit development and seed maturation, from pod set (stage 71) to harvest date.

Non-destructive methods were used to characterize the Leaf Area Index (LAI) dynamics for

all quadrats. In the first period (from emergence until pea canopy closure reached 80%), LAI was estimated based on cover rate, using a linear regression (r^2 = 0.91, data not shown) between destructive LAI measurements and cover rate measured in other parts of the field. The cover rate was estimated through picture analysis with the ImageJ (version 1.46) software (Schneider et al., 2012) and destructive LAI measurements were done by measuring the surface of pea green leaves with the WinFolia software (Regent Instruments Inc., QC, Canada). Beyond 80% canopy closure, LAI was measured by means of an LAI-2200 Plant Canopy Analyzer (LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska) until senescence.

The whole quadrat ($1m^2$) was harvested at pea maturity from the 13th to the 19th of June in EXC and from the 19th to the 21st of June in CTL. On each sample, aboveground total biomass and grain yield were assessed. All biomass samples were oven-dried at 50°C until weight remained stable. At harvest, yield components, *i.e.* the number of pods per plant, the number of seeds per pod and thousand kernel weight (TKW) were recorded at the quadrat level. Additionally, two plants were randomly sampled at harvest near each quadrat (80 plants in total) and for each plant, pods and seeds were collected, counted and weighed per node position. So the determination of yield components was performed at the stand (quadrat) and the individual plant level. Individual plant analysis was included to detect possible ontogenetic change (alteration of flowering or fruiting patterns) across growth conditions.

2.7 Data analysis

Statistical analyses were conducted with the R software (R Core Team, 2020) to: 1) evaluate the influence of tree on light and water availability and to 2) investigate the effects of light and water availability on crop yield and to 3) analyze plant biomass allocation between vegetative and reproductive organs (maximal LAI and yield components).

Tree effects on light availability were evaluated by comparing the transmittance dynamics and cumulated incident PAR between AF and AC. The effects of trees and rainfall exclusion on SWC were compared according to daily dynamics. For each soil layer, data from individual sensors were averaged either by cropping system (AC against AF ; 4 sensors by modality) or by rainfall regime (CTL against EXC ; 4 sensors by modality).

The effects of light availability and rainfall regime on maximal LAI, yield components, grain yield, straw yield and harvest index were tested using linear mixed models fitted with the lme4 package (Bates et al., 2015). For each target variable, a full model with cumulated PAR_{inc} and rainfall regime as fixed effects was compared to progressively reduced models. Subplots were introduced as random effects to account for effects related to uncontrolled environmental variability among the blocks.

Second-order Akaike Information Criterion (AICc) was computed for each model with the package AICmodavg (Mazerolle, 2020) to correct bias related to small sample size (Hurvich and Tsai, 1991). The final model was retained according to the lowest AICc value (ΔAICc > 2) and

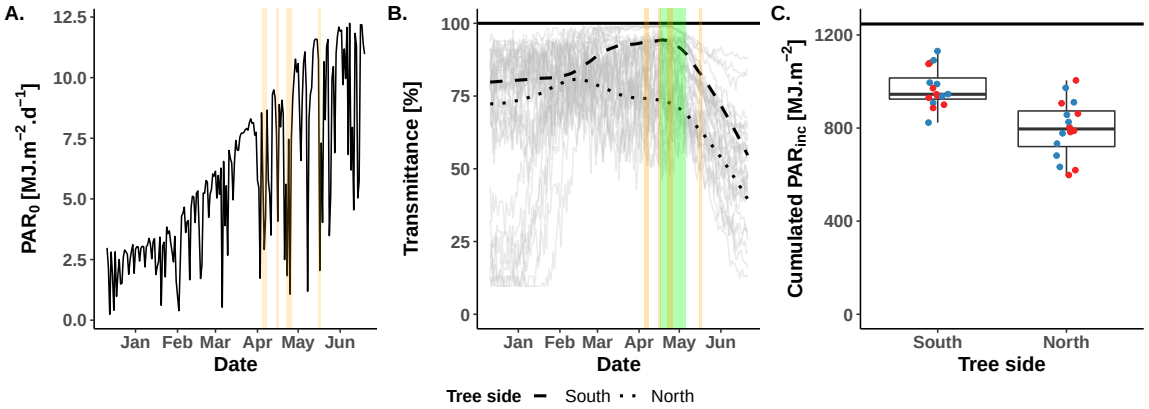


Figure II.3 Light conditions over the cropping period according to available PAR (PAR_0) in agricultural control (AC) (A.), median dynamics of PAR transmittance in agroforestry (AF) (B.) and boxplots of cumulative incident PAR (PAR_{inc}) in AF (C.). Orange areas depict rainfall interception periods and green areas indicate tree budburst period. Horizontal solid line in B. and C. indicates the value of transmittance (100%) and PAR_{inc} (1247 $MJ.m^{-2}$) in AC.

significance of the fixed effects was tested according to the Satterthwhaite's method implemented in the lmerTest package (Kuznetsova et al., 2017). In addition to the linear regressions, the bivariate relationships between i) maximal LAI and straw yield, ii) yield components and grain yield and iii) maximal LAI and yield components were evaluated using standardized major axis (SMA) regression with the smatr package (Warton et al., 2012).

Finally, curves of yield components at the plant level were compared using paired *t*-test applied for each reproductive node number to assess if light conditions in AF-S and AF-N induced changes in the fruiting pattern compared to the conditions in AC. Bonferroni correction was applied to adjust the significance level in case of multiple comparisons.

3 Results

3.1 Reduction of light and soil water availability under large walnut trees

PAR levels in agroforestry (AF) conditions (Figure II.3) featured a gradient of cumulated incident PAR (PAR_{inc}), partly explained by quadrat position (North or South) relative to the tree. In agricultural control (AC), sky conditions were pretty clear overall (Figure II.3.A.) and cumulated PAR_0 reached 1112 $MJ.m^{-2}$ over the cropping period. In AF, cumulated PAR_{inc} was reduced during the cropping period by 19% (-236 $MJ.m^{-2}$) and 35% (-439 $MJ.m^{-2}$) at South (AF-S) and North of the tree (AF-N) (Figure II.3.C.). Dynamics of light availability exhibited three distinctive periods (Figure II.3.B.): i) from December to February, light transmittance was around 75% with only minor differences (2%) between AF-N and AF-S ; ii) from March to tree budburst (which occurred from the 17th of April to the 6th of May across subplots), relative light transmittance was 92% in AF-S

and 75% in AF-N ; iii) from tree budburst to crop harvest (between the 13th and 21st of June), light transmittance dropped by 20% more in AF conditions, and decreased continuously until harvest down to 60 and 40% in AF-S and AF-N respectively. Overall, 65% of light reduction was observed during the part of the crop cycle that occurred after tree budburst.

During the cropping period, soil water content (SWC) dynamics of AC and AF differed in shallow soil layers but not in deeper soil layers. At 20 cm depth (Figure II.4.A.), SWC did not differ much during the winter period (December to February), as SWC remained around field capacity. From early March to mid-May, SWC in AF became progressively drier in comparison to AC. After

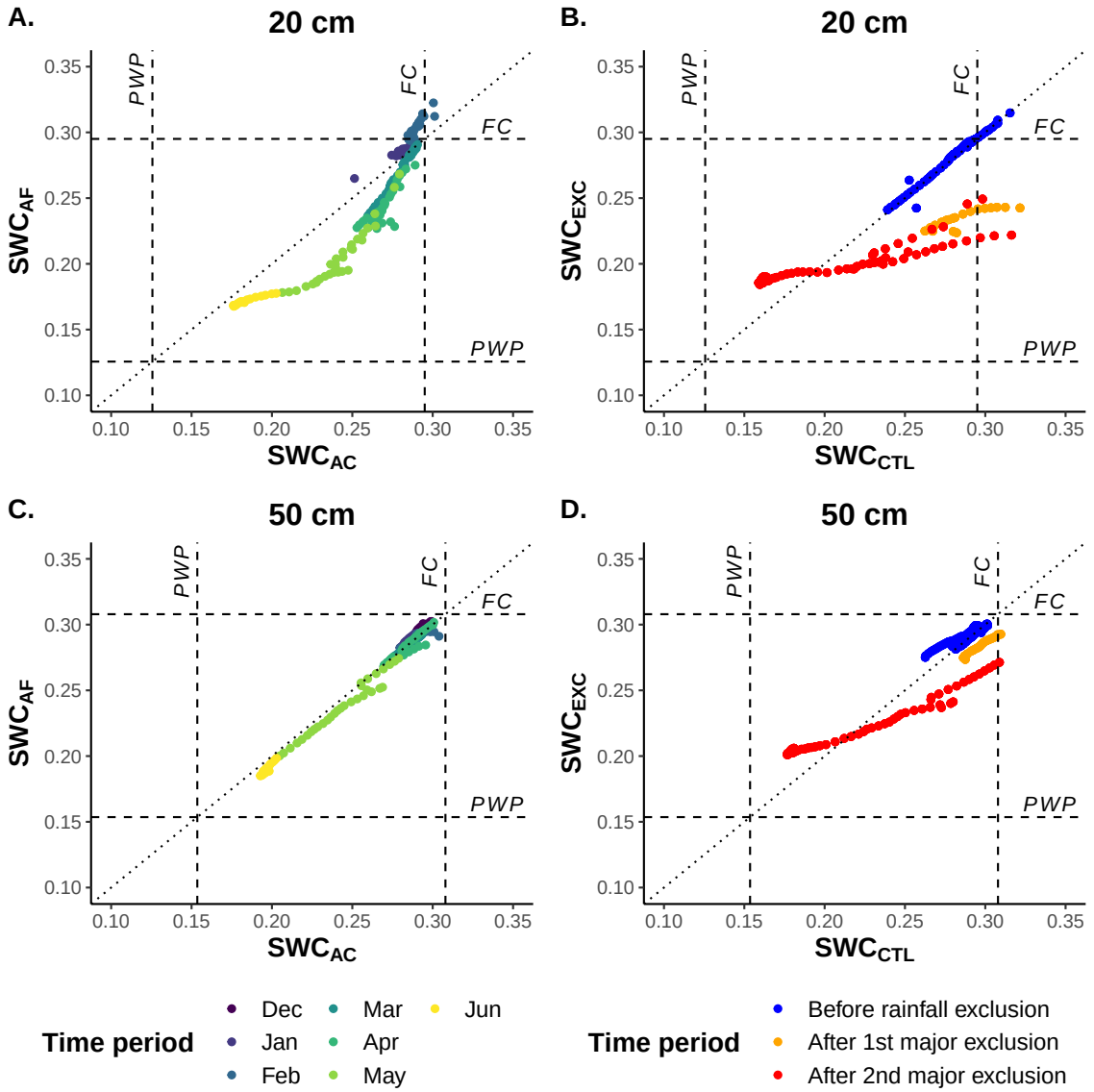


Figure II.4 Paired analysis of mean daily soil water content (SWC) [$m^3.m^{-3}$] between cropping systems (A. and C.) and rainfall regime (B. and D.) at 20 and 50 cm depth. Dotted line indicates 1:1 line and dashed lines indicate permanent wilting point (PWP) and field capacity (FC) computed according to Rawls et al. (2003). Colors indicate different time period, set as i) 1-month interval for the evaluation of SWC dynamics between cropping systems and as ii) interperiod between major rainfall exclusion (> 20 mm) for the evaluation of dynamics between rainfall regime.

mid-May, SWC became less contrasted, and differences were no longer perceptible at harvest. At 50 cm depth (Figure II.4.C.), mean sensor signals remained close to the 1:1 line.

3.2 Effects of rainfall regimes on soil water content

From sowing to early April, SWC dynamics between CTL and EXC conditions were similar (Figure II.4.B and D, blue dots). During spring rainfall events, 135 mm of rain water was excluded in EXC and impacted SWC down to 50 cm depth (Figure II.4.B and D, orange and red dots). Differences in SWC dynamics between CTL and EXC rainfall regimes lasted until harvest, although they diminished progressively at the end of the cropping period.

3.3 Impacts of light conditions and rainfall regime on winter pea

Crop phenological development was very sensitive to the rainfall regime while light conditions had a weaker influence (Figure II.5.A.). The beginning date of flowering (around the 29th of April) was similar in all cropping conditions, although major rainfall exclusion were performed

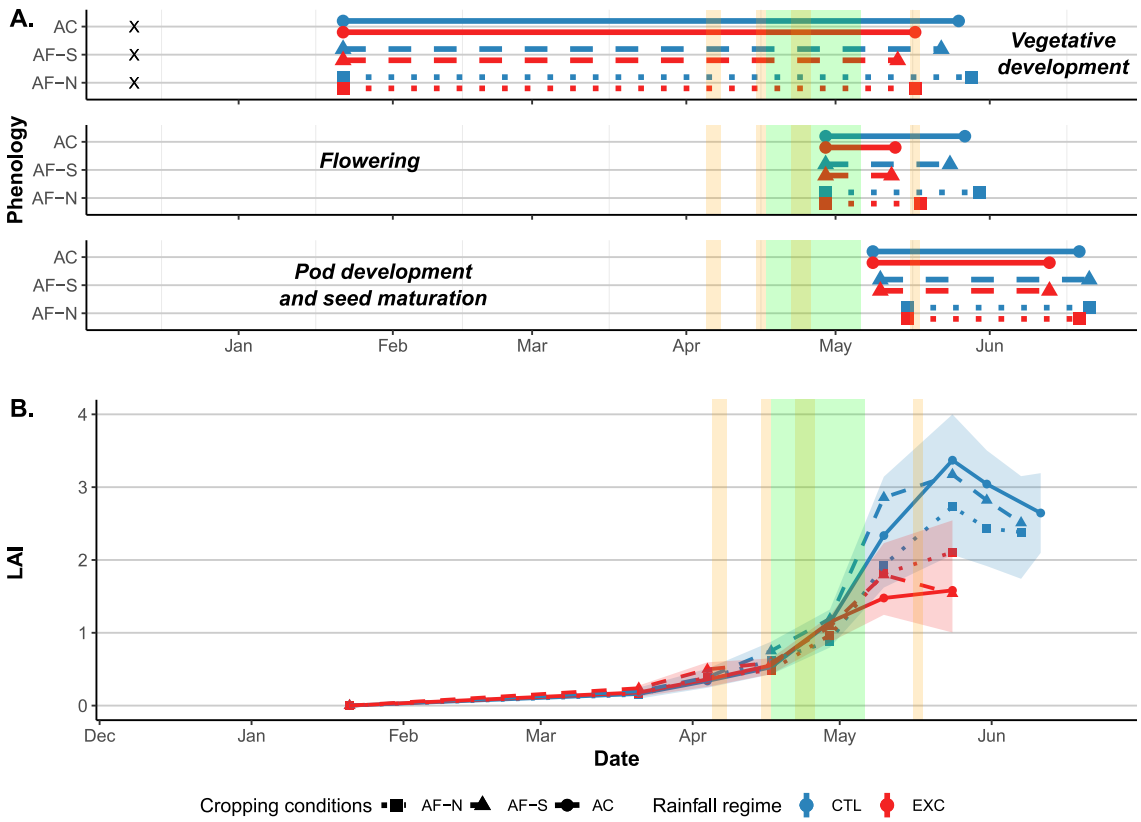


Figure II.5 Phenological development of winter pea (A.) and LAI dynamics (B.) according to cropping conditions and rainfall regime. In A., black crosses indicate sowing date, while colored lines of vegetative growth start at emergence. In B., confidence curves were computed according to standard error of LAI values pooled per rainfall regime. Orange areas depict rainfall interception periods and green areas indicate tree budburst period.

Table II.1 Linear mixed effect analyses to test the effects of resource availability on proxies of vegetative and reproductive development.

	LAI_{max} [$m^2.m^{-2}$]		Nb. pods / plant [$ind.ind^{-1}$]		Nb. seeds / pod [$ind.ind^{-1}$]		TKW [g]	
Fixed effects	**Estimate**	***P***	**Estimate**	***P***	**Estimate**	***P***	**Estimate**	***P***
Cum. PAR (PAR)	0.001	0.210	0.006	**<0.001**	0.001	**0.026**	0.085	**<0.001**
Rainfall regime	-1.347	**<0.001**	3.513	0.057	0.429	**0.001**	47.603	**0.009**
PAR × RAIN	-		-0.005	**0.014**	-	-	-0.034	0.091
r^2		0.67		0.48		0.31		0.72

during the preceding month. The flowering duration was shortened by 12 days on average in EXC compared to CTL, and subsequent phenological stages (*e.g.* pod elaboration, grain filling, grain maturation) were observed earlier in EXC. Shade effects on flowering were only observed in AF-N, where flowering lasted longer (up to 14 days). At the end of the crop cycle, harvest dates differed up to 8 days between cropping conditions and rainfall regimes.

At harvest, light conditions and rainfall regime negatively impacted straw and grain yield (Figure II.6). Straw yield ranged from 134 to 344 $g.m^{-2}$, with a clear difference between CTL (136 to 344 $g.m^{-2}$) and EXC (134 to 206 $g.m^{-2}$). Light conditions (P = 0.022) and rainfall regimes (P < 0.001) had a significant impact on the slope and the intercept of the selected mixed model respectively. On the other hand, effects on grain yield were more complex due to the significant interaction observed between light conditions and rainfall regimes (P < 0.001). Pea yield were lower in AF conditions compared to AC in both rainfall regimes but the yield reduction due to the presence of trees was more pronounced in CTL (-25% to -77% yield difference between AC and AF) than in EXC (-1% to -47% between AC and AF). Under spring drought, pea yield was reduced in AC by -22% compared to rainfed conditions while it was relatively improved in AF conditions between

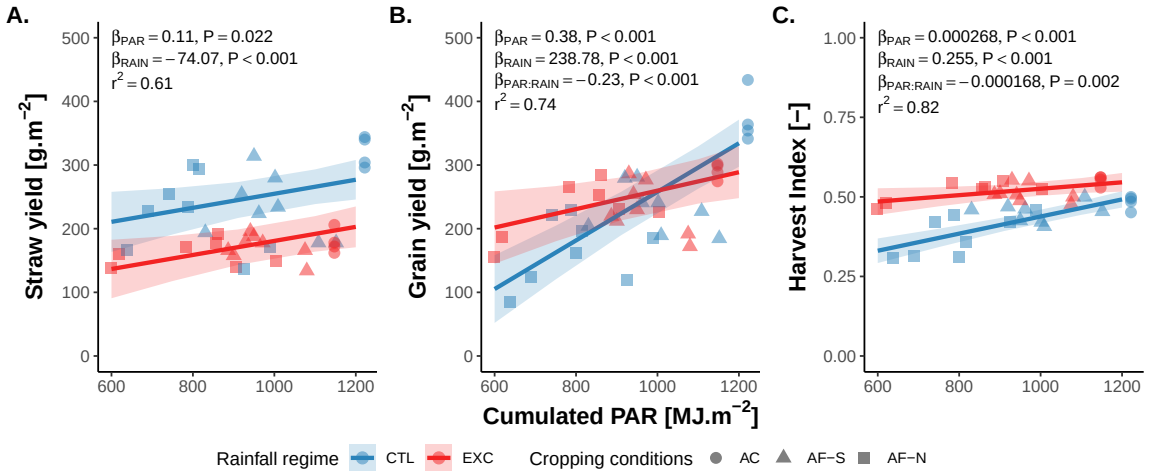


Figure II.6 Linear mixed effects analyses of straw yield (A.), grain yield (B.) and harvest index (C.) in relation with cumulated PAR over the whole cropping period and rainfall regime. Estimates of fixed effects (β) in retained models according to AICc value and their significance are provided, as well as pseudo-r^2. Confidence intervals represent the standard error of the model.

Table II.2 Standardized major axis (SMA) regression to test the effect size of respective proxies of vegetative and reproductive development on crop performances.

Proxies (*targeted crop performance*)	Rainfall regime	n	r^2	*P*	Slope	Intercept
LAI_{max} (*Straw yield*)	-	39	0.74	**<0.001**	58.62	70.95
	CTL	20	0.57	**<0.001**	64.07	64.07
	EXC	19	0.49	**<0.001**	48.42	48.42
Nb. pods / plant (*Grain yield*)	-	39	0.50	**<0.001**	48.43	-61.27
	CTL	20	0.80	**<0.001**	51.10	-110.49
	EXC	19	0.12	0.137	60.89	-98.18
Nb seeds / pod (*Grain yield*)	-	39	0.18	**0.007**	153.46	-281.85
	CTL	20	0.33	**0.008**	287.11	-680.73
	EXC	19	0.20	0.055	90.42	-82.93
TKW (*Grain yield*)	-	39	0.45	**<0.001**	3.69	-286.02
	CTL	20	0.52	**<0.001**	4.54	-373.51
	EXC	19	0.58	**<0.001**	3.18	-237.76

+12% (when PAR_{inc} > 920 $MJ.m^{-2}$) and +20% (when PAR_{inc} < 920 $MJ.m^{-2}$). The HI was systematically higher in EXC (HI_{mean} = 0.522) than in CTL (HI_{mean} = 0.428) in all cropping conditions. The interaction between light conditions and rainfall regime on HI was significant (P = 0.002) and reflected that the HI was less influenced by the light gradient in EXC (coefficient of variation (CV) = 6.7%) than in CTL (CV = 14.2%).

Rainfall regime impacted maximal LAI and yield components of winter pea whereas light conditions influenced yield components only (Table II.1). The vegetative development ended on average 10 days earlier (Figure II.5.A.) and maximal LAI was reduced by 46% in EXC (P < 0.001) with no effect of light conditions (Figure II.5.B.). The number of pods per plant was significantly reduced under shade conditions (P < 0.001), but presented a significant interaction with rainfall regime (P = 0.014). In particular, the number of pods per plant varied along the light gradient in CTL (observed range: 3.7 to 9.9 pods.plant-1; CV = 26.5%), but did not in EXC (observed range: 4.4 to 7.7 pods.plant-1; CV = 15.5%). Overall, spring drought reduced the number of pods per plant by -38% in AC but only by -8% in AF. On the opposite, spring drought had a positive effect on the number of seeds per pod (P = 0.001) and the TKW (P = 0.009). More specifically, TKW was increased on average by +10% in AC and +13% in AF in case of spring drought. Shade conditions decreased the number of seeds per pod (P = 0.026) and the TKW (P < 0.001).

3.4 Linkages between plant biomass allocation and crop yield

Interdependences between maximal LAI, yield components and crop performances were observed (Table II.2). Maximal LAI was significantly correlated to straw yield under all rainfall regimes (overall P<0.001 and R^2 = 0.74). Among yield components, grain yield was positively correlated with the number of pods per plants (overall P < 0.001 and R^2 = 0.50) and with the TKW (overall, P < 0.001 and R^2 = 0.45). Under CTL conditions, the number of pods per plant was positively correlated to grain yield (P < 0.001 and R^2 = 0.80). For the yield components, a significant

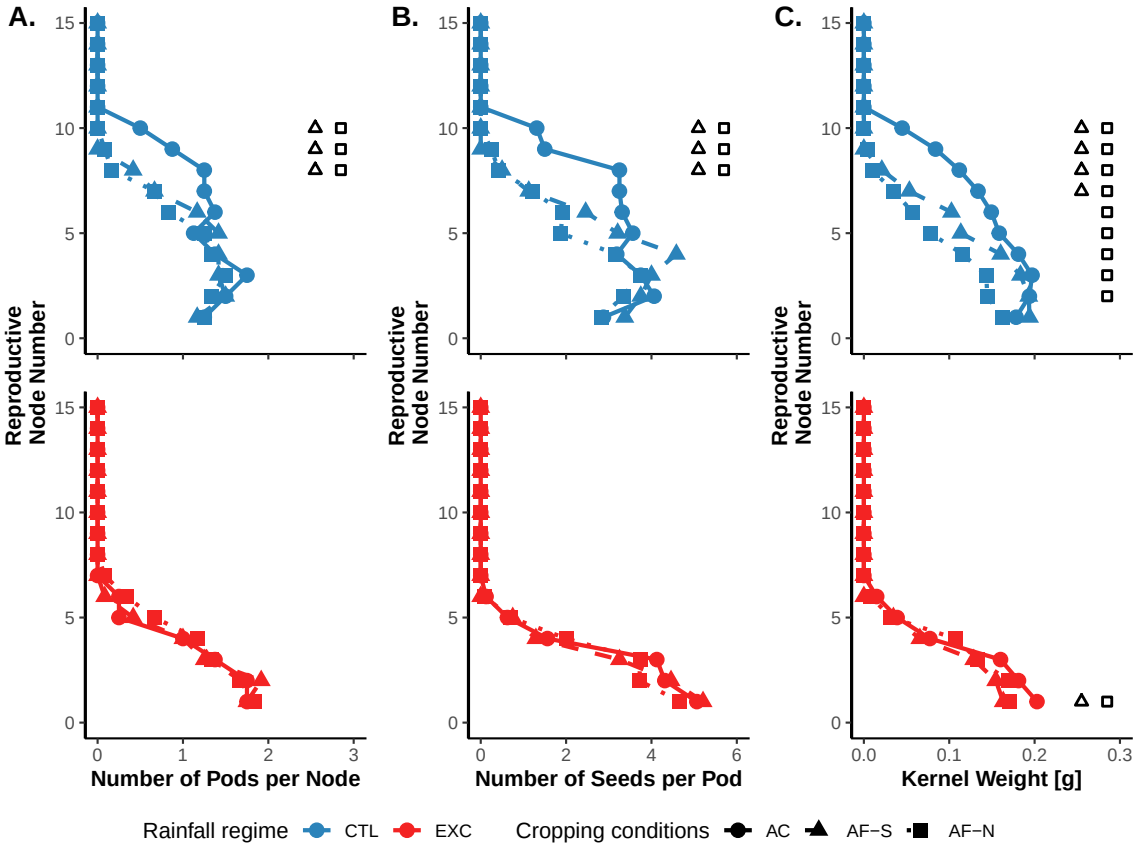


Figure II.7 Average profile of the number of pods per node (A.), the number of seeds per pod (B.) and individual seed weight (C.) along reproductive nodes of winter pea according to rainfall regime and three different cropping conditions : agricultural control (AC), South (AF-S) and North (AF-N) of tree lines in agroforestry conditions. Black symbols indicate significant differences between AF and AC conditions according to a paired sample *t*-test (α = 0.05) with Bonferroni correction.

relationship was only observed between maximal LAI and the number of pods per plant ($P < 0.001$, $R^2 = 0.34$; Table D.1).

Different fruiting patterns were observed depending on rainfall regime and light conditions (Figure II.7). Compared to AC, the number of pods per node and the number of seeds per pods were reduced in CTL at the higher reproductive nodes (*i.e.* later produced, nodes 9,10 and 11) in both AF locations (AF-N and AF-S). Kernel weight was significantly reduced along all reproductive nodes in AF-N, and only for nodes 8 to 11 in AF-S. In EXC conditions, yield component pattern was very similar in all cropping conditions. In comparison with CTL, the number of nodes bearing a pod in EXC was halved and induced a denser distribution of the other yield components toward low (*i.e.* early produced) nodes.

4 Discussion

4.1 Large walnut trees strongly reduce light availability but the impacts on soil water remain limited

Twenty-five years after the plantation of walnut trees in the AF plot, light interception by trees was significant but heterogeneous. Shade is expected to be the most intense close to the tree lines, where yield measurements were performed (Coussement et al., 2018; Pardon et al., 2018). Quadrats located North of tree lines had much lower light availability on average than in the South (Figure II.3), as it was expected with East-West oriented tree lines. In a modeling experiment, Dupraz et al. (2018) showed that East-West oriented tree lines under Mediterranean latitudes induce higher spatial variability of incoming light in the alley as compared to North-South oriented tree lines.

The gradient of light reduction observed in AF resulted from structural and phenological heterogeneity of the tree stand. Walnut trees presented heterogeneous crown volumes (Figure II.1) and the trees' growth rate was likely impacted by site heterogeneity (*e.g.* soil properties, water table depth) and individual genetic factors. The budburst period differed markedly between subplots, with differences up to 4 weeks between early and late trees (from mid-April to early May). In a deciduous AF system, most of the reduction of available light for winter crops occurs after tree budburst, although the reduction induced by woody parts of the tree (*i.e.* trunks and branches) during the winter period can not be neglected as trees become larger (Figure II.3.B and Talbot and Dupraz 2012). The timing of tree budburst is often mentioned to be a critical point regarding light competition (Dufour et al., 2013) as it occurs when PAR_0 radiation increases drastically (Figure II.3.A). The earlier the budburst is, the stronger the impact of shade on critical phenological stages like flowering (Figure II.5).

In contrast, walnut trees moderately impacted soil water content in the crop root zone, probably due to the good complementarity of tree-crop root systems. During the cropping period, soil water dynamics were very similar between the two cropping systems in deep soil horizons ($\geq$ 50 cm) (Figure II.4.C), while soil conditions were drier in AF as compared to AC in the plough layer (Figure II.4.A). The reduction of soil water availability by trees in the crop root zone has been observed in AF with manipulative studies, either by installing physical barriers or by pruning roots (Jose et al., 2000; Korwar and Radder, 1994; Miller and Pallardy, 2001). However, these studies dealt with summer crops, when water requirements of both trees and crops were simultaneously high. In temperate deciduous AF systems with winter crops, a higher complementarity for water resources is expected, either temporally because winter crops can take advantage of fall and winter precipitation when trees are leafless, or spatially because trees can benefit from deeper water resources during summer. At the study site, previous work showed that the distribution of tree root systems shifted towards deeper horizons over the long term as a response to tree-crop competition, root destruction by annual ploughing in the upper soil horizon and local soil condi-

tions with substantial water resources in deeper soil horizons (Cardinael et al., 2015b; Mulia and Dupraz, 2006). Nevertheless, we were surprised by the earliness of the drying trend observed in AF in upper soil horizon, since early March and way sooner than tree budburst. Although tree water uptake begins a few weeks before budburst, during bud swelling (Essiamah and Eschrich, 1986), uptake is generally considered as limited at first and most of the competition for water occurs once leaf canopy is well-developed (around end of May in this site) (Broadhead, 2015). Therefore, further analyses should be performed to investigate whether such trend is related to crop water requirements, soil water dynamics (*e.g.* evaporation, infiltrability) or soil heterogeneity (*e.g.* texture, compaction). Rainfall exclusion performed in spring had, in fine, a much stronger effect on soil water availability in the crop root zone than trees (Figure II.4).

4.2 Spring drought blocked the vegetative development of winter pea while tree shade only had a minor impact

Spring drought reduced pea LAI and straw biomass at harvest. Rainfall exclusion affected pea growth just before the period of maximal leaf expansion (Figure II.5), reducing maximal LAI (Table II.1) and the number of reproductive nodes of plant profiles (Figure II.7). Under drought, vegetative growth of pea ceases due to physiological regulation at cell level (Davies et al., 1994; Lockhart, 1965), which decreases leaf production and leaf expansion rates (Lecoeur and Guilioni, 1998; Lecoeur and Sinclair, 1996; Lecoeur et al., 1995).

In comparison, tree shade only had a modest impact on vegetative development. Light conditions had a significant but rather weak effect on straw mass (Figure II.6) and no effect on maximal LAI (Table II.1). Though tree budburst occurred during the period of maximal leaf growth rate (Figure II.5), light conditions were quite similar between AF and AC over the vegetative period of winter pea (Figure II.3), as tree leaf canopies were still poorly developed. Maximal LAI of legume crops is not very sensitive to shade (Allard et al., 1991; Meadley and Milbourn, 1971; Verghis et al., 1999), suggesting that tree shade in such AF system does not affect much the vegetative growth of legume crop. The low sensitivity of leaf development to shade could be explained by C allocation priority towards vegetative organs during maximal leaf expansion. Jeuffroy and Warembourg (1991) showed that, under light reduction, the growing apex of winter pea constitutes a larger C sink compared to the other organs under formation, although sink strength of the apex decreases progressively to the benefit of newly formed reproductive organs.

The cessation of vegetative development under spring drought strongly decreased pea yield potential in both AC and AF systems. In coherence with the reduction of maximal LAI under drought (Figure II.5), the number of reproductive nodes at plant level (Figure II.7) and the number of pods per plant at quadrat level (Table II.1) were reduced as well. In indeterminate crops such as winter pea, biomass allocation during the end of vegetative development is complex, because leaf expansion, flower emission and pod set occur simultaneously at the plant level (Munier-Jolain et al., 2010). The cessation of the vegetative development under drought decreases the number of reproductive phytomeres (*i.e.* potentially bearing flowers or pods) and affects in turn the yield

potential of pea crop, although some compensation effects during seed formation and grain filling can offset partially such yield reduction (Wery, 2005).

4.3 The negative effect of drought on pea yield faded with shade

Tree shade impacted less pea yield under drought conditions. Tree shade reduced grain yield in all rainfall regimes but the yield reduction was lower under spring drought (from -1% to 47% compared to AC) than in rainfed conditions (from -25 to -77% compared to AC) (Figure II.6.B). In AF, grain yield in the shadiest conditions was even higher under spring drought than in rainfed conditions (+20% where PAR_{inc} < 920 MJ.m-2) and contributed to decrease the difference between yields in AF and AC. In terms of biomass allocation, the HI revealed that allocation to grain was particularly improved in case of spring drought along the shade gradient (Figure II.6.C). Similarly, Verghis et al. (1999) also observed on chickpea that the reduction of grain yield due to lower water availability (non-irrigated vs. irrigated conditions) was buffered under shade due to the improvement of both the grain yield and the HI. Though spring drought have a negative impact on pea yield, early drought can improve the HI of pea because pea plant compensates through other yield components in response to the limited vegetative development (Martin and Jamieson, 1996; Wery, 2005). The modification in terms of HI of winter pea also suggested that yield elaboration was less sensitive to tree shade under spring drought.

Spring drought and tree shade reduced both the number of pods per plant but the sensitivity of pod set to shade decreased under drought. In full-sun conditions, spring drought negatively impacted pea yield by stopping the vegetative development and reduced in turn the number of pods per plant (-38% in AC). Tree shade also decreased the number of pods per plant but mostly in rainfed conditions as revealed by the interaction effect (Table II.1). Shade conditions around pod set is critical on grain yield and the HI of field pea and other legume crops (Lake et al., 2019; Lake and Sadras, 2014; Sandaña and Calderini, 2012). When light reduction occurs around pod set, higher flower and pod abscission rate reduces the number of pods per plant (Heindl and Brun, 1983; Jiang and Egli, 1993; Verghis et al., 1999). Under drought, the number of reproductive phytomeres of pea plant decreased, but similar pod production levels were sustained under more intense shade conditions (Figure II.7). On the contrary, there was a clear decrease of pods for the latter-produced nodes in rainfed AF conditions. In a sink-source framework, flower or pod abscission is considered as the result of trophic competition between the growing apex, flowers and pods along the nodes (Heindl and Brun, 1983; Jeuffroy and Warembourg, 1991). We interpreted this as a shift from source-limited conditions in AF-CTL (*i.e.* lack of photoassimilates under tree shade to fulfill flowers or pods requirements) to sink-limited conditions in AF-EXC (*i.e.* lower number of flowers or pods but sufficient production of photoassimilates under shade conditions to fulfill organs requirements) during the flowering and pod set period.

Pea seed weight was improved under spring drought in all cropping conditions and contributed to alleviate the negative impact of tree shade on pea yield. Tree shade decreased the number of seeds per pod and TKW, while spring drought had an opposite effect (Table II.1). Nevertheless,

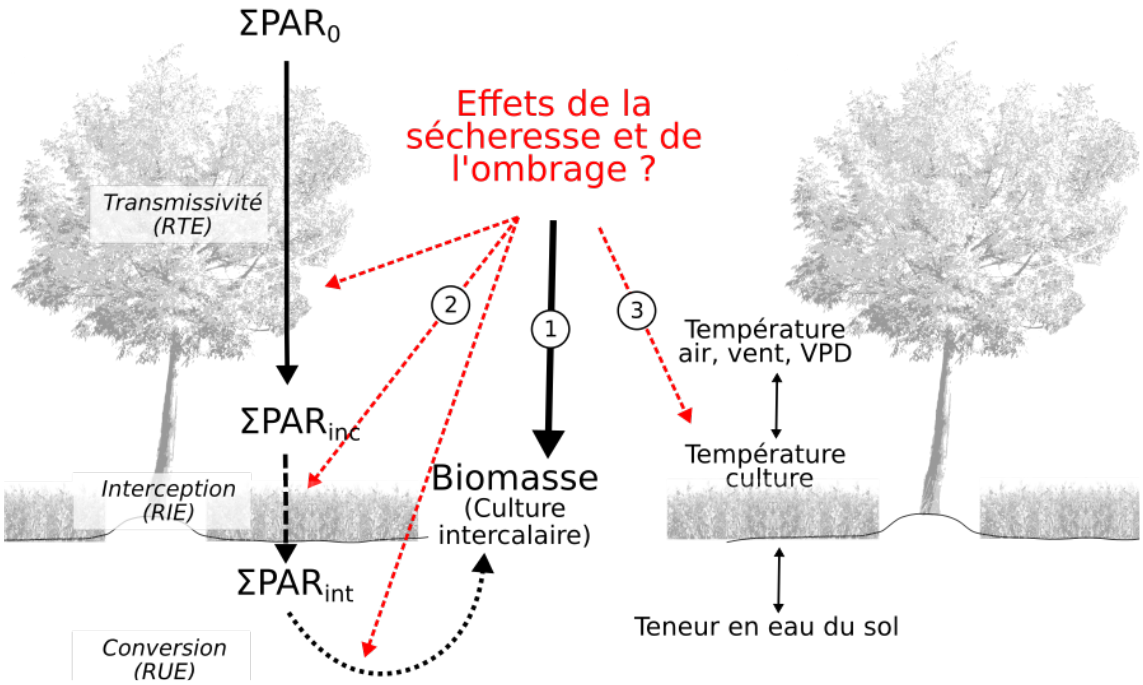
TKW explained better the variations observed on grain yield than the number of seeds per pod (Table II.2), suggesting that grain filling was a more determinant factor than seed set. In AF system, Dufour et al. (2020) showed that intense tree shade close to tree line could considerably reduce TKW compared to other locations in the alley. Our results suggest that TKW reduction depends on the rainfall regime because of possible compensation effects at the plant level. Although the weight of pea seeds in a given reproductive node is relatively insensitive to light reduction (Sandaña et al., 2009), differences appear among the reproductive nodes due to the progressive increase of the number of sinks and the modification of cropping conditions (Munier-Jolain and Ney, 1998). Spring drought lowered the overall number of reproductive sinks and induced a greater proportion of bigger seeds at plant scale, with only a negligible effect of tree shade (Figure II.7). On the contrary, shade conditions decreased the seed weight along the reproductive nodes of a pea plant grown under rainfed conditions and negatively impacted TKW. Therefore, winter pea fully revealed its reproductive plasticity between the tested rainfall regimes in AF: depending on the potential number of reproductive sinks formed during the vegetative development, pea crop adjusted the number and size of reproductive sinks according to photoassimilate availability (Guilioni et al., 2003).

5 Conclusion

In this 25 year-old walnut agroforestry system, tree shade was the major factor limiting pea yield, while tree-crop competition for water appeared limited. This was attributed to a good complementarity of the tree root system with the intercrop and consequent soil water reserves (*i.e.* deep soil combined with favourable rain regime). Under shade, yield reduction of winter pea was largely explained by the reduced number of pods per plant and reduced seed weight. Under spring drought, the yield potential of winter pea strongly decreased in all cropping conditions because of a reduced vegetative development. In agroforestry, the negative impacts of tree shade decreased under drought because biomass allocation shifted to the benefit of reproductive organs during pod set and grain filling. Under the most intense tree shade, crop yield was even higher under drought than in rainfed conditions. Although this study did not address the productivity of agroforestry at the whole plot scale, this experiment supports the hypothesis that agroforestry systems may be particularly resilient in case of early spring drought, which is an increasing concern with climate change.

Chapitre 3: Impact d'une sécheresse printanière sur la biomasse d'une culture de pois en agroforesterie et effets microclimatiques

Ce chapitre est une première version d'un article à soumettre prochainement.



Dans ce chapitre, nous cherchons à mieux comprendre comment la production de biomasse d'une culture de pois est maintenue à l'ombre des arbres en conditions de sécheresse (1). Pour cela, nous analysons l'effet relatif de la sécheresse sur les termes de l'équation de Monteith (par rapport à des conditions de pluviométrie "normale"), afin de mieux comprendre les processus éco-physiologiques impliqués. Dans un second temps, nous analysons l'importance des effets micro-climatiques pour voir si ils contribuent à réduire le stress hydrique de la plante (3).

Titre de l'article

Blanchet G, Dupraz C, Reyes F, Vincent G and Gosme M (in preparation) ***How trees may buffer drought impact on pea biomass in a Mediterranean alley cropping system ? Insights from a rainfall reduction experiment***

Abstract

Agroforestry systems are gaining more and more attention in the context of climate change as an adaptation strategy to face more frequent drought and/or arid climate. To test the influence of agroforestry conditions on crop productivity in case of a drought event, we performed a rainfall manipulation experiment on winter pea (*Pisum Sativum*) in a 25-year-old walnut-based alley cropping system in the South of France. Spring rainfall events were excluded (-136 mm) around pea flowering by means of rainout shelters in both agroforestry conditions (AF) and agricultural control (AC). We proposed a method to analyse the impact of drought on pea biomass according to the different terms of Monteith's equation. The impact of drought on pea biomass was lowered in AF conditions (-17% and +2% at the South (AF-S) and the North (AF-N) of tree line respectively) compared to full sun conditions (-32%). To better understand the ecophysiological processes at play, the radiation budget at the crop canopy level was analyzed. In all cropping conditions, drought reduced the duration of the pea crop cycle by accelerating pea senescence. However, senescence rates were particularly contrasted between AF-S and AF-N under drought. In particular, crop cycle duration was extended in AF-N compared to all other cropping conditions. Nonetheless, this apparent "stay-green" effect in AF-N did not offset the negative impact of drought on available PAR during pea development compared to full-sun conditions. The negative impact of drought on the fraction of intercepted radiation was also reduced in AF-N compared to AF-S and AC, reflecting a better foliar development under tree shade despite the water deficit. In all AF conditions, the estimated radiation use efficiency was improved under drought conditions, suggesting less stressful conditions for the pea crop. Measurements of components of the water balance revealed a limited influence of tree presence on soil water dynamics compared to AC, but a considerable reduction of the evaporative demand at the end of the crop cycle. Crop temperature measurements revealed lower pea crop temperature in AF-N but limited effects in AF-S, revealing microclimate contrasts between the two sides of the alley. This study provides additional evidence that agroforestry systems may help crops cope with drought events, but also draw attention to the fact that contrasted crop senescence may also emerge within an AF alley under drought because of microclimate heterogeneity.

Keywords: agroforestry ; rainout shelter ; water-stress ; climate change ; senescence

1 Introduction

Agroforestry (AF) is considered as a climate-smart agricultural strategy with a growing interest from farmers and policy makers (Debaeke et al., 2017; Verchot et al., 2007). The integration of woody vegetation within a crop and/or livestock farming system represents an ecological intensification of agricultural practices at the land level, because it diversifies the production while improving the efficiency of resource acquisition (Altieri et al., 2015; Malézieux, 2012; Malézieux et al., 2009). Agroforestry systems provide a wide range of ecosystem services, such as soil and water protection (Jose, 2009), biodiversity conservation (Torralba et al., 2016) and carbon sequestration (Cardinael et al., 2015a, 2018; Kay et al., 2019; Pardon et al., 2017). They may also represent a relevant adaptation strategy to climate hazards, if understory conditions could buffer the detrimental effects of heatwaves or drought events. Although the main relevant biophysical processes behind the adaptation potential of AF systems to climate hazards have been identified decades ago (Monteith et al., 1991), concrete and unequivocal evidence are still lacking.

At the landscape and/or the plot level, AF practices may sustain land productivity under resource-limited conditions because of higher resource use efficiency, which represent a valuable asset under arid climate or during a drought event. Overyielding in AF practices generally results from improved resource capture at the system level because of complementary use of the available resources (Cannell et al., 1996). In terms of light budget, the multi-layered structure of AF systems increases the interception of incoming light within space and the careful choice of complementary tree and crop phenologies also contributes to improving light capture over time (Black et al., 2015; Malézieux et al., 2009). In the understory, increased radiation use efficiency (RUE) of the intercrop, *i.e.* the proportion of intercepted radiation converted into biomass, may also contribute to improve the land productivity (Charbonnier et al., 2017). Regarding the water budget, AF systems are also considered as efficient agroecosystems that can increase the water use efficiency (Bai et al., 2016). In particular, tree shade may reduce water losses by reducing both soil evaporation (Jackson and Wallace, 1999) and runoff, thanks to the barrier effect of tree lines (Narain et al., 1997b) and an improved soil infiltrability (Anderson et al., 2009; Wang et al., 2015). The reduction of water drainage was also observed in the deeper soil layer, but mostly under tropical climates in coffee-based or cocoa-based AF designs so far (Cannavo et al., 2011; Schwendenmann et al., 2010). However, the water flows within an AF system are particularly complex to characterize (Bayala et al., 2015). In particular, whether understory conditions alleviate or aggravate crop water stress is likely to be context specific. On the one hand, atmospheric evaporative demand is obviously reduced when sufficiently-developed trees are close to crops (Kanzler et al., 2018; Messing and Akrimi, 1998), which could contribute to alleviate crop water stress. On the other hand, trees and crops may compete for soil water resources (Jose et al., 2000), though competition effects may be limited by both spatial and temporal complementarity in water uptake. Gao et al. (2018) reported that, during an extreme drought event on the Loess plateau in China, complementary uptakes between tree and crop root-systems were observed in a jujube-based alley cropping system installed on the thick Loess deposits. However, Smith et al. (1997) showed that complementary water up-

take between windbreak trees and millet in the Sahel was dependent on the capacity of the tree root system to access deep groundwater resources. Therefore, many of the biophysical processes at play in an AF system appear contextual, making relatively uncertain the yield stability of the intercrop under dry conditions.

At the canopy level, understanding the physiological functioning of the intercrop is also complex because the understory conditions in AF systems are spatially and temporally heterogeneous and affect all ecosystem fluxes (Malézieux et al., 2009). In full sun conditions, the analysis of the ecophysiological functioning of the crop usually rely on the equation proposed by Monteith (1972, 1977), which relates the increase of aboveground biomass over a given period to the product of the incident photosynthetically active radiation (PAR_{inc}), the radiation interception efficiency (RIE) and the radiation use efficiency (RUE). However, its application in shade conditions is less frequent, because it implies to characterize the light environment. Simple modeling approaches have been proposed to analyse the local radiative budget at crop canopy level by representing the structural design of AF (Zhang et al., 2018) or agrivoltaic systems (Marrou et al., 2013). In sparse and heterogeneous agroforestry tree stands, hemispherical photographs provide good estimates of the gap fraction (Bellow and Nair, 2003), which can be used to characterize the dynamic of incident PAR. The coupling between these approaches and the Monteith's equation can be a valuable tool to better understand which physiological processes are influenced in shade conditions.

From an ecophysiological point of view, analysing the outcome of co-occurring drought and shade stresses during crop development is challenging, because respective stresses lead to antagonistic responses. Shade conditions in AF may modify the rate of appearance of reproductive phenological stages by reducing the photothermal quotient (Inurreta-Aguirre et al., 2018), and senescence processes may be delayed under shade (Mae et al., 1993). On the contrary, drought conditions tend to shorten the crop cycle duration and induce earlier senescence (Farooq et al., 2017). In terms of leaf development, light reduction may delay the leaf development and/or decrease the leaf area to a certain extent (Zhang et al., 2018). However, foliar reduction may be partially or fully compensated by an increase of the specific leaf area (SLA), a shade tolerance strategy adopted by a wide range of annual species to improve light interception while optimizing leaf carbon allocation (Gommers et al., 2013). On the contrary, a decrease of SLA is generally observed under water deficit as a consequence of lower leaf expansion rate and indirectly enhances water use efficiency (Poorter et al., 2009; Wellstein et al., 2017). Tardieu et al. (1999) showed that the outcome of water and light deficit on SLA will mostly depend on the respective timing of each stress, relative to leaf cell division or leaf cell elongation. Finally, the RUE of a crop may be positively influenced by a higher proportion of diffuse radiation encountered under shade conditions (Sinclair et al., 1992), or negatively by alterations of the photosynthetic processes due to water stresses (Monteith, 1977). Therefore, tolerance to drought stress in understory conditions still remains a field of research to explore (Valladares et al., 2016), especially in temperate and mediterranean AF systems. Further research is required to evaluate how AF conditions may help to mitigate drought impacts on the intercrop from an ecophysiological perspective.

The present study continues the work of Blanchet et al. (2021), who performed a rainfall manip-

ulation experiment in a walnut-based alley-cropping system in the South of France. They showed that the negative impact of tree shade on pea yield was alleviated in case of spring drought because of i) a limited tree-crop competition for water resources at the plot level and ii) the modification of biomass allocation between vegetative and reproductive organs at the plant level. In particular, early drought reduced the vegetative development of pea crop, and hence tree shade impacted less the biomass allocation of pea toward grains. Positive compensation effects related to pod set and grain filling were observed when both tree shade and drought were co-occurring. This first analysis epitomized the importance of developmental adjustment in response to stress. In the present follow-up study we focus on overall growth pattern, *i.e.* how total biomass accumulation over time was altered by the combination of light and water availability. To better characterize and understand the various growth trajectories, we propose to i) study the effect of an experimental drought on pea biomass dynamics and crop cycle duration, ii) analyse the drought effects on pea radiation budget and iii) evaluate the potential of microclimate effects in AF to alleviate pea water stress. In particular, we hypothesized that:

1. tree shade delays pea senescence, which contribute to offset the negative effects of drought on pea radiation budget
2. tree shade sustains radiation interception efficiency under drought by improving pea canopy development
3. understory microclimate contribute to alleviating pea water stress in case of drought

2 Materials and methods

2.1 Experimental site and rainfall manipulation experiment

A rainfall manipulation experiment took place in 2018-2019 on plot A2 at the Restinclières Farm Estate, a long-term monitored experimental site on alley-cropping practices located in the South of France (Prades-le-Lez, 43°42'15.9''N, 3°51'4"E). On this specific plot, monocropping (agricultural control - AC) and alley cropping (agroforestry - AF) conditions are compared. In the AF modality, hybrid walnut trees (*Juglans nigra* × *regia, var. NG23*) were planted in 1995, forming 13 m wide East-West orientated alleys. Tree stand density was 93 tree.ha^{-1} in 2018, with trees exhibiting an average height of 10.9m (SD = 2.3 m).

We monitored the impact of an experimental drought on crop development in AC and two positions in AF, namely at the North (heavy shade) and at the South (light shade) of the tree line. The monitored quadrats in AF were all at the same distance from the tree line (3.5 m) to ensure that belowground tree-crop interactions would be uniform. Replications in AF were chosen to ensure comparable shading conditions between rainfed (CTL) and rain-excluded (EXC) quadrats. Individual hybrid walnut trees can be early or late leafing, with up to 6 weeks difference between the earlier and the later. We chose walnut trees with similar phenology and canopy size (based on

hemispherical pictures analysis, performed prior to the experiment) to ensure that CTL and EXC quadrats were in very similar conditions in each replication. Although the cropping conditions were not fully randomized in this experimental design, soil texture sampling and analysis revealed homogeneous soil conditions between AC and AF in the crop-rooted soil layers (as detailed in Blanchet et al. 2021). This resulted in 40 monitored quadrats (8 in AC and 32 in AF). 20 mobile rainout shelters (15 m^2 each) were installed over half of the quadrats, in each block, resulting in a paired design (pairs of EXC + CTL, within each of the North/South sides of each of the 4 AF blocks, pairs of EXC + CTL within 4 AC blocks). Rainfall exclusion was performed during 4 rainfall events (Figure III.1), spanning from 115th day after sowing (DAS) (*i.e.* on 5th of April) to 158th DAS (*i.e.* on 18th of May). Rainfall exclusion started before pea flowering and ended slightly after the apparition of the first pods. At harvest, cumulative rainfall between rainfed (CTL) and rainfall-excluded (EXC) conditions differed by 135 mm. One quadrat in EXC was removed from the study, due to shelter leak. The experimental design of this experiment is fully described in Blanchet et al. (2021).

2.2 Crop development monitoring

In 2018-2019, winter pea (*Pisum Sativum var. Dexter*) was sown on 11th of December, just after 30 cm deep ploughing. Emergence occurred uniformly in all quadrats around 42th DAS (on 22th of January), and pea plant density was subsequently manually standardized at 80 pea plants.m^{-2}, to limit any effect related to sowing heterogeneity. Plant biomass samplings were performed 4 times during the cropping season: 1) on 104th DAS, 2) on 139th DAS (*i.e* the beginning of flowering), 3) on 167th and 176th DAS (at the end of the seed abortion stage in CTL and EXC respectively) and 4) at harvest. Harvest was performed once pea reached its maturity, thus it was adjusted to each cropping conditions and rainfall regime (Table 1). Rainout shelters' size constrained the amount of plant material that could be destructively sampled, therefore plant biomass was evaluated on a 1 m^2 quadrat at harvest, while intermediate samplings were performed on a 0.25 m^2 sub-quadrat, relatively close to the main quadrat. Samples were oven-dried at 60°C.

Pea phenology, leaf area development and leaf greenness duration were monitored all along the cropping cycle. Pea LAI dynamics was monitored according to the plant cover rate (and a site-specific regression with LAI) before the maximal leaf development and then with a plant canopy analyser (LAI 2200, LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska). Phenological observations were performed on a weekly basis during the flowering period according to the BBCH scale (Hack et al., 1992). Daily LAI was estimated using linear interpolation between each observation date. Because the pea variety chosen in this experiment is an afila cultivar (*i.e.* pea stipules are deprived of leaflets which are replaced by additional tendrils), leaf area loss was limited during senescence. Therefore, daily LAI after the last observation was considered as constant until harvest. To capture the decay of plant greenness after flowering and until senescence, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was monitored from 151st DAS to 183rd DAS. At harvest, missing NDVI values were supposed to be equivalent to the lowest value observed in each cropping system. Measurements

were performed with a GreenseekerTM Handheld Optical Sensor Unit (Trimble, Sunnyvale, CA, USA).

2.3 Characterization of plant water stress

Soil water content (SWC) was continuously monitored from flowering to harvest using time-domain reflectometers (TDR) sensors (CS650, Campbell Scientific, USA). Four soil pits (2 in AC and 2 in AF-S) were dug at the end of October 2018 to install horizontally TDR probes at 50, 150 and 250 cm depth before consequent rainfall events (to allow disturbed soil to subsequently settle) and ploughing. Because digging deep soil pits in AF is particularly intrusive and implies heavy logistics, soil pits in AF were limited to the South of tree lines. Each soil pit extended below the future location of both rainfed and rain-excluded quadrats to monitor SWC under both rainfall regimes. Shortly after sowing, additional TDR sensors were installed at 20 cm depth to gather data in the plough layer. Because the rooting depth of pea did not exceed 100 cm (according to *in-situ* evaluation at the end of May), SWC was only considered at 20 and 50 cm depth. Calibration of TDR signals to estimate SWC are described in Blanchet et al. (2021).

To evaluate the influence of AF conditions on the evapotranspirative demand, absolute differences in air temperature, vapour pressure deficit (VPD) and wind speed (WS) were quantified between AC and AF. Anemovanes (Young 05103, Campbell Scientific, USA) and HMP 155 probes (Campbell Scientific, USA) were installed in AC and in 2 locations in AF (see supplementary materials - Figure E.1).

Pea canopy temperature was measured with copper-constantan thermocouples from 150th DAS to harvest. In total, 24 thermocouples were set-up in 12 quadrats distributed within 4 blocks (2 in AC and 2 in AF). In each quadrat, two plants were randomly chosen and equipped with one thermocouple. Hot junction of each thermocouple was gently inserted in plant tissue, at the basis of a stem leaf located at the top of a pea crop canopy. At installation, a small drop of medical silicone glue was applied around the insertion area to maintain the hot junction in place in the soft pea plant tissue and medical tape was wrapped around pea stem and thermocouple's wires beneath the monitored leaf to guarantee a stable installation of the sensor along the monitoring period. Quality of the connection between thermocouple and pea leaf was checked once every week.

2.4 PAR radiation fluxes at the canopy level

Daily incident photosynthetic active radiation (PAR_{inc}) in all quadrats was estimated according to:

$$PAR_{inc}(t) = PAR_0(t) \times RTE(t) \quad (5)$$

where PAR_0 is the daily PAR measured in full-sun conditions and RTE is the local radiation transmission efficiency (RTE), defined as the ratio of incoming PAR reaching the understory crop over

incoming PAR in full-sun conditions (RTE = 1 in AC). Daily RTE was estimated with hemispherical photographs analysis in AF. Hemispherical photographs were shot on three distinct days (before budburst on 116th DAS, at the end of the short shoot growth on 183rd DAS, and at the end of the long shoot growth on the 219th DAS) on every AF quadrat to fully capture tree leaves dynamics. Image analysis was performed with WinScanopy (Regent Instruments Inc., QC, Canada) to compute daily incident PAR under the tree canopy and a theoretical daily incident PAR over the tree canopy. To account for the progressive tree canopy development, PAR_{inc} was then estimated 1) based on the leafless tree picture for the whole period between crop sowing and tree budburst, 2) according to a linear interpolation between the value obtained with the leafless tree and with the tree at the end of short shoot growth for the period between tree budburst and the end of short shoot growth and 3) according to a linear interpolation of the values between the second and the third photograph for the period between the end of short growth and the end of long shoot growth.

Daily intercepted PAR (PAR_{int}) was estimated according to the Beer-Lambert law, which relates the fraction of intercepted PAR (or radiation interception efficiency - RIE) in a canopy to the aboveground crop LAI according to:

$$PAR_{int}(t) = PAR_{inc}(t) \times (1 - e^{-k \cdot LAI(t)}) \quad (6)$$

where k is the light extinction coefficient, fixed as 0.58 for pea (Guilioni and Jeuffroy, 2010) and LAI(t) is the daily estimate of LAI.

Daily PAR_0 was measured over the whole cropping period with 4 PAR sensors (PAR-80, Decagon Devices, Pullman, WA) installed in AC. In addition, field measurements of daily RTE and PAR_{int} were also performed by means of 11 pairs of PAR sensors installed in both cropping conditions and rainfall regime (2,2,4,3 in AC-CTL, AC-EXC, AF-CTL and AF-EXC respectively) to evaluate the validity of the proposed approach. Sensors were placed respectively above- and below pea canopy in each pair of sensors and intercepted PAR was computed as the flux difference between the two sensors (Varlet-Grancher et al., 1989). Sensor set-up and evaluation procedure is fully described in supplementary materials (Figure E.1).

2.5 Data analysis

Data analysis was decomposed into three steps. In a first step, the effects of both cropping conditions and rainfall regime were analysed on crop growth, focusing on biomass increase and crop senescence. The effect of drought on pea biomass was tested for each sampling date in order to define the beginning of the study period. Then NDVI time series were analyzed to detect whether differences in senescence dynamics should be accounted for in the analysis of crop cycle duration. Paired difference tests were performed to detect the period during which the decrease of NDVI values was significant. A unilateral t-test was performed as long as the normality assumption was respected. Otherwise, a unilateral wilcoxon signed-rank test was performed. Then NDVI time series were analyzed to detect whether differences in senescence dynamics should be accounted for

in the analysis of crop cycle duration. Paired difference tests were performed to detect the period during which the decrease of NDVI values was significant. A unilateral *t*-test was performed as long as the normality assumption was respected. Otherwise, a unilateral wilcoxon signed-rank test was performed.

In a second step, the impact of spring drought regarding the canopy radiation budget was analyzed by decomposing Monteith's equation through logarithmic transformation (Marrou et al., 2013; Talbot et al., 2014). Monteith's equation relates the biomass increment with the crop radiation budget over a given period according to the following equation (Monteith, 1972, 1977):

$$\Delta DM = \Sigma PAR_{inc} \times \overline{RIE} \times \overline{RUE} \tag{7}$$

where ΔDM is the biomass increment, ΣPAR_{inc} is the cumulated incident PAR, RIE is the radiation interception efficiency and RUE is the radiation use efficiency. In order to compare the effect of drought on the crop radiation budget under various cropping conditions, this equation needs to be further decomposed to include i) the interception of light by trees in AF conditions and ii) the drought-induced senescence, that may shorten the crop cycle duration. More specifically, PAR_{inc} can be expressed as:

$$\Sigma PAR_{inc} = \Delta t \times \overline{PAR_0} \times \overline{RTE} \tag{8}$$

where Δt is the crop cycle duration in days, and $\overline{PAR_0}$ and $\overline{RTE}$ are respectively the mean daily PAR_0 and RTE over the considered period. Overall, each terms of the Monteith's equation were calculated for each quadrat as follows:

$$\overline{PAR_0} = \frac{\Sigma PAR_0(t)}{\Delta t} \qquad \overline{RTE} = \frac{\Sigma PAR_{inc}(t)}{\Sigma PAR_0(t)}$$

$$\overline{RIE} = \frac{\Sigma PAR_{int}(t)}{\Sigma PAR_{inc}(t)} \qquad \overline{RUE} = \frac{\Delta DM}{\Sigma PAR_{int}(t)} \tag{9}$$

In order to evaluate the impact of drought on pea production in terms of radiation budget modification, a response ratio can be computed between the values observed in EXC and CTL, according to the paired design. In this experiment, quadrat pairing aimed specifically at ensuring that incoming radiation and tree-crop interaction could be considered similar between rainfed and rain-excluded quadrats (*i.e.* same orientation relative to the tree line, same size and phenology of trees, see Blanchet et al. 2021). Therefore, a relative ratio was defined as :

$$RR(variable) = \frac{variable_{EXC}}{variable_{CTL}} \tag{10}$$

Then, equations 3 and 4 were combined, yielding to:

$$RR(\Delta DM) = RR(\Delta t) \times RR(\overline{PAR_0}) \times RR(\overline{RTE}) \times RR(\overline{RIE}) \times RR(\overline{RUE}) \tag{11}$$

By applying logarithmic transformation, equation 7 can be further transformed into a sum rather than a product, where each term of the equation corresponds to the respective contribution of each process. When such a transformation is applied, improvement or deterioration of a process in drought conditions is respectively indicated by positive and negative values while the absence of any effect is reported by a null value.

A sensitivity analysis was performed on the proposed decomposition to evaluate the influence of various time thresholds used for delimiting the end of the photosynthetically active period of the crop cycle. We compared the outcome of the analysis whether harvest dates or NDVI thresholds were used to define the end of the crop cycle. Harvest was performed as a "technical" date to collect all samples from a given modality within a single day, despite the variability of senescence that was observed in the field. Then, based on this sensitivity analysis, one single threshold was considered for the analysis of the canopy radiation budget. To analyse the impact of drought on the respective terms of Monteith's equation, two-tailed *t*-tests were performed to evaluate whether the contribution of the log-relative variable was significantly different from 0. If normality assumption was not respected, then a Wilcoxon's signed rank test was performed. The overall procedure is synthesized in Figure III.1.

Finally, crop temperature measurements were performed to apprehend how pea crop responded to the overall modification of local microclimatic conditions and soil water availability induced by the presence of trees. Sensor recordings were averaged for a given cropping condition and rainfall regime in the case of crop temperature measurements. Because of the high number of thermocouples, time series consistency was first visually checked within a given quadrat and outliers were discarded. In order to apprehend both intra- and interday variability over the considered period, timeline heatmaps were drawn. This type of graph allows representing time series as the superposition of two temporal patterns (here a daily pattern and a seasonal pattern). All statistical analyses were performed with the R software (R Core Team, 2020) and figures were created with the ggplot2 package (Wickham et al., 2020).

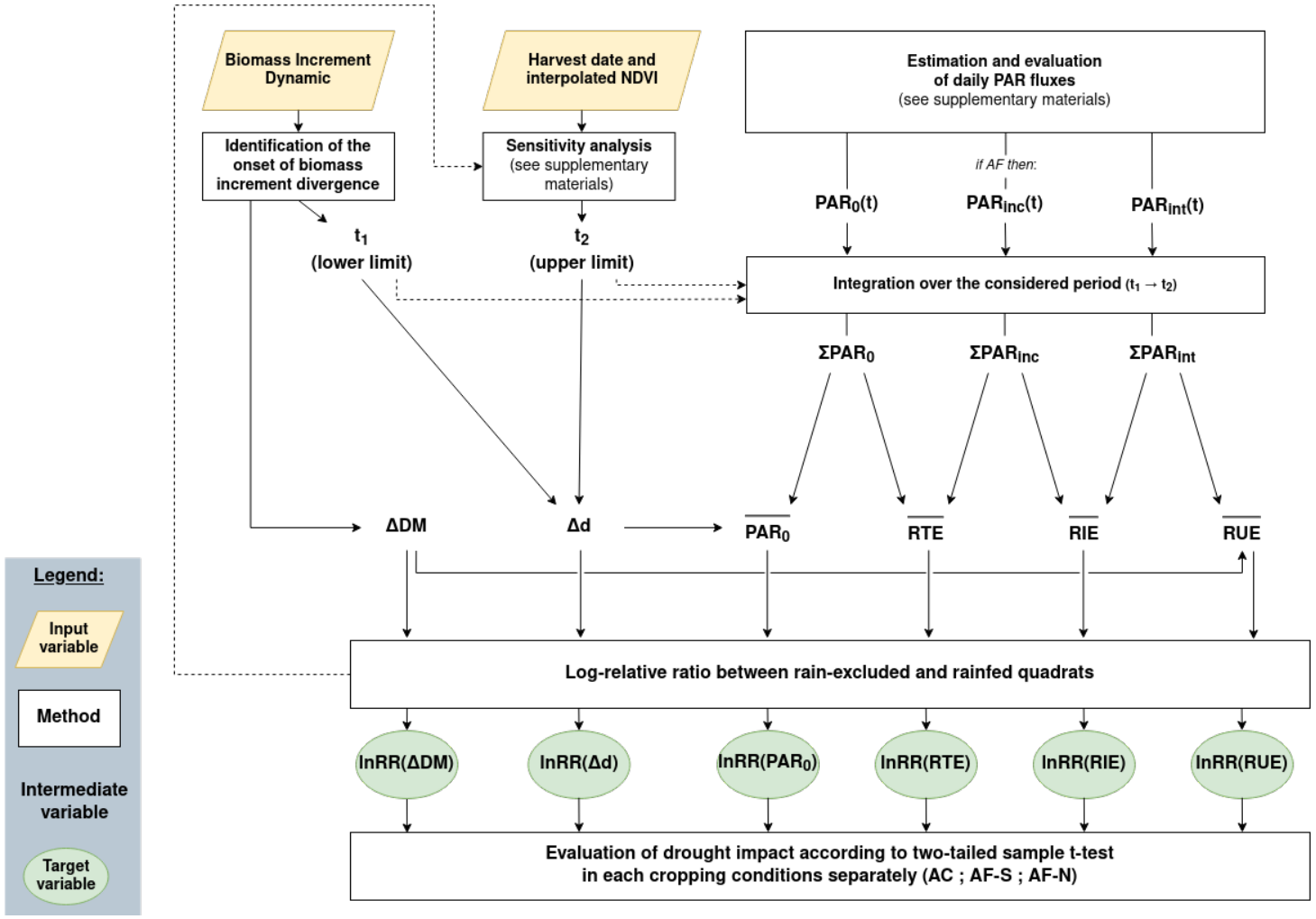


Figure III.1 Flowchart of the proposed approach to analyse the drought impact on pea biomass increment and PAR radiation budget in an agroforestry (AF) system leaning on Monteith's approach.

3 Results

3.1 Impact of rainfall regime on soil water availability

Soil water availability decreased in EXC relative to CTL with the successive rainfall exclusions, but lower soil water availability was observed in CTL at the end of the pea reproductive period (Figure III.2). SWC was strongly reduced in EXC from the first rainfall exclusion at 20 cm depth, while the effect of rainfall exclusion became perceptible at 50 cm depth from the 3rd rainfall exclusion. Surprisingly, SWC was higher in EXC than in CTL by the end of the rainfall exclusion. SWC became progressively lower in CTL at the end of the cropping period, around the 170th DAS, in both soil layers and cropping conditions.

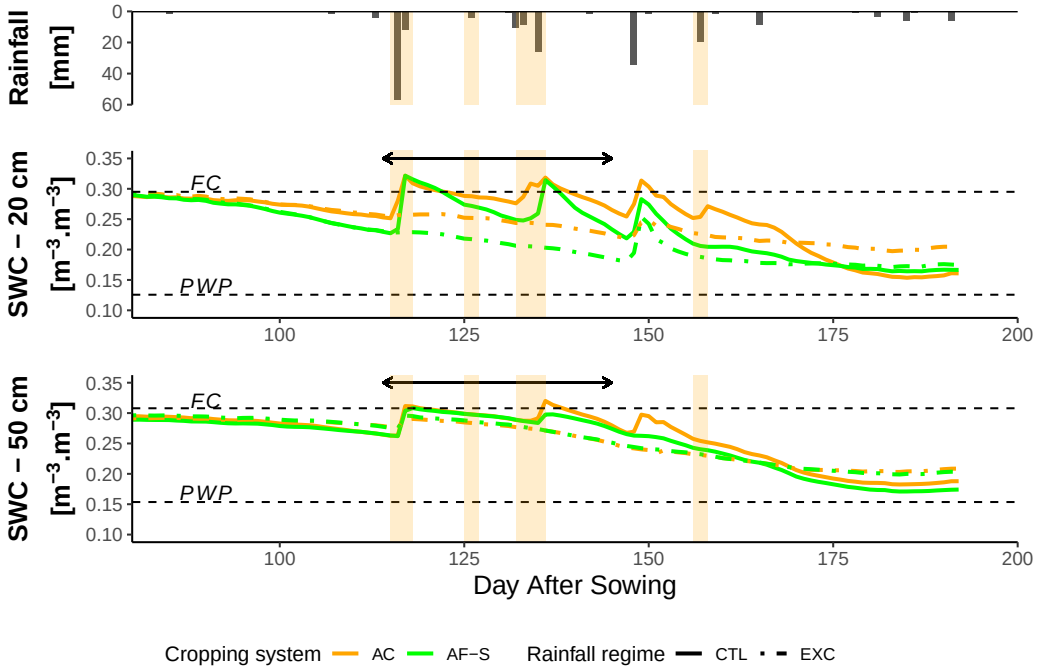


Figure III.2 Mean dynamics of soil water content in rooted soil horizons (20 and 50 cm deep) according to two cropping conditions and rainfall regimes, from pea crop emergence to harvest. Horizontal dashed lines indicate respectively field capacity (FC) and permanent wilting point (PWP), calculated according to Rawls et al. (2003). Orange rectangles represent rain-excluded periods. Horizontal arrows indicate tree budburst period.

3.2 Pea biomass

Total biomass was not significantly different between cropping conditions nor between rainfall regimes before pea flowering (Figure III.3), even though rainfall exclusion started 24 days before flowering (Figure III.2). Significant effects of cropping conditions and rainfall regimes were observed for the biomass increments between flowering and the end of final seed stage abortion (FSSA) (p=0.006 for rainfall regime, p=0.006 for cropping conditions) and between FSSA and harvest (p=0.009 for the interaction between cropping conditions and rainfall regime). At harvest, the negative impact of drought on pea biomass was buffered in AF. Rain exclusion reduced mean DM at harvest by -246.0 ± 71.0 g.m^{-2} in AC (- 32%), while the reduction amounted to only -84.9 ± 117.0 g.m^{-2} in AF-S (-17%) and biomass was even increased in AF-N (+19.1 ± 80.8 g.m^{-2}) (+2%).

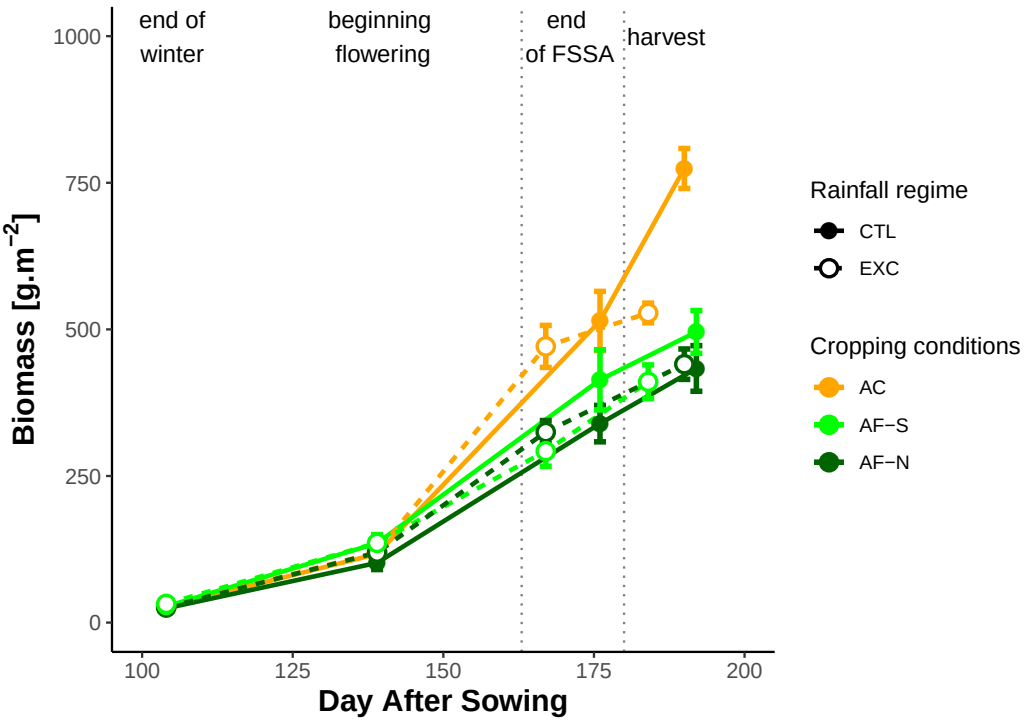


Figure III.3 Dynamics of total biomass of pea crop according to cropping conditions and rainfall regime. Error bars feature standard error of the mean.

Considering only the biomass increase during the reproductive period (from flowering to full senescence), AF conditions buffered the impact of drought compared to AC (Figure III.3). The log-relative change of biomass increment related to drought was significantly negative in AC (p-value = 0.007 for an average lnRR(ΔDM) = -0.479), indicating a strong negative impact of drought on biomass increment in this period, while this impact faded progressively in AF along the shade conditions according to the position relative to tree-line (AF-S: average lnRR(ΔDM) = -0.304, p=0.048; AF-N: average lnRR(ΔDM) = 0.018, p>0.05).

3.3 Crop NDVI dynamics

NDVI dynamics highlighted an earlier senescence in case of rainfall exclusion (Figure III.4). The onset of NDVI decrease was clearly contrasted between the two rainfall regimes: NDVI started to significantly decrease around the 155th DAS in EXC while it occured about 2 weeks later in CTL, around the 168th DAS. NDVI responses in AF differed to some extent. In AF-S, NDVI dynamics were overall similar to AC, although a quicker decrease was observed under EXC conditions. In AF-N, decrease of NDVI values appeared delayed compared to both AC and AF-S, especially under EXC conditions. As a consequence, the contrast between the NDVI dynamics between AF-S and AF-N increased under EXC.

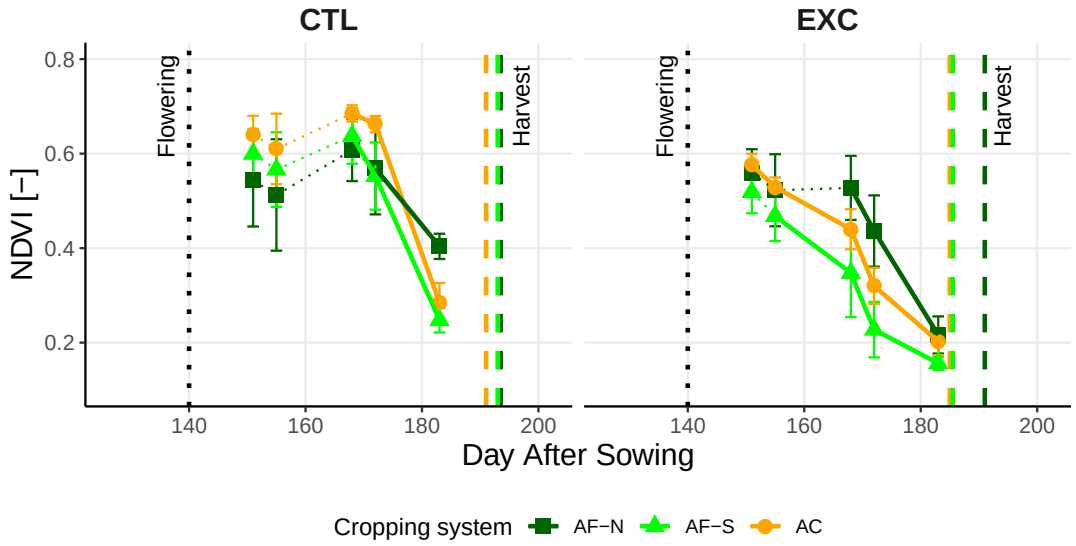


Figure III.4 Dynamics of pea crop NDVI according to rainfall regime and cropping conditions. Errors bars feature standard deviation. Between observation points, solid lines indicate significant variation(p-value < 0.01) between the two dates, while dotted lines suggest non non-significant variation. Colored dashed vertical lines indicates harvest dates.

Using NDVI values to detect the onset of crop senescence rather than using the actual harvest date only had a moderate influence on the interpretation of drought impact on the crop radiation budget during the reproductive period (Figure III.4). The integration period (Δt) markedly differed whether harvest dates or different NDVI thresholds were chosen, as choosing a NDVI threshold shortened more or less the integration period depending on the chosen threshold (Figure E.5.A). The use of NDVI values to define the end of the photosynthetically-active period instead of the harvest date increased the contrast of lnRR(Δt) between AF-S and AF-N, but increased the mean contribution of lnRR(RUE) (Figure E.5.B). On the contrary, the other terms of the log-relative decomposition were hardly affected by the choice of the NDVI threshold. We used the lowest NDVI threshold (0.20) in the following analysis, because it compromised between keeping the end of the integration period as close as possible to harvest dates, while better reflecting the variations of

pea greenness duration observed in the field.

3.4 Drought impact on crop radiation budget

The estimation of daily incoming PAR based on RTE coefficients derived from hemispherical photographs gave good results (RMSEP = 1.47 $MJ.m^{-2}$; rRMSEP = 25.49%) (Figure E.3). A good agreement between estimated and measured intercepted PAR was also observed (RMSEP = 1.22 $MJ.m^{-2}$; rRMSEP = 23.69%) (Figure E.4), though the agreement was better in CTL conditions (RMSEP = 0.93 $MJ.m^{-2}$; rRMSEP = 17.51%) than in EXC conditions (RMSEP = 1.50 $MJ.m^{-2}$; rRMSEP = 30.04%). According to PAR sensors, daily estimates of intercepted PAR in EXC tended to be overestimated in AF-S, while they were underestimated in AC. Nevertheless, field observations revealed higher clumpiness of crop canopy in case of low LAI, highlighting some limits in the estimation of measuring intercepted PAR. The impact of such an aspect on the results is further detailed in supplementary materials (Figure E.4).

According to the log-relative decomposition of the crop radiation budget (Figure III.5), the reduction of pea biomass under drought resulted from a reduction of lnRR(Δt), lnRR(RIE) and lnRR(RUE). Nevertheless, only lnRR(Δt) and lnRR(RIE) differed significantly from 0 (p-value = 0.003 and p-value < 0.001 respectively).

The reduction by drought of the duration of the reproductive phase (Δt) was more negative in AF-S (mean lnRR(Δt) = -0.361) than in AC and AF-N (mean lnRR(Δt) = -0.135 and -0.147 respectively) (Figure III.5). The RIE was significantly decreased under drought in AC and in AF-S (mean lnRR(RIE) = -0.283 and -0.268 respectively), while the reduction was very low and non-significant in AF-N (mean lnRR(RIE) = -0.092). The impact of drought on the RUE observed in AF-S and AF-N was positive (mean lnRR(RUE) = 0.226 and 0.231 respectively) whereas it had a negative impact in AC (mean lnRR(RUE)= -0.060). Though a positive contribution was observed in AF, log-response ratios barely differed from null because of a high variability. Finally, the log-relative decomposition also revealed a positive impact of drought on RTE in AF-S, but the contribution was small (+0.102, p=0.007).

3.5 Microclimate in AF conditions and pea crop temperature

Tree budburst, which happened between 114th and 145th DAS depending on the block considered, impacted the dynamics of microclimatic variables involved in the estimation of the atmospheric evapotranspirative demand (Figure III.6). The diurnal pattern of air temperature differed progressively between AC and AF from the 140th DAS (Figure III.6.A.). In particular, air temperature in AF became warmer during nighttime (up to +1.1 °C) and cooler during daytime (down to -1.9°C) compared to AC. VPD also was modified after tree budburst, as it progressively decreased in AF during daytime (down to -0.46 kPa) (Figure III.6.B.). Finally, wind speed was also reduced (-36.6 % between flowering and harvest), mostly because of wind speed reduction during daytime (Figure III.6.C.).

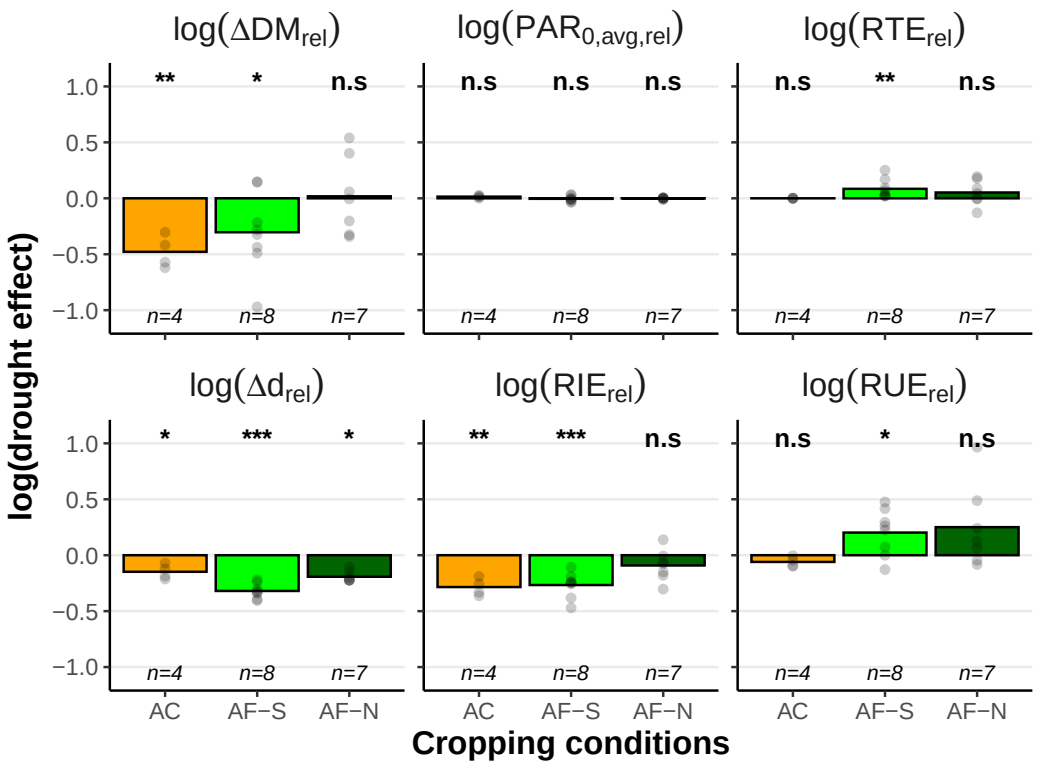


Figure III.5 Barplots of the log-relative effects of rain exclusion on the logarithmic decomposition of Monteith's equation from flowering to full senescence (considered as NDVI = 0.2). Stars indicate the significance of the difference to zero according to a two-sided Student's test (or a two-sided Wicolxon's test in case of non-normal distribution), *i.e.* $^{*}p \leq 0.05$, $^{**}p \leq 0.01$, $^{***}p \leq 0.001$.

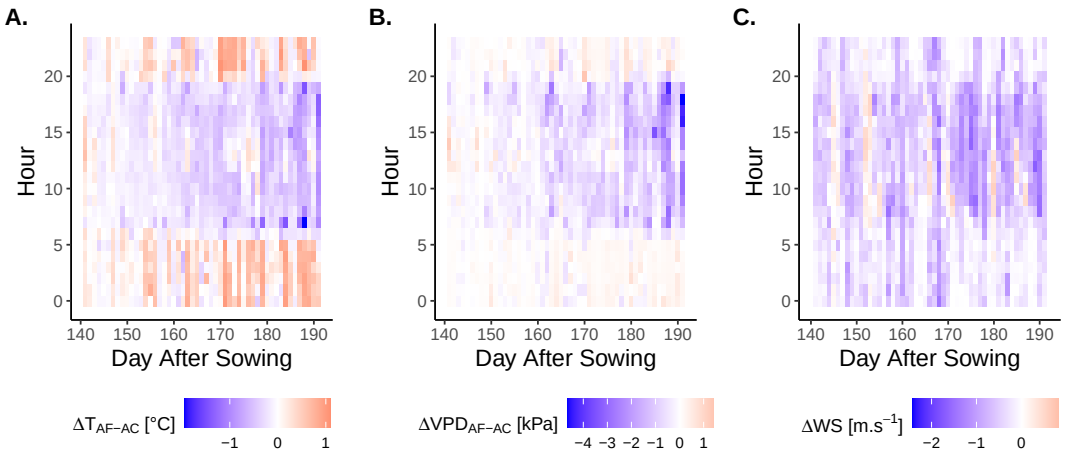


Figure III.6 Hourly time-based heatmap of the difference between AF and AC of air temperature (at 1.5 m) (A.), air vapour pressure deficit (VPD) (B.) and wind speed (WS) (at 2 m) (C.) from pea flowering until pea harvest.

Daytime pea leaf temperature from flowering to harvest decreased in AF conditions compared to AC conditions by respectively -0.62°C and -1.60°C in AF-S and AF-N on average (Figure III.7). The reduction of pea leaf temperature took place progressively over the monitored period and the strongest reductions were observed at the end of the crop cycle. Additional variability was also observed at the daily scale. In AF-S, the reduction of leaf temperature compared to AC was more pronounced during the morning hours (-1.59°C on average from 8:00 to 12:00), while stronger reduction was observed from midday until the end of afternoon in AF-N (-2.47°C on average from 12:00 to 18:00 PM). The response of pea crop temperature to drought showed a contrasted pattern among cropping conditions, though pea leaf temperature tended to increase in case of drought (+0.8°C on average, all cropping conditions considered together). In particular, some inversions of pea leaf temperature were observed between the rainfall regime: first, in AC, pea leaf temperature was higher in CTL than in EXC at the end of the crop cycle, while such inversion of crop temperature was not reported in AF ; at last, the increase of leaf temperature was more pronounced in AF-N than in AF-S, though the absolute leaf temperature remained lower in AF-N.

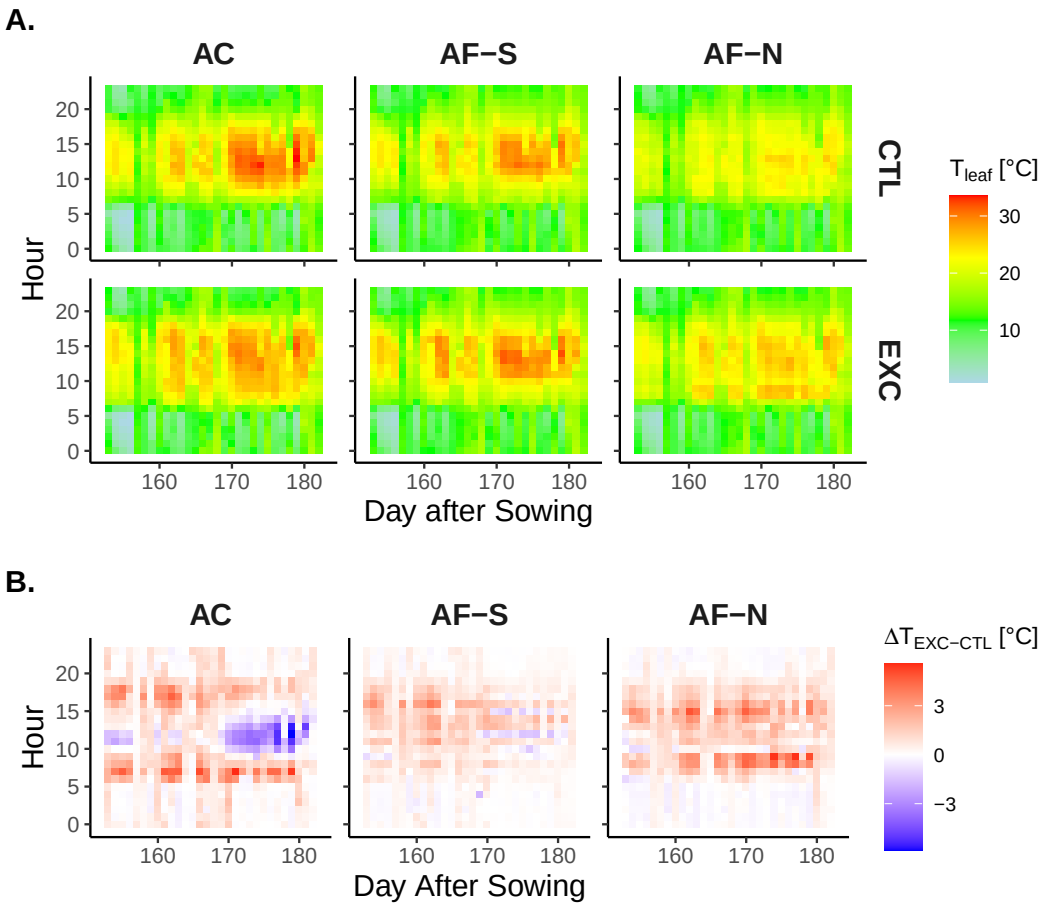


Figure III.7 Hourly time-based heatmap of pea leaf temperature across cropping conditions and rainfall regime (A.) and the relative impact of rain exclusion on pea leaf temperature (B.) from pea flowering until pea harvest

4 Discussion

4.1 Stay green effect in AF did not offset drought impact

Intense tree shade (AF-N) sustained pea canopy greenness compared to sun-exposed conditions, suggesting an extended duration of photosynthetic activity. This was particularly clear under drought (Figure III.4). The extension of crop canopy greenness and delayed maturity has been reported in various AF systems under dry climate, with delays spanning from a few days to several weeks, either with cereals (Inurreta-Aguirre, 2018; Sida et al., 2018) and/or legume crops (Mahieu et al., 2016; Temani et al., 2021). Results from this study suggested that the extension of pea canopy greenness depends on the light conditions, as this effect was not observed in the most sunlit side of the alley (AF-S). It is also noteworthy to mention that there was a good agreement between the delay in NDVI dynamics and the flowering duration (Figure E.6). In pea crop, there is a relationship between the progress of flowering and the onset of foliar senescence (Malik and Berrie, 1975). Pot experiments reported that water deficits hastened foliar senescence, while flower ablation delayed it (Lecoeur, 2010; Pic et al., 2002). Both effects may be involved under AF conditions, because soil water content was reduced earlier during the pea crop cycle relatively to AC (Figure III.2), while extended flowering and higher abortion of reproductive organs was observed under intense tree shade (Blanchet et al., 2021). Such opposite effects may explain the observed contrast in the onset of leaf senescence between the sunlit and shaded side of AF alleys. Processes involved in monocarpic senescence are complex and establishing a link with the reduction of resource (light and water) availability in AF systems requires additional studies.

Nevertheless, modified dynamics of pea canopy greenness in AF did not contribute to offset the negative impact of spring drought on the incident radiation budget per se (Figure III.5, lower left panel). Spring drought reduced the cumulated incident radiation budget during pea reproductive stages by shortening the crop cycle duration. In AF-S, the shortening of crop cycle duration was even exacerbated compared to AC and contributed to reducing the budget of incoming radiation. By contrast, the apparent extension of the pea greenness duration observed in AF-N sustained the budget of incoming radiation to a level similar to AC but did not improve it. In this experiment, the "*stay-green effect*" related to tree shade in AF-N presumably alleviated the impact of lower soil water availability observed in AF, while it did not happen in AF-S because of limited tree shade. These results considerably nuance our original hypothesis which stated that delayed senescence under tree shade would contribute to offset the impact of drought by improving the incoming radiation budget. At best, delayed pea senescence under tree shade contributed to limit the reduction of incoming radiation budget under drought similarly to full sun conditions.

Contrasted dynamics of pea canopy greenness in AF also shed light on the possibility of increased damages caused by birds. Because of bigger contrasts in seed maturity dynamics between sun-exposed and more shady conditions within an AF alley, drought conditions could expose farmers to a dilemma from a management perspective. Choosing one single harvest date makes the harvest logistics easier, but increases the time of exposure of ripe grains to bird predation in the

most sun-exposed AF locations. In this experiment, this unforeseen outcome was dealt with using protective nets, but such a solution does not appear realistic at field scale. In a broader perspective, the agronomic consequences of heterogeneous maturation should be carefully analysed before sowing crops that are particularly prone to delayed senescence under shade conditions, once trees are well-developed.

4.2 Tree shade may sustain light interception and improve light use efficiency in case of spring drought

In full-sun conditions (AC), the negative impact of drought on pea biomass was mostly related to the reduction of the fraction of intercepted PAR. Rainfall exclusion started before the maximal leaf expansion of pea crop, and strongly limited the vegetative development (Blanchet et al., 2021). Therefore, the RIE decreased drastically and turned out to be the main factor explaining the reduction of pea biomass in AC under drought (Figure III.5). Drought effect on the RUE of pea crop in AC was slightly negative, though not significantly so. In full sun conditions, the RUE of pea crop is generally considered stable across a wide range of water deficits (Martin and Jamieson, 1996), but alteration may occur under intense drought and/or combined with thermal stress (Lecoeur, 2010; Zain et al., 1983). Drought timing is also important in legume crops, and Tesfaye et al. (2006) showed that water deficit during flowering and pod setting decreased particularly the RUE of bean and chickpea, but not cowpea.

Intense shade conditions alleviated the impact of drought on the RIE, likely reflecting a relative improvement of pea crop canopy development (Figure III.5). In this study, interception was assumed to be a physical process, directly related to plant LAI dynamics through the Beer-Lambert's law. The lower impact of drought on the RIE in well-shaded AF conditions suggests an enhanced leaf area of plants in case of both shade and drought. Morphological leaf traits were not finely characterized at plant level in this study. However, some observations suggested an increase in specific leaf area (SLA) because straw biomass decreased significantly under shade conditions, while maximal pea LAI tended to increase, though not significantly so (Blanchet et al., 2021). Sgarbossa et al. (2020) reported that the SLA of various leguminous crops can be improved in AF conditions. The difference between AF-S and AF-N suggested that only shade at the North of the tree line was sufficiently dense to improve SLA, probably because of the earlier and stronger light reduction during pea leaf development.

Contrary to our expectations, the RUE of pea crop during the reproductive period tended to improve under drought conditions (Figure III.5). Higher RUE values were observed overall in AF-N (see supplementary material - Figure E.7). Zhang et al. (2018) also reported that the RUE of various annual crops grown in AF was improved and attributed this observation to the increased proportion of diffuse radiation. On the opposite, Sgarbossa et al. (2020) reported lower RUE values of soybean and bean crops grown in dense AF conditions when compared to full sun conditions. Although the improvement of RUE observed in AF remained limited, we did not find any study mentioning such effects in case of drought. The alleviation of thermal stress in AF was unlikely to

be a major factor affecting RUE in this experiment. This spring 2019 was chilly and mean daily temperature remained under 20°C (stay-green effect), a physiological threshold for heat damage in pea (Guilioni and Lecoeur, 2010). An improvement related to the diffuse proportion of light was also unlikely, because of the similarity of the light environment between CTL and EXC quadrats in this experimental design. Given the design and the context of this rainfall manipulation experiment, the possible processes involved in an improvement of the RUE specifically in AF conditions could therefore concern i) plant nutrient stress, ii) plant water stress and iii) contrasted biotic stress (*e.g.* disease or fungal attacks). Concerning the improvement of plant nutrition status under drought, this experiment lacks proper measurements to reject this hypothesis. Biological N fixation by leguminous crops may be improved in agroforestry conditions compared to full sun conditions, but plant N content was reported to remain similar (Querné et al., 2017; Nasielski et al., 2015). In a drought manipulative experiment, Nasielski et al. (2015) did not observe any improvement of soybean N status grown in droughted AF conditions.

4.3 Contrasted effects of understory microclimate on plant stress

Soil and microclimate conditions in AF had antagonistic effects on plant water status. Soil water availability was relatively lower in AF compared to AC from early March onward (Figure III.2). However, this effect was restricted to the upper soil layer, and could reflect a limited tree-crop competition for soil water resources (Blanchet et al., 2021). In particular, the observed soil water reduction in AF was not exacerbated in case of drought in this rainfall manipulation experiment, either because of higher complementarity of tree water uptake during drought events (Gao et al., 2018), or because a possible experimental artefact related to the limited size of the rainout shelter relative to the tree root system (*i.e.* trees took up water out of the rain-excluded area). On the other side, local microclimate in AF changed progressively after tree budburst (Figure III.6), and microclimate modification decreased atmospheric evaporative demand, not only by reducing incident radiation, but also air temperature, VPD and wind speed, in line with previous observations in alley cropping systems (Kanzler et al., 2018; Lott et al., 2009). At the study site, air temperature reduction under tree canopy has been also reported (Gosme et al., 2016; Inurreta-Aguirre et al., 2018) and took place progressively after tree budburst. Tree canopy reduced understory air temperature (*ca.* -0.5 to -1.5 °C) during daytime by reducing incident radiation, while air temperature was warmer during nighttime (*ca.* +0.5 to +1°C), likely reflecting a greater interception of terrestrial longwave radiations. Due to the dependence of VPD to air temperature, VPD reductions were observed during daytime, in line with the observation of Kanzler et al. (2018). VPD reduction occurred quite late in the pea crop cycle, but with substantial reduction (from -0.2 to -0.4 kPa) at the end of the cycle. This could improve plant water status during the hottest days, at the end of the crop cycle, when soil water availability was low. Finally, with the exception of a few wind gusts that were accelerated, wind speed was considerably lowered in AF (from -0.5 to -2 $m.s^{-1}$). Therefore, despite the slight reduction of soil water availability, all the microclimate modifications observed under these 25-year walnut trees led to a reduction of the atmospheric evaporative demand, either from a radiative or an aerodynamic perspective. Large trees represent therefore

a valuable asset to improve plant water status in case of drought and could also limit thermal stress. Surprisingly, at the end of the crop cycle, soil water content appeared to be higher in the rain-excluded condition than in the control condition at 20 cm in AC and at 50 cm in both cropping systems (Figure III.1), suggesting a potential water conservation strategy of pea in the case of drought. This was confirmed by the reduction of the leaf area, the reduction of stomatal conductance (data not shown)[1] and earlier senescence. Leaf temperature is generally considered as a proxy of plant water status, because plant evaporative cooling reflects leaf transpiration (Lambers et al., 2008a). At the end of the crop cycle in AC (and to some extent in AF-S), pea leaf temperature was higher in CTL than in EXC (Figure III.7.B), suggesting important stomatal closure in rainfed conditions and/or senescent (*i.e.* non-transpiring) plant material under drought at this moment. To our knowledge, this counter-intuitive result, but consistent with soil water dynamics, has not been observed earlier. It suggested a complex interaction between plant stomatal control, contrasted leaf area and different senescence dynamics. This result should be further confirmed by experimentation and tested with modeling.

AF conditions buffered pea leaf temperature under drought and more so under denser shade (Figure III.7). The cooling effect of tree shade potentially limits plant water stress. Pea leaf temperature differences were in line with the observations of Lott et al. (2009) who observed reduction of Maize meristem temperature about 2.5-6.0°C lower than for full-sun conditions, depending on shade intensity and seasonal rainfall. The decrease in the leaf temperature and in the difference between leaf-air temperature suggested lower water stress of drought-stressed pea crop in AF, in line with the trade-off between reduced soil water availability and reduced evaporative demand. However, the crop thermal regime appeared to be complex, with important diurnal variations. In particular, temperature buffering in AF-S appeared to be limited because of the sun exposition, compared to AF-N. In intense shade conditions (*e.g.* AF-N), lower plant water stress may result in better stomatal conductance. However, lower evaporative demand also limits the increase of crop temperature and therefore decreases its difference with air temperature. More detailed studies, coupling crop temperature and hourly monitoring of stomatal conductance are necessary to better understand plant water stress within AF alleys and to account for the shade dynamics.

An unforeseen effect of drought on pea health status was also observed and should be considered for further research on drought impact in AF. From pod set to harvest, pea plants grown in AF appeared to be more prone to powdery mildew (Blanchet, 2021)[2], most probably because the local environment was more humid due to the microclimate modification presented above. Similarly, Schroth et al. (1995) reported a stronger impact of fungi diseases on groundnut leaves in the most shaded part of an *Gliricidia*-based alley-cropping system. At the study site, field observations showed that drought-stressed plants were much less prone to powdery mildew, especially in AF conditions. In the drought treatment, pea leaf canopy was less moistened by rainfall events and difference in leaf-air temperature of pea also revealed a higher frequency of low or negative values in normal rainfall conditions, especially in AF-N (Figure E.9). This can induce higher condensa-

[1] In this thesis manuscript, these results are presented as supplementary materials - Figure E.10
[2] In this thesis manuscript, these results are presented in the discussion section (see Figure IV.3).

tion of water at the leaf surface (Lambers et al., 2008a). Under drought conditions, the sensitivity of understory crops to fungal diseases could decrease. In addition, the shortening of the pea crop cycle may also have contributed to reduce the possible impact of the disease. We cannot exclude that such an effect contributed to improving the RUE of drought-stressed pea in AF. In the end, this rainfall manipulation experiment revealed unforeseen interactions with the biotic environment (*e.g.* higher bird predation pressure, lower disease rate) that highlighted the complexity of the microclimate modification brought by AF systems. These aspects deserve higher attention in future research experiments in AF with well-developed trees.

5 Conclusion

In this study, we showed that agroforestry conditions buffered the impact of a spring drought event on pea biomass compared to full sun conditions. We illustrated that microclimatic conditions in alley cropping systems may represent a good asset to alleviate the impact of a drought event, an increasing concern in the face of climate change. By analyzing the radiative budget at the crop canopy level, we showed that pea productivity was sustained under drought through complex adjustments of the physiological processes to agroforestry conditions. Pea water stress was likely lowered under intense shade conditions, as suggested by delayed senescence and lower crop temperature. Microclimatic modifications were important in this alley cropping system with well-developed trees, but they were also contrasted depending on the position relative to the tree line. Higher attention should be paid to contrasts in crop senescence in different parts of the alley in alley cropping systems, at least with annual leguminous crops. Higher contrasts of crop senescence under drought may complicate harvest management. This problem could be possibly mitigated through management, either at the crop level (*e.g.* different crop varieties in different locations in the alley) or at the tree level (*e.g.* tree pruning in years when the crop is especially prone to this problem).

Part IV

DISCUSSION GÉNÉRALE

Discussion générale

1. Synthèse des résultats
2. Discussion des réponses apportées aux hypothèses de travail
3. Perspectives pour des travaux de modélisation
4. Conclusion

Les résultats obtenus dans le cadre de ce travail de thèse permettent de comprendre un certain nombre de processus à l'échelle sub-parcellaire, bien que cela ne représente qu'un seul type de système agroforestier, à un moment très restreint de la rotation agroforestière, sur une seule culture, une seule année et dans un contexte pédoclimatique particulier. Ces aspects constituent autant de limites pour cette expérimentation. La portée de ce travail de thèse reste donc modeste, mais elle soulève malgré tout un certain nombre de questions quant à l'étude des systèmes agroforestiers intra-parcellaires en cas de sécheresse. Les trois chapitres de thèse proposés sont indépendants et contiennent leur propre discussion, mais on cherchera malgré tout à discuter dans quelle mesure on a pu répondre aux hypothèses de travail soulevées et quelles sont les perspectives de recherches identifiées.

Pour rappel, les hypothèses formulées étaient :

- Chapitre 1 - H_0 : "*Les expérimentations de manipulation du régime de pluie au champ peuvent permettre de comprendre les processus impliqués dans la productivité des systèmes agroforestiers face à des épisodes de sécheresse*"
- Chapitre 2 - H_0 : "*La modification de l'élaboration du rendement de la culture intercalaire en conditions agroforestières permet de mieux résister à un épisode de sécheresse*"
- Chapitre 3 - H_0 : "*Les conditions agroforestières diminuent le stress hydrique de la culture intercalaire lors d'un épisode de sécheresse et maintiennent la production globale de biomasse*"

1 Synthèse des résultats

Dans le premier chapitre, nous montrons qu'une grande diversité de dispositifs expérimentaux a été proposée pour manipuler la ressource en eau, soit par exclusion des épisodes de pluie, soit par irrigation, afin d'étudier la réponse des systèmes agricoles et forestiers à des épisodes de sécheresse. Ces dispositifs peuvent être mobilisés pour identifier des leviers d'adaptation à l'échelle de la parcelle dans un contexte de changement climatique. Nous avons distingué différentes approches pour établir un scénario de manipulation de la ressource en eau et nous avons proposé une typologie des dispositifs d'exclusion de pluie existants. Nous avons également souligné l'importance de certains aspects techniques et logistiques lors de la mise en place de ces expérimentations. Ces dispositifs peuvent être utilisés pour approfondir les connaissances sur le fonctionnement des systèmes agroforestiers, mais nous montrons qu'il est nécessaire de prendre en compte un certain nombre de spécificités. En fonction des questions de recherche, nous montrons que différentes approches sont envisageables pour aborder l'hétérogénéité spatiale de ces systèmes. Par ailleurs, l'étude d'une modification du régime de pluie nécessite la prise en compte d'effets contrastés dans le temps puisque les cultures associées peuvent être de nature très différentes (plantes annuelles vs. pérennes) avec une dépendance différente à d'autres facteurs externes (*e.g.* nappe phréatique). Ces aspects modifient sensiblement le domaine de validité des résultats obtenus, qui nécessitent d'être clairement identifiés. Par ailleurs, les dispositifs nécessitent de prendre en compte à la fois

des aspects de gestion au niveau de l'arbre et de la culture. Manipuler la ressource en eau à l'échelle globale du système est donc une logistique lourde et il est parfois nécessaire de réduire la taille des dispositifs proposés. Ces aspects renforcent la notion de compromis entre ambition scientifique et mise en œuvre technique. Le chapitre 1 permet de répondre favorablement à la première hypothèse formulée, sous réserve de l'identification préalable du domaine de validité des résultats lors de la mise en place de l'expérimentation.

Dans le chapitre 2, nous montrons que l'élaboration du rendement de la culture de pois est à la fois modifiée par la disponibilité de lumière et la ressource en eau au sein d'un système agroforestier. Les conditions de culture au sein de la parcelle d'étude sont spécifiques puisque les mesures d'humidité du sol révèlent une bonne complémentarité des prélèvements en eau au sein d'une association noyer-culture d'hiver, à la fois au niveau spatial et temporel. Le débourrement des arbres réduit sensiblement la lumière disponible pour la culture de pois au moment de la floraison. En conditions de pluviométrie normale, nous montrons que l'ombrage réduit sensiblement la mise en place des gousses, avec un impact marqué sur le rendement de la culture par rapport aux conditions de plein soleil. Le remplissage des grains est lui aussi réduit en conséquence. Lors d'une sécheresse printanière, pendant laquelle une contrainte hydrique est présente avant la floraison, le développement foliaire de la culture (en pleine soleil) est fortement réduit par rapport aux plantes en conditions de pluviométrie normale. En conséquence, le nombre de gousses et de grains est réduit, avec un impact fort sur le rendement. En revanche, nous montrons que lorsque cet épisode de sécheresse a lieu en conditions agroforestières, la réduction du rendement de la culture de pois le long du gradient d'ombrage est réduite. L'analyse de l'indice de récolte révèle un fort effet d'interaction entre la lumière et la sécheresse : en conditions de sécheresse, l'indice est stable (tout système de culture confondu) alors qu'il décroît avec l'ombrage en condition de pluviométrie normale. Nous validons donc la seconde hypothèse. Cependant, les résultats ne permettent pas de conclure quant au rendement de la culture selon tout le gradient de conditions du système agroforestier.

Dans le chapitre 3, nous montrons que l'agroforesterie diminue l'impact négatif d'une sécheresse printanière sur la biomasse totale du pois. Pour analyser les effets de la sécheresse dans les différentes conditions de culture, nous avons proposé de décomposer l'équation de Monteith afin de mieux comprendre quels sont les processus physiologiques impliqués. L'analyse des termes de l'équation montrent que la diminution de l'impact de la sécheresse sur la biomasse du pois en agroforesterie s'explique par une mobilisation de plusieurs processus physiologiques. Nous montrons que la présence des arbres modifie la dynamique de la sénescence du pois, en particulier en conditions sèches. C'est un premier facteur explicatif qui a un impact sur la capacité de la plante à valoriser la lumière malgré les conditions de sécheresse. Par rapport à des conditions de plein soleil, la sénescence est retardée en conditions très ombragées (Nord de la ligne d'arbre, AF-N) tandis qu'elle est accélérée en conditions faiblement ombragées (Sud de la ligne d'arbre, AF-S). Malgré un allongement marqué du cycle de développement en AF-N, nous montrons que l'effet de la sécheresse réduit similairement l'énergie lumineuse disponible pour la culture en AF-N et en plein soleil. En second lieu, nous montrons que l'impact de la sécheresse sur la fraction de PAR

interceptée par le couvert de pois est réduit en agroforesterie par rapport à des conditions de plein soleil. Cela traduit un meilleur maintien de la surface foliaire en conditions agroforestières malgré les conditions sèches. Nous supposons que le développement foliaire de la plante de pois pourrait être modifié (*e.g.* effet de plasticité foliaire - SLA) en conditions d'ombrage, contribuant à limiter la fraction de lumière interceptée par le couvert. Enfin, nous montrons que l'impact de la sécheresse sur l'efficience de conversion lumineuse du couvert diffèrent entre l'agroforesterie et le témoin agricole. Bien qu'il est difficile d'analyser tous les processus sous-jacents à ces observations, nous détaillons les effets microclimatiques observés. Après le débourrement des arbres, nous montrons que le microclimat en agroforesterie permet de diminuer la demande évaporative. Nous évoquons également le fait que l'exclusion de pluie pourrait avoir réduit la pression de maladie sur la culture de pois en conditions agroforestières. Nous validons notre dernière hypothèse vis à vis du maintien de la biomasse, et les mesures microclimatiques et physiologiques confirment un effet positif vis à vis du stress hydrique de la plante. Malgré tout, cette hypothèse nécessite d'être nuancée car des contrastes sont observés des deux côtés de l'allée agroforestière et d'autres effets peuvent également avoir été mobilisés (*e.g.* réduction de la pression des maladies).

2 Discussion des réponses apportées aux hypothèses de travail

2.1 Comment faciliter l'étude de la réponse à la sécheresse des cultures annuelles en agroforesterie par manipulation du régime de pluie ?

Le changement climatique nécessite de considérer des événements de sécheresse de plus en plus extrêmes qui nécessitent des dispositifs expérimentaux ambitieux. Pour ces raisons, nous avons choisi de mettre en place des dispositifs d'exclusion totale des pluies. Ces dispositifs sont particulièrement compliqués à mettre en œuvre et impliquent une logistique lourde, mais nous considérons que ces dispositifs représentent une opportunité unique pour simuler des sécheresses intenses et évaluer le rôle que peuvent jouer les systèmes de culture en tant que levier d'adaptation. Le caractère "extrême" de notre scénario mériterait d'être mieux contextualisé à l'aide d'une analyse fréquentielle sur des données pluviométriques plus longues[3], mais l'analyse (simple) des cumuls pluviométriques montrent que le scénario testé reste largement dans la gamme de ces 25 dernières années pour la période entre Septembre et Juin. Malgré tout, la mise en place de ce type de dispositifs reste lourde, et l'étude des systèmes agroforestiers se heurte encore à un ensemble de difficultés. Les systèmes agroforestiers intra-parcellaires restent des systèmes encore peu étudiés et les moyens financiers alloués restent globalement limités. Les parcelles agroforestières actuellement équipées et suivies ne sont pas à proximité immédiate des infrastructures techniques des

[3]Voir par exemple l'analyse fréquentielle réalisée par (Misson et al., 2011) pour le site de Puéchabon à partir de données météorologiques de la ville de Montpellier obtenue pour la période 1762-2008.

stations expérimentales. C'est un aspect qui complique la mise en œuvre de ce type de dispositifs. L'automatisation de ces dispositifs serait un atout logistique indéniable, qu'il est nécessaire de considérer comme crucial dès la conception des dispositifs. Cela nécessite malgré tout des moyens techniques conséquents, ce qui risque de limiter également le nombre de dispositifs envisageable. La mise en place de ce type d'expérimentation nécessite donc la mise en place d'un programme de recherche coordonné, où le design expérimental proposé satisferait plusieurs équipes de recherche et où les résultats obtenus pourraient être mutualisés. Pour pouvoir aborder la diversité des systèmes agroforestiers et l'hétérogénéité des conditions en agroforesterie, des dispositifs robustes et mobiles (*i.e.* que l'on peut déplacer d'une année sur l'autre, au sein d'une même parcelle ou pour en explorer plusieurs, montés sur roues par exemple) pourraient être pertinents. Cela constitue un travail d'ingénierie à part entière, puisque les solutions techniques actuellement disponibles dans le commerce (*e.g.* serres ou systèmes bâchés mobiles) ne répondent pas pleinement aux contraintes logistiques de l'expérimentation de terrain.

Ce sont les agriculteurs qui mettent en place des systèmes agroforestiers, et étudier le maintien de la productivité de la culture intercalaire est un aspect essentiel. Considérer les effets de la sécheresse à l'échelle de la culture est un premier niveau d'étude pertinent. Mobiliser un ensemble de dispositifs, même assez petits, permet d'appréhender le gradient de conditions existantes dans les systèmes agroforestiers. L'analyse de photographies aériennes et de photographies hémisphériques sont des données très utiles pour caractériser les conditions de cultures et les hétérogénéités de la parcelle. Ce sont des données qui peuvent être facilement mobilisé, sans nécessiter des moyens logistiques très importants. Les dispositifs d'exclusion d'exclusion partielles des pluies, tels que ceux proposés par Nasielski et al. (2015) ou Gagné et al. (2019) représentent également une première opportunité pour étudier un certain nombre de processus (*e.g.* fixation de l'azote, élaboration du rendement,...) tout en étant simples à mettre en œuvre et peu coûteux.

L'irrigation est une autre option pertinente, en particulier en contexte méditerranéen. En s'appuyant sur la variabilité de la pluviométrie annuelle, elle permet d'étudier les effets de la sécheresse avec un certain confort logistique. Elle peut faciliter par conséquent la mise en place d'expérimentation sur le plus long terme, ce qui est particulièrement pertinent dans le cadre des systèmes agroforestiers. Bien que l'irrigation ne permet pas d'évaluer l'impact d'épisodes de sécheresse extrême (sauf si elle est présente au cours de l'année d'expérimentation), elle permet cependant de travailler plus facilement à l'échelle de l'arbre et de la culture, à l'image des travaux de Temani et al. (2021). L'analyse fréquentielle de la pluviométrie et des apports par irrigation devient alors l'élément qui permet de contextualiser l'étude dans le cadre du changement climatique et d'une augmentation de la fréquence des épisodes de sécheresse. Par ailleurs, cette approche serait très pertinente pour mieux comprendre les processus liés à la transpiration des cultures en milieu agroforestier, un aspect qui reste encore mal connu.

Enfin, les expérimentations de manipulation du régime des pluies ne sont pas les seuls outils à disposition pour étudier les effets d'épisode de sécheresse au niveau des systèmes agricoles, forestiers ou agroforestiers. Un certain nombre d'études travaillent en mobilisant des gradients spatiaux de pluviométrie (*e.g.* Baah-Acheamfour et al. 2016; Herold et al. 2014), bien que de nombreux effets

confondants existent et que l'analyse qui en résulte est moins fine au niveau des processus impliqués. Des parcelles agroforestières de démonstration ou expérimentales sont progressivement mises en place en France et en Europe. Une approche par réseau de parcelles représente également une opportunité de recherche à ne pas écarter non plus, même si une logistique spécifique et des protocoles expérimentaux harmonisés seraient à établir. L'étude des effets des sécheresses et plus largement du stress hydrique au sein des systèmes cultivés nécessite de diversifier les approches de terrain.

2.2 Renforcer la méthodologie pour mieux comprendre la réponse des cultures en contexte agroforestier ?

Les résultats présentés dans le cadre de ce travail de thèse ont fait face à l'enjeu de caractériser la réponse d'une culture dans un milieu hétérogène, où l'on tente de caractériser des effets liés à la fois à la modification du microclimat (lumière, vent, température...) et à la réponse d'une culture à la sécheresse. Cela soulève par conséquent un certain nombre d'enjeux méthodologiques.

Les résultats présentés se limitent à une seule distance de l'arbre (au Nord et au Sud de l'arbre), mais il révèle une diversité assez importante de conditions de culture différentes (des houppiers différents). Cela montre qu'en fonction de la zone où la parcelle agroforestière est implantée, une hétérogénéité peut progressivement s'installer (pour les raisons mentionnées en Matériel et Méthodes). La plupart des études en agroforesterie intraparcellaire présentent les résultats en fonction de la distance à l'arbre, à partir d'un design expérimental établi sur une large zone. C'est informatif vis à vis de la productivité global du système, mais une variabilité importante est observée au niveau des mesures (*e.g.* biomasse, rendement et ses composantes,...). Il est alors difficile de comprendre quels sont les processus impliqués. Dans ce travail de thèse, les variables mesurées ont été largement analysées en fonction de la disponibilité de lumière au cours du cycle de développement. Introduire la disponibilité de la lumière en tant que co-variable explicative semble particulièrement intéressant et reste étrangement encore peu mobilisé dans l'étude des systèmes tempérés. Étendre ce type d'analyse pourrait participer à mieux comprendre la contribution relative des effets liés à la compétition aérienne et souterraine. En particulier, au niveau aérien, la dépendance du rendement aux conditions lumineuses pendant certains stades phénologiques (voir point plus bas sur la notion de "période critique") semble une piste intéressante pour mieux appréhender les réductions de rendement observées chez les cultures annuelles en agroforesterie. La caractérisation de l'influence des gradients environnementaux en agroforesterie reste un enjeu méthodologique.

Les résultats présentés dans le cadre du chapitre 3 mettent en lumière la complexité des processus physiologiques mobilisés dans la réponse d'une culture telle que le pois. La décomposition de l'équation de Monteith proposée permet de synthétiser ces effets observés. Elle montre une fois de plus un intérêt dans les systèmes avec des conditions ombragées, où elle a déjà été mise à profit pour étudier la réponse de laitues cultivées sous des panneaux agrivoltaïques (Marrou et al., 2013). Le pois est une culture sensible au stress hydrique, ce qui semble expliquer également

pourquoi on observe des effets contrastés entre le Nord et le Sud de l'allée. L'intégration des effets du stress hydrique au niveau de la durée du cycle de culture dans la méthode de décomposition est un aspect nouveau. Mais caractériser la dynamique de sénescence n'est pas aisée lorsque les conditions sont particulièrement hétérogènes. Pour les cultures où des contrastes de sénescence importants peuvent apparaître, mobiliser le NDVI semble intéressant, mais c'est également une mesure intégrative qui prend en compte le sol et le LAI. Il est nécessaire de vérifier la pertinence de cette approche dans un contexte plus large.

Par ailleurs, l'évaluation des effets d'un épisode de sécheresse intense sur une culture en plein champ nécessite d'anticiper que l'on peut sortir du domaine de validité de certaines méthodes de mesure. Dans notre étude, la surface foliaire du pois a été fortement réduite après les exclusions de pluie. Pour l'estimation du LAI par méthodes optiques, nous sommes à la limite du principe de fonctionnement de certaines méthodes (*e.g.* capteurs PAR fixes). La faible disponibilité du matériel végétal à disposition n'a pas permis de pouvoir caractériser cela finement. Idéalement, il aurait nécessité de réaliser un point spécifique à ce niveau, éventuellement en mobilisant plus longtemps le taux de couverture dans ce cas de figure. Les mesures de température de culture par mesure infrarouge ont également fait face au même cas de figure. C'est pour cette raison que les thermocouples ont été préférés. Ces aspects méthodologiques sont importants pour obtenir des mesures fiables.

Enfin, la caractérisation du stress hydrique à l'aide des indicateurs classiquement utilisés en conditions de plein-soleil est questionnable. La température de culture est un indicateur fréquemment utilisé pour caractériser le stress hydrique (généralement en regardant la différence avec la température de l'air) puisqu'elle est liée à la capacité de transpirer de plantes situées en plein soleil. En revanche, en agroforesterie, la température de la plante est également influencée par les effets d'ombrage variable dans le temps et l'espace. Le bilan d'énergie local est modifié de façon complexe et affecte à la fois la température de la plante et sa capacité à transpirer. Pour que cette mesure reste pertinente dans le cadre d'une quantification du stress hydrique, il est nécessaire de réaliser des mesures de conductance stomatique. Il serait pertinent de réaliser pour quelques situations bien contrastées (du point de vue de la dynamique de l'ombrage) des mesures régulières au cours de la journée pour mieux comprendre les aspects dynamiques. Cela pourrait permettre de regarder comment la température et la conductance stomatique réagissent en conditions ombragées, afin de mieux caractériser ensuite les besoins en eau de la plante selon une approche résistive (voir point de discussion dans la modélisation). Il existe notamment un enjeu autour de la discrétisation temporelle des processus : ces mesures de terrain sont représentatives à un pas de temps court, tandis que les modèles actuels (*e.g.* HisAFe) travaillent à une échelle journalière. Rosati et al. (2020) soutiennent qu'il est important de se pencher sur ces aspects de discrétisation temporelle pour éviter des biais trop importants dans les approches de modélisation. Par ailleurs, des indicateurs plus intégrés du stress hydrique, tels que des mesures de ΔC13 ou des mesures de potentiel hydrique (de base ou à midi) sont des pistes méthodologiques à envisager pour faciliter les comparaisons entre les systèmes (ou les conditions) de culture.

2.3 Approches réductionnistes et importance du timing des stress pour l'étude du rendement en agroforesterie

L'approche proposée dans le deuxième chapitre semble particulièrement réductionniste[4], puisqu'elle évalue la réponse de la culture à travers la disponibilité de deux ressources : l'eau et la lumière. C'est fortement réducteur par rapport au fonctionnement des systèmes agroforestiers. Cependant, les résultats obtenus permettent de mieux comprendre un effet d'interaction entre ces deux ressources vis-à-vis de l'élaboration du rendement. La diminution de la variation du rendement de la culture de pois le long d'un gradient de lumière lors d'une sécheresse précoce est un résultat positif vis-à-vis des systèmes agroforestiers. Si ce résultat est à nouveau observé, il confirme le fait que les stress lumineux et de sécheresse ne sont pas nécessairement additifs. En particulier, les résultats obtenus insistent sur la nécessité de prendre en compte l'ordre d'apparition des stress hydriques et des stress lumineux vis-à-vis du cycle de développement de la culture intercalaire. Cet aspect semble affecter les effets d'allocation de biomasse à l'échelle de la plante, à minima pour une culture indéterminée telle que le pois. Après analyse des résultats présentés dans le chapitre 2, on peut reposer la question suivante : L'effet d'interaction sur le rendement en pois entre la lumière et la disponibilité réduite en eau correspond-il à :

- *une diminution de l'effet de la sécheresse en conditions ombragées ?*
- *une diminution de l'effet de l'ombrage en conditions de sécheresse ?*

Lorsque la question est posée telle quelle, il semble possible de formuler une interprétation dans les deux sens puisque les termes "ombrage" et "sécheresse" ne précisent pas clairement le moment d'apparition du stress sous entendu. On peut argumenter que le rendement du pois semble moins affecté par un épisode de sécheresse printanière lorsque la culture est en conditions ombragées. La pente de la régression entre le rendement et le gradient d'ombrage est en effet plus faible lors d'un épisode de sécheresse printanière qu'en condition de pluviométrie "normale" (Figure II.6). Cette formulation ne reflète pourtant pas l'ordre d'apparition des stress hydriques et lumineux pendant le développement de la culture de pois. Si l'on retrace l'ordre dans lequel la diminution des ressources disponibles a eu lieu (Figure II.3 et Figure III.2), on peut argumenter que l'exclusion de pluie ayant eu lieu avant que la canopée des arbres ne soit bien développée, c'est la modification du développement de la culture sous la contrainte d'un stress hydrique précoce qui a modifié l'effet d'un stress lumineux tardif sur le rendement en grain de la culture.

Cette différence dans l'interprétation de la causalité des facteurs reflète également l'importance de préciser le contexte dans lequel l'analyse est considérée. L'évaluation du rendement de la culture intercalaire est considérée en fonction du moment de la rotation agroforestière. L'ombrage est une propriété prévisible et intrinsèque des systèmes agroforestiers. La productivité de la culture intercalaire décline généralement au fur et à mesure que les arbres se développent et que

[4]Le terme réductionniste s'emploie ici par opposition à une approche holistique, qui considèreraient la réponse du système dans sa globalité. Dans l'étude des systèmes écologiques complexes, ces deux approches sont parfois opposées et sont sources de débats (Peters, 1991)



Figure IV.1 Effet "lisière" au niveau des panicules d'une culture de Sorgho le long d'une ripisylve dense (Prades-le-Lez, France) - la manifestation d'effets sources-puits sous l'effet de l'ombrage ?

l'ombrage s'intensifie. La baisse de rendement de la culture intercalaire peut être anticipée dans une certaine mesure. En revanche, l'occurrence des sécheresses n'est pas prévisible à l'avance, ce qui constitue une source de préoccupation pour les agriculteurs. Il semble raisonnable de dire que l'ombrage des arbres peut permettre de réduire l'impact d'une sécheresse précoce sur le rendement comparativement à un système en monoculture. Mais en considérant l'ordre d'apparition des stress hydriques et lumineux pendant le développement de la culture, on doit nuancer ce propos. L'analyse de la dynamique foliaire et des composantes de rendements, qui s'apparente à une analyse des relations source-puits, offre une autre interprétation intéressante. En imposant une diminution de la ressource en eau (par exclusion de pluie), le développement foliaire a été limité. Cela a réduit la durée de floraison, avec pour conséquence la réduction du nombre d'inflorescences à l'échelle de la plante. Dans ces conditions, le stress lumineux (à partir du débourrement des arbres) a eu un impact réduit pendant la période de floraison car le taux d'avortement des fleurs à l'ombre a sensiblement été réduit. Au final, un meilleur équilibre trophique entre les sources et les puits semble limiter la réduction du rendement observé à l'ombre. L'indice de récolte est une belle illustration de cet effet : dans le cas d'une sécheresse précoce, l'indice de récolte est stable le long du gradient d'ombrage, tandis qu'il décroit en condition pluviométrique normale. Le cadre d'analyse offert par les relations sources-puits semble particulièrement intéressant. Bien que conceptuel, c'est un cadre d'analyse générique, qui est utilisé pour étudier le développement de toutes les plantes. Par exemple, Wery (2005) s'appuie dessus pour proposer un cadre d'étude simplifié de la réponse des cultures indéterminées au stress hydrique. Dans nos campagnes, l'observation de certaines cultures à l'ombre, lorsqu'elles sont à proximité d'arbre ou de lisière, interpelle : on peut y observer parfois une forte réduction de la présence des organes reproducteurs tandis que les structures végétatives sont moins affectées (Figure IV.1) - cela souligne l'importance de considérer les processus d'allocation du carbone à l'échelle de la plante lorsqu'elles sont à l'ombre.

Pour mieux comprendre ces effets source-puits au sein des systèmes agroforestiers, il pourrait être pertinent de mettre en place des expérimentations simplifiées, pour mieux comprendre les effets d'interactions entre l'ombrage et la sécheresse sur l'élaboration du rendement des cultures annuelles. En utilisant une ombrière et des niveaux d'irrigation différents sur une culture de pois chiche, Verghis et al. (1999) a obtenu un effet d'interaction similaire à celui observé sur le pois dans le chapitre 2. L'utilisation d'ombrière a déjà été proposée pour étudier l'effet d'une dynamique d'ombrage similaire à celle des systèmes agroforestiers tempérés à base de feuillus (Artru, 2017; Dufour et al., 2013; Varella et al., 2011). Pour identifier les périodes sensibles des cultures annuelles, de nombreuses études mobilisent des ombrières pour déterminer la "période critique" de la culture (*e.g.* Arisnabarreta and Miralles 2008; Lake and Sadras 2014; Lake et al. 2019; Sandaña et al. 2009, 2012). Cependant, l'ombrage obtenu n'est pas réaliste des conditions agroforestières puisque i) la réduction de lumière n'est pas progressive et ii) l'ombrage est réalisé pendant une courte période (14 à 20 jours), avec un décalage de cette fenêtre entre les modalités expérimentales pour identifier le stade phénologique le plus sensible. Ces expériences restent malgré tout informatives et montrent le caractère critique de certains processus d'élaboration du rendement affectés par l'ombrage. Pour renforcer les connaissances sur les interactions ombrage-sécheresse au champ, ce type de dispositifs artificiels est pertinent. Bien qu'ils soient réducteurs, cela reste utile pour évaluer si les formalismes d'élaboration du rendement implémentés au sein d'un modèle de culture, tel que STICS, ou d'un modèle agroforestier, tel que Hi-sAFe, permettent de rendre compte des effets d'allocation de carbone à l'échelle de la plante (voir point de discussion plus bas). Cela s'apparente à une extension de la démarche proposée dans les travaux de thèse de Sidonie Artru (2017).

2.4 Bénéfices contrastés du microclimat en conditions sèches

Les analyses microclimatiques réalisées montrent que les systèmes agroforestiers bien développés permettent de réduire sensiblement la demande évaporative locale, mais la compréhension de l'ampleur spatiale de ces effets restent un enjeu. L'analyse des températures de culture montre que de fortes réductions au Nord de la ligne des arbres. Mais le régime de température des cultures est encore très contrasté à l'échelle de la journée entre les différentes positions de l'allée. Une étude étendue à l'échelle de l'allée entière serait particulièrement intéressante pour évaluer plus finement l'ampleur de ces effets. Des travaux par imagerie thermique (*e.g.* par acquisition drone) serait à ce propos intéressant, à l'image des travaux proposés par Juliette Grimaldi (2018). Les effets microclimatiques de l'arbre pour protéger les cultures à des aléas climatiques existent, mais les effets restent complexes et localisés. Il est nécessaire de mieux les comprendre pour pouvoir les mobiliser efficacement et de façon réaliste face à des épisodes climatiques intenses.

Le pois étant une culture sensible au stress hydrique, le retard de la sénescence est une belle illustration de la réduction du stress hydrique par la modification du microclimat local. Malgré tout, les résultats du chapitre 3 nuance aussi le rôle de la sénescence vis-à-vis de la performance globale du système. Les contrastes observées entre les deux côtés des allées cultivées peuvent



Figure IV.2 Effet "lisière" au niveau de la sénescence d'une culture de pois chiche. Photo prise par C. Dupraz en Juin 2009 au Domaine de Restinclières.

contribuer à augmenter le risque de perte en grain par ouverture spontanée (déhiscence spontanée) des gousses, ainsi qu'augmenter le temps d'exposition de la culture de l'allée à des ravageurs, tels que des pigeons. Avec une vitesse de maturation contrastée entre les deux côtés de l'allée, envisager une récolte unique à l'échelle de la parcelle nécessitent de différer celle-ci jusqu'à maturité des parties les plus tardives. C'est un aspect à ne pas négliger. Les observations de contrastes de sénescence ne sont pas les premières sur le site de Restinclières. Des observations similaires avait été réalisée sur le pois chiche au sein du Domaine de Restinclières avec des effets très contrastés du fait du caractère plus tardif de la culture (Figure IV.2). Il semble observé chez d'autres légumineuses annuelles, telles que la févérole (*e.g.* Temani et al. 2021). Par ailleurs, aucune mesure de la qualité du grain n'a été réalisée dans cette étude. Une pigmentation plus verte des grains avait été observée en conditions ombragées, quel que soit le régime de pluie expérimenté. Cela pourrait également avoir des conséquences au niveau agronomique.

2.5 Un microclimat qui interroge en conditions plus humides

Une conséquence inattendue de l'effet de la sécheresse ressort des observations réalisées sous le grand dispositif. La variété de pois (Dexter) est assez sensible à l'oïdium et des différences assez importantes quant aux taux d'incidence de cette maladie ont été observées entre le témoin agricole et l'agroforesterie (Figure IV.3). Par ailleurs, en condition d'exclusion, ce taux d'incidence de l'oïdium diminue dans toutes les modalités. C'est un résultat qui interpelle et souligne la nécessité d'envisager des suivis des maladies en système agroforestier où les arbres sont bien développés. A notre grande surprise, la littérature actuellement disponible fait très peu état de ce type d'observation, qui correspond pourtant à une préoccupation des agriculteurs vis-à-vis de ce type de

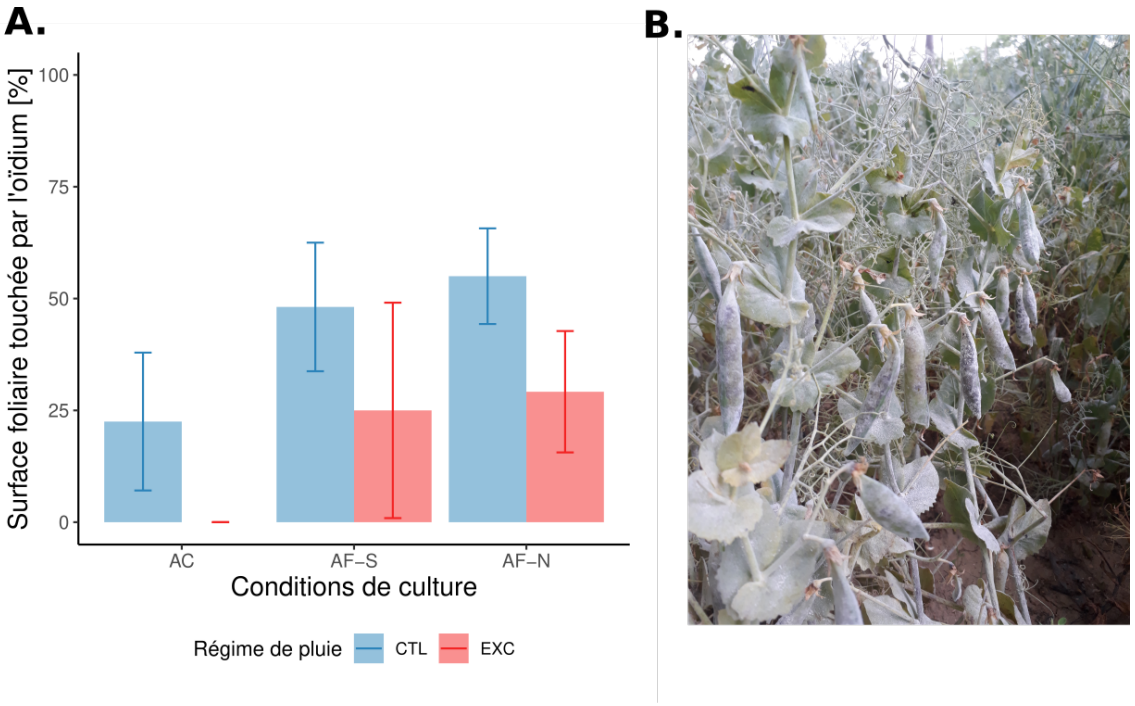


Figure IV.3 Taux d'incidence de l'oïdium sur le couvert de pois d'hiver selon les conditions de culture (TA : témoin agricole ; AF-S : Sud de la ligne d'arbres en agroforesterie ; AF-N : Nord de la ligne d'arbres en agroforesterie) et le régime pluviométrique (CTL : régime pluvial ; EXC : régime exclu) (a) et illustration d'une placette en AF fortement touchée par l'oïdium (b). Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Les mesures ont été réalisées sous le grand dispositif.

système. Une raison qui pourrait expliquer ce manque d'information concerne le manque de recul existant sur les systèmes agroforestiers tempérés avec des arbres bien développés. Des études existent en contexte tropical, mais principalement au sein de systèmes basés sur des plantes pérennes (cacaoyer ou caféier) (*e.g.* Barkaoui et al., 2019). A ce titre, le site de Restinclières représente une belle opportunité pour étudier ces effets. Dans le cadre d'une expérimentation de pluie, l'effet interpelle également. Plusieurs hypothèses sont formulées dans le chapitre 3 vis à vis du microclimat, mais elles nécessitent d'être confirmées avec des mesures additionnelles. En particulier, il semble important de tenter de découpler cet effet au niveau des effets microclimatiques et de la phénologie du pois. Est-ce liée à la présence de l'ombrage des arbres ou à un autre effet du microclimat local ? Des analyses et des mesures plus étendues sont nécessaires pour répondre à ces questions. Ces aspects méritent une attention particulière, d'autant plus qu'ils ne sont pas pris en compte dans les modèles actuellement proposés. Cela souligne une fois de plus la complexité de prédire les conséquences de l'impact du microclimat sur les cultures intercalaires. En agroforesterie, l'ombrage d'un arbre n'est pas qu'une simple réduction de lumière, il correspond à une modification complexe de l'environnement de culture.

2.6 Diversité des processus identifiés et conséquences pour la gestion des systèmes agroforestiers

Cette expérience de manipulation du régime des pluies n'a pas permis d'explorer la résilience de ce système agroforestier méditerranéen stricto-sensu puisqu'elle est particulièrement restreinte dans le temps et elle ne prend en compte que la culture. En revanche, elle permet de questionner un ensemble de processus à travers différentes échelles de la parcelle face à une perturbation telle qu'une période de sécheresse.

Lors de l'évaluation du rendement (chapitre 2), nous observons :

- une compétition existante entre l'arbre et le pois pour la ressource en eau dans le sol, mais restreinte à l'horizon supérieur du sol. Cela suggère malgré tout une bonne complémentarité spatiale et temporelle des prélèvements - c'est un **effet plutôt négatif** pour la culture, mais contextuel et pour lequel ces travaux de thèse ne nous permettent pas d'affirmer qu'en cas de sécheresse aggravée (*e.g.* avec diminution forte et prolongée de la hauteur de la nappe phréatique), il serait aggravé.
- une compétition importante pour la lumière entre l'arbre et la culture de pois dans un système agroforestier aussi développé - c'est un **effet négatif** qui limite le rendement en biomasse totale de la culture de pois quel que soit le régime de pluie.
- une modification de l'allocation à l'échelle de la plante qui contribue à maintenir le rendement de la culture de pois à l'ombre et en conditions de sécheresse - c'est un **effet positif** qui peut contribuer à limiter les pertes de rendement en agroforesterie sous l'effet de l'ombrage.

Lors de l'évaluation de la production de biomasse et des effets microclimatiques (chapitre 3), nous observons :

- Le microclimat en conditions agroforestières permet de réduire la demande évaporative par diminution du vent et du déficit hygrométrique alors que la demande climatique s'intensifie - c'est un **effet positif**
- Le microclimat en conditions agroforestières permet de limiter l'augmentation de la température de culture du fait des conditions ombragées - c'est un **effet positif**, qui peut être d'autant plus positif en cas de forte chaleur
- La pression de maladie (type oïdium) en agroforesterie est diminuée en conditions de sécheresse - si ce type d'effet est confirmé, ce serait plutôt un **effet positif** du contexte climatique qui avantage les systèmes agroforestiers en conditions sèches. En conditions plus humides, ce serait plutôt un **effet négatif** des conditions agroforestières sur la culture.
- Le décalage de la sénescence - c'est un **effet positif** à l'échelle de la culture qui permet de maintenir les processus photosynthétiques malgré les conditions de sécheresse, mais c'est

un **effet possiblement négatif** à l'échelle de la parcelle agroforestière si la sénescence est suffisamment hétérogène à l'échelle des allées agroforestières pour perturber la récolte.

On observe donc que l'analyse du fonctionnement du système agroforestier face à un aléa de sécheresse nécessite également d'évaluer sa dépendance à des influences externes de la parcelle (*e.g.* la nappe phréatique, pression de ravageurs), de son contexte (*e.g.* profondeur du sol) et en fonction des conséquences agronomiques (*e.g.* l'impact de l'hétérogénéité spatiale sur la réponse de la culture à un épisode de sécheresse et des conséquences sur la récolte). Outre la réduction de rendement observée à l'ombre des arbres, nous mettons également en avant d'autres effets négatifs additionnels du système sur la culture de pois. Un certain nombre de stratégies de gestion à la parcelle peuvent être imaginées pour en minimiser les conséquences, bien qu'elles mériteraient toutes d'être évaluées plus amplement.

Les travaux de cette thèse montrent que l'ombrage des arbres peut présenter des atouts pour diminuer la demande évaporative et le risque de stress thermique. Au sein de notre étude, les conditions climatiques n'ont engendré aucun stress thermique majeur pour le pois, alors que c'est un aléa climatique amené à devenir de plus en plus fréquent. En Espagne, Arenas-Corraliza et al. (2018) observent des améliorations du rendement en agroforesterie chez des céréales les années où des températures excessives ont été observées juste avant la floraison et pendant le remplissage des grains. Ils suggèrent donc que l'ombrage permet de diminuer l'impact de ces stress thermiques. Pour maximiser les bénéfices microclimatiques dans les régions particulièrement vulnérables à ces aléas climatiques, il semble donc nécessaire de bénéficier de conditions d'ombrage aux heures les plus chaudes de la journée, au moment où la demande évaporative est la plus importante et où les stress thermiques les plus intenses ont lieu. Dans une optique de maximisation des effets microclimatiques sur la culture, l'orientation des arbres Est-Ouest est celle qui maximise l'ombrage sur l'allée, mais c'est aussi celle qui crée le plus de contraste. Le design des allées doit être adapté en conséquence. Comment faire ? Augmenter la densité du système (*e.g.* en la largeur des allées) ? L'étude de Arenas-Corraliza et al. (2018) a été réalisée dans un système agroforestier où la densité d'arbres est particulièrement dense (333 arbres.ha^{-1}) avec des allées plus étroites : ce sont des densités forestières (voir Figure IV.4). La parcelle reste cependant jeune (*ca.* 10 ans), les arbres vont grandir, la compétition au sein de ce système va continuer de s'intensifier. Combien de temps ce système permettra t-il d'observer un effet positif sur le rendement des céréales pour faire face à des épisodes de chaleur ? La question reste ouverte.

Mais nous avons aussi montré que les effets de l'ombrage peuvent également être contrastés à l'échelle de l'allée, générant des disservices potentiels. Pour une culture de pois, les pertes de rendement à l'ombre restent importantes, même en condition de sécheresse. Quels sont les leviers à envisager à l'échelle de la parcelle pour en minimiser l'impact négatif ?

En ce qui concerne la culture, il serait intéressant d'étudier si, parmi la diversité des variétés de pois existantes, les contrastes dans la dynamique de sénescence en conditions de sécheresse et d'ombrage sont généralisés ou non. Le lien entre floraison et sénescence suggère également qu'il pourrait être pertinent de choisir des variétés précoces à floraison courte afin d'éviter autant que

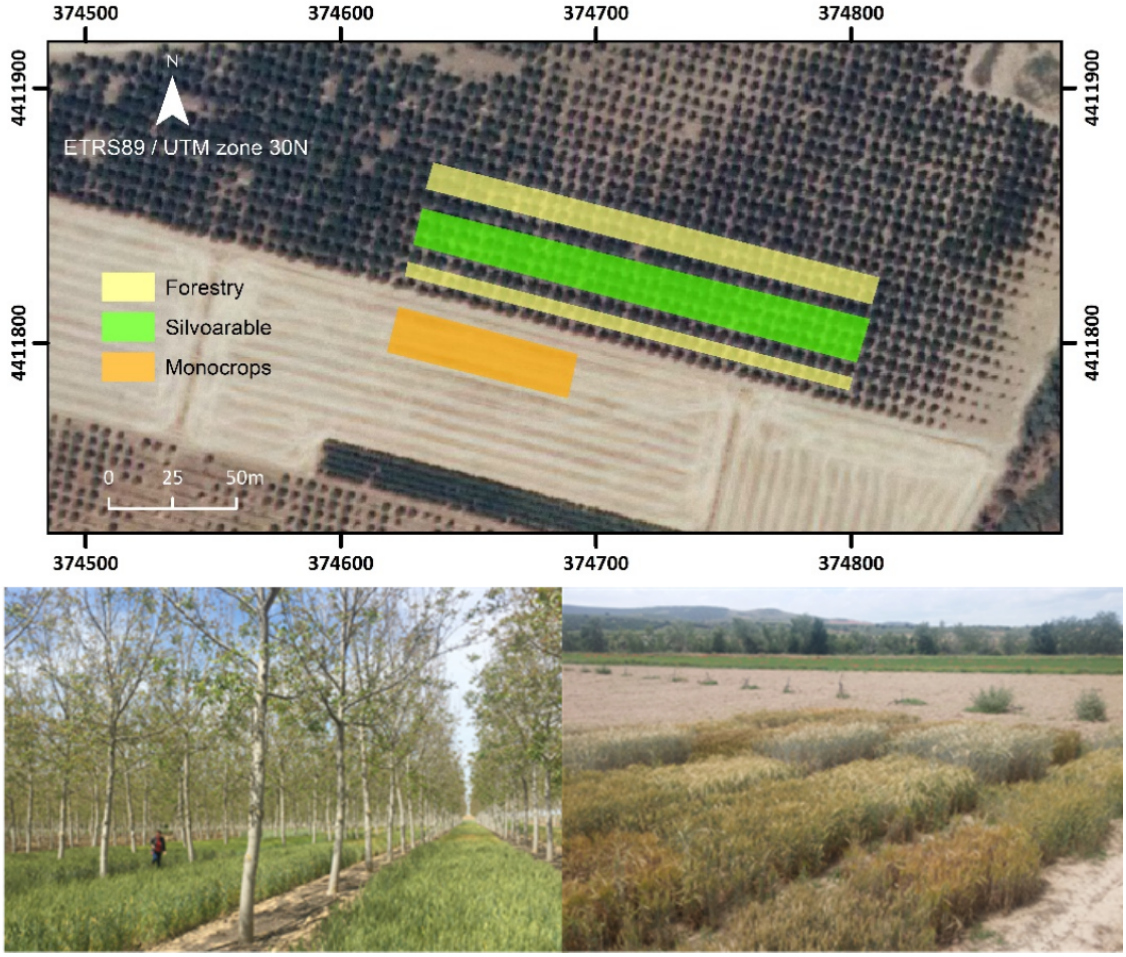


Figure IV.4 Système agroforestier noyer-céréale étudié dans lequel des effets de facilitations microclimatiques ont été observées dans le cadre de fortes températures printanières au Sud de l'Espagne (images tirées des annexes de Arenas-Corraliza et al. 2018)

possible les pertes de rendement pendant la floraison. La résistance aux maladies semble être également un critère à considérer pour les systèmes bien développés. La sélection variétale pour des cultures annuelles adaptées à des conditions agroforestières reste un large champ de recherche à explorer. A l'échelle de l'allée, on pourrait également considérer de cultiver des cultures ou des variétés différentes lorsque les contrastes de lumière deviennent importants. Mais c'est un facteur de complication vis-à-vis la gestion de la parcelle. Des leviers de gestion pourraient être également imaginés en co-gérant à la fois l'arbre et la rotation de culture ensemble. Le pois est une culture qui présente un intérêt fort au sein de la rotation (*e.g.* tête d'assolement, fixation d'azote). Il est donc nécessaire de garder ce type de culture. On pourrait donc imaginer une rotation de culture où les cultures particulièrement sensibles à la lumière seraient placées après l'élagage en trogne des arbres. Les cultures les plus tolérantes à l'ombre (*e.g.* l'orge) pourraient être placés lorsque l'ombrage est de nouveau intense, à la fin du "cycle d'élagage des trognes". A Restinclières, les travaux sur les trognes montrent que le rendement des cultures après la taille redevient presque identique à celui du témoin agricole du fait d'une amélioration significative de la disponibilité de lumière

(Dufour et al., 2020). Malgré tout, le recul quant à la possibilité de couper des arbres en trogne (*e.g.* vis à vis des essences, de la fréquence, etc...) et de l'impact sur la qualité du bois sont encore peu étudiés. Par ailleurs, dans une perspective d'adaptation à la sécheresse, une telle pratique revient aussi à accepter que certains effets microclimatiques bénéfiques sont réduits dans le temps (les années sans branches) et dans l'espace (l'extension du houppier est réduite). C'est un moyen de contrôle intéressant pour le microclimat de la parcelle, mais cela représente aussi une logistique supplémentaire à évaluer. Dans quelle mesure cette pratique est pertinente ? Similairement, la pratique du cernage racinaire est aussi une pratique à évaluer plus largement qui pourrait permettre de limiter les effets de compétition souterraine, un possible atout en conditions de sécheresse fortement limitantes. Lors de la mise en place de la parcelle, l'orientation des lignes d'arbres joue t'elle un rôle pour limiter les contrastes de sénescence chez les cultures qui y sont susceptibles ? On peut le supposer puisque cela homogénéise les conditions de lumière, mais c'est probablement au détriment d'une partie des bénéfices microclimatiques (réduction de la température aux heures chaudes) mentionnés avant.

Tous ces exemples illustrent encore une fois la diversité et la nécessité de devoir combiner possiblement plusieurs leviers au sein du système agroforestier et d'accepter certains compromis. Face à cette diversité de leviers envisageables et pour identifier les combinaisons pertinentes, le développement de la modélisation est une piste intéressante. Elle permettrait de mieux appréhender certains aspects complexes du fonctionnement des systèmes agroforestiers vis-à-vis des effets du changement climatiques.

3 Perspectives pour des travaux de modélisation

3.1 Objectifs initiaux de la thèse

Les objectifs initiaux de la thèse étaient ambitieux, puisqu'il était prévu de :

- réaliser des exclusions de pluie pour augmenter les stress hydriques avec des dispositifs d'exclusion de pluie
- calibrer et valider le modèle de culture Hi-sAFe avec les données récoltées
- réaliser des simulations numériques avec des scénarios de changement climatique

Nous nous sommes limités au premier point, du fait de grandes difficultés rencontrées dans la réalisation des exclusions de pluie. Un travail de modélisation a été engagé, mais celui-ci n'a pas pu permettre de valorisation scientifique. Un certain nombre d'aspects concernant la modélisation sont malgré tout consignés dans la discussion qui suit.

3.2 Présentation succincte du modèle agroforestier Hi-sAFe

Le modèle agroforestier Hi-sAFe a été développé afin d'étudier les systèmes agroforestiers par simulation numérique afin de mieux comprendre le partage des ressources (lumière, eau, azote) et d'envisager des leviers de gestion (*e.g.* densité de plantation, gestion de l'arbre par élagage ou cernage racinaire,etc). Ce modèle numérique repose sur deux hypothèses principales :

1. pour comprendre la productivité d'un système agroforestier, il est nécessaire de simuler les processus d'acquisition des ressources en tenant compte de l'hétérogénéité spatiale et temporelle du système. Les ressources actuellement considérées par le modèle sont la lumière, l'eau et l'azote.

2. les interactions arbre-culture sont gouvernées à la fois par des effets de plasticité et de complémentarité aérienne, souterraine et phénologique

Pour cela, Hi-sAFe simule une scène virtuelle tridimensionnelle dans laquelle la croissance d'un ou plusieurs arbres, avec leurs systèmes racinaires, peuvent être simulés en association avec des cultures intercalaires. Une scène virtuelle se décompose en cellules (éléments de surface), elles même composée de plusieurs voxels (élément de volume, souterrain dans le cas de ce modèle) (Figure IV.5). Les simulations sont réalisées au pas de temps journalier. La croissance de la culture est modélisée à partir d'une version modifiée du modèle de culture STICS (Brisson et al., 2009) et la croissance des arbres est modélisée à partir de formalismes spécifiquement établis, implémentés au sein de la plateforme de modélisation Capsis. Une description plus détaillée de ce modèle est disponible dans le cadre des travaux de thèse de Talbot (2011) et de l'article de présentation (Dupraz et al., 2019).

3.3 Problèmes rencontrés dans le travail de modélisation

Un travail de calibration de la variété de pois a été entamé dans un premier temps pour simuler correctement la variété de pois semée dans le témoin agricole. A partir d'un fichier STICS pour le pois d'hiver, les paramètres d'ajustement ciblés étaient tous des paramètres variétaux et ont permis d'améliorer la qualité de l'ajustement sous la version 3.5 d'Hi-sAFe, sans arbres (cf. annexe - Figure F.1). Cependant, le code d'Hi-sAFe a été modifié entre temps (version 4.1), afin de rendre plus cohérent le calcul des stress hydriques de la culture. Auparavant, le module de compétition pour l'eau, implémenté dans Hi-sAFe, gouvernait l'extraction d'eau pour l'arbre et la culture, mais le calcul des stress sur la culture était toujours fait par STICS. Cette différence dans le calcul des stress pouvait générer des situations anormales, où la culture était stressée (i.e. peu de prélèvement en eau), mais aucun stress hydrique n'était calculé, ce qui pouvait engendrer des développements exagérés de la culture. L'équipe de développement de Hi-sAFe a modifié le calcul des stress pour qu'il soit cohérent : il est désormais fait dans le module de compétition pour l'eau. Lorsque le travail de calibration de la variété de pois a été repris sur la version 4.1 du modèle, la dynamique de LAI était différente, ce qui a rendu caduque le travail de calibration. Nous avons

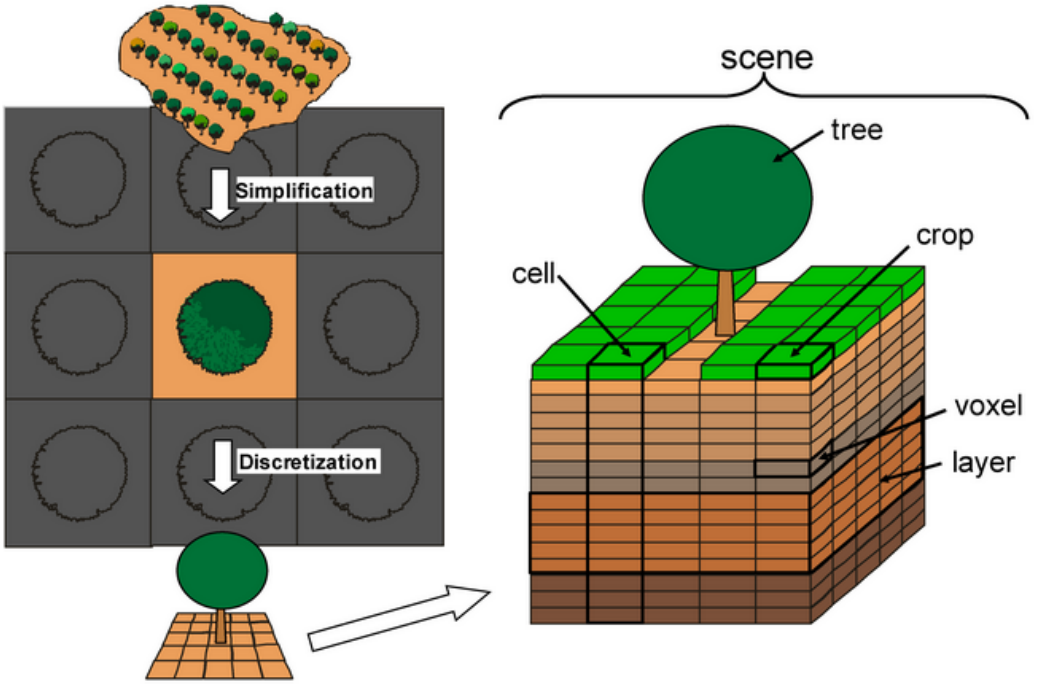


Figure IV.5 Scène virtuelle Hi-sAFe et ses différents éléments. Figure tirée de Dupraz (2019)

comparé les sorties d'une simulation STICS ("standalone", v8.5) et d'une simulation Hi-sAFe sans arbre pour vérifier que les deux modèles restaient cohérents quant à la modélisation d'une même culture dans un même sol et avec le même climat, sans arbre. L'analyse des sorties a révélé des différences au niveau du LAI, de la dynamique de l'eau et de l'azote dans le sol, et des besoins en eau et en azote de la culture, en particulier lorsque l'on souhaite simuler une exclusion de pluie similaire à notre étude (cf. annexe - Figure F.2). La description des scènes entre STICS et Hi-sAFe est différente (scène 1D vs. scène 3D, description des propriétés du sol) et des différences existent au niveau des formalismes, notamment vis à vis de l'extraction d'eau et d'azote (Dupraz et al., 2019). Ces différences sont assumées, mais elles interpellent malgré tout. Elles montrent que les sorties de deux modèles peuvent être différentes dans leur comportement. La modélisation avec le modèle STICS bénéficie d'un travail de développement plus intense. Le fichier de paramètres décrivant la culture de pois a été calibré et validé sous STICS (Falconnier et al., 2020). Cependant, les différences observées au niveau des sorties montrent que ce fichier ne peut pas être repris tel quel et utilisé dans Hi-sAFe. Il est nécessaire de l'adapter. Les sorties des deux modèles en conditions de monoculture restent un élément de comparaison intéressant dans un premier temps.

3.4 Des formalismes à améliorer ?

Les formalismes adoptés dans le modèle STICS et le modèle HI-sAFe sont-ils pertinents pour représenter une culture de pois en agroforesterie ? Nous en doutons. Nous avons identifié deux faiblesses des choix de modélisation : l'un concerne la représentation du pois dans STICS, l'autre concerne le calcul de la demande évaporative des cultures ombragées dans Hi-sAFe. Le premier est spécifique à la culture de pois, le second est général pour toutes les cultures ombragées.

3.4.1 Quels formalismes pour représenter l'impact des arbres sur les allocations de carbone dans une culture de pois ?

Il existe deux types de plantes annuelles cultivées. Dans les plantes déterminées, la surface foliaire est entièrement mise en place avant la floraison, qui est courte, avec un nombre de fleurs fixé pendant l'initiation florale qui a lieu dans la période qui précède la floraison. Tous les fruits ont le même âge. C'est notamment le cas des céréales. Dans les plantes indéterminées, des feuilles supplémentaires sont mises en place pendant la floraison. Cette floraison est longue et indéterminée. Ces nouvelles feuilles entrent en compétition avec les fleurs et les fruits pour l'allocation du carbone. Le nombre de fleurs dépend des conditions trophiques pendant la floraison et ne peut pas être prédit au moment de la première fleur. C'est le cas des solanacées (tomate, etc) et des légumineuses comme le pois. Les fruits ont des âges différents, la maturité est étalée, et des initiations florales se produisent alors qu'il y a déjà des fruits sur la plante. La récolte peut être étalée (tomate) ou groupée (pois). Le modèle de culture STICS propose deux formalismes différents pour les plantes déterminées et indéterminées afin de prédire le nombre de grains par m^2. Paradoxalement, alors que le pois est d'un point de vue botanique une plante indéterminée, c'est le formalisme des plantes déterminées qui est proposé par les auteurs de STICS pour le représenter. Pour comprendre ce choix, il est nécessaire d'analyser les deux formalismes.

Dans le cas du formalisme pour déterminer le rendement des plantes déterminées, le nombre de grains est d'abord calculé en fonction de l'accroissement de biomasse entre un stade qui définit l'initiation des grains et le début de remplissage des grains. Ce formalisme mobilise 4 paramètres (Tableau F.1). Le nombre de grains est alors fixé à partir d'un stade précis qui définit le début de remplissage des grains. Puis la biomasse des grains est calculée à l'aide d'un indice de récolte pour lequel STICS offre deux options de calcul (Tableau F.2). Au total, le formalisme utilisé pour déterminer le rendement des plantes déterminées utilise 6 à 7 paramètres.

Dans le cas du formalisme pour simuler le rendement des plantes indéterminées, l'approche est complètement différente. La méthode repose sur l'idée que des "cohortes" de grains sont émises au fur et à mesure que des inflorescences apparaissent. L'émission des inflorescences, la formation des grains et leur remplissage dépend également du statut trophique de la plante, qui prend également en compte le développement foliaire et la production totale de biomasse. Les relations source-puits à l'échelle de la plante sont définies à partir de 4 paramètres (Tableau F.3), qui définissent des effets de stress sur la croissance foliaire et la mise en place des inflorescences ou des

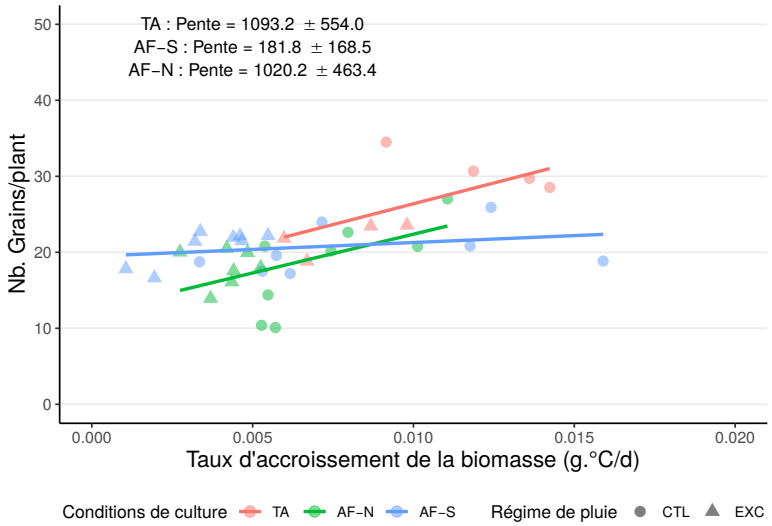


Figure IV.6 Régression entre le nombre de grain final par plante et le taux d'accroissement de biomasse (entre le début de la floraison et le stade limite de fin d'avortement) en fonction des conditions de culture (TA : Témoin Agricole, AF : Agroforesterie, CTL : régime pluvial, EXC : exclusion de pluie)

fruits. Le nombre d'inflorescences est déterminé à l'aide de 1 ou de 2 paramètres : soit il est fixé, soit il est déterminé à partir de la biomasse (Tableau F.4). Le nombre de grains (/fruits) par inflorescence nécessite de préciser un paramètre additionnel pour définir le nombre d'inflorescences potentielles ($AFRUITSP_v$). Enfin, le formalisme du remplissage des grains fait appel à 8 paramètres (Tableau F.5). Ce dernier formalisme présente la spécificité de reposer sur des équations non linéaires (exponentielles et logistiques). Les formalismes utilisés pour déterminer le rendement des plantes indéterminées nécessite 14 à 15 paramètres au total.

Le choix de représenter le pois avec le formalisme des espèces déterminées est justifié en conditions de plein soleil, mais il peut être remis en question en conditions ombragées. Le formalisme des plantes déterminées a l'avantage d'être plus économe en paramètres. En plein soleil, il s'appuie en particulier sur le fait que i) l'indice de récolte augmente linéairement avec la température à partir de la floraison chez le pois (Lecoeur and Sinclair, 2001) et ii) le nombre de grains final est relié linéairement à l'incrément de biomasse entre le début de la floraison et le stade final d'avortement des grains (Guilioni et al., 2003). Guilioni et al. (2003) montrent que cette relation est stable en conditions de stress thermique ou de stress hydrique, ce qui fait qu'elle a été adoptée. Malgré tout, (Jeuffroy et al., 2010) mentionnent que cette relation n'est peut être plus valable lors d'une combinaison de stress abiotique et/ou biotique. Une récente analyse de nos observations de terrain montrent qu'une relation linéaire existe entre la vitesse d'accroissement de biomasse et le nombre de grains à l'échelle de la plante (Figure IV.6). Cette relation linéaire est cependant modifiée en l'agroforesterie en fonction de la position par rapport à l'arbre (Nord ou Sud). Ce résultat mérite d'être approfondi et des mesures de terrains devraient être poursuivies afin de voir comment cette relation linéaire évolue au sein de l'allée agroforestière. Ces travaux pourraient

permettre d'orienter le modélisateur pour choisir un formalisme plus qu'un autre. En particulier, le formalisme pour les plantes indéterminées nécessite l'estimation d'un plus grand nombre de paramètres, ce qui pourrait fortement alourdir le travail de calibration.

3.4.2 L'impact des arbres sur la demande en eau de la culture est il bien pris en compte ?

La prise en compte des effets microclimatiques liés aux arbres dans Hi-sAFe repose sur un ensemble de formalismes volontairement simples. Si l'interception de la lumière par les arbres semble correctement représentée (Talbot and Dupraz, 2012), l'impact des arbres sur la demande évaporative des cultures est plus difficile à modéliser. Le formalisme actuel utilisé dans le modèle Hi-sAFe consiste à modifier le rayonnement net dans le calcul de la demande évaporative, selon une approche basée sur un coefficient cultural (Talbot, 2011). Une autre approche est disponible dans le modèle, basée sur un bilan résistif des transferts de vapeur d'eau. Dans les deux cas, l'effet des arbres sur deux processus importants pour la demande évaporative de la culture ombragée sont négligés ou mal représentés :

1. l'effet des arbres sur les mouvements d'air dans la parcelle
2. l'effet des arbres sur l'humidité de l'air

a. Impact aérodynamique des arbres

Il faut distinguer deux situations : avec et sans vent. Lorsqu'il y a du vent, il est très difficile de prévoir le vent dans la parcelle agroforestière. L'impact des lignes d'arbres va dépendre de l'angle entre la direction du vent et la direction des lignes d'arbres. Mais la direction du vent change en permanence. L'interaction est donc très variable à court terme. Un vent parallèle aux lignes d'arbres pourra accélérer dans les allées, alors qu'un vent orthogonal aux lignes d'arbres sera fortement freiné. La hauteur d'élagage des arbres peut aussi avoir un impact : sous les houppiers, on peut imaginer une accélération du vent par effet venturi.

Les données météo de base utilisées par STICS et HisAFe ne contiennent pas la direction du vent, même en moyenne à l'échelle de la journée. Les stations météos avec des girouettes sont assez rares. Cela explique qu'il a fallu se contenter pour le modèle de formalismes qui oublient cet impact. On pourrait cependant imaginer des formalismes simplifiés qui prédiraient une rugosité moyenne du couvert d'arbres en fonction de leur hauteur, de leur espacement, de la hauteur élaguée, et de la densité du feuillage. Cela permettrait de calculer un vent moyen à 2 m de hauteur qui serait utilisé pour calculer la demande évaporative sous les arbres dans la parcelle agroforestière. Cette approche avait été envisagée par les microclimatologistes qui ont écrit ce module de Hi-sAFe (François Bussières, INRAé), mais finalement écartée, car son impact semble négligeable par rapport à l'impact de la modification du rayonnement net, qui est un terme majeur du calcul de l'ETP.

Lorsqu'il n'y a pas de vent, les arbres peuvent aussi avoir un impact important, en modifiant les phénomènes de convection. Dans une parcelle sans arbres, dès que des conditions sèches et de fortes températures apparaissent, les plantes s'échauffent, et des cellules de convection peuvent se mettre en place, et mélangent l'air qui est au niveau de la culture avec l'air plus sec qui se trouve en altitude. L'humidité dégagée par la transpiration est diluée dans des couches d'air plus importantes, ce qui stimule la demande évaporative de l'air. Comment les arbres influent-ils sur ces cellules de convection ? C'est très difficile à prévoir, et impossible à prévoir à partir de données météorologiques moyennes quotidiennes.

b. Impact des arbres sur l'humidité de l'air

Les arbres transpirent et contribuent à humidifier l'air et à réduire la demande évaporative de l'air pour les cultures qui se trouvent sous les arbres ou à proximité des arbres. Mais cet effet peut être annulé par le vent, s'il y en a. On comprend donc toute la difficulté à représenter ce phénomène, très fluctuant en fonction du vent, et donc très difficile à représenter avec des valeurs moyennes quotidiennes. Malgré tout, l'approche proposée par Shuttleworth et Wallace est une approche qui permet de considérer les processus d'humidification de l'air par transpiration à travers une représentation dite "résistive". Chaque plante est considérée comme une "résistance", placée entre une "source d'eau" (le sol) et qui répond à une demande évaporative (l'atmosphère). En fonction de la structure du couvert végétal, les flux d'eau par transpiration pour chaque strate végétale sont représentés par un agencement de résistances qui répondent à une demande évaporative globale. Les calculs détaillés qui utilisent ces équations de Shuttleworth et Wallace n'ont pas été implémentés dans Hi-sAFe à l'échelle de la scène agroforestière, car les calculs sont itératifs (recherches de convergences) et gourmands en temps de calcul. C'est à cause de ces calculs que l'ancêtre du modèle Hi-sAFe, Hypar, a été abandonné. Or ce calcul est très important pour évaluer correctement le stress hydrique des cultures ombragées.

En négligeant ces deux processus, on sous-estime deux effets potentiellement favorables des arbres sur les cultures. On pourrait ainsi surestimer la demande évaporative de la culture influencée par les arbres. Mais les analyses de sensibilité des équations de calcul de l'ETP (Penman-Monteith) montrent que le bilan radiatif (qui est très impacté par les arbres) est le facteur majeur de la modification des conditions de demande transpiratoire des plantes à l'ombre.

c. Comment améliorer le calcul de la demande évaporative pour les cultures à l'ombre des arbres ?

Les approches par coefficient cultural et par bilan résistif des transferts de vapeur sont toutes les deux proposées par STICS et disponibles dans Hi-sAFe pour calculer les besoins en eau de la culture. A l'échelle des cellules de la scène, l'approche par bilan résistif des transferts de vapeur pourrait être employée. Elle n'a pas encore été appliquée et nécessite un travail de modélisation pour vérifier qu'elle est fonctionnelle. Elle nécessite également de choisir d'autres formalismes pour le calcul des transferts radiatifs et des bilans d'énergie.

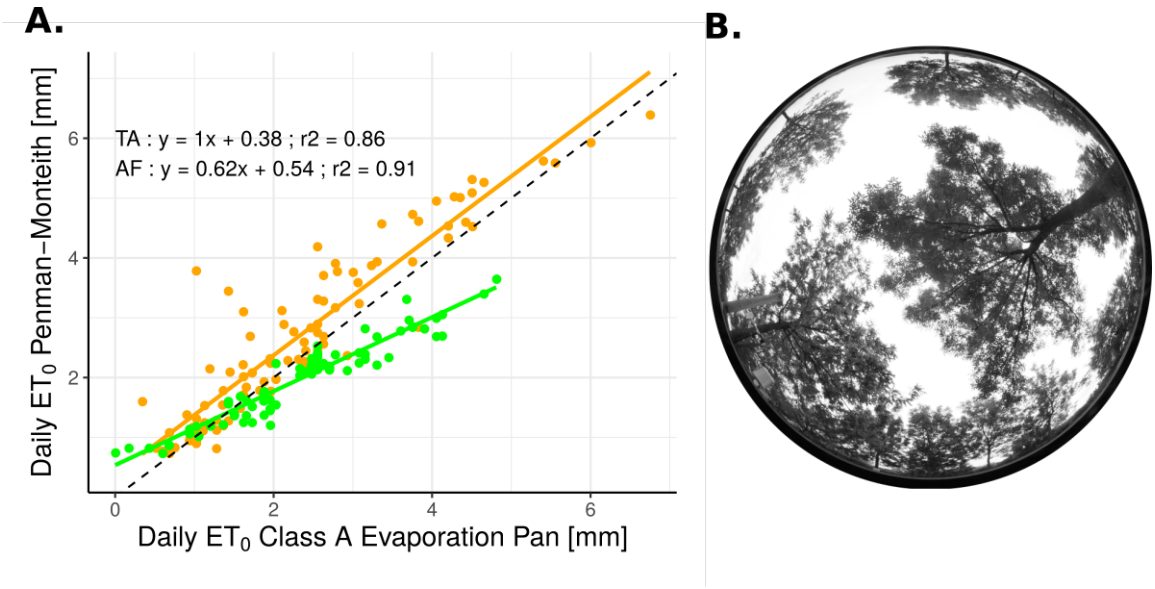


Figure IV.7 Comparaison de l'ETP0 journalière estimée selon les mesures à partir du bac d'évaporation (axe des abscisses) et selon les données météorologiques (axe des ordonnées). La relation est évaluée en TA (points oranges) et en AF (points verts).

Avant d'entreprendre un tel travail, nous avons voulu savoir si des mesures de terrain pouvaient venir critiquer l'approche par coefficient cultural. La validité d'une approche d'évapotranspiration potentielle (ETP) à partir de la méthode de Penman-Monteith n'a pas été évaluée et adaptée pour un contexte agroforestier. Nous avons comparé la demande évaporative en parcelle agricole et en parcelle agroforestière avec un bac d'évaporation de classe A. Cette méthode semble avantageuse car elle permet de prendre en compte tous les processus modifiés par l'arbre : rayonnement, vent, humidité de l'air, température de l'air. La comparaison des évaporations mesurées et des ETP calculées par la formule de Penman-Monteith apparaît instructive (Figure IV.7). Précisons que les ETP calculées par la formule de Penman-Monteith utilisent les données de la centrale météo située en plein soleil loin des arbres pour la partie agricole, et celles de la station située sous les arbres, à proximité du bac d'évaporation, pour la parcelle agroforestière. Au soleil, nous observons une bonne corrélation entre l'ETP estimée à partir du bac d'évaporation et l'ETP calculée à partir des données météorologiques, avec une pente proche de la bissectrice. Sous les arbres, la corrélation est également excellente, mais la pente de la relation linéaire est différente : l'ETP calculée à partir du bac est plus forte que l'ETP calculée à partir des données météorologiques lors des journées à forte demande évaporative. L'interprétation de ce changement de pente n'est pas aisée, mais montre l'influence du bilan d'énergie local sur les processus d'évaporation au bilan d'énergie local. Dans quelle mesure ces résultats peuvent-ils permettre d'améliorer les travaux de modélisation ? Ce n'est pas évident. Les mesures d'évaporation physique, à l'aide de bac d'évaporation ou d'évaporimètre de Piché restent globalement critiquées, car elles présentent des sensibilités très variables aux conditions locales (Fu et al., 2009).

Malgré tout, nous avons souhaité poursuivre l'analyse. Le modèle HisAFe utilise un formalisme dérivé de Penman-Monteith pour calculer l'ETP des cultures ombragées, car les valeurs des va-

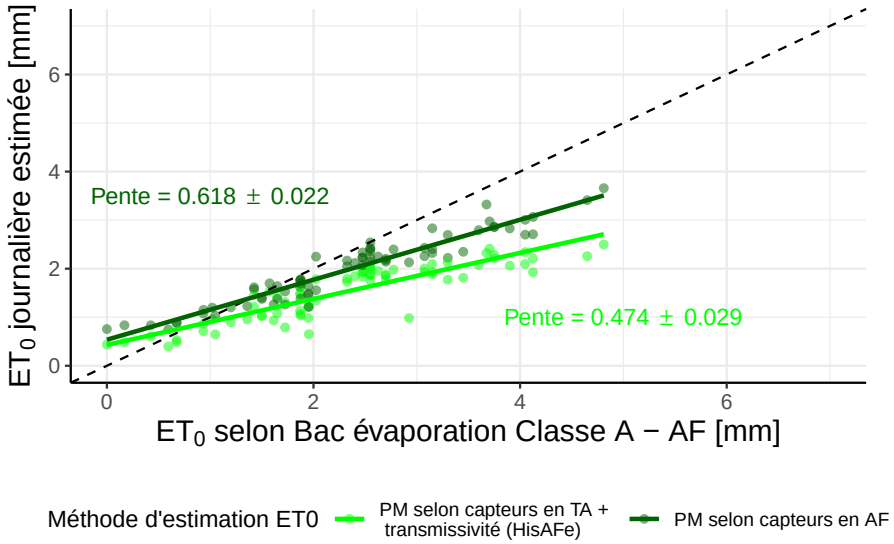


Figure IV.8 Comparaison de l'ET_0 journalière estimée selon les mesures à partir du bac d'évaporation (axe des abscisses) et selon les données météorologiques (axe des ordonnées, estimation selon la méthode de Penman-Monteith (PM)). La relation est évaluée en TA (points oranges) et en AF (points verts).

riables climatiques sous les arbres ne sont pas connues. On y calcule l'ETP sous les arbres comme une fraction de l'ETP au soleil. C'est une approche simplifiée, cela ne tient pas compte des modifications de vent, d'humidité de l'air et de température de l'air. Nous avons calculé cette ETP réduite "à la mode de HisAFe" et l'avons comparée à l'évaporation du bac A (Figure IV.8). On constate que la pente de relation établie entre les mesures du bac et l'ETP "à la mode de Hi-sAFe" est légèrement plus faible que si les données météorologiques locales sont utilisées directement au sein de l'équation de Penman-Monteith. La différence reste modeste, mais elle est statistiquement plus faible. Cela questionne encore une fois la simplicité du formalisme choisi dans Hi-sAFe pour quantifier les besoins en eau de la plante en contexte ombragé. La modélisation des flux d'eau au sein d'une scène agroforestière reste une limite actuelle du modèle, et des compromis de modélisation seront forcément nécessaires entre la simplicité et la robustesse des formalismes. L'approche résistive semble être la méthode de modélisation la plus juste vis-à-vis des processus biophysiques mobilisés, mais elle complexifie également le travail de modélisation, au sein d'un modèle où le nombre de paramètres est déjà très important. Elamri et al. (2018) ont proposé une approche de modélisation pour la modélisation des flux d'eau de culture en contexte agri-voltaïque. Cette méthode s'appuie sur l'approche par coefficient cultural mais prend en compte des effets d'ombrage sur la conductance stomatique des cultures. Ils mettent en avant le caractère relativement parcimonieux de l'approche. Cette approche mériterait plus d'attention.

4 Conclusion

A travers ce travail de thèse, nous avons montré qu'un système agroforestier avec des arbres bien développés en contexte méditerranéen représente une opportunité pour limiter les effets négatifs d'un épisode de sécheresse sur la productivité d'une culture de pois. Du point de vue de la production de biomasse globale de la culture, la production reste constante en conditions d'ombrage intense tandis qu'elle décline en conditions moins ombragées ou en plein soleil. Les effets négatifs d'une sécheresse printanière ne s'ajoutent pas à la réduction de rendement observée en agroforesterie : des effets de compensation à l'échelle de la plante sont mobilisés chez le pois. Les systèmes agroforestiers restent des systèmes de culture complexes encore peu étudiés qui méritent plus d'attention en tant que stratégie d'adaptation pour les cultures annuelles dans les zones où la menace du changement climatique est amenée à s'intensifier fortement. Malgré tout, d'autres effets (*e.g.* maturité contrastée, pression de maladie) méritent plus d'attention afin de pouvoir proposer des leviers de gestion adaptés à ces systèmes. Par ailleurs, il est important de rappeler que les bénéfices procurés par les systèmes agroforestiers dépassent largement le cadre de l'adaptation au changement climatique, puisque ces systèmes contribuent également à son atténuation et à maintenir une biodiversité.

Les expérimentations de manipulation du régime de pluie et les approches écophysiologiques sont particulièrement difficiles à aborder en contexte agroforestier du fait de la lourdeur des dispositifs expérimentaux et de la forte hétérogénéité des conditions agroforestières. Elles peuvent cependant s'avérer riche en termes d'enseignement quant à la compréhension des processus liés à i) l'élaboration du rendement et ii) la production de biomasse dans un environnement d'interactions écologiques complexes. Outre la diversité et la complexité du fonctionnement des systèmes agroforestiers, il est aussi nécessaire de faire attention à l'utilisation des mots "ombrage" et "sécheresse", qui sont deux mots polysémiques en fonction du contexte et du domaine dans lesquels ils sont employés. La nature des stress physiologiques soulevées et leur timing vis-à-vis du développement des cultures annuelles complexifie l'analyse des observations de terrain.

Enfin, pour aborder dans son ensemble la complexité des systèmes agroforestiers, celle des effets du changement climatique et les nombreuses possibilités de leviers de gestion envisageables à l'échelle de la parcelle, la modélisation numérique semble être une piste intéressante. Bien que ce travail de thèse n'ait pas pu aborder correctement un travail de modélisation avec Hi-sAFe, l'analyse des données de terrain et des formalismes interrogent quant à la représentation numérique des processus au sein des systèmes agroforestiers. Il est nécessaire de rester critique par rapport aux formalismes implémentés actuellement dans STICS et Hi-sAFe qui constituent immanquablement une simplification du fonctionnement des systèmes agricoles et des systèmes agroforestiers. Un vaste travail de calibration et d'évaluation reste à effectuer si l'on souhaite évaluer fiablement le potentiel d'adaptation à la parcelle que peuvent représenter les systèmes agroforestiers vis-à-vis du changement climatique. Cela pourrait stimuler des collaborations interdisciplinaires entre écophysiologistes, bioclimatologues, écologues, agronomes et modélisateurs afin de répondre à cet objectif.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bibliographie

Ababaei, B. and Chenu, K. (2020). Heat shocks increasingly impede grain filling but have little effect on grain setting across the Australian wheatbelt. *Agricultural and Forest Meteorology*, 284 :107889, DOI : 10.1016/j.agrformet.2019.107889. 115

Abbasi Surki, A., Nazari, M., Fallah, S., Iranipour, R., and Mousavi, A. (2020). The competitive effect of almond trees on light and nutrients absorption, crop growth rate, and the yield in almond–cereal agroforestry systems in semi-arid regions. *Agroforestry Systems*, DOI : 10.1007/s10457-019-00469-2. 47

Abson, D. J., Fraser, E. D., and Benton, T. G. (2013). Landscape diversity and the resilience of agricultural returns : a portfolio analysis of land-use patterns and economic returns from lowland agriculture. *Agriculture and Food Security*, 2(1) :2, DOI : 10.1186/2048-7010-2-2. 38

Alba, C., NeSmith, J. E., Fahey, C., Angelini, C., and Flory, S. L. (2017). Methods to test the interactive effects of drought and plant invasion on ecosystem structure and function using complementary common garden and field experiments. *Ecology and Evolution*, 7(5) :1442–1452, DOI : 10.1002/ece3.2729. 98

Allard, G., Nelson, C. J., and Pallardy, S. G. (1991). Shade effects on growth of tall fescue : I. Leaf anatomy and dry matter partitioning. *Crop Science*, 31(1) :163–167, DOI : 10.2135/cropsci1991.0011183X003100010037x. 130

Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D. D., Hogg, E. H. T., Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J.-H., Allard, G., Running, S. W., Semerci, A., and Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259(4) :660–684, DOI : 10.1016/j.foreco.2009.09.001. 31

Allen, R., Pereira, L., Raes, D., and Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). Technical Report 56, FAO. 75

Almer, C., Laurent-Lucchetti, J., and Oechslin, M. (2017). Water scarcity and rioting : Disaggregated evidence from Sub-Saharan Africa. *Journal of Environmental Economics and Management*, 86 :193–209, DOI : 10.1016/j.jeem.2017.06.002. 24

Altieri, M. A. and Nicholls, C. I. (2002). The simplification of traditional vineyard based agroforests in northwestern Portugal : some ecological implications. *Agroforestry Systems*, 56 :185–191. 39

Altieri, M. A., Nicholls, C. I., Henao, A., and Lana, M. A. (2015). Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(3) :869–890, DOI : 10.1007/s13593-015-0285-2. 38, 41, 115, 135

Anderson, S. H., Udawatta, R. P., Seobi, T., and Garrett, H. E. (2009). Soil water content and infiltration in agroforestry buffer strips. *Agroforestry Systems*, 75(1) :5–16, DOI : 10.1007/s10457-008-9128-3. 41, 135

Andrianarisoa, K. S., Dufour, L., Bienaimé, S., Zeller, B., and Dupraz, C. (2016). The introduction of hybrid walnut trees (Juglans nigra × regia cv. NG23) into cropland reduces soil mineral N content in autumn in southern France. *Agroforestry Systems*, 90(2) :193–205, DOI : 10.1007/s10457-015-9845-3. 54

Arenas-Corraliza, M. G., López-Díaz, M. L., and Moreno, G. (2018). Winter cereal production in a Mediterranean silvoarable walnut system in the face of climate change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 264 :111–118, DOI : 10.1016/j.agee.2018.05.024. 43, 44, 46, 47, 89, 115, 170, 171

Arenas-Corraliza, M. G., Rolo, V., López-Díaz, M. L., and Moreno, G. (2019). Wheat and barley can increase grain yield in shade through acclimation of physiological and morphological traits in Mediterranean conditions. *Scientific Reports*, 9(1) :1–10, DOI : 10.1038/s41598-019-46027-9. 116

Arisnabarreta, S. and Miralles, D. J. (2008). Critical period for grain number establishment of near isogenic lines of two- and six-rowed barley. *Field Crops Research*, 107(3) :196–202, DOI : 10.1016/j.fcr.2008.02.009. 92, 166

Arkin, G. F., Ritchie, J. T., Thompson, M., and Chaison, R. (1976). A rainout shelter installation for studying drought stress. *Agronomy Journal*, 68(2) :429, DOI : 10.2134/agronj1976.00021962006800020060x. 95

Artru, S. (2017). Impact of spatio-temporal shade on crop growth and productivity, perspectives for temperate agroforestry. PhD thesis, Université de Liège - Gembloux Agro-bio Tech. URL : https ://orbi.uliege.be/handle/2268/211276. 47, 166

Asadi Zarch, M. A., Sivakumar, B., Malekinezhad, H., and Sharma, A. (2017). Future aridity under conditions of global climate change. *Journal of Hydrology*, 554 :451–469, DOI : 10.1016/j.jhydrol.2017.08.043. 31

Attiwill, P. M. (1994). The disturbance of forest ecosystems : the ecological basis for conservative management. *Forest Ecology and Management*, 63 :247–300. 35

Baah-Acheamfour, M., Carlyle, C. N., Lim, S.-S., Bork, E. W., and Chang, S. X. (2016). Forest and grassland cover types reduce net greenhouse gas emissions from agricultural soils. *Science of The Total Environment*, 571 :1115–1127, DOI : 10.1016/j.scitotenv.2016.07.106. 161

Bai, W., Sun, Z., Zheng, J., Du, G., Feng, L., Cai, Q., Yang, N., Feng, C., Zhang, Z., Evers, J. B., van der Werf, W., and Zhang, L. (2016). Mixing trees and crops increases land and water use efficiencies in a semi-arid area. *Agricultural Water Management*, 178 :281–290, DOI : 10.1016/j.agwat.2016.10.007. 135

Barkaoui, K., Nyaga, J., Pinard, F., Vaast, P., and Lamanda, N. (2019). Shade trees improve coffee health without reducing coffee potential yield in agroforestry systems in Murang'a, Kenya (Poster). In *4th World Congress of Agroforestry*, Montpellier. 168

Bates, D., Machler, M., Bolker, B., and Walker, S. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1) :1 :48, DOI : 10.18637/jss.v067.i01. 122

Battie-Laclau, P., Delgado-Rojas, J. S., Christina, M., Nouvellon, Y., Bouillet, J.-P., Piccolo, M. d. C., Moreira, M. Z., Gonçalves, J. L. d. M., Roupsard, O., and Laclau, J.-P. (2016). Potassium fertilization increases water-use efficiency for stem biomass production without affecting intrinsic water-use efficiency in Eucalyptus grandis plantations. *Forest Ecology and Management*, 364 :77–89, DOI : 10.1016/j.foreco.2016.01.004. 89

Battie-Laclau, P., Laclau, J.-P., Domec, J.-C., Christina, M., Bouillet, J.-P., Piccolo, M. d. C., Gonçalves, J. L. d. M., Moreira, R. M. e., Krusche, A. V., Bouvet, J.-M., and Nouvellon, Y. (2014). Effects of potassium and sodium supply on drought-adaptive mechanisms in Eucalyptus grandis plantations. *New Phytologist*, 203(2) :401–413, DOI : https://doi.org/10.1111/nph.12810. 89, 95

Battie-Laclau, P., Taschen, E., Plassard, C., Dezette, D., Abadie, J., Arnal, D., Benezech, P., Duthoit, M., Pablo, A.-L., Jourdan, C., Laclau, J.-P., Bertrand, I., Taudière, A., and Hinsinger, P. (2019). Role of trees and herbaceous vegetation beneath trees in maintaining arbuscular mycorrhizal communities in temperate alley cropping systems. *Plant and Soil*, DOI : 10.1007/s11104-019-04181-z. 44

Bayala, J., Sanou, J., Teklehaimanot, Z., Ouedraogo, S. J., Kalinganire, A., Coe, R., and Noordwijk, M. v. (2015). Advances in knowledge of processes in soil–tree–crop interactions in parkland systems in the West African Sahel : A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 205 :25–35, DOI : 10.1016/j.agee.2015.02.018. 135

Bayala, J., Öborn, I., and Dupraz, C. (2019). Belowground resource sharing in mixed tree-crop systems : methods to better understand belowground interactions. In *Sustainable development through trees on farms : agroforestry in its fifth decade*, pages 93–110. World Agroforestry (ICRAF) Southeast Asia Regional Program, Bogor, Indonesia. ISBN : 978-602-5894-03-9. 115

Bean, E. Z., Huffaker, R. G., and Migliaccio, K. W. (2018). Estimating Field Capacity from Volumetric Soil Water Content Time Series Using Automated Processing Algorithms. *Vadose Zone Journal*, 17(1) :180073, DOI : 10.2136/vzj2018.04.0073. 73

Beauchêne, K., Leroy, F., Fournier, A., Huet, C., Bonnefoy, M., Lorgeou, J., de Solan, B., Piquemal, B., Thomas, S., and Cohan, J.-P. (2019). Management and characterization of abiotic stress via PhénoField®, a high-throughput field phenotyping platform. *Frontiers in Plant Science*, 10, DOI : 10.3389/fpls.2019.00904. 88, 94, 95

Bedoussac, L. and Justes, E. (2010). Dynamic analysis of competition and complementarity for light and N use to understand the yield and the protein content of a durum wheat–winter pea intercrop. *Plant and Soil*, 330(1) :37–54, DOI : 10.1007/s11104-010-0303-8. 79

Beier, C., Beierkuhnlein, C., Wohlgemuth, T., Penuelas, J., Emmett, B., Körner, C., de Boeck, H., Christensen, J. H., Leuzinger, S., Janssens, I. A., and Hansen, K. (2012). Precipitation manipulation experiments - challenges and recommendations for the future. *Ecology Letters*, 15(8) :899–911, DOI : 10.1111/j.1461-0248.2012.01793.x. 76, 97, 98, 119

Bellow, J. G. and Nair, P. K. R. (2003). Comparing common methods for assessing understory light availability in shaded-perennial agroforestry systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 114(3) :197–211, DOI : 10.1016/S0168-1923(02)00173-9. 136

Belsky, A. J. (1994). Influences of trees on savanna productivity : tests of shade, nutrients, and tree-grass competition. *Ecology*, 75(4) :922–932, DOI : 10.2307/1939416. 89

Ben-Ari, T., Boé, J., Ciais, P., Lecerf, R., Velde, M. V. d., and Makowski, D. (2018). Causes and implications of the unforeseen 2016 extreme yield loss in the breadbasket of France. *Nature Communications*, 9(1) :1627, DOI : 10.1038/s41467-018-04087-x. 26

Bertness, M. D. and Callaway, R. (1994). Positive interactions in communities. *Trends in Ecology and Evolution*, 9(5) :191–193, DOI : 10.1016/0169-5347(94)90088-4. 116

Black, C. R., Randhawa, D., and Ong, C. K. (2015). Principles of ressource capture and use of light and water. In Ong, C. K., Black, C. R., and Wilson, J., editors, *Tree-crop interactions : Agroforestry in a changing climate*. CAB International, Wallingford, 2nd edition. ISBN : 978-1-78064-511-7. 135

Blanchet, G., Barkaoui, K., Bradley, M., Dupraz, C., and Gosme, M. (2021). Interactions between drought and shade on the productivity of winter pea grown in a 25-year-old walnut-based alley cropping system. *Journal of Agronomy and Crop Science*, DOI : 10.1111/jac.12488. 99, 101, 106, 136, 138, 139, 141, 150, 151, 152

Boeck, H. J. D., Groote, T. D., and Nijs, I. (2012). Leaf temperatures in glasshouses and open-top chambers. *New Phytologist*, 194(4) :1155–1164, DOI : https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04117.x. 97

Boinot, S., Fried, G., Storkey, J., Metcalfe, H., Barkaoui, K., Lauri, P.-E., and Mézière, D. (2019a). Alley cropping agroforestry systems : Reservoirs for weeds or refugia for plant diversity ? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 284 :106584, DOI : 10.1016/j.agee.2019.106584. 41, 54, 115

Boinot, S., Poulmarc'h, J., Mézière, D., Lauri, P.-E., and Sarthou, J.-P. (2019b). Distribution of overwintering invertebrates in temperate agroforestry systems : Implications for biodiversity conservation and biological control of crop pests. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 285 :106630, DOI : 10.1016/j.agee.2019.106630. 115

Bonada, M., Edwards, E. J., McCarthy, M. G., Sepúlveda, G. C., and Petrie, P. R. (2020). Impact of low rainfall during dormancy on vine productivity and development. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 26(4) :325–342, DOI : https://doi.org/10.1111/ajgw.12445. 93, 95

Brisson, N., Gate, P., Gouache, D., Charmet, G., Oury, F.-X., and Huard, F. (2010). Why are wheat yields stagnating in Europe ? A comprehensive data analysis for France. *Field Crops Research*, 119(1) :201–212, DOI : 10.1016/j.fcr.2010.07.012. 25, 115

Brisson, N., Launay, M., Mary, B., and Beaudoin, N. (2009). *Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model*. Editions Quae, Versailles, France. ISBN : 978-2-7592-0169-3. 18, 45, 173, 254, 256

Broadhead, J. (2015). Competition and Phenology in Agroforestry. In *Tree-crop interactions : Agroforestry in a changing climate*. Wallingford, 2nd edition. ISBN : 978-1-78064-511-7. 130

Bruce, R. R. and Shuman, F. L. (1962). Design for automatic movable plot shelter. *Transactions of the ASAE*, 5(2) :0212–0213, DOI : 10.13031/2013.40981. 88, 95

Burgess, P. J., den Herder, M., Dupraz, C., Garnett, K., Giannitsopoulos, M., Graves, A. R., Hermansen, J., Kanzler, M., Liagre, F., Mirck, J., Moreno, G., Mosquera-Losada, M., Palma, J. H. N., Pantera, A., and Plieninger, T. (2018). AGFORWARD - Project Final Report. Technical report, Cranfield University. 40

Calderini, D. F. and Slafer, G. A. (1998). Changes in yield and yield stability in wheat during the 20th century. *Field Crops Research*, 57(3) :335–347, DOI : 10.1016/S0378-4290(98)00080-X. 25, 115

Cammarano, D., Ceccarelli, S., Grando, S., Romagosa, I., Benbelkacem, A., Akar, T., Al-Yassin, A., Pecchioni, N., Francia, E., and Ronga, D. (2019). The impact of climate change on barley yield in the Mediterranean basin. *European Journal of Agronomy*, 106 :1–11, DOI : 10.1016/j.eja.2019.03.002. 115

Cannavo, P., Sansoulet, J., Harmand, J. M., Siles, P., Dreyer, E., and Vaast, P. (2011). Agroforestry associating coffee and Inga densiflora results in complementarity for water uptake and decreases deep drainage in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 140(1) :1–13, DOI : 10.1016/j.agee.2010.11.005. 135

Cannell, M. G. R., Van Noordwijk, M., and Ong, C. K. (1996). The central agroforestry hypothesis : the trees must acquire resources that the crop would not otherwise acquire. *Agroforestry Systems*, 34(1) :27–31, DOI : 10.1007/BF00129630. 44, 135

Cardinael, R. (2015). Stockage de carbone et dynamique des matières organiques des sols en agroforesterie sous climat méditerranéen et tempéré. These de doctorat, Université Paris-Saclay (ComUE). URL : http ://www.theses.fr/2015SACLA003. 56, 117

Cardinael, R., Chevallier, T., Barthès, B. G., Saby, N. P. A., Parent, T., Dupraz, C., Bernoux, M., and Chenu, C. (2015a). Impact of alley cropping agroforestry on stocks, forms and spatial distribution of soil organic carbon — A case study in a Mediterranean context. *Geoderma*, 259-260 :288–299, DOI : 10.1016/j.geoderma.2015.06.015. 41, 54, 115, 117, 135, 241

Cardinael, R., Chevallier, T., Cambou, A., Béral, C., Barthès, B. G., Dupraz, C., Durand, C., Kouakoua, E., and Chenu, C. (2017). Increased soil organic carbon stocks under agroforestry : A survey of six different sites in France. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 236 :243–255, DOI : 10.1016/j.agee.2016.12.011. 41, 115

Cardinael, R., Guenet, B., Chevallier, T., Dupraz, C., Cozzi, T., and Chenu, C. (2018). High organic inputs explain shallow and deep SOC storage in a long-term agroforestry system andamp ;ndash ; combining experimental and modeling approaches. *Biogeosciences*, 15(1) :297–317, DOI : 10.5194/bg-15-297-2018. 41, 54, 115, 135

Cardinael, R., Hoeffner, K., Chenu, C., Chevallier, T., Béral, C., Dewisme, A., and Cluzeau, D. (2019). Spatial variation of earthworm communities and soil organic carbon in temperate agroforestry. *Biology and Fertility of Soils*, 55(2) :171–183, DOI : 10.1007/s00374-018-1332-3. 54

Cardinael, R., Mao, Z., Prieto, I., Stokes, A., Dupraz, C., Kim, J. H., and Jourdan, C. (2015b). Competition with winter crops induces deeper rooting of walnut trees in a Mediterranean alley cropping agroforestry system. *Plant and Soil*, 391(1) :219–235, DOI : 10.1007/s11104-015-2422-8. 54, 130

Carlsson, M., Merten, M., Kayser, M., Isselstein, J., and Wrage-Mönnig, N. (2017). Drought stress resistance and resilience of permanent grasslands are shaped by functional group composition and N fertilization. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 236 :52–60, DOI : 10.1016/j.agee.2016.11.009. 88

Cellier, P., Richard, G., and Robin, P. (1996). Partition of sensible heat fluxes into bare soil and the atmosphere. *Agricultural and Forest Meteorology*, 82(1-4) :245–265, DOI : 10.1016/0168-1923(95)02328-3. 79

Charbonnier, F., Roupsard, O., Maire, G. l., Guillemot, J., Casanoves, F., Lacointe, A., Vaast, P., Allinne, C., Audebert, L., Cambou, A., Clément-Vidal, A., Defrenet, E., Duursma, R. A., Jarri, L., Jourdan, C., Khac, E., Leandro, P., Medlyn, B. E., Saint-André, L., Thaler, P., Meersche, K. V. D., Aguilar, A. B., Lehner, P., and Dreyer, E. (2017). Increased light-use efficiency sustains net primary productivity of shaded coffee plants in agroforestry system. *Plant, Cell and Environment*, 40(8) :1592–1608, DOI : https://doi.org/10.1111/pce.12964. 135

Christina, M., le Maire, G., Nouvellon, Y., Vezy, R., Bordon, B., Battie-Laclau, P., Gonçalves, J. L. M., Delgado-Rojas, J. S., Bouillet, J. P., and Laclau, J. P. (2018). Simulating the effects of different potassium and water supply regimes on soil water content and water table depth over a rotation of a tropical Eucalyptus grandis plantation. *Forest Ecology and Management*, 418 :4–14, DOI : 10.1016/j.foreco.2017.12.048. 112

Christina, M., Maire, G. L., Battie-Laclau, P., Nouvellon, Y., Bouillet, J.-P., Jourdan, C., Gonçalves, J. L. d. M., and Laclau, J.-P. (2015). Measured and modeled interactive effects of potassium deficiency and water deficit on gross primary productivity and light-use effi-

ciency in Eucalyptus grandis plantations. *Global Change Biology*, 21(5) :2022–2039, DOI : https://doi.org/10.1111/gcb.12817. 112

Cochard, H. (2020). A new mechanism for tree mortality due to drought and heatwaves. *Prepint on BioRxiv*, DOI : 10.1101/531632. 31

Coussement, T., Maloteau, S., Pardon, P., Artru, S., Ridley, S., Javaux, M., and Garré, S. (2018). A tree-bordered field as a surrogate for agroforestry in temperate regions : Where does the water go ? *Agricultural Water Management*, 210 :198–207, DOI : 10.1016/j.agwat.2018.06.033. 129

Craine, J. M. and Dybzinski, R. (2013). Mechanisms of plant competition for nutrients, water and light. *Functional Ecology*, 27(4) :833–840, DOI : 10.1111/1365-2435.12081. 43

Cranston, B. M., Powers, B. F., and Macinnis-Ng, C. (2020). Inexpensive throughfall exclusion experiment for single large trees. *Applications in Plant Sciences*, 8(2), DOI : 10.1002/aps3.11325. 95

Daoui, K. and Fatemi, Z. E. A. (2014). Agroforestry Systems in Morocco : The Case of Olive Tree and Annual Crops Association in Saïs Region. In Behnassi, M., Shahid, S. A., and Mintz-Habib, N., editors, *Science, Policy and Politics of Modern Agricultural System : Global Context to Local Dynamics of Sustainable Agriculture*, pages 281–289. Springer Netherlands, Dordrecht, DOI : 10.1007/978-94-007-7957-0_19. 39

Davies, W. J., Tardieu, F., and Trejo, C. L. (1994). How Do Chemical Signals Work in Plants that Grow in Drying Soil ? *Plant Physiology*, 104(2) :309–314, DOI : 10.1104/pp.104.2.309. 46, 130

Davis, A. S., Hill, J. D., Chase, C. A., Johanns, A. M., and Liebman, M. (2012). Increasing Cropping System Diversity Balances Productivity, Profitability and Environmental Health. *PLOS ONE*, 7(10) :e47149, DOI : 10.1371/journal.pone.0047149. Publisher : Public Library of Science. 38

Day, W., Legg, B. J., French, B. K., Johnston, A. E., Lawlor, D. W., and Jeffers, W. D. C. (1978). A drought experiment using mobile shelters : the effect of drought on barley yield, water use and nutrient uptake. *The Journal of Agricultural Science*, 91(3) :599–623, DOI : 10.1017/S0021859600059992. 116

De Boeck, H. J., Bloor, J. M. G., Aerts, R., Bahn, M., Beier, C., Emmett, B. A., Estiarte, M., Grünzweig, J. M., Halbritter, A. H., Holub, P., Jentsch, A., Klem, K., Kreyling, J., Kröel-Dulay, G., Larsen, K. S., Milcu, A., Roy, J., Sigurdsson, B. D., Smith, M. D., Sternberg, M., Vandvik, V., Wohlgemuth, T., Nijs, I., and Knapp, A. K. (2020). Understanding ecosystems of the future will require more than realistic climate change experiments – A response to Korell et al. *Global Change Biology*, 26(2) :e6–e7, DOI : https://doi.org/10.1111/gcb.14854. 90

Debaeke, P., Pellerin, S., and Scopel, E. (2017). Climate-smart cropping systems for temperate and tropical agriculture : mitigation, adaptation and trade-offs. *Cahiers Agricultures*, 26(3) :34002, DOI : 10.1051/cagri/2017028. 135

Degani, E., Leigh, S. G., Barber, H. M., Jones, H. E., Lukac, M., Sutton, P., and Potts, S. G. (2019). Crop rotations in a climate change scenario : short-term effects of crop diversity on resilience and ecosystem service provision under drought. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 285 :106625, DOI : 10.1016/j.agee.2019.106625. 88

del Pozo, A., Brunel-Saldias, N., Engler, A., Ortega-Farias, S., Acevedo-Opazo, C., Lobos, G. A., Jara-Rojas, R., and Molina-Montenegro, M. A. (2019). Climate Change Impacts and Adaptation Strategies of Agriculture in Mediterranean-Climate Regions (MCRs). *Sustainability*, 11(10) :2769, DOI : 10.3390/su11102769. 33

Delpierre, N., Guillemot, J., Dufrêne, E., Cecchini, S., and Nicolas, M. (2017). Tree phenological ranks repeat from year to year and correlate with growth in temperate deciduous forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 234-235 :1–10, DOI : 10.1016/j.agrformet.2016.12.008. 63

Deléglise, C., Meisser, M., Mosimann, E., Spiegelberger, T., Signarbieux, C., Jeangros, B., and Buttler, A. (2015). Drought-induced shifts in plants traits, yields and nutritive value under realistic grazing and mowing managements in a mountain grassland. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 213 :94–104, DOI : 10.1016/j.agee.2015.07.020. 88

den Herder, M., Moreno, G., Mosquera-Losada, R. M., Palma, J. H. N., Sidiropoulou, A., Santiago Freijanes, J. J., Crous-Duran, J., Paulo, J. A., Tomé, M., Pantera, A., Papanastasis, V. P., Mantzanas, K., Pachana, P., Papadopoulos, A., Plieninger, T., and Burgess, P. J. (2017). Current extent and stratification of agroforestry in the European Union. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 241 :121–132, DOI : 10.1016/j.agee.2017.03.005. 39, 40

Dore, M. H. I. (2005). Climate change and changes in global precipitation patterns : What do we know? *Environment International*, 31(8) :1167–1181, DOI : 10.1016/j.envint.2005.03.004. 30, 87

Dubey, R., Pathak, H., Chakrabarti, B., Singh, S., Gupta, D. K., and Harit, R. C. (2020). Impact of terminal heat stress on wheat yield in India and options for adaptation. *Agricultural Systems*, 181 :102826, DOI : 10.1016/j.agsy.2020.102826. 37

Dufour, L., Gosme, M., Le Bec, J., and Dupraz, C. (2020). Does pollarding trees improve the crop yield in a mature alley-cropping agroforestry system? *Journal of Agronomy and Crop Science*, 00 :1–10, DOI : 10.1111/jac.12403. 47, 54, 65, 132, 172

Dufour, L., Metay, A., Talbot, G., and Dupraz, C. (2013). Assessing Light Competition for Cereal Production in Temperate Agroforestry Systems using Experimentation and Crop Modelling. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 199(3) :217–227, DOI : 10.1111/jac.12008. 47, 54, 58, 129, 166

Dupraz, C. (1999). Adequate design of control treatments in long term agroforestry experiments with multiple objectives. *Agroforestry Systems*, 43 :35–48, DOI : 10.1007/978-94-017-0679-7_2. 54

Dupraz, C., Blitz-Frayret, C., Lecomte, I., Molto, Q., Reyes, F., and Gosme, M. (2018). Influence of latitude on the light availability for intercrops in an agroforestry alley-cropping system. *Agroforestry Systems*, 92(4) :1019–1033, DOI : 10.1007/s10457-018-0214-x. 129

Dupraz, C. and Liagre, F. (2008). *Agroforesterie : des arbres et des cultures*. La France Agricole, Paris. ISBN : 978-2-85557-150-8. 41, 117

Dupraz, C., Wolz, K. J., Lecomte, I., Talbot, G., Vincent, G., Mulia, R., Bussière, F., Ozier-Lafontaine, H., Andrianarisoa, S., Jackson, N., Lawson, G., Dones, N., Sinoquet, H., Lusiana, B., Harja, D., Domenicano, S., Reyes, F., Gosme, M., and Van Noordwijk, M. (2019). Hi-sAFe : A 3D agroforestry model for integrating dynamic tree–crop interactions. *Sustainability*, 11(8) :2293, DOI : 10.3390/su11082293. 54, 173, 174

Duru, M., Therond, O., Martin, G., Martin-Clouaire, R., Magne, M.-A., Justes, E., Journet, E.-P., Aubertot, J.-N., Savary, S., Bergez, J.-E., and Sarthou, J. P. (2015). How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services : a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(4) :1259–1281, DOI : 10.1007/s13593-015-0306-1. 38, 41, 88, 102

Elamri, Y., Cheviron, B., Mange, A., Dejean, C., Liron, F., and Belaud, G. (2018). Rain concentration and sheltering effect of solar panels on cultivated plots. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(2) :1285–1298, DOI : 10.5194/hess-22-1285-2018. 180

Erbs, M., Manderscheid, R., and Weigel, H.-J. (2012). A combined rain shelter and free-air CO2 enrichment system to study climate change impacts on plants in the field : Experimental drought stress and elevated CO2. *Methods in Ecology and Evolution*, 3(1) :81–88, DOI : 10.1111/j.2041-210X.2011.00143.x. 95, 98

Essiamah, S. and Eschrich, W. (1986). Water uptake in deciduous trees during winter and the role of conducting tissues in spring reactivation. *IAWA Journal*, 7(1) :31–38, DOI : 10.1163/22941932-90000435. 130

Fader, M., Shi, S., von Bloh, W., Bondeau, A., and Cramer, W. (2016). Mediterranean irrigation under climate change : more efficient irrigation needed to compensate for increases in irrigation water requirements. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(2) :953–973, DOI : 10.5194/hess-20-953-2016. Publisher : Copernicus GmbH. 33, 37

Falconnier, G. N., Vermue, A., Journet, E.-P., Christina, M., Bedoussac, L., and Justes, E. (2020). Contrasted response to climate change of winter and spring grain legumes in southwestern France. *Field Crops Research*, 259 :107967, DOI : 10.1016/j.fcr.2020.107967. 174

Fariaszewska, A., Aper, J., Van Huylenbroeck, J., De Swaef, T., Baert, J., and Pecio, (2020). Physiological and biochemical responses of forage grass varieties to mild drought stress

under field conditions. *International Journal of Plant Production*, 14(2) :335–353, DOI : 10.1007/s42106-020-00088-3. 95

Farooq, M., Gogoi, N., Barthakur, S., Baroowa, B., Bharadwaj, N., Alghamdi, S. S., and Siddique, K. H. M. (2017). Drought Stress in Grain Legumes during Reproduction and Grain Filling. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 203(2) :81–102, DOI : https://doi.org/10.1111/jac.12169. 136

Fay, P. A., Carlisle, J. D., Knapp, A. K., Blair, J. M., and Collins, S. L. (2000). Altering Rainfall Timing and Quantity in a Mesic Grassland Ecosystem : Design and Performance of Rainfall Manipulation Shelters. *Ecosystems*, 3(3) :308–319, DOI : 10.1007/s100210000028. 95

Felsmann, K., Baudis, M., Kayler, Z. E., Puhlmann, H., Ulrich, A., and Gessler, A. (2018). Responses of the structure and function of the understory plant communities to precipitation reduction across forest ecosystems in Germany. *Annals of Forest Science*, 75(1) :3, DOI : 10.1007/s13595-017-0681-7. 91

Field, C., Barros, V., Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Ebi, K. L., Estrada, Y. O., Genova, R. C., Girma, B., Kissel, E. S., Levy, A. N., MacCracken, S., Mastrandea, P. R., and White, L. L. (2014). Climate change 2014 : impacts, adaptation, and vulnerability. Part A : Global Aspects. Contributions of Working Group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Technical report, Cambridge University Press, New York, NY. 38

Fischer, R. A. (1985). Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *The Journal of Agricultural Science*, 105(2) :447–461, DOI : 10.1017/S0021859600056495. 116

Fletcher, H. F. and Maurer, A. R. (1966). A movable rain shelter for small experimental plots. *Canadian Journal of Plant Science*, 46 :695–698. 88

Foale, M. A., Davis, R., and Upchurch, D. R. (1986). The design of rain shelters for field experimentation : a review. *The British Society for Research in Agricultural Engineering*, (34) :1–16. 98

Fournier, R. A. and Hall, R. J., editors (2017). *Hemispherical Photography in Forest Science : Theory, Methods, Applications*. Managing Forest Ecosystems. Springer Netherlands, DOI : 10.1007/978-94-024-1098-3, ISBN 978-94-024-1098-3. 68

Fu, G., Charles, S. P., and Yu, J. (2009). A critical overview of pan evaporation trends over the last 50 years. *Climatic Change*, 97(1-2) :193–214, DOI : 10.1007/s10584-009-9579-1. 179

Gaborit-Varlet, P. (2010). Comment l'agroforesterie modifie-t-elle les facteurs qui conditionnent les performances agronomiques du pois chiche ? Master thesis, Agrocampus Ouest. 76

Gagné, G., Lorenzetti, F., and Rivest, D. (2019). Soybean yield responses to rainfall reduction and tree root pruning in a tree-based intercropping system in Québec (Poster). In *4th World Congress of Agroforestry*, Montpellier. 95, 101, 161

Gao, X., Liu, Z., Zhao, X., Ling, Q., Huo, G., and Wu, P. (2018). Extreme natural drought enhances interspecific facilitation in semiarid agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 265 :444–453, DOI : 10.1016/j.agee.2018.07.001. 47, 89, 99, 115, 135, 152

Gaudin, A. C. M., Tolhurst, T. N., Ker, A. P., Janovicek, K., Tortora, C., Martin, R. C., and Deen, W. (2015). Increasing crop diversity mitigates weather variations and improves yield stability. *PLOS ONE*, 10(2) :e0113261, DOI : 10.1371/journal.pone.0113261. 38

Gautier, H. and Varlet-Grancher, C. (1996). Regulation of leaf growth of grass by blue light. *Physiologia Plantarum*, 98(2) :424–430, DOI : https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.1996.980227.x. 46

Gavinet, J., Ourcival, J. M., Gauzere, J., García de Jalón, L., and Limousin, J. M. (2020). Drought mitigation by thinning : Benefits from the stem to the stand along 15 years of experimental rainfall exclusion in a holm oak coppice. *Forest Ecology and Management*, 473 :118266, DOI : 10.1016/j.foreco.2020.118266. 89

Gavinet, J., Ourcival, J. M., and Limousin, J. M. (2019). Rainfall exclusion and thinning can alter the relationships between forest functioning and drought. *New Phytologist*, 223(3) :1267–1279, DOI : 10.1111/nph.15860. 89

Gerland, P., Raftery, A. E., Ševčíková, H., Li, N., Gu, D., Spoorenberg, T., Alkema, L., Fosdick, B. K., Chunn, J., Lalic, N., Bay, G., Buettner, T., Heilig, G. K., and Wilmoth, J. (2014). World population stabilization unlikely this century. *Science*, 346(6206) :234–237, DOI : 10.1126/science.1257469. 115

Germon, A., Cardinael, R., Prieto, I., Mao, Z., Kim, J., Stokes, A., Dupraz, C., Laclau, J.-P., and Jourdan, C. (2016). Unexpected phenology and lifespan of shallow and deep fine roots of walnut trees grown in a silvoarable Mediterranean agroforestry system. *Plant and Soil*, 401(1) :409–426, DOI : 10.1007/s11104-015-2753-5. 54

Gherardi, L. A. and Sala, O. E. (2013). Automated rainfall manipulation system : a reliable and inexpensive tool for ecologists. *Ecosphere*, 4(2) :1–10, DOI : 10.1890/ES12-00371.1. 94

Gillespie, A. R., Jose, S., Mengel, D. B., Hoover, W. L., Pope, P. E., Seifert, J. R., Biehle, D. J., Stall, T., and Benjamin, T. J. (2000). Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the midwestern USA : 1. Production physiology. *Agroforestry Systems*, 48(1) :25–40, DOI : 10.1023/A:1006285205553. 42

Gimbel, K. F., Felsmann, K., Baudis, M., Puhlmann, H., Gessler, A., Bruelheide, H., Kayler, Z., Ellerbrock, R. H., Ulrich, A., Welk, E., and Weiler, M. (2015). Drought in forest understory

ecosystems – a novel rainfall reduction experiment. *Biogeosciences*, 12(4) :961–975, DOI : 10.5194/bg-12-961-2015. 91, 95

Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S. M., and Toulmin, C. (2010). Food security : the challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 327(5967) :812–818, DOI : 10.1126/science.1185383. 115

Gommers, C. M. M., Visser, E. J. W., Onge, K. R. S., Voesenek, L. A. C. J., and Pierik, R. (2013). Shade tolerance : when growing tall is not an option. *Trends in Plant Science*, 18(2) :65–71, DOI : 10.1016/j.tplants.2012.09.008. 136

Gosme, M., Inurreta-Aguirre, H., and Dupraz, C. (2016). Microclimatic effect of agroforestry on diurnal temperature cycle. In *3rd European Agroforestry Conference*, pages 183–186, Montpellier. European Agroforestry Federation. 47, 54, 115, 152

Graves, A. R., Burgess, P. J., Palma, J. H. N., Herzog, F., Moreno, G., Bertomeu, M., Dupraz, C., Liagre, F., Keesman, K., van der Werf, W., de Nooy, A. K., and van den Briel, J. P. (2007). Development and application of bio-economic modelling to compare silvoarable, arable, and forestry systems in three European countries. *Ecological Engineering*, 29(4) :434–449, DOI : 10.1016/j.ecoleng.2006.09.018. 42

Grimaldi, J. (2018). Impacts microclimatiques de l'agroforesterie en viticulture : étude de cas dans le Sud de la France. PhD Thesis, Université Toulouse 3 Paul Sabatier, Toulouse, France. 54, 166

Grimm, V. and Wissel, C. (1997). Babel, or the ecological stability discussions : an inventory and analysis of terminology and a guide for avoiding confusion. *Oecologia*, 109(3) :323–334, DOI : 10.1007/s004420050090. 35

Grossiord, C., Buckley, T. N., Cernusak, L. A., Novick, K. A., Poulter, B., Siegwolf, R. T. W., Sperry, J. S., and McDowell, N. G. (2020). Plant responses to rising vapor pressure deficit. *New Phytologist*, 226(6) :1550–1566, DOI : https://doi.org/10.1111/nph.16485. 31, 87, 111

Guilioni, L. and Jeuffroy, M.-H. (2010). Effects of high temperature on a pea crop. In *Physiology of the pea crop*, pages 44–60. Editions Quae, Versailles, France. ISBN : 978-1-57808-570-5. 140, 250

Guilioni, L. and Lecoeur, J. (2010). Carbon acquisition at the crop level in pea. In *Physiology of the pea crop*, pages 44–60. Editions Quae, Versailles, France. ISBN : 978-1-57808-570-5. 152

Guilioni, L., Wery, J., and Tardieu, F. (1997). Heat stress-induced abortion of buds and flowers in pea : Is sensitivity linked to organ age or to relations between reproductive organs ? *Annals of Botany*, 80(2) :159–168, DOI : 10.1006/anbo.1997.0425. 120

Guilioni, L., Wéry, J., and Lecoeur, J. (2003). High temperature and water deficit may reduce seed number in field pea purely by decreasing plant growth rate. *Functional Plant Biology*, 30(11) :1151, DOI : 10.1071/FP03105. 132, 176

Guillet, S., Corona, C., Stoffel, M., Khodri, M., Lavigne, F., Ortega, P., Eckert, N., Sielenou, P. D., Daux, V., Churakova (Sidorova), O. V., Davi, N., Edouard, J.-L., Zhang, Y., Luckman, B. H., Myglan, V. S., Guiot, J., Beniston, M., Masson-Delmotte, V., and Oppenheimer, C. (2017). Climate response to the Samalas volcanic eruption in 1257 revealed by proxy records. *Nature Geoscience*, 10(2) :123–128, DOI : 10.1038/ngeo2875. 24

Guillot, E., Hinsinger, P., Dufour, L., Roy, J., and Bertrand, I. (2019). With or without trees : Resistance and resilience of soil microbial communities to drought and heat stress in a Mediterranean agroforestry system. *Soil Biology and Biochemistry*, 129 :122–135, DOI : 10.1016/j.soilbio.2018.11.011. 54

Gundersen, P., Andersen, B. R., Beier, C., and Rasmussen, L. (1995). Experimental manipulations of water and nutrient input to a Norway spruce plantation at Klosterhede, Denmark. I. Unintended physical and chemical changes by roof experiments. *Plant and Soil*, 168-169 :601–611. 88, 95

Gundersen, P., Boxman, A. W., Lamersdorf, N., Moldan, F., and Andersen, B. R. (1998). Experimental manipulation of forest ecosystems : lessons from large roof experiments. *Forest Ecology and Management*, 101(1) :339–352, DOI : 10.1016/S0378-1127(97)00148-5. 88, 97

Gunderson, L. H. (2000). Ecological Resilience—In Theory and Application. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 31(1) :425–439, DOI : 10.1146/annurev.ecolsys.31.1.425. 35

Hack, H., Bleiholder, H., Buhr, L., Meier, U., Schnock-Fricke, U., Weber, E., and Witzenberger, A. (1992). Einheitliche Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen - Erweiterte BBCH-Skala, Allgemein. *Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd.*, 44 :265–270. 76, 121, 138, 248

Hacke, U. G., Stiller, V., Sperry, J. S., Pittermann, J., and McCulloh, K. A. (2001). Cavitation fatigue. Embolism and refilling cycles can weaken the cavitation resistance of xylem. *Plant Physiology*, 125(2) :779–786, DOI : 10.1104/pp.125.2.779. 103

Hahn, C., Ernst-Hasler, S., Lüscher, A., and Kahmen, A. (2020). Timing of drought in the growing season and strong legacy effects determine the annual productivity of temperate grasses in a changing climate. preprint, Earth System Science/Response to Global Change : Climate Change, DOI : 10.5194/bg-2020-100. 93

Hall, A. J. and Richards, R. A. (2013). Prognosis for genetic improvement of yield potential and water-limited yield of major grain crops. *Field Crops Research*, 143 :18–33, DOI : 10.1016/j.fcr.2012.05.014. 37

Hatfield, P. M., Wright, G. C., and Tapsall, W. R. (1990). A large, retractable, low cost and re-locatable rainout shelter design. *Experimental Agriculture*, 26(01) :57, DOI : 10.1017/S0014479700015404. 95

Heindl, J. C. and Brun, W. A. (1983). Light and shade effects on abscission and C14-photoassimilate partitioning among reproductive structures in soybean. *Plant Physiology*, 73(2) :434–439, DOI : 10.1104/pp.73.2.434. 131

Heitschmidt, R. K., Haferkamp, M. R., Karl, M. G., and Hild, A. L. (1999). Drought and grazing : I. Effects on quantity of forage produced. *Journal of Range Management*, page 7. 88

Herold, N., Schöning, I., Gutknecht, J., Alt, F., Boch, S., Müller, J., Oelmann, Y., Socher, S. A., Wilcke, W., Wubet, T., and Schrumpf, M. (2014). Soil property and management effects on grassland microbial communities across a latitudinal gradient in Germany. *Applied Soil Ecology*, 73 :41–50, DOI : 10.1016/j.apsoil.2013.07.009. 161

Herrera-Estrada, J. E. and Sheffield, J. (2017). Uncertainties in Future Projections of Summer Droughts and Heat Waves over the Contiguous United States. *Journal of Climate*, 30(16) :6225–6246, DOI : 10.1175/JCLI-D-16-0491.1. 29

Hill, S. B. and MacRae, R. J. (1996). Conceptual framework for the transition from conventional to sustainable agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture*, 7(1) :81–87, DOI : 10.1300/J064v07n01_07. 37

Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4(1) :1–23, DOI : 10.1146/annurev.es.04.110173.000245. 35

Holt-Giménez, E., Shattuck, A., Altieri, M., Herren, H., and Gliessman, S. (2012). We already grow enough food for 10 billion people … and still can't end hunger. *Journal of Sustainable Agriculture*, 36(6) :595–598, DOI : 10.1080/10440046.2012.695331. 25

Hoover, D. L., Wilcox, K. R., and Young, K. E. (2018). Experimental droughts with rainout shelters : a methodological review. *Ecosphere*, 9(1) :e02088, DOI : 10.1002/ecs2.2088. 91

Horton, M. L. (1962). "Rainout" shelter for corn. *Iowa Farm Science*, 17(2) :16. 88

Howden, S. M., Soussana, J.-F., Tubiello, F. N., Chhetri, N., Dunlop, M., and Meinke, H. (2007). Adapting agriculture to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(50) :19691–19696. 115

Huang, M., Wang, X., Keenan, T. F., and Piao, S. (2018). Drought timing influences the legacy of tree growth recovery. *Global Change Biology*, 24(8) :3546–3559, DOI : https://doi.org/10.1111/gcb.14294. 103

Hurvich, C. M. and Tsai, C.-L. (1991). Bias of the corrected AIC criterion for underfitted regression and time series models. *Biometrika*, 78(3) :499–509, DOI : 10.1093/biomet/78.3.499. 122

INRAé (2019). Preparing grasslands to better adapt to climate change. URL : https ://www.inrae.fr/en/news/grasslands-and-climate-change. Consulted on the 25/04/2021. 95

Inurreta-Aguirre, H. (2018). Looking for facilitation in agroforestry : can trees reduce terminal water and heat stress in winter cereals in the Mediterrainean climate ? An experimental and modelling approach. PhD thesis, Université de Montpellier. URL : http ://www.theses.fr/s191107. 54, 65, 112, 150

Inurreta-Aguirre, H. D., Lauri, P.-E., Dupraz, C., and Gosme, M. (2018). Yield components and phenology of durum wheat in a Mediterranean alley-cropping system. *Agroforestry Systems*, 92(4) :961–974, DOI : 10.1007/s10457-018-0201-2. 54, 78, 115, 116, 136, 152

IPCC (2013). *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 27, 28, 29, 32, 33, 222, 223, 224

IPCC (2014). *Climate Change 2014 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A : Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 87, 89

IUSS Working Group WRB (2007). World Reference Base for Soil Ressources 2006, first update 2007. World Soil Resources Reports 103, FAO, Rome. 117

Ives, A. R. and Carpenter, S. R. (2007). Stability and diversity of ecosystems. *Science*, 317(5834) :58–62, DOI : 10.1126/science.1133258. 35

Jackson, N. A. and Wallace, J. S. (1999). Analysis of soil water dynamics in an agroforestry system based on detailed soil water records from time-domain reflectometry. *Hydrology and Earth System Sciences*, 3(4) :517–527. 89, 115, 135

Jamieson, P. D., Martin, R. J., and Francis, G. S. (1995). Drought influences on grain yield of barley, wheat, and maize. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 23(1) :55–66, DOI : 10.1080/01140671.1995.9513868. 92

Jat, R. K., Singh, P., Jat, M. L., Dia, M., Sidhu, H. S., Jat, S. L., Bijarniya, D., Jat, H. S., Parihar, C. M., Kumar, U., and Ridaura, S. L. (2018). Heat stress and yield stability of wheat genotypes under different sowing dates across agro-ecosystems in India. *Field Crops Research*, 218 :33–50, DOI : 10.1016/j.fcr.2017.12.020. 37

Jentsch, A., Kreyling, J., and Beierkuhnlein, C. (2007). A new generation of climate-change experiments : events, not trends. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(7) :365–374. 91, 94

Jeuffroy, M., Duthion, C., Meynard, J., and Pigeaire, A. (1990). Effect of a short period of high day temperatures during flowering on the seed number per pod of pea (Pisum sativum L). *Agronomie*, 10(2) :139–145, DOI : 10.1051/agro:19900207. 120

Jeuffroy, M.-H., Lecoeur, J., and Roche, R. (2010). The seed number. In *Physiology of the pea crop*, pages 3–43. Editions Quae, Versailles, France. ISBN : 978-1-57808-570-5. 176

Jeuffroy, M.-H. and Warembourg, F. R. (1991). Carbon Transfer and Partitioning between Vegetative and Reproductive Organs in *Pisum sativum* L. *Plant Physiology*, 97(1) :440–448, DOI : 10.1104/pp.97.1.440. 130, 131

Jiang, H. and Egli, D. B. (1993). Shade Induced Changes in Flower and Pod Number and Flower and Fruit Abscission in Soybean. *Agronomy Journal*, 85(2) :221–225, DOI : 10.2134/agronj1993.00021962008500020011x. 131

Jose, S. (2009). Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits : an overview. *Agroforestry Systems*, 76(1) :1–10, DOI : 10.1007/s10457-009-9229-7. 41, 135

Jose, S., Gillespie, A., and Pallardy, S. (2004). Interspecific interactions in temperate agroforestry. *Agroforestry Systems*, 61(1) :237–255, DOI : 10.1023/B:AGFO.0000029002.85273.9b. 115

Jose, S., Gillespie, A. R., Seifert, J. R., and Biehle, D. J. (2000). Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the midwestern USA : 2. Competition for water. *Agroforestry Systems*, 48(1) :41–59, DOI : 10.1023/A:1006289322392. 42, 65, 115, 129, 135

Kang, B. T. (1993). Alley cropping : past achievements and future directions. *Agroforestry Systems*, 23(2-3) :141–155, DOI : 10.1007/BF00704912. 39

Kant, S., Thoday-Kennedy, E., Joshi, S., Vakani, J., Hughes, J., Maphosa, L., Sadler, A., Menidis, M., Slater, A., and Spangenberg, G. (2017). Automated rainout shelter's design for well-defined water stress field phenotyping of crop plants. *Crop Science*, 57(1) :327, DOI : 10.2135/cropsci2016.08.0677. 88, 95

Kanzler, M., Böhm, C., Mirck, J., Schmitt, D., and Veste, M. (2018). Microclimate effects on evaporation and winter wheat (Triticum aestivum L.) yield within a temperate agroforestry system. *Agroforestry Systems*, DOI : 10.1007/s10457-018-0289-4. 89, 115, 135, 152

Kay, S., Rega, C., Moreno, G., den Herder, M., Palma, J. H. N., Borek, R., Crous-Duran, J., Freese, D., Giannitsopoulos, M., Graves, A., Jäger, M., Lamersdorf, N., Memedemin, D., Mosquera-Losada, R., Pantera, A., Paracchini, M. L., Paris, P., Roces-Díaz, J. V., Rolo, V., Rosati, A., Sandor, M., Smith, J., Szerencsits, E., Varga, A., Viaud, V., Wawer, R., Burgess, P. J., and Herzog, F. (2019). Agroforestry creates carbon sinks whilst enhancing the environment in agricultural landscapes in Europe. *Land Use Policy*, 83 :581–593, DOI : 10.1016/j.landusepol.2019.02.025. 135

Kerr, A. C. (2012). Drought resilience of maize-legume agroforestry systems in Malawi. PhD thesis, UC Berkeley. URL : https ://escholarship.org/uc/item/7bm3k6nv. 98, 99, 101

Kirkegaard, J. A., Lilley, J. M., Brill, R. D., Ware, A. H., and Walela, C. K. (2018). The critical period for yield and quality determination in canola (Brassica napus L.). *Field Crops Research*, 222 :180–188, DOI : 10.1016/j.fcr.2018.03.018. 116

Kirschbaum, M. U. F., Gross, L. J., and Pearcy, R. W. (1988). Observed and modelled stomatal responses to dynamic light environments in the shade plant Alocasia macrorrhiza. *Plant, Cell and Environment*, 11(2) :111–121, DOI : https://doi.org/10.1111/1365-3040.ep11604898. 46

Knapp, A. K., Avolio, M. L., Beier, C., Carroll, C. J. W., Collins, S. L., Dukes, J. S., Fraser, L. H., Griffin-Nolan, R. J., Hoover, D. L., Jentsch, A., Loik, M. E., Phillips, R. P., Post, A. K., Sala, O. E., Slette, I. J., Yahdjian, L., and Smith, M. D. (2017). Pushing precipitation to the extremes in distributed experiments : recommendations for simulating wet and dry years. *Global Change Biology*, 23(5) :1774–1782, DOI : 10.1111/gcb.13504. 91

Knapp, A. K., Beier, C., Briske, D. D., Classen, A. T., Luo, Y., Reichstein, M., Smith, M. D., Smith, S. D., Bell, J. E., Fay, P. A., Heisler, J. L., Leavitt, S. W., Sherry, R., Smith, B., and Weng, E. (2008). Consequences of more extreme precipitation regimes for terrestrial ecosystems. *BioScience*, 58(9) :811–821, DOI : 10.1641/B580908. 91

Korell, L., Auge, H., Chase, J. M., Harpole, S., and Knight, T. M. (2020a). We need more realistic climate change experiments for understanding ecosystems of the future. *Global Change Biology*, 26(2) :325–327, DOI : https://doi.org/10.1111/gcb.14797. 90

Korell, L., Auge, H., Chase, J. M., Harpole, W. S., and Knight, T. M. (2020b). Understanding plant communities of the future requires filling knowledge gaps. *Global Change Biology*, 26(2) :328–329, DOI : https://doi.org/10.1111/gcb.14920. 90

Korwar, G. R. and Radder, G. D. (1994). Influence of root pruning and cutting interval of Leucaena hedgerows on performance of alley cropped rabi sorghum. *Agroforestry Systems*, 25(2) :95–109, DOI : 10.1007/BF00705670. 115, 129

Kreyling, J., Arfin Khan, M. A. S., Sultana, F., Babel, W., Beierkuhnlein, C., Foken, T., Walter, J., and Jentsch, A. (2017). Drought effects in climate change manipulation experiments : Quantifying the influence of ambient weather conditions and rain-out shelter artifacts. *Ecosystems*, 20(2) :301–315, DOI : 10.1007/s10021-016-0025-8. 97

Kreyling, J. and Beier, C. (2013). Complexity in climate change manipulation experiments. *BioScience*, 63(9) :763–767, DOI : 10.1525/bio.2013.63.9.12. 90

Kundel, D., Bodenhausen, N., Jørgensen, H. B., Truu, J., Birkhofer, K., Hedlund, K., Mäder, P., and Fliessbach, A. (2020). Effects of simulated drought on biological soil quality, microbial diversity and yields under long-term conventional and organic agriculture. *FEMS Microbiology Ecology*, 96(fiaa205), DOI : 10.1093/femsec/fiaa205. 92

Kundel, D., Lori, M., Fliessbach, A., van Kleunen, M., Meyer, S., and Mäder, P. (2021). Drought effects on nitrogen provisioning in different agricultural systems : Insights gained and lessons learned from a field experiment. *Nitrogen*, 2(1) :1–17, DOI : 10.3390/nitrogen2010001. 98, 110

Kundel, D., Meyer, S., Birkhofer, H., Fliessbach, A., Maeder, P., Scheu, S., van Kleunen, M., and Birkhofer, K. (2018). Design and manual to construct rainout-shelters for climate change experiments in agroecosystems. *Frontiers in Environmental Science*, 6, DOI : 10.3389/fenvs.2018.00014. 95

Kuznetsova, A., Brockhoff, P. B., and Christensen, R. H. B. (2017). lmerTest package : Tests in linear mixed effects models. *Journal of Statistical Software*, 82(1) :1–26, DOI : 10.18637/jss.v082.i13. 123

Lake, L., Godoy-Kutchartt, D. E., Calderini, D. F., Verrell, A., and Sadras, V. O. (2019). Yield determination and the critical period of faba bean (Vicia faba L.). *Field Crops Research*, 241 :107575, DOI : 10.1016/j.fcr.2019.107575. 116, 131, 166

Lake, L. and Sadras, V. O. (2014). The critical period for yield determination in chickpea (Cicer arietinum L.). *Field Crops Research*, 168 :1–7, DOI : 10.1016/j.fcr.2014.08.003. 46, 92, 116, 131, 166

Lambers, H., Chapin, F. S., and Pons, T. L. (2008a). Leaf Energy Budgets : Effects of Radiation and Temperature. In *Plant Physiological Ecology*, pages 225–244. Springer Science and Business Media, New York, NY, 2nd edition. ISBN : 978-0-387-78340-6. 153, 154

Lambers, H., Chapin, F. S., and Pons, T. L. (2008b). *Plant Physiological Ecology*. Springer Science and Business Media, New York, NY, 2nd edition. ISBN : 978-0-387-78340-6. 45

Langton, S. (1990). Avoiding edge effects in agroforestry experiments; the use of neighbour-balanced designs and guard areas. *Agroforestry Systems*, 12(2) :173–185, DOI : 10.1007/BF00123472. 60

Lauri, P.-E. (2021). Tree architecture and functioning facing multispecies environments : We have gone only halfway in fruit-trees. *American Journal of Botany*, 108(1) :3–7, DOI : https://doi.org/10.1002/ajb2.1598. 39

Lavigne, F., Degeai, J.-P., Komorowski, J.-C., Guillet, S., Robert, V., Lahitte, P., Oppenheimer, C., Stoffel, M., Vidal, C. M., Surono, n., Pratomo, I., Wassmer, P., Hajdas, I., Hadmoko, D. S., and de Belizal, E. (2013). Source of the great A.D. 1257 mystery eruption unveiled, Samalas volcano, Rinjani Volcanic Complex, Indonesia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(42) :16742–16747, DOI : 10.1073/pnas.1307520110. 24

Lecoeur, J. (2010). Vegetative development : The morphogenesis of plant organs. In *Physiology of the pea crop*, pages 3–43. Editions Quae, Versailles, France. ISBN : 978-1-57808-570-5. 150, 151

Lecoeur, J. and Guilioni, L. (1998). Rate of leaf production in response to soil water deficits in field pea. *Field Crops Research*, 57(3) :319–328, DOI : 10.1016/S0378-4290(98)00076-8. 130

Lecoeur, J. and Sinclair, T. R. (1996). Field pea transpiration and leaf growth in response to soil water deficits. *Crop Science*, 36(2) :331–335, DOI : 10.2135/cropsci1996.0011183X003600020020x. 82, 130

Lecoeur, J. and Sinclair, T. R. (2001). Harvest index increase during seed growth of field pea. *European Journal of Agronomy*, 14(3) :173–180, DOI : 10.1016/S1161-0301(00)00091-5. 176

Lecoeur, J., Wery, J., Turc, O., and Tardieu, F. (1995). Expansion of pea leaves subjected to short water deficit : cell number and cell size are sensitive to stress at different periods of leaf development. *Journal of Experimental Botany*, 46(9) :1093–1101, DOI : 10.1093/jxb/46.9.1093. 130

Lemoine, N. P., Sheffield, J., Dukes, J. S., Knapp, A. K., and Smith, M. D. (2016). Terrestrial Precipitation Analysis (TPA) : A resource for characterizing long-term precipitation regimes and extremes. *Methods in Ecology and Evolution*, 7(11) :1396–1401, DOI : https://doi.org/10.1111/2041-210X.12582. 91

Lhotka, O., Kyselý, J., and Farda, A. (2018). Climate change scenarios of heat waves in Central Europe and their uncertainties. *Theoretical and Applied Climatology*, 131(3) :1043–1054, DOI : 10.1007/s00704-016-2031-3. 29

Limousin, J. M., Rambal, S., Ourcival, J. M., Rocheteau, A., Joffre, R., and Rodriguez-Cortina, R. (2009). Long-term transpiration change with rainfall decline in a Mediterranean *Quercus ilex* forest. *Global Change Biology*, 15(9) :2163–2175, DOI : 10.1111/j.1365-2486.2009.01852.x. 95

Lin, M. and Huybers, P. (2012). Reckoning wheat yield trends. *Environmental Research Letters*, 7(2) :024016, DOI : 10.1088/1748-9326/7/2/024016. 25, 115

Lionello, P. and Scarascia, L. (2018). The relation between climate change in the Mediterranean region and global warming. *Regional Environmental Change*, 18(5) :1481–1493, DOI : 10.1007/s10113-018-1290-1. 33, 87

Lockhart, J. A. (1965). An analysis of irreversible plant cell elongation. *Journal of Theoretical Biology*, 8(2) :264–275, DOI : 10.1016/0022-5193(65)90077-9. 130

Lott, J. E., Howard, S. B., Ong, C. K., and Black, C. R. (2000). Long-term productivity of a Grevillea robusta-based overstorey agroforestry system in semi-arid Kenya : II. Crop growth and system performance. *Forest Ecology and Management*, 139(1) :187–201, DOI : 10.1016/S0378-1127(00)00267-X. 78

Lott, J. E., Ong, C. K., and 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(6) :1140–1151, DOI : 10.1016/j.agrformet.2009.02.002. 47, 89, 152, 153

Lovell, S. T., Dupraz, C., Gold, M., Jose, S., Revord, R., Stanek, E., and Wolz, K. J. (2017). Temperate agroforestry research : considering multifunctional woody polycultures and the design of long-term field trials. *Agroforestry Systems*, pages 1–19, DOI : 10.1007/s10457-017-0087-4. 39, 54

Lozano, Y. M., Aguilar-Trigueros, C. A., Flaig, I. C., and Rillig, M. C. (2020). Root trait responses to drought are more heterogeneous than leaf trait responses. *Functional Ecology*, 34(11) :2224–2235, DOI : https://doi.org/10.1111/1365-2435.13656. 46

Luedeling, E., Smethurst, P. J., Baudron, F., Bayala, J., Huth, N. I., van Noordwijk, M., Ong, C. K., Mulia, R., Lusiana, B., Muthuri, C., and Sinclair, F. L. (2016). Field-scale modeling of tree–crop interactions : Challenges and development needs. *Agricultural Systems*, 142 :51–69, DOI : 10.1016/j.agsy.2015.11.005. 112

Lutz, W. and Kc, S. (2010). Dimensions of global population projections : what do we know about future population trends and structures ? *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, 365(1554) :2779–2791, DOI : 10.1098/rstb.2010.0133. 25

Mae, T., Thomas, H., Gay, A. P., Makino, A., and Hidema, J. (1993). Leaf development in Lolium temulentum : Photosynthesis and photosynthetic proteins in leaves senescing under different irradiances. *Plant and Cell Physiology*, 34(3) :391–399, DOI : 10.1093/oxfordjournals.pcp.a078433. 136

Maestre, F. T., Callaway, R. M., Valladares, F., and Lortie, C. J. (2009). Refining the stress-gradient hypothesis for competition and facilitation in plant communities. *Journal of Ecology*, 97(2) :199–205, DOI : 10.1111/j.1365-2745.2008.01476.x. 116

Mahieu, S., Metay, A., Brunel, B., and Dufour, L. (2016). Nitrogen fluxes in chickpea grown in Mediterranean agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 90(2) :313–324, DOI : 10.1007/s10457-015-9856-0. 54, 76, 150

Malek, and Verburg, P. (2017). Mediterranean land systems : Representing diversity and intensity of complex land systems in a dynamic region. *Landscape and Urban Planning*, 165 :102–116, DOI : 10.1016/j.landurbplan.2017.05.012. 33, 34

Malek, and Verburg, P. H. (2018). Adaptation of land management in the Mediterranean under scenarios of irrigation water use and availability. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 23(6) :821–837, DOI : 10.1007/s11027-017-9761-0. 33

Malik, N. S. A. and Berrie, A. M. M. (1975). Correlative effects of fruits and leaves in senescence of pea plants. *Planta*, 124(2) :169–175, DOI : 10.1007/BF00384759. 150

Malézieux, E. (2012). Designing cropping systems from nature. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(1) :15–29, DOI : 10.1007/s13593-011-0027-z. 38, 135

Malézieux, E., Crozat, Y., Dupraz, C., Laurans, M., Makowski, D., Ozier-Lafontaine, H., Rapidel, B., Tourdonnet, S., and Valantin-Morison, M. (2009). Mixing plant species in cropping systems : concepts, tools and models. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1) :43–62, DOI : 10.1051/agro:2007057. 38, 88, 102, 135, 136

Marrou, H., Dufour, L., and Wery, J. (2013). How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil–crop system? *European Journal of Agronomy*, 50 :38–51, DOI : 10.1016/j.eja.2013.05.004. 136, 141, 162

Martin, R. J. and Jamieson, P. D. (1996). Effect of timing and intensity of drought on the growth and yield of field peas (Pisum sativum L.). *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 24(2) :167–174, DOI : 10.1080/01140671.1996.9513949. 92, 116, 131, 151

Martin-Chave, A., Béral, C., and Capowiez, Y. (2019). Agroforestry has an impact on nocturnal predation by ground beetles and Opiliones in a temperate organic alley cropping system. *Biological Control*, 129 :128–135, DOI : 10.1016/j.biocontrol.2018.10.009. 115

Mazerolle, M. (2020). AICcmodavg : Model selection and multimodel inference based on (Q)AIC(c). 122

Mbow, C., Rosenzweig, C., Tubiello, F., Benton, T., Herrero, M., Pradhan, P., Barioni, L., Krishnapillai, M., Liwenga, E., Rivera-Ferre, M., Sapkota, T., and Xu, Y. (2019). IPCC special report on land and climate change. Chapter 5 : Food security. 24

Mead, R. and Willey, R. W. (1980). The Concept of a 'Land Equivalent Ratio' and Advantages in Yields from Intercropping. *Experimental Agriculture*, 16(3) :217–228, DOI : 10.1017/S0014479700010978. 42, 100

Meadley, J. T. and Milbourn, G. M. (1971). The growth of vining peas : III. The effect of shading on abscission of flowers and pods. *The Journal of Agricultural Science*, 77(1) :103–108, DOI : 10.1017/S0021859600023534. 130

Messing, I. and Akrimi, N. (1998). Evaporative demand, water use, and crop yield at sheltered and unsheltered sites in an arid environment. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 12(3) :223–235, DOI : 10.1080/15324989809381511. 135

Michler, J. D., Baylis, K., Arends-Kuenning, M., and Mazvimavi, K. (2019). Conservation agriculture and climate resilience. *Journal of Environmental Economics and Management*, 93 :148–169, DOI : 10.1016/j.jeem.2018.11.008. 88

Michon, G. (2011). Revisiting the Resilience of Chestnut Forests in Corsica : from Social-Ecological Systems Theory to Political Ecology. *Ecology and Society*, 16(2), DOI : 10.5751/ES-04087-160205. 39

Miller, A. W. and 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(3) :247–259, DOI : 10.1023/A:1013327510748. 115, 129

Misson, L., Degueldre, D., Collin, C., Rodriguez, R., Rocheteau, A., Ourcival, J.-M., and Rambal, S. (2011). Phenological responses to extreme droughts in a Mediterranean forest. *Global Change Biology*, 17(2) :1036–1048, DOI : 10.1111/j.1365-2486.2010.02348.x. 94, 95, 160

Misson, L., Rocheteau, A., Rambal, S., Ourcival, J.-M., Limousin, J.-M., and Rodriguez, R. (2010). Functional changes in the control of carbon fluxes after 3 years of increased drought in a Mediterranean evergreen forest ? *Global Change Biology*, 16(9) :2461–2475, DOI : 10.1111/j.1365-2486.2009.02121.x. 94, 95

Mohamed, A., Monnier, Y., Mao, Z., Jourdan, C., Sabatier, S., Dupraz, C., Dufour, L., Millan, M., and Stokes, A. (2020). Asynchrony in shoot and root phenological relationships in hybrid walnut. *New Forests*, 51(1) :41–60, DOI : 10.1007/s11056-019-09718-9. 54

Mohamed, A., Stokes, A., Mao, Z., Jourdan, C., Sabatier, S., Pailler, F., Fourtier, S., Dufour, L., and Monnier, Y. (2018). Linking above- and belowground phenology of hybrid walnut growing along a climatic gradient in temperate agroforestry systems. *Plant and Soil*, 424(1) :103–122, DOI : 10.1007/s11104-017-3417-4. 54

Molotoks, A., Stehfest, E., Doelman, J., Albanito, F., Fitton, N., Dawson, T. P., and Smith, P. (2018). Global projections of future cropland expansion to 2050 and direct impacts on biodiversity and carbon storage. *Global Change Biology*, 24(12) :5895–5908, DOI : https://doi.org/10.1111/gcb.14459. 25

Monteith, J. L. (1972). Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems. *The Journal of Applied Ecology*, 9(3) :747, DOI : 10.2307/2401901. 45, 136, 141

Monteith, J. L. (1977). Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, (281) :277–294. 45, 136, 141

Monteith, J. L., Ong, C. K., and Corlett, J. E. (1991). Microclimatic interactions in agroforestry systems. *Forest Ecology and Management*, 45(1) :31–44, DOI : 10.1016/0378-1127(91)90204-9. 135

Moore, F. C. and Lobell, D. B. (2015). The fingerprint of climate trends on European crop yields. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(9) :2670–2675, DOI : 10.1073/pnas.1409606112. 115

Morak, S., Hegerl, G. C., and Christidis, N. (2013). Detectable Changes in the Frequency of Temperature Extremes. *Journal of Climate*, 26(5) :1561–1574, DOI : 10.1175/JCLI-D-11-00678.1. 28, 29

Morak, S., Hegerl, G. C., and Kenyon, J. (2011). Detectable regional changes in the number of warm nights. *Geophysical Research Letters*, 38(17), DOI : https://doi.org/10.1029/2011GL048531. 29

Mori, A. S., Furukawa, T., and Sasaki, T. (2013). Response diversity determines the resilience of ecosystems to environmental change : Response diversity and ecosystem resilience. *Biological Reviews*, 88(2) :349–364, DOI : 10.1111/brv.12004. 38

Mulia, R. and 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(1-2) :71–85, DOI : 10.1007/s11104-005-3770-6. 54, 130

Muller, L. A. H., Ballhausen, M.-B., Lakovic, M., and Rillig, M. C. (2020). Response to the Editor : Assessing the robustness of communities and ecosystems in global change research. *Global Change Biology*, 26(2) :e4–e5, DOI : https://doi.org/10.1111/gcb.14853. 90

Munier-Jolain, N. G., Biarnès, V., Chaillet, I., Lecoeur, J., and Jeuffroy, M.-H. (2010). *Physiology of the pea crop*. Editions Quae, Versailles, France. ISBN : 978-1-57808-570-5. 75, 78, 116, 130

Munier-Jolain, N. G. and Ney, B. (1998). Seed growth rate in grain legumes II. Seed growth rate depends on cotyledon cell number. *Journal of Experimental Botany*, 49(329) :1971–1976. 132

Mézière, D., Boinot, S., de Wall, L., Cadet, E., and Fried, G. (2016). Arable weeds in alley cropping agroforestry systems – results of a first year survey. In *3rd European Agroforestry Conference*, page 466, Montpellier. 54

Narain, P., Singh, R. K., Sindhwal, N. S., and Joshie, P. (1997a). Agroforestry for soil and water conservation in the western Himalayan Valley Region of India 1. Runoff, soil and nutrient losses. *Agroforestry Systems*, 39(2) :175–189, DOI : 10.1023/A:1005916713956. 41

Narain, P., Singh, R. K., Sindhwal, N. S., and Joshie, P. (1997b). Agroforestry for soil and water conservation in the western Himalayan Valley Region of India 2. Crop and tree production. *Agroforestry Systems*, 39(2) :191–203, DOI : 10.1023/A:1005900229886. 135

Nasielski, J., Furze, J. R., Tan, J., Bargaz, A., Thevathasan, N. V., and Isaac, M. E. (2015). Agroforestry promotes soybean yield stability and N2-fixation under water stress. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(4) :1541–1549, DOI : 10.1007/s13593-015-0330-1. 95, 99, 101, 102, 152, 161

Okono, A., Monneveux, P., and Ribaut, J.-M. (2013). Facing the challenges of global agriculture today : what can we do about drought ? *Frontiers in Physiology*, 4, DOI : 10.3389/fphys.2013.00289. 88

Ong, C. K., Black, C. R., and Wilson, J. (2015). *Tree-Crop Interactions, 2nd Edition, Agroforestry in a Changing Climate*. CAB International, Wallingford. ISBN : 978-1-78064-511-7. 115

Ong, C. K., Wilson, J., Deans, J. D., Mulayta, J., Raussen, T., and Wajja-Musukwe, N. (2002). Tree–crop interactions : manipulation of water use and root function. *Agricultural Water Management*, 53(1) :171–186, DOI : 10.1016/S0378-3774(01)00163-9. 65

Osborne, T. M. and Wheeler, T. R. (2013). Evidence for a climate signal in trends of global crop yield variability over the past 50 years. *Environmental Research Letters*, 8(2) :024001, DOI : 10.1088/1748-9326/8/2/024001. 25, 115

Panozzo, A., Bernazeau, B., and Desclaux, D. (2019). Durum wheat in organic olive orchard : good deal for the farmers ? *Agroforestry Systems*, DOI : 10.1007/s10457-019-00441-0. 42

Pardon, P., Reheul, D., Mertens, J., Reubens, B., De Frenne, P., De Smedt, P., Proesmans, W., Van Vooren, L., and Verheyen, K. (2019). Gradients in abundance and diversity of ground dwelling arthropods as a function of distance to tree rows in temperate arable agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 270-271 :114–128, DOI : 10.1016/j.agee.2018.10.017. 41, 115

Pardon, P., Reubens, B., Mertens, J., Verheyen, K., De Frenne, P., De Smet, G., Van Waes, C., and Reheul, D. (2018). Effects of temperate agroforestry on yield and quality of different arable intercrops. *Agricultural Systems*, 166 :135–151, DOI : 10.1016/j.agsy.2018.08.008. 42, 129

Pardon, P., Reubens, B., Reheul, D., Mertens, J., De Frenne, P., Coussement, T., Janssens, P., and Verheyen, K. (2017). Trees increase soil organic carbon and nutrient availability in temperate agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 247 :98–111, DOI : 10.1016/j.agee.2017.06.018. 41, 115, 135

Pendergrass, A. G. and Knutti, R. (2018). The uneven nature of daily precipitation and its change. *Geophysical Research Letters*, 45(21) :11,980–11,988, DOI : 10.1029/2018GL080298. 30, 32, 87

Pendergrass, A. G., Knutti, R., Lehner, F., Deser, C., and Sanderson, B. M. (2017). Precipitation variability increases in a warmer climate. *Scientific Reports*, 7(1) :17966, DOI : 10.1038/s41598-017-17966-y. 30, 87, 90

Peters, R. H. (1991). *A Critique for Ecology*. Cambridge University Press. ISBN : 978-0-521-39588-5. 164

Peterson, C. A., Eviner, V. T., and Gaudin, A. C. M. (2018). Ways forward for resilience research in agroecosystems. *Agricultural Systems*, 162 :19–27, DOI : 10.1016/j.agsy.2018.01.011. 36

Pic, E., de la Serve, B. T., Tardieu, F., and Turc, O. (2002). Leaf senescence induced by mild water deficit follows the same sequence of macroscopic, biochemical, and molecular events as monocarpic senescence in pea. *Plant Physiology*, 128(1) :236–246, DOI : 10.1104/pp.010634. 150

Poorter, H., Fiorani, F., Pieruschka, R., Wojciechowski, T., Putten, W. H. v. d., Kleyer, M., Schurr, U., and Postma, J. (2016). Pampered inside, pestered outside ? Differences and similarities between plants growing in controlled conditions and in the field. *New Phytologist*, 212(4) :838–855, DOI : 10.1111/nph.14243. 96

Poorter, H., Niinemets, , Poorter, L., Wright, I. J., and Villar, R. (2009). Causes and consequences of variation in leaf mass per area (LMA) : a meta-analysis. *New Phytologist*, 182(3) :565–588, DOI : https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02830.x. 136

Porter, J. R., Howden, M., and Smith, P. (2017). Considering agriculture in IPCC assessments. *Nature Climate Change*, 7 :680–683. 25, 112

Poschen, P. (1986). An evaluation of the Acacia albida-based agroforestry oractices in the Hararghe highlands of Eastern Ethiopia. *Agroforestry Systems*, 4 :129–143. 47

Pretty, J., Benton, T. G., Bharucha, Z. P., Dicks, L. V., Flora, C. B., Godfray, H. C. J., Goulson, D., Hartley, S., Lampkin, N., Morris, C., Pierzynski, G., Prasad, P. V. V., Reganold, J., Rockström, J., Smith, P., Thorne, P., and Wratten, S. (2018). Global assessment of agricultural system redesign for sustainable intensification. *Nature Sustainability*, 1(8) :441–446, DOI : 10.1038/s41893-018-0114-0. 38

Querné, A., Battie-laclau, P., Dufour, L., Wery, J., and Dupraz, C. (2017). Effects of walnut trees on biological nitrogen fixation and yield of intercropped alfalfa in a Mediterranean agroforestry system. *European Journal of Agronomy*, 84 :35–46, DOI : 10.1016/j.eja.2016.12.001. 44, 54, 152

R Core Team (2020). R : A Language and Environment for Statistical Computing. 142

Rawls, W., Pachepsky, Y., Ritchie, J., Sobecki, T., and Bloodworth, H. (2003). Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma*, 116(1-2) :61–76, DOI : 10.1016/S0016-7061(03)00094-6. 73, 121, 144

Ray, D. K., Ramankutty, N., Mueller, N. D., West, P. C., and Foley, J. A. (2012). Recent patterns of crop yield growth and stagnation. *Nature Communications*, 3(1) :1293, DOI : 10.1038/ncomms2296. 25, 115

Reidsma, P., Ewert, F., Lansink, A. O., and Leemans, R. (2010). Adaptation to climate change and climate variability in European agriculture : The importance of farm level responses. *European Journal of Agronomy*, 32(1) :91–102, DOI : 10.1016/j.eja.2009.06.003. 115

Renard, D. and Tilman, D. (2019). National food production stabilized by crop diversity. *Nature*, 571(7764) :257–260, DOI : 10.1038/s41586-019-1316-y. 38, 115

Renwick, L. L. R., Kimaro, A. A., Hafner, J. M., Rosenstock, T. S., and Gaudin, A. C. M. (2020). Maize-Pigeonpea Intercropping Outperforms Monocultures Under Drought. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, DOI : 10.3389/fsufs.2020.562663. Publisher : Frontiers. 88, 92, 95, 100, 101

Reynolds, P. E., Simpson, J. A., Thevathasan, N. V., and Gordon, A. M. (2007). Effects of tree competition on corn and soybean photosynthesis, growth, and yield in a temperate tree-based agroforestry intercropping system in southern Ontario, Canada. *Ecological Engineering*, 29(4) :362–371, DOI : 10.1016/j.ecoleng.2006.09.024. 42

Rist, L., Felton, A., Nyström, M., Troell, M., Sponseller, R. A., Bengtsson, J., Österblom, H., Lindborg, R., Tidåker, P., Angeler, D. G., Milestad, R., and Moen, J. (2014). Applying resilience thinking to production ecosystems. *Ecosphere*, 5(6) :1–11, DOI : 10.1890/ES13-00330.1. 36

Rivest, D., Lorente, M., Olivier, A., and Messier, C. (2013a). Soil biochemical properties and microbial resilience in agroforestry systems : Effects on wheat growth under controlled drought and flooding conditions. *Science of The Total Environment*, 463-464 :51–60, DOI : 10.1016/j.scitotenv.2013.05.071. 47

Rivest, D., Paquette, A., Moreno, G., and Messier, C. (2013b). A meta-analysis reveals mostly neutral influence of scattered trees on pasture yield along with some contrasted effects depending on functional groups and rainfall conditions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 165 :74–79, DOI : 10.1016/j.agee.2012.12.010. 89

Riviere, P. (2014). Méthodologie de la sélection décentralisée et participative : un exemple sur le blé tendre. PhD thesis, Université Paris Sud - Paris XI, Paris. 37

Rosati, A., Wolz, K. J., Murphy, L., Ponti, L., and Jose, S. (2020). Modeling light below tree canopies overestimates net photosynthesis and radiation use efficiency in understory crops by averaging light in space and time. *Agricultural and Forest Meteorology*, 284 :107892, DOI : 10.1016/j.agrformet.2019.107892. 163

Rotem, J. and Palti, J. (1969). Irrigation and plant diseases. *Annual Review of Phytopathology*, (7) :267–288. 97

Sadras, V. O. and Denison, R. F. (2009). Do plant parts compete for resources ? An evolutionary viewpoint. *New Phytologist*, 183(3) :565–574, DOI : 10.1111/j.1469-8137.2009.02848.x. 102

Sanchis-Ibor, C., Molle, F., and Kuper, M. (2020). Irrigation and water governance. In *Water Resources in the Mediterranean Region*, pages 89–118. Elsevier edition. 32

Sandaña, P. and Calderini, D. F. (2012). Comparative assessment of the critical period for grain yield determination of narrow-leafed lupin and pea. *European Journal of Agronomy*, 40 :94–101, DOI : 10.1016/j.eja.2012.02.009. 131

Sandaña, P., Ramírez, M., and Pinochet, D. (2012). Radiation interception and radiation use efficiency of wheat and pea under different P availabilities. *Field Crops Research*, 127 :44–50, DOI : 10.1016/j.fcr.2011.11.005. 166

Sandaña, P. A., Harcha, C. I., and Calderini, D. F. (2009). Sensitivity of yield and grain nitrogen concentration of wheat, lupin and pea to source reduction during grain filling. A comparative survey under high yielding conditions. *Field Crops Research*, 114(2) :233–243, DOI : 10.1016/j.fcr.2009.08.003. 116, 132, 166

Savin, R. and Slafer, G. A. (1991). Shading effects on the yield of an Argentinian wheat cultivar. *The Journal of Agricultural Science*, 116(1) :1–7, DOI : 10.1017/S0021859600076085. 116

Schauberger, B., Ben Ari, T., Makowski, D., Kato, T., Kato, H., and Ciais, P. (2018). Yield trends, variability and stagnation analysis of major crops in France over more than a century. *Scientific Reports*, 8, DOI : 10.1038/s41598-018-35351-1. 25, 26

Schneider, C. A., Rasband, W. S., and Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ : 25 years of image analysis. *Nature Methods*, 9(7) :671–675, DOI : 10.1038/nmeth.2089. 76, 122

Schoeneberger, M., Bentrup, G., de Gooijer, H., Soolanayakanahally, R., Sauer, T., Brandle, J., Zhou, X., and Current, D. (2012). Branching out : Agroforestry as a climate change mitigation and adaptation tool for agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation*, 67(5) :128–136, DOI : 10.2489/jswc.67.5.128A. 89

Schroth, G., Balle, P., and Peltier, R. (1995). Alley cropping groundnut with Gliricidia sepium in Côte d'Ivoire : effects on yields, microclimate and crop diseases. *Agroforestry Systems*, 29 :147–163. 42, 153

Schroth, G. and Sinclair, F. L. (2003). *Trees, Crops, and Soil Fertility : Concepts and Research Methods*. CABI. 44

Schwendenmann, L., Veldkamp, E., Moser, G., HöLscher, D., KöHler, M., Clough, Y., Anas, I., Djajakirana, G., Erasmi, S., Hertel, D., Leitner, D., Leuschner, C., Michalzik, B., Propastin, P., Tjoa, A., Tscharntke, T., and van STRAATEN, O. (2010). Effects of an experimental drought on the functioning of a cacao agroforestry system, Sulawesi, Indonesia. *Global Change Biology*, 16(5) :1515–1530, DOI : 10.1111/j.1365-2486.2009.02034.x. 99, 101, 115, 135

Schär, C., Vidale, P. L., Lüthi, D., Frei, C., Häberli, C., Liniger, M. A., and Appenzeller, C. (2004). The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, 427(6972) :332–336, DOI : 10.1038/nature02300. 29

Selten, F. M., Bintanja, R., Vautard, R., and van den Hurk, B. J. J. M. (2020). Future continental summer warming constrained by the present-day seasonal cycle of surface hydrology. *Scientific Reports*, 10(1) :4721, DOI : 10.1038/s41598-020-61721-9. 28

Sereke, F., Graves, A. R., Dux, D., Palma, J. H. N., and Herzog, F. (2015). Innovative agroecosystem goods and services : key profitability drivers in Swiss agroforestry. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2) :759–770, DOI : 10.1007/s13593-014-0261-2. 42

Sgarbossa, J., Elli, E. F., Schwerz, F., Nardini, C., Knapp, F. M., Schmidt, D., Lúcio, A. D., and Caron, B. O. (2020). Bean–soybean succession under full sun and in agroforestry systems : Impacts on radiation use efficiency, growth and yield. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 00(n/a) :1–16, DOI : 10.1111/jac.12450. 151

Sida, T. S., Baudron, F., Kim, H., and Giller, K. E. (2018). Climate-smart agroforestry : Faidherbia albida trees buffer wheat against climatic extremes in the Central Rift Valley of Ethiopia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248 :339–347, DOI : 10.1016/j.agrformet.2017.10.013. 150

Sigl, M., Winstrup, M., McConnell, J. R., Welten, K. C., Plunkett, G., Ludlow, F., Büntgen, U., Caffee, M., Chellman, N., Dahl-Jensen, D., Fischer, H., Kipfstuhl, S., Kostick, C., Maselli, O. J., Mekhaldi, F., Mulvaney, R., Muscheler, R., Pasteris, D. R., Pilcher, J. R., Salzer, M., Schüpbach, S., Steffensen, J. P., Vinther, B. M., and Woodruff, T. E. (2015). Timing and climate forcing of volcanic eruptions for the past 2,500 years. *Nature*, 523(7562) :543–549, DOI : 10.1038/nature14565. 24

Simonneau, T. and Habib, R. (1994). Water uptake regulation in peach trees with split-root systems. *Plant, Cell and Environment*, 17(4) :379–388, DOI : https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1994.tb00306.x. 102

Sinclair, T. R., Shiraiwa, T., and Hammer, G. L. (1992). Variation in crop radiation-use efficiency with increased diffuse radiation. *Crop Science*, 32(5) :cropsci1992.0011183X003200050043x, DOI : https://doi.org/10.2135/cropsci1992.0011183X003200050043x. 136

Singh, R. P., Saharan, N., and Ong, C. K. (1989). Above and below ground interactions in alley-cropping in semi-arid India. *Agroforestry Systems*, 9(3) :259–274, DOI : 10.1007/BF00141088. 78

Slafer, G. A., Calderini, D. F., and Miralles, D. J. (1996). Yield components and compensation in wheat : Opportunities for further increasing yield potential. In *Increasing Yield Potential in Wheat : Breaking the Barriers*, Mexico. CIMMYT. 25

Smith, D. M., Jarvis, P. G., and Odongo, J. C. W. (1997). Sources of water used by trees and millet in Sahelian windbreak systems. *Journal of Hydrology*, 198(1) :140–153, DOI : 10.1016/S0022-1694(96)03311-2. 44, 47, 89, 99, 135

Smits, N., Dupraz, C., and Dufour, L. (2012). Unexpected lack of influence of tree rows on the dynamics of wheat aphids and their natural enemies in a temperate agroforestry system. *Agroforestry Systems*, 85(1) :153–164, DOI : 10.1007/s10457-011-9473-5. 54

Song, J., Wan, S., Piao, S., Knapp, A. K., Classen, A. T., Vicca, S., Ciais, P., Hovenden, M. J., Leuzinger, S., Beier, C., Kardol, P., Xia, J., Liu, Q., Ru, J., Zhou, Z., Luo, Y., Guo, D., Langley, J. A., Zscheischler, J., Dukes, J. S., Tang, J., Chen, J., Hofmockel, K. S., Kueppers, L. M., Rustad, L.,

Liu, L., Smith, M. D., Templer, P. H., Thomas, R. Q., Norby, R. J., Phillips, R. P., Niu, S., Fatichi, S., Wang, Y., Shao, P., Han, H., Wang, D., Lei, L., Wang, J., Li, X., Zhang, Q., Li, X., Su, F., Liu, B., Yang, F., Ma, G., Li, G., Liu, Y., Liu, Y., Yang, Z., Zhang, K., Miao, Y., Hu, M., Yan, C., Zhang, A., Zhong, M., Hui, Y., Li, Y., and Zheng, M. (2019). A meta-analysis of 1,119 manipulative experiments on terrestrial carbon-cycling responses to global change. *Nature Ecology and Evolution*, 3(9) :1309–1320, DOI : 10.1038/s41559-019-0958-3. 88

Souther, S., Loeser, M., Crews, T. E., and Sisk, T. (2020). Drought exacerbates negative consequences of high-intensity cattle grazing in a semiarid grassland. *Ecological Applications*, 30(3) :e02048, DOI : https://doi.org/10.1002/eap.2048. 88

Sternberg, T. (2012). Chinese drought, bread and the Arab Spring. *Applied Geography*, 34 :519–524, DOI : 10.1016/j.apgeog.2012.02.004. 24

Steward, P. R., Thierfelder, C., Dougill, A. J., and Ligowe, I. (2019). Conservation agriculture enhances resistance of maize to climate stress in a Malawian medium-term trial. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 277 :95–104, DOI : 10.1016/j.agee.2018.07.009. 88

Talbot, G. (2011). L'intégration spatiale et temporelle du partage des ressources dans un système agroforestier noyers-céréales : une clef pour en comprendre la productivité ? PhD thesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc. URL : https ://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00664530. 54, 173, 177

Talbot, G. and Dupraz, C. (2012). Simple models for light competition within agroforestry discontinuous tree stands : are leaf clumpiness and light interception by woody parts relevant factors ? *Agroforestry Systems*, 84(1) :101–116, DOI : 10.1007/s10457-011-9418-z. 54, 129, 177

Talbot, G., Roux, S., Graves, A., Dupraz, C., Marrou, H., and Wery, J. (2014). Relative yield decomposition : A method for understanding the behaviour of complex crop models. *Environmental Modelling and Software*, 51 :136–148, DOI : 10.1016/j.envsoft.2013.09.017. 141

Tardieu, F., Granier, C., and Muller, B. (1999). Modelling leaf expansion in a fluctuating environment : are changes in specific leaf area a consequence of changes in expansion rate ? *New Phytologist*, 143(1) :33–43, DOI : 10.1046/j.1469-8137.1999.00433.x. 46, 136

Temani, F., Bouaziz, A., Daoui, K., Wery, J., and Barkaoui, K. (2021). Olive agroforestry can improve land productivity even under low water availability in the South Mediterranean. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 307 :107234, DOI : 10.1016/j.agee.2020.107234. 39, 42, 47, 91, 93, 100, 101, 102, 103, 150, 161, 167

Tesfaye, K., Walker, S., and Tsubo, M. (2006). Radiation interception and radiation use efficiency of three grain legumes under water deficit conditions in a semi-arid environment. *European Journal of Agronomy*, 25(1) :60–70, DOI : 10.1016/j.eja.2006.04.014. 151

Thevathasan, N. V., Gordon, A. M., Simpson, J. A., Reynolds, P. E., Price, G., and Zhang, P. (2004). Biophysical and ecological interactions in a temperate tree-based intercropping system. *Journal of Crop Improvement*, 12(1-2) :339–363, DOI : 10.1300/J411v12n01_04. 42

Thomson, A. M., Ellis, E. C., Grau, H. R., Kuemmerle, T., Meyfroidt, P., Ramankutty, N., and Zeleke, G. (2019). Sustainable intensification in land systems : trade-offs, scales, and contexts. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 38 :37–43, DOI : 10.1016/j.cosust.2019.04.011. 25

Tilman, D., Wedin, D., and Knops, J. (1996). Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems. *Nature*, 379(6567) :718–720, DOI : 10.1038/379718a0. 38

Torquebiau, E. (2017). Climate-smart agriculture : pour une agriculture climato-compatible. *Cahiers Agricultures*, 26(6) :66001, DOI : 10.1051/cagri/2017048. 26

Torralba, M., Fagerholm, N., Burgess, P. J., Moreno, G., and Plieninger, T. (2016). Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services ? A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 230 :150–161, DOI : 10.1016/j.agee.2016.06.002. 135

Ullah, M. R., Corneo, P. E., and Dijkstra, F. A. (2020). Inter-seasonal Nitrogen Loss with Drought Depends on Fertilizer Management in a Seminatural Australian Grassland. *Ecosystems*, 23(6) :1281–1293, DOI : 10.1007/s10021-019-00469-4. 92

Valladares, F., Laanisto, L., Niinemets, , and Zavala, M. A. (2016). Shedding light on shade : ecological perspectives of understorey plant life. *Plant Ecology and Diversity*, 9(3) :237–251, DOI : 10.1080/17550874.2016.1210262. 99, 111, 136

Vandermeer, J. (1989). *The ecology of intercropping*. Cambridge University Press. ISBN : 0-521-34689-4. 43, 44

Varella, A. C., Moot, D. J., Pollock, K. M., Peri, P. L., and Lucas, R. J. (2011). Do light and alfalfa responses to cloth and slatted shade represent those measured under an agroforestry system ? *Agroforestry Systems*, 81(2) :157–173, DOI : 10.1007/s10457-010-9319-6. 166

Varlet-Grancher, C., Gosse, G., Chartier, M., Sinoquet, H., Bonhomme, R., and Allirand, J. M. (1989). Mise au point : rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal. *Agronomie*, 9(5) :419–439, DOI : 10.1051/agro:19890501. 79, 140

Vautard, R., Yiou, P., Van Oldenborgh, G. J., Lenderink, G., Thao, S., Ribes, A., Planton, S., Dubuisson, B., and Soubeyroux, J.-M. (2015). Extreme Fall 2014 Precipitation in the Cévennes Mountains. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96 :S56–S60, DOI : 10.1175/BAMS-EEE_2014_ch12.1. 120

Verchot, L. V., Noordwijk, M. V., Kandji, S., Tomich, T., Ong, C., Albrecht, A., Mackensen, J., Bantilan, C., Anupama, K. V., and Palm, C. (2007). Climate change : linking adaptation and mitigation

through agroforestry. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12(5) :901–918, DOI : 10.1007/s11027-007-9105-6. 89, 115, 135

Verghis, T. I., Mckenzie, B. A., and Hill, G. D. (1999). Effect of light and soil moisture on yield, yield components, and abortion of reproductive structures of chickpea (*Cicerarietinum),* in Canterbury, New Zealand. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 27(2) :153–161, DOI : 10.1080/01140671.1999.9514091. 130, 131, 166

Vicca, S., Gilgen, A. K., Serrano, M. C., Dreesen, F. E., Dukes, J. S., Estiarte, M., Gray, S. B., Guidolotti, G., Hoeppner, S. S., Leakey, A. D. B., Ogaya, R., Ort, D. R., Ostrogovic, M. Z., Rambal, S., Sardans, J., Schmitt, M., Siebers, M., Linden, L. v. d., Straaten, O. v., and Granier, A. (2012). Urgent need for a common metric to make precipitation manipulation experiments comparable. *New Phytologist*, 195(3) :518–522, DOI : 10.1111/j.1469-8137.2012.04224.x. 110

Vicente-Serrano, S. M., Lopez-Moreno, J.-I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Sanchez-Lorenzo, A., García-Ruiz, J. M., Azorin-Molina, C., Morán-Tejeda, E., Revuelto, J., Trigo, R., Coelho, F., and Espejo, F. (2014). Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe. *Environmental Research Letters*, 9(4) :044001, DOI : 10.1088/1748-9326/9/4/044001. 32, 87

Villalba Gonzalez, A. (2009). Impact de l'ombre des arbre sur la croissance et le rendement d'une culture de pois chiche dans un système agroforestier. Master's thesis, Montpellier Supagro, Montpellier. 76

Vogel, A., Fester, T., Eisenhauer, N., Scherer-Lorenzen, M., Schmid, B., Weisser, W. W., and Weigelt, A. (2013). Separating Drought Effects from Roof Artifacts on Ecosystem Processes in a Grassland Drought Experiment. *PLOS ONE*, 8(8) :e70997, DOI : 10.1371/journal.pone.0070997. 96, 97

Vogel, A., Scherer-Lorenzen, M., and Weigelt, A. (2012). Grassland Resistance and Resilience after Drought Depends on Management Intensity and Species Richness. *PLOS ONE*, 7(5) :e36992, DOI : 10.1371/journal.pone.0036992. 88

Walker, B., Holling, C. S., Carpenter, S., and Kinzig, A. (2004). Resilience, Adaptability and Transformability in Social–ecological Systems. *Ecology and Society*, 9(2), DOI : 10.5751/ES-00650-090205. 35

Wallace, J. S., Jackson, N. A., and Ong, C. K. (1999). Modelling soil evaporation in an agroforestry system in Kenya. *Agricultural and Forest Meteorology*, 94(3) :189–202, DOI : 10.1016/S0168-1923(99)00009-X. 115

Wang, B. J., Zhang, W., Ahanbieke, P., Gan, Y. W., Xu, W. L., Li, L. H., Christie, P., and Li, L. (2014). Interspecific interactions alter root length density, root diameter and specific root length in jujube/wheat agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 88(5) :835–850, DOI : 10.1007/s10457-014-9729-y. 42

Wang, L., Zhong, C., Gao, P., Xi, W., and Zhang, S. (2015). Soil infiltration characteristics in agroforestry systems and their relationships with the temporal distribution of rainfall on the Loess plateau in China. *PloS one*, 10(4) :e0124767, DOI : 10.1371/journal.pone.0124767. 41, 135

Wang, Q., Han, S., Zhang, L., Zhang, D., van der Werf, W., Evers, J. B., Sun, H., Su, Z., and Zhang, S. (2016). Density responses and spatial distribution of cotton yield and yield components in jujube (Zizyphus jujube)/cotton (Gossypium hirsutum) agroforestry. *European Journal of Agronomy*, 79 :58–65, DOI : 10.1016/j.eja.2016.05.009. 78

Warton, D. I., Duursma, R. A., Falster, D. S., and Taskinen, S. (2012). smatr 3– an R package for estimation and inference about allometric lines. *Methods in Ecology and Evolution*, 3(2) :257–259, DOI : 10.1111/j.2041-210X.2011.00153.x. 123

Wellstein, C., Poschlod, P., Gohlke, A., Chelli, S., Campetella, G., Rosbakh, S., Canullo, R., Kreyling, J., Jentsch, A., and Beierkuhnlein, C. (2017). Effects of extreme drought on specific leaf area of grassland species : A meta-analysis of experimental studies in temperate and sub-Mediterranean systems. *Global Change Biology*, 23(6) :2473–2481, DOI : 10.1111/gcb.13662. 136

Werrell, E. C. E. and Femia, F. (2013). The Arab Spring and climate change - A climate and security correlations series. Technical report, Center for American Progress ; Stimson ; The Center for Climate and Security. 24

Wery, J. (2005). Differential effects of soil water deficit on the basic plant functions and their significance to analyse crop responses to water deficit in indeterminate plants. *Australian Journal of Agricultural Research*, 56(11) :1201, DOI : 10.1071/AR05066. 103, 116, 131, 165

Wickham, H., Chang, W., Henry, L., Pedersen, T. L., Takahashi, K., Wilke, C., Woo, K., Yutani, H., Dunnington, D., and RStudio (2020). ggplot2 : Create Elegant Data Visualisations Using the Grammar of Graphics. 142

Wolz, K. J., Branham, B. E., and DeLucia, E. H. (2018). Reduced nitrogen losses after conversion of row crop agriculture to alley cropping with mixed fruit and nut trees. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 258 :172–181, DOI : 10.1016/j.agee.2018.02.024. 41, 115

Wolz, K. J. and DeLucia, E. H. (2018). Alley cropping : Global patterns of species composition and function. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 252 :61–68, DOI : 10.1016/j.agee.2017.10.005. 47, 115

Wu, Z., Dijkstra, P., Koch, G. W., Peñuelas, J., and Hungate, B. A. (2011). Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change : a meta-analysis of experimental manipulation. *Global Change Biology*, 17(2) :927–942, DOI : 10.1111/j.1365-2486.2010.02302.x. 88

Yang, T., Duan, Z. P., Zhu, Y., Gan, Y. W., Wang, B. J., Hao, X. D., Xu, W. L., Zhang, W., and Li, L. H. (2019). Effects of distance from a tree line on photosynthetic characteristics and yield of wheat in a jujube tree/wheat agroforestry system. *Agroforestry Systems*, 93(4) :1545–1555, DOI : 10.1007/s10457-018-0267-x. 46, 47

Yuan, W., Zheng, Y., Piao, S., Ciais, P., Lombardozzi, D., Wang, Y., Ryu, Y., Chen, G., Dong, W., Hu, Z., Jain, A. K., Jiang, C., Kato, E., Li, S., Lienert, S., Liu, S., Nabel, J. E. M. S., Qin, Z., Quine, T., Sitch, S., Smith, W. K., Wang, F., Wu, C., Xiao, Z., and Yang, S. (2019). Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth. *Science Advances*, 5(8) :eaax1396, DOI : 10.1126/sciadv.aax1396. 31, 87

Zain, Z. M., Gallagher, J. N., White, J. G. H., and Reid, J. (1983). The effect of irrigation on radiation absorption, water use and yield of conventional and semi-leafless peas. *Proceedings Agronomy Society of New Zealand*, 13 :95–102. 151

Zamora, D. S., Jose, S., Nair, P. K. R., Jones, J. W., Brecke, B. J., and Ramsey, C. L. (2008). Interspecific competition in a pecan-cotton alley-cropping system in the southern United States : Is light the limiting factor ? In Jose, S. and Gordon, A. M., editors, *Toward Agroforestry Design : An Ecological Approach*, Advances in Agroforestry, pages 81–95. Springer Netherlands, Dordrecht, DOI : 10.1007/978-1-4020-6572-9_6. 78

Zhang, D., Du, G., Sun, Z., Bai, W., Wang, Q., Feng, L., Zheng, J., Zhang, Z., Liu, Y., Yang, S., Yang, N., Feng, C., Cai, Q., Evers, J. B., van der Werf, W., and Zhang, L. (2018). Agroforestry enables high efficiency of light capture, photosynthesis and dry matter production in a semi-arid climate. *European Journal of Agronomy*, 94 :1–11. 78, 136, 151

Zhang, J., Zuo, X., Zhao, X., Ma, J., and Medina-Roldán, E. (2020). Effects of rainfall manipulation and nitrogen addition on plant biomass allocation in a semiarid sandy grassland. *Scientific Reports*, 10(1) :9026, DOI : 10.1038/s41598-020-65922-0. 94

Zwicke, M., Alessio, G. A., Thiery, L., Falcimagne, R., Baumont, R., Rossignol, N., Soussana, J.-F., and Picon-Cochard, C. (2013). Lasting effects of climate disturbance on perennial grassland above-ground biomass production under two cutting frequencies. *Global Change Biology*, 19(11) :3435–3448, DOI : https://doi.org/10.1111/gcb.12317. 88

Østergård, H., Finckh, M. R., Fontaine, L., Goldringer, I., Hoad, S. P., Kristensen, K., Bueren, E. T. L. v., Mascher, F., Munk, L., and Wolfe, M. S. (2009). Time for a shift in crop production : embracing complexity through diversity at all levels. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 89(9) :1439–1445, DOI : https://doi.org/10.1002/jsfa.3615. 37

ANNEXES

Annexe A - Introduction

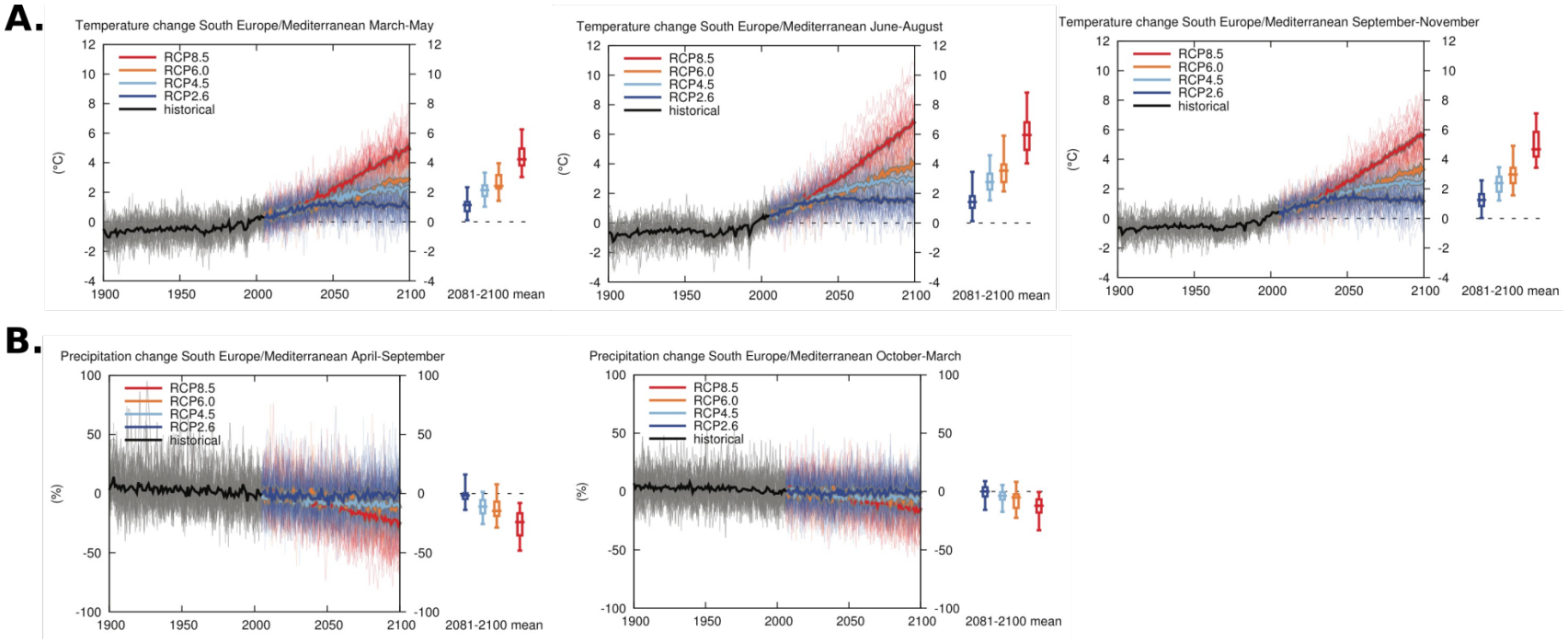


Figure A.1 Anomalie des températures moyennes annuelles (A.) et des précipitations annuelles (B.) à l'échelle saisonnière pour le bassin Méditerranéen. Graphique adapté du 5ème rapport du GIEC (IPCC, 2013)

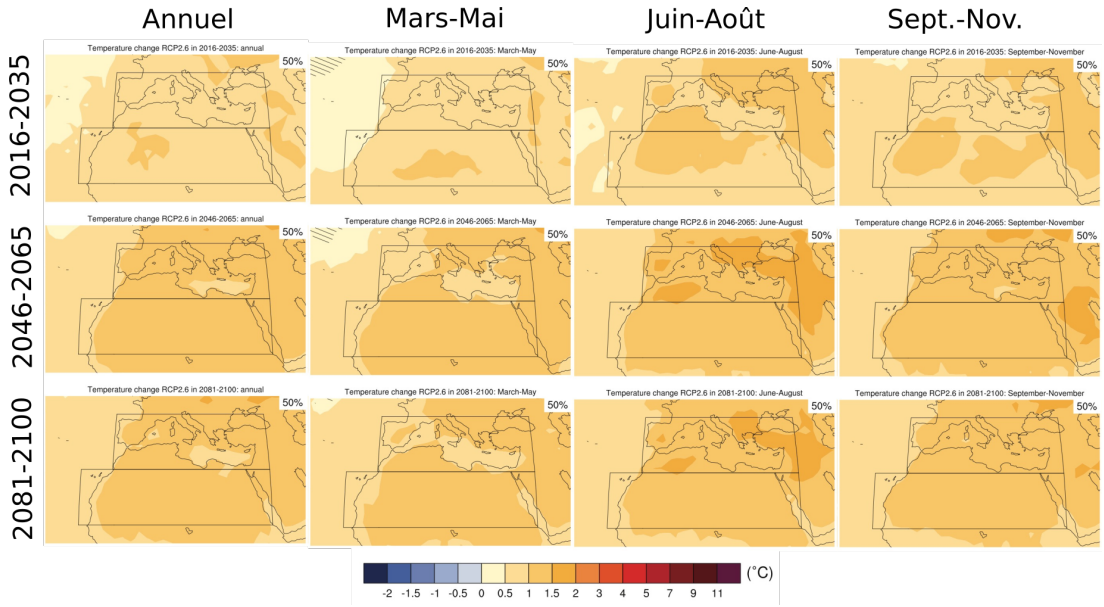


Figure A.2 Anomalie médiane des températures à l'échelle de l'année et des saisons pour le bassin Méditerranéen selon le scénario **RCP2.6**. Les données sont exprimées relativement à la période 1986-2005. Graphique établi à partir du 5ème rapport du GIEC (IPCC, 2013)

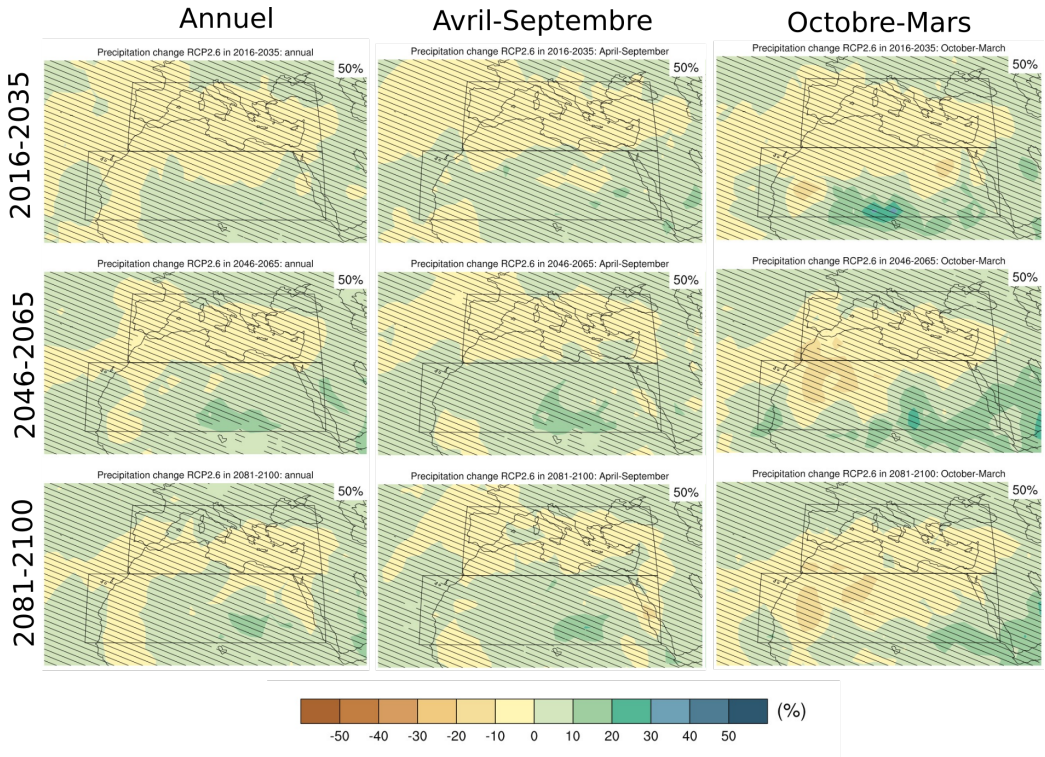


Figure A.3 Anomalie médiane des cumuls de précipitations à l'échelle de l'année et des saisons pour le bassin Méditerranéen selon le scénario **RCP2.6**. Les données sont exprimées relativement à la période 1986-2005. Les zones hachées indiquent les zones pour lesquelles l'anomalie présentée est d'amplitude faible ou les simulations des modèles divergent beaucoup Graphique établi à partir du 5ème rapport du GIEC (IPCC, 2013).

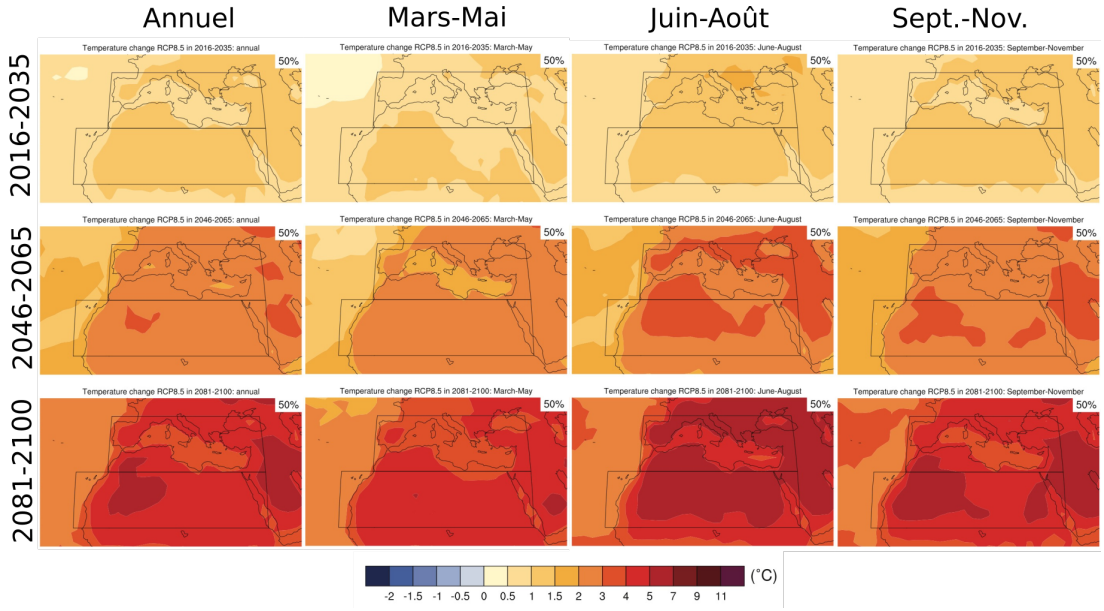


Figure A.4 Anomalie médiane des températures à l'échelle de l'année et des saisons pour le bassin Méditerranéen selon le scénario **RCP8.5**. Les données sont exprimées relativement à la période 1986-2005. Graphique établi à partir du 5ème rapport du GIEC (IPCC, 2013)

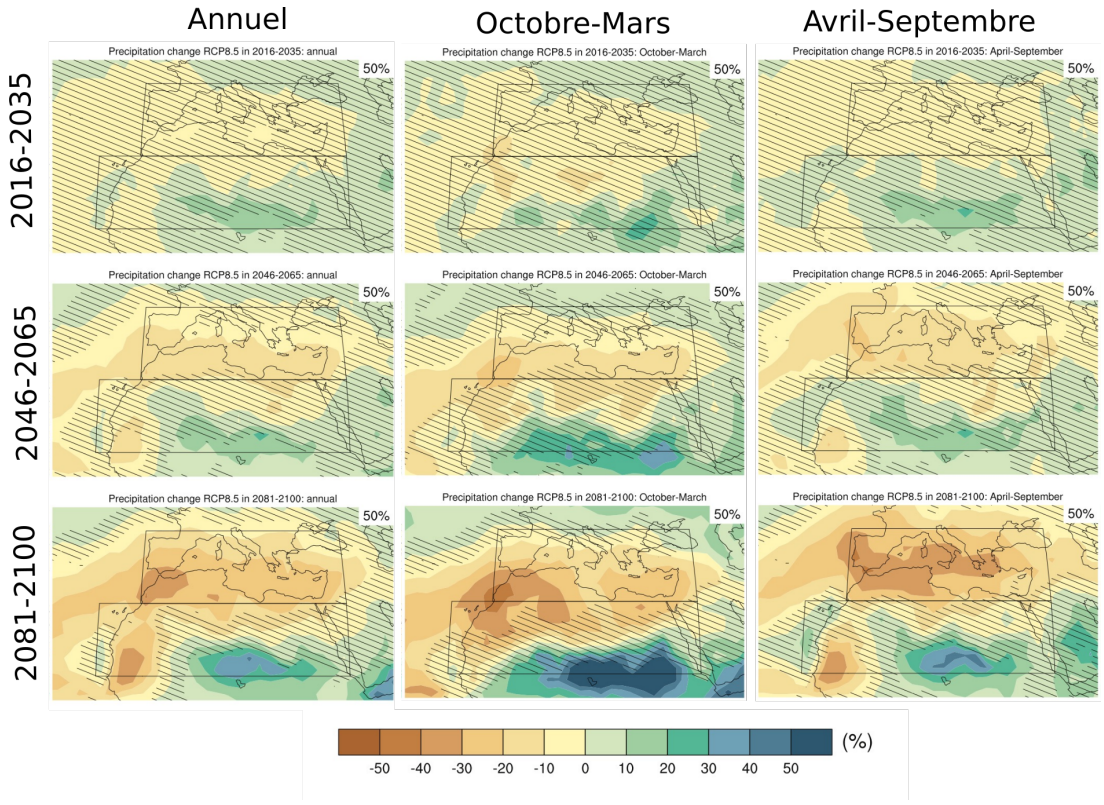


Figure A.5 Anomalie médiane des cumuls de précipitations à l'échelle de l'année et des saisons pour le bassin Méditerranéen selon le scénario **RCP8.5**. Les données sont exprimées relativement à la période 1986-2005. Les zones hachées indiquent les zones pour lesquelles l'anomalie présentée est d'amplitude faible ou les simulations des modèles divergent beaucoup. Graphique établi à partir du 5ème rapport du GIEC (IPCC, 2013)

Annexe B - Matériels et méthodes

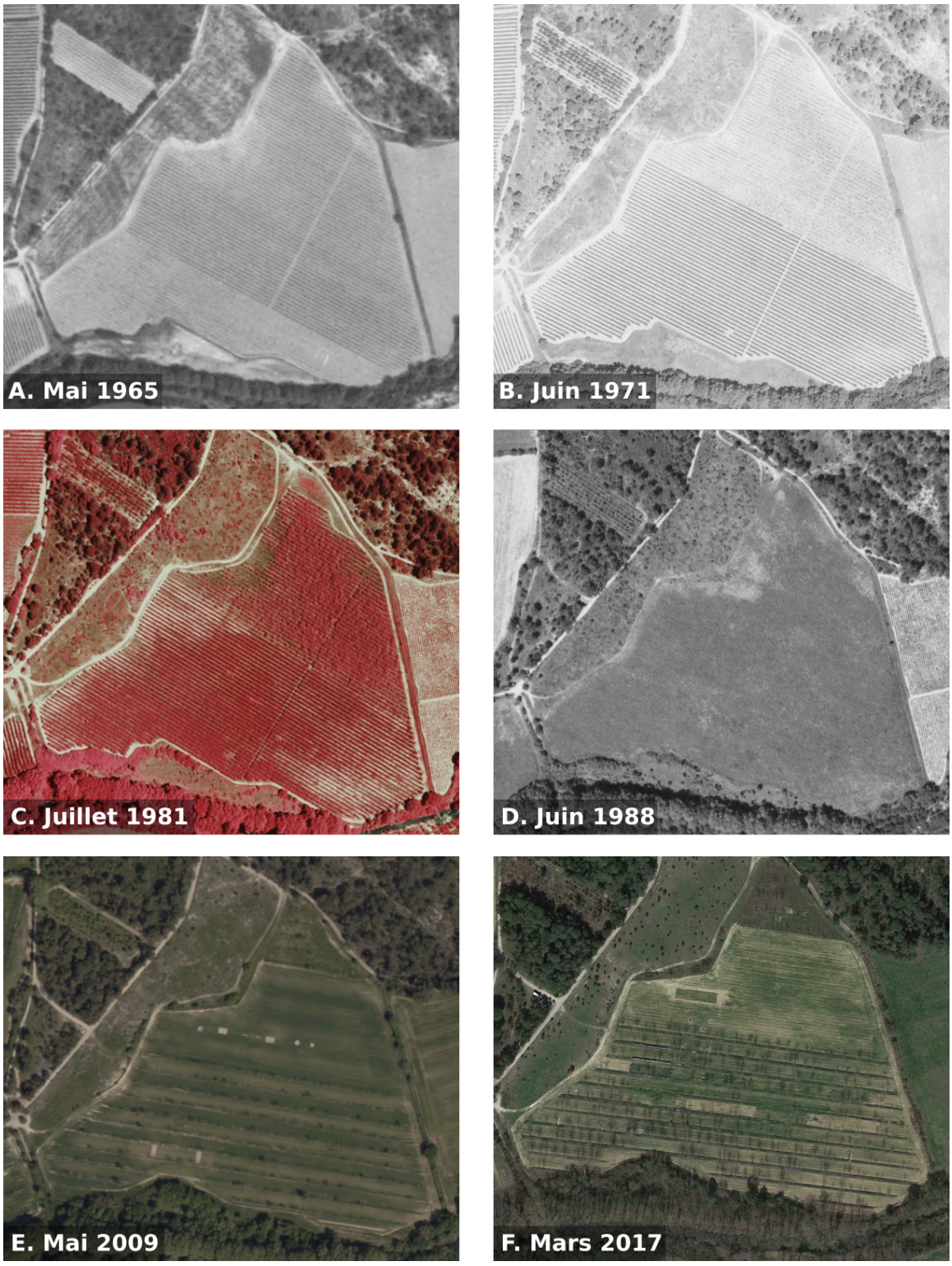


Figure B.1 Photographies aériennes historiques de la parcelle A2, de 1965 à 2017. Les photographies A,B,D sont des clichés en noir et blanc. La photographie C est un cliché en proche infrarouge. Les photographies E et F sont des clichés en couleur. Crédit image : photos A à D - ©IGN via le service Remonter le temps ; photos E à F - ©Google via Google Earth Pro

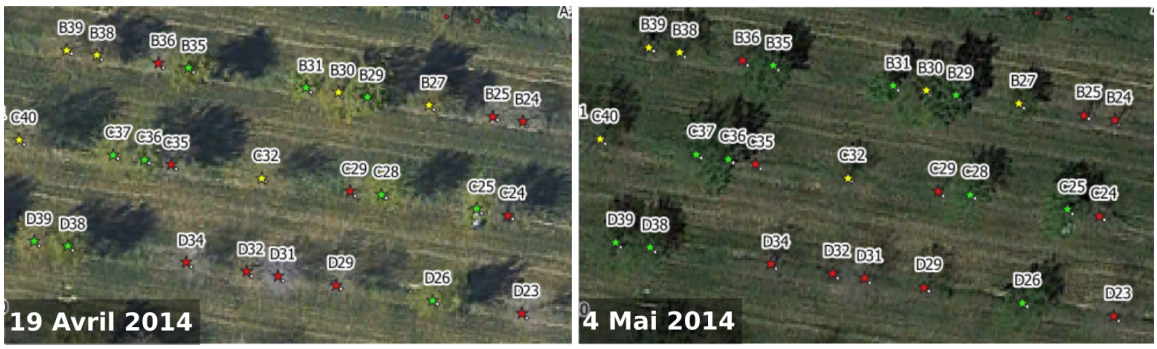


Figure B.2 Apercu des photographies aériennes utilisées pour la classification de la phénologie des arbres *a-priori*. Crédit image : ©Google via Google Earth Pro

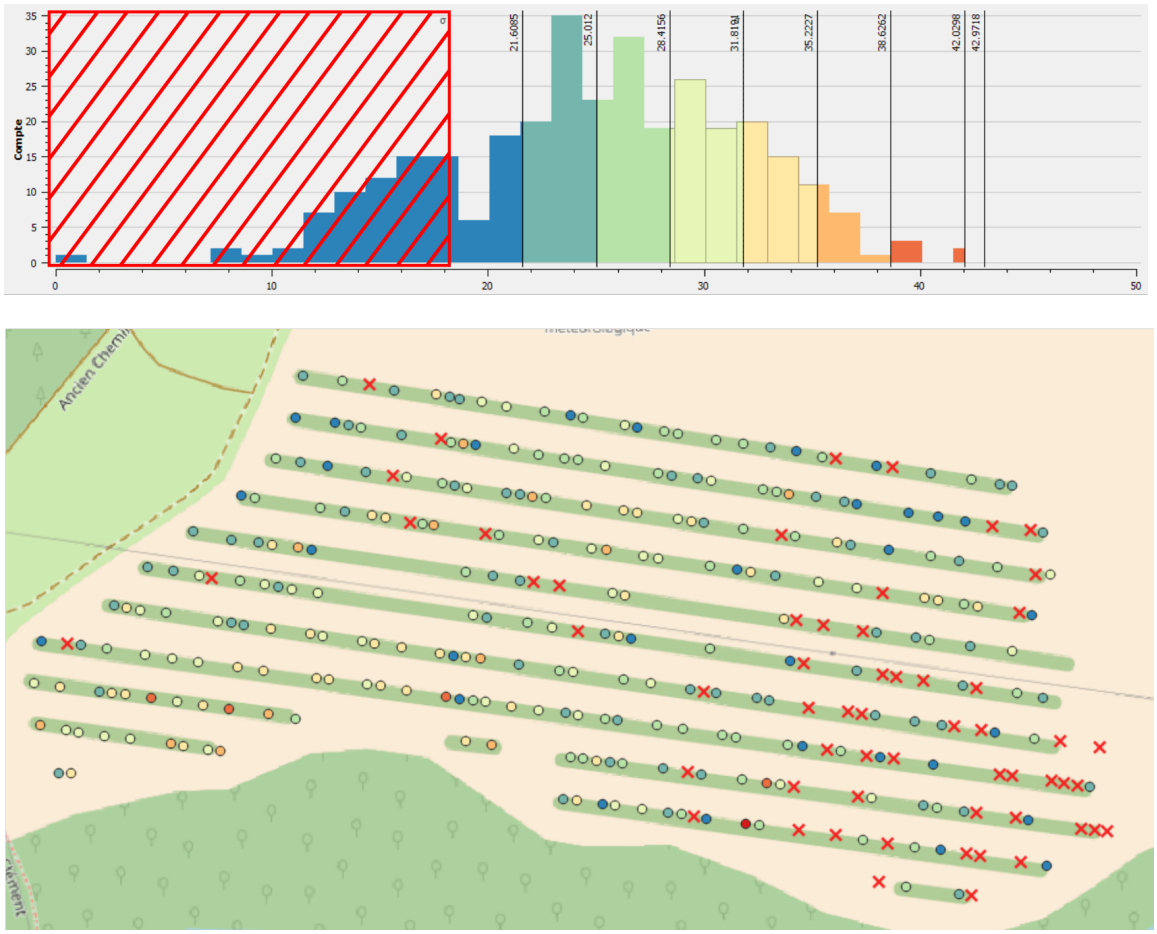


Figure B.3 Classification des arbres de la parcelle selon leur DBH et discrimination choisie pour les arbres au diamètre trop faible.



Figure B.4 Couple d'arbres répondant aux critères de sélection établis. Les couples en orange ont été écartés dans le cadre de ce travail de thèse pour ne pas interférer avec d'autres suivis expérimentaux en cours. Crédit image : ©IGN (2014)

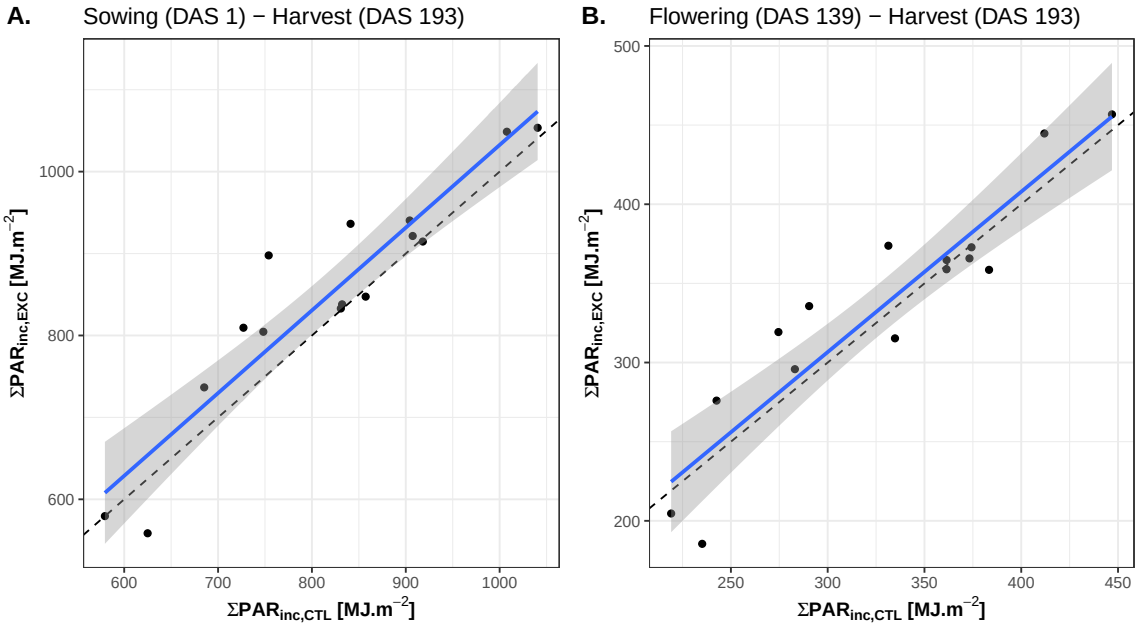


Figure B.5 Comparaison du cumul de PAR incident entre les placettes exclues et témoin en AF pour deux périodes distinctes : 1) du semis à la récolte et 2) du début de la floraison à la récolte). L'estimation du cumul lumineux a été réalisée selon la méthode proposée dans l'équation 2 et le chapitre 3. La ligne en pointillée représente la ligne 1 :1.

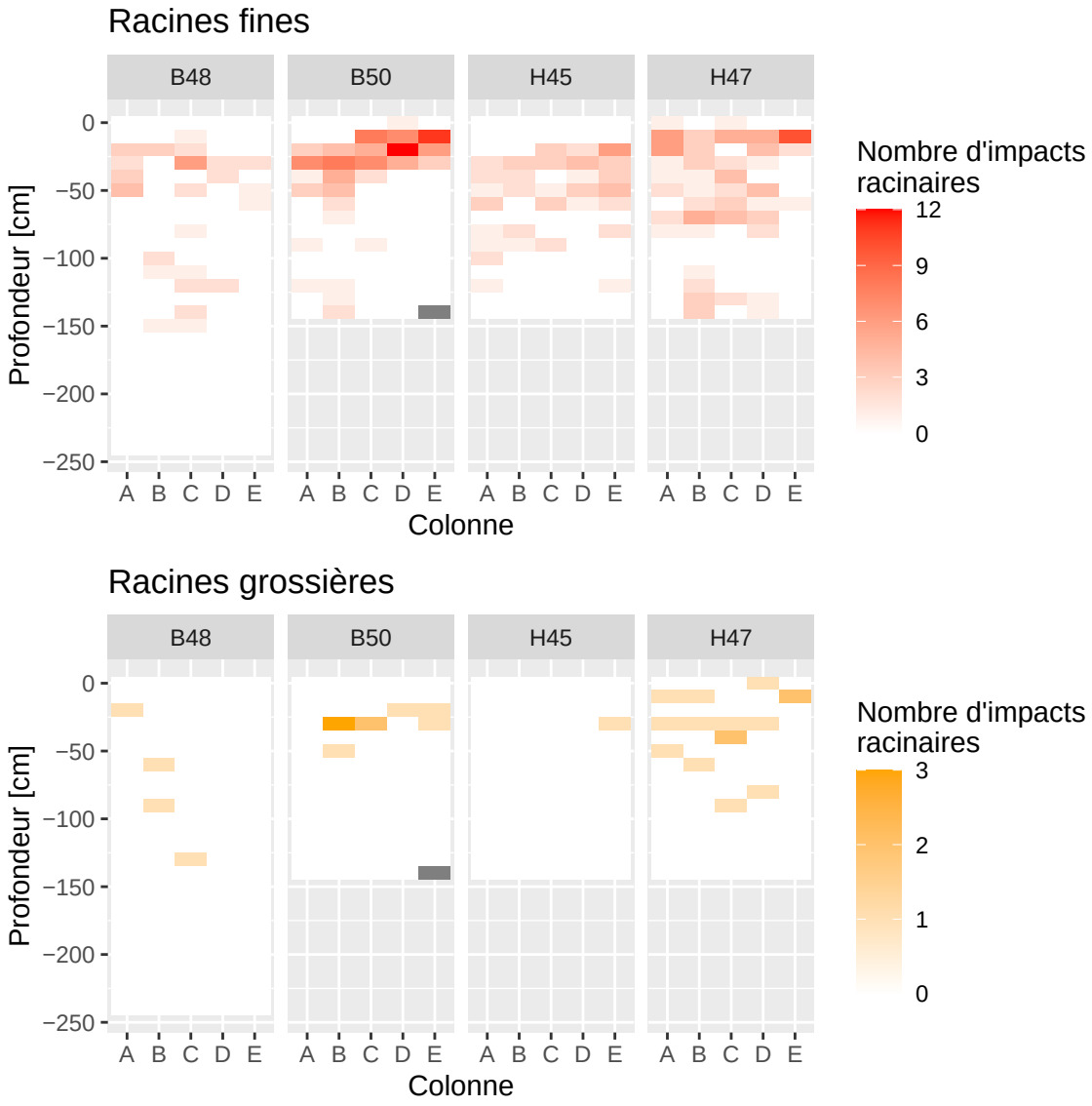


Figure B.6 Carte des impacts racinaires observés lors de la mise en place des sondes TDR. Chaque observation a été réalisé sur un carré de 10x10 cm. Les mesures ont été réalisées à 4.5m de la ligne d'arbre, à proximité de la zone où ont été installées les sondes TDR.

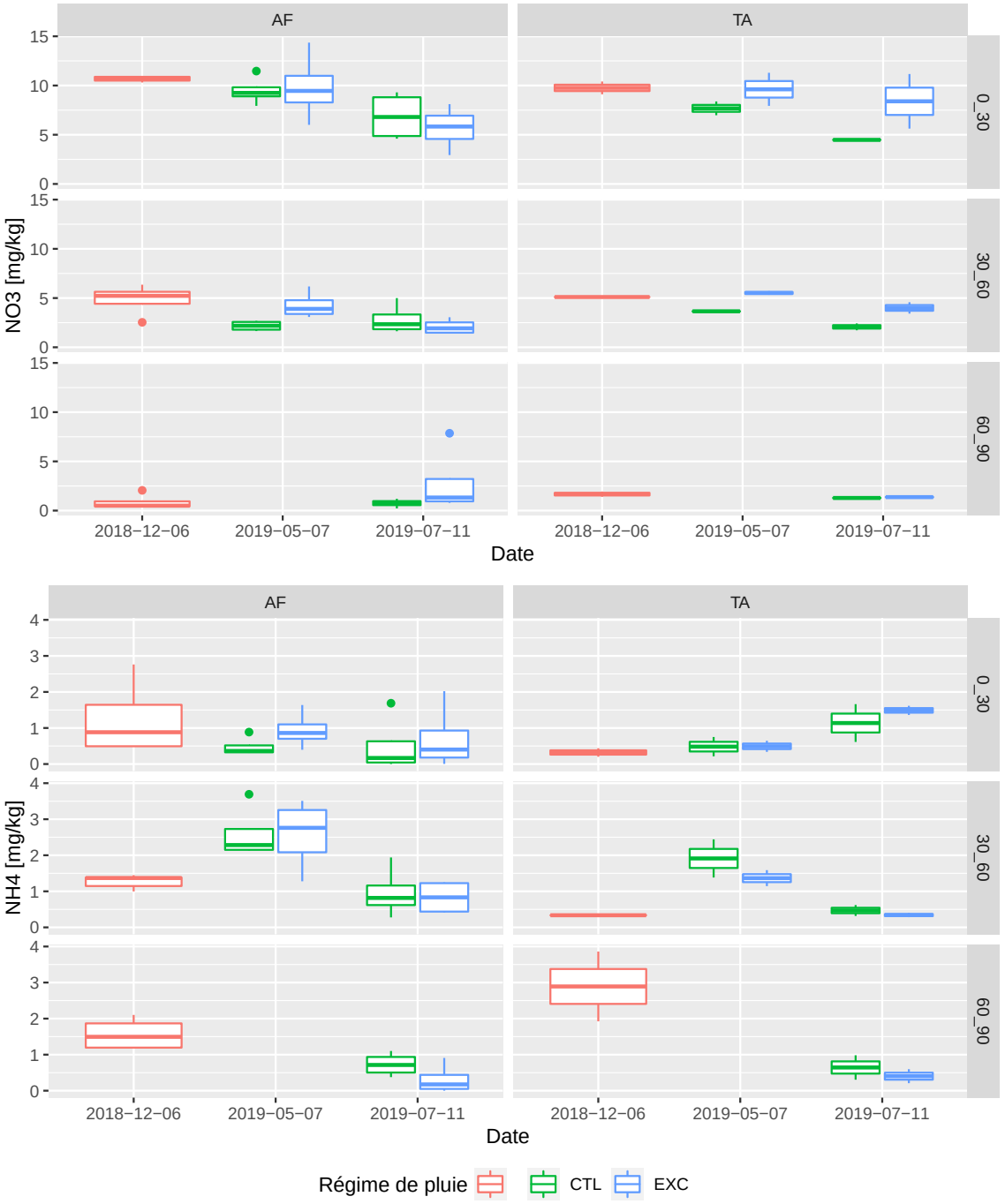


Figure B.7 Boxplots des mesures d'azote minéral en agroforesterie et en témoin agricole au cours de la saison 2018-2019.

Annexe C - Chapitre 1

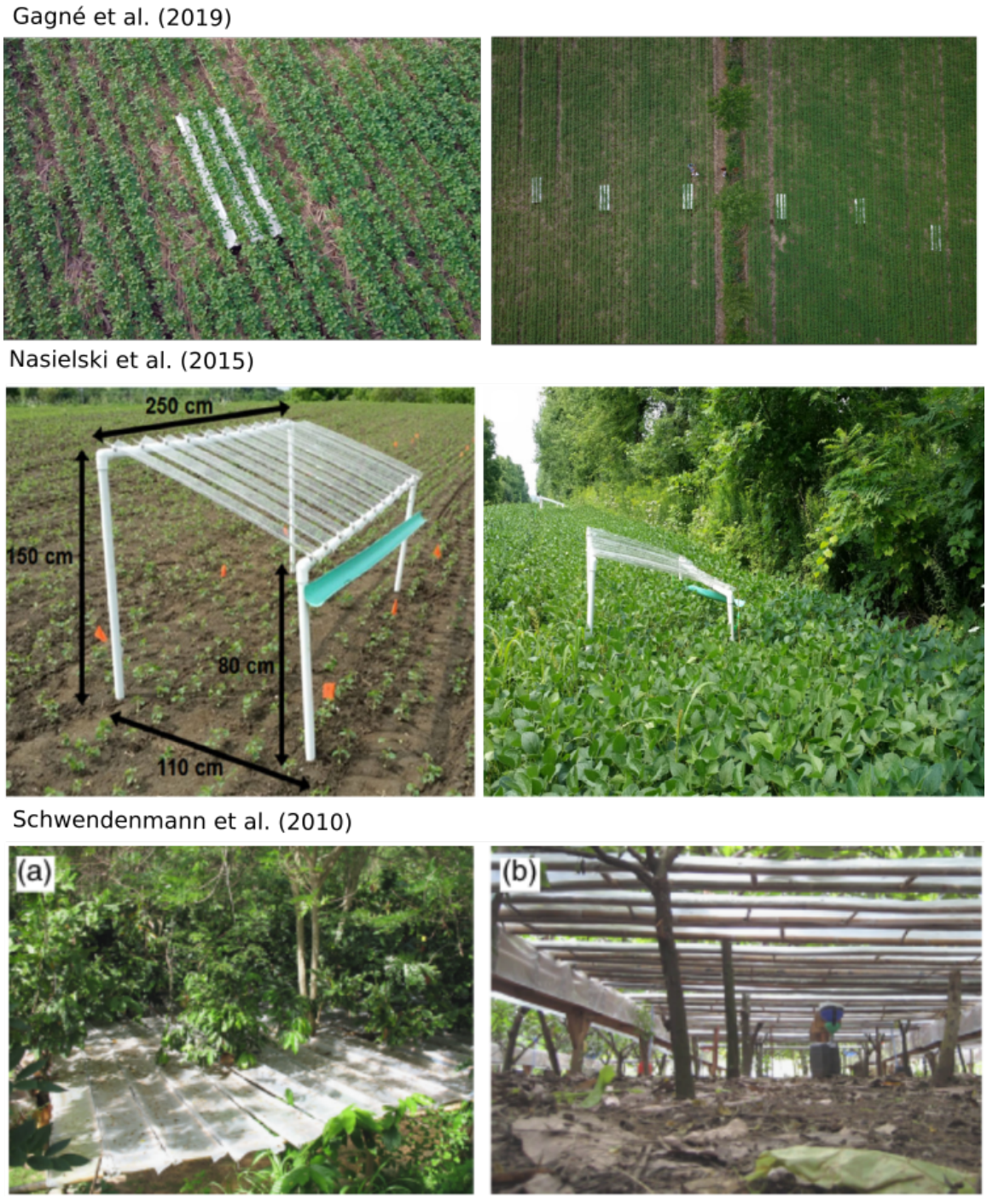


Figure C.1 Illustration d'autres dispositifs d'exclusion de pluie mobilisés pour l'étude des systèmes agroforestiers



Figure C.2 Design expérimental des dispositifs d'exclusion de pluie initialement envisagé... sur le papier !

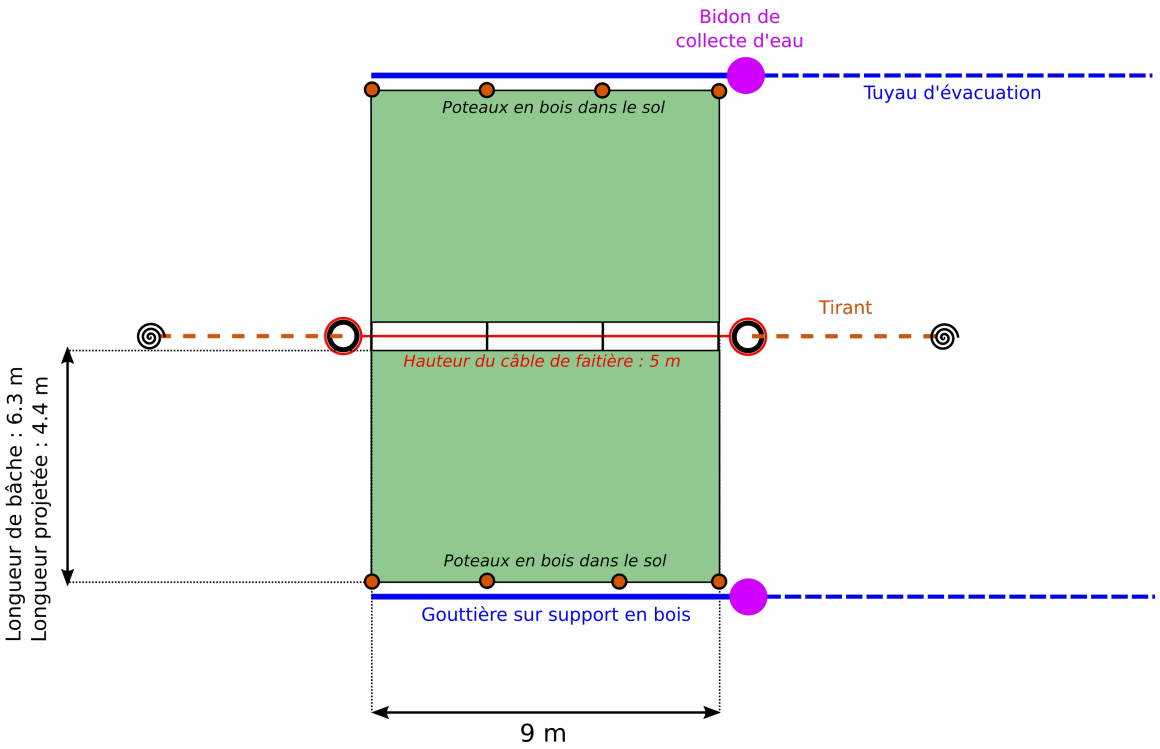


Figure C.3 Schéma global du dispositif de grande envergure en témoin agricole

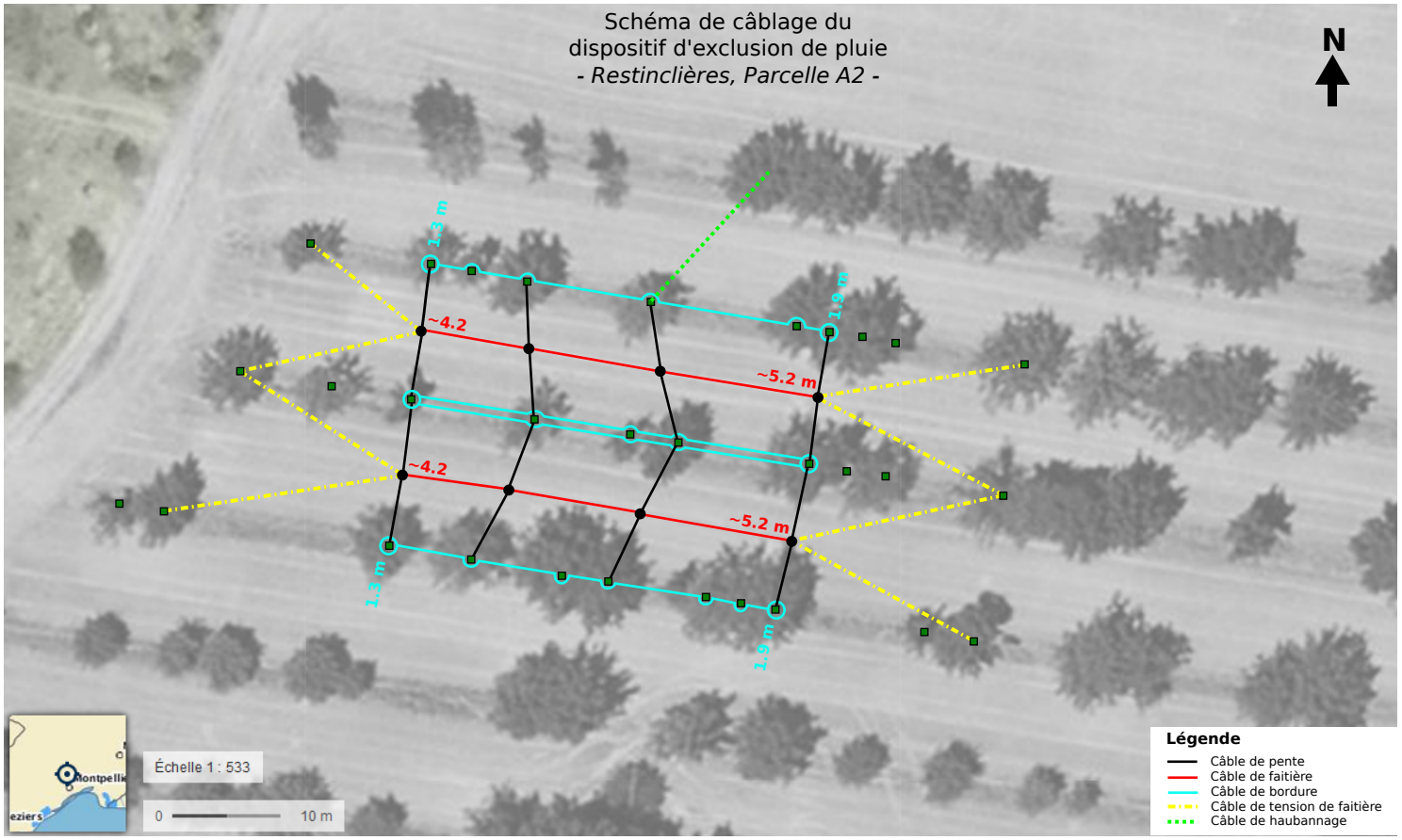


Figure C.4 Schéma global de l'implantation des câbles de structure du dispositif de grande envergure en agroforesterie

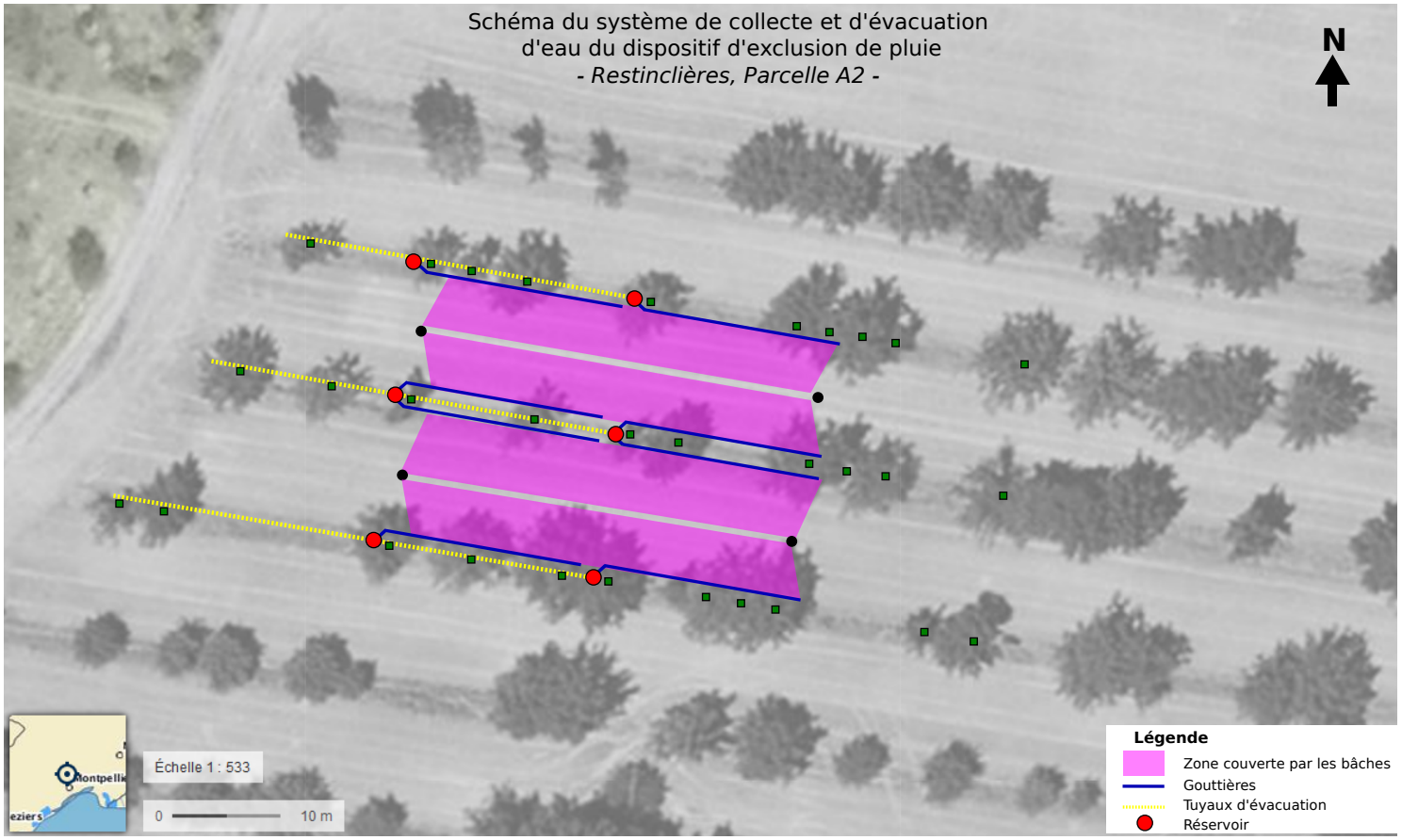


Figure C.5 Schéma global des éléments de collecte et d'évacuation du dispositif de grande envergure en agroforesterie



Figure C.6 Photographies supplémentaires du grand dispositif.



Figure C.7 Illustration des aléas techniques rencontrés avec le grand dispositif d'exclusion de pluie : après un épisode de grêle (A.), pendant un épisode pluvieux venté (B.), après un orage nocturne (C.), en vidant une poche d'eau (D.) et des fuites d'eau qui affectent placettes de suivi sous le dispositif (E.)



Figure C.8 Photographies supplémentaires des dispositifs de moyenne envergure. Les filets latéraux et la gouttière sont mis en tension à l'aide de tendeurs fixés sur les barres au sol. Lorsque les dispositifs sont rangés, les toits (composés du "cercle" d'arceaux supérieur, de la bâche translucide, de la gouttière et des filets latéraux) sont empilés sur la ligne d'arbre.

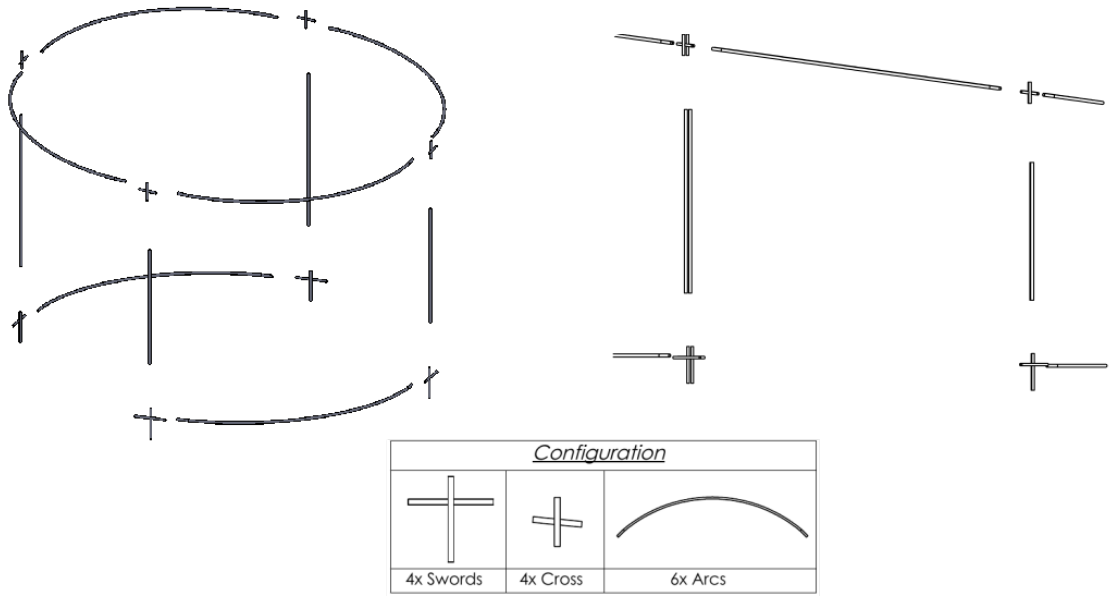


Figure C.9 Assemblage global des éléments de structure des dispositifs de moyenne envergure

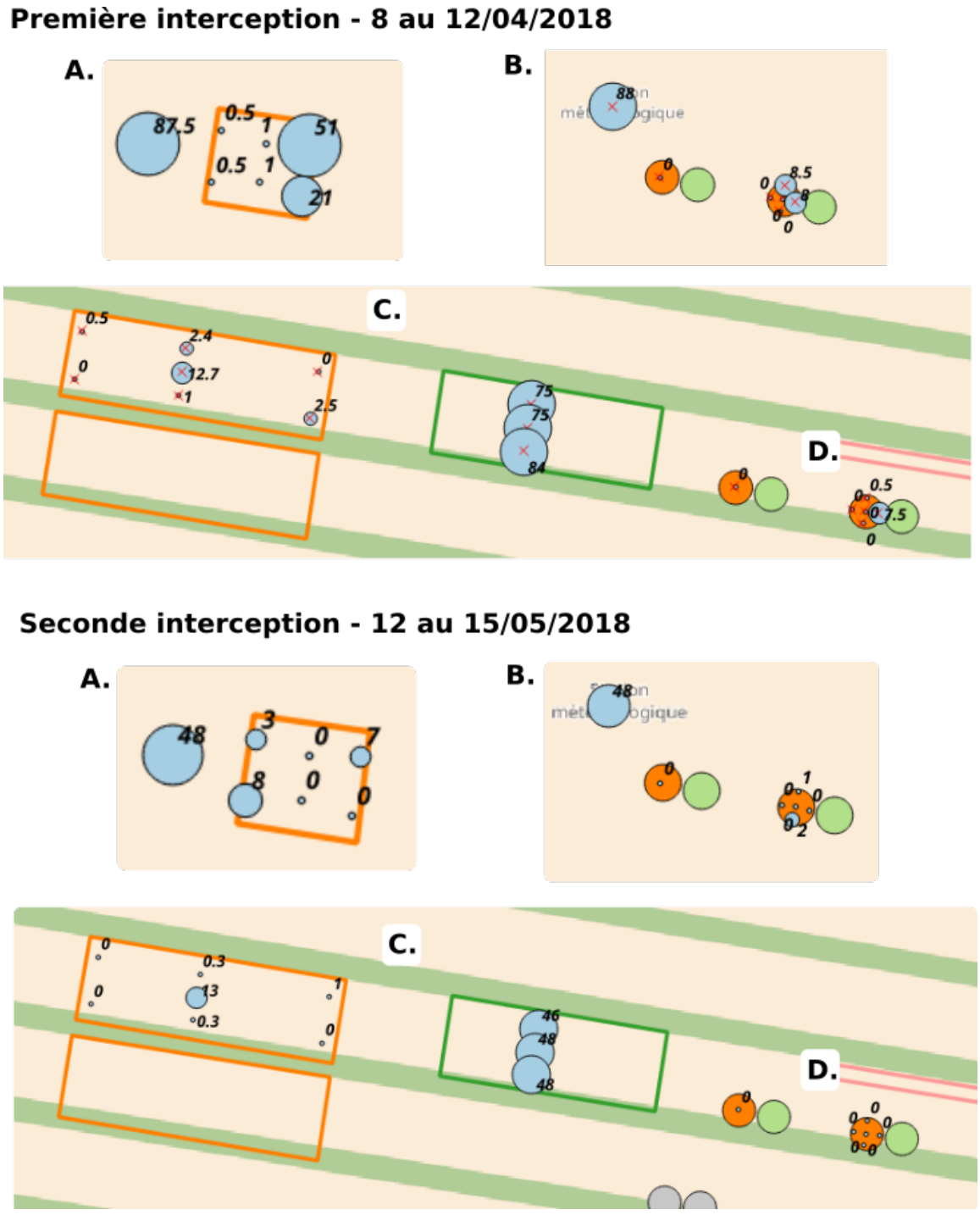


Figure C.10 Caractérisation des effets de bords sous les dispositifs d'exclusion de pluie lors de la première saison d'expérimentation (2017-2018). Les rectangles orange correspondent au zone exclue. Les rectangles verts indiquent les zones témoins. Les cercles pluies correspondent au cumul pluviométrique mesuré. Les zones respectives sont : le dispositif de grande envergure en TA (A.), les dispositifs de moyenne envergure en TA (B.), les dispositifs de grande envergure en AF (C.) et les dispositifs de moyenne envergure en AF (D.).

Tableau C.1 Comparaison des aspects logistiques des dispositifs d'exclusion de pluie mis en place à Restinclières (Partie 1/2).

Critère logistique	Dispositifs de grande envergure	Dispositifs d'envergure modeste
Déploiement/Rangement		
Automatisation	Non	Non
Nb. de personnes nécessaires	2	2
Temps de mise en place	ca. 2h30 (1h30-2h en AF, 30 à 45 min en TA)	ca. 2h pour 20 dispositifs (5 à 7 min par dispositif)
Ergonomie	Travaux avec cordes et tendeurs	Portage manuel des structures d'interception
Compétences nécessaires	Maîtrise de noeuds (cordage) Expertise pour ajustement de la tension de la bâche	Aucune
Gestion pendant le déploiement du dispositif		
Autonomie des dispositifs déployés	Faible	Moyenne
Horaires de travail	Journée + nuit	Journée
Personnel mobilisé pour la gestion	*ca.* 4	2
Aléas techniques identifiés	Fuites d'eau "aléatoire" Entrées d'eau latérales aériennes Ecrasement des cultures par formation de poches d'eau ou grêle Endommagement des éléments du dispositifs compromettant l'interception (bâches, drisses, gouttières) Risque accru de piétinement des cultures pendant la gestion du dispositif	Fuite d'eau par accumulation de grêle* Nécessité de réassemblage d'un dispositif si bourrasque de vent trop forte

Tableau C.2 Comparaison des aspects logistiques des dispositifs d'exclusion de pluie mis en place à Restinclières (Partie 2/2).

Critères logistiques	**Dispositifs de grande envergure**	**Dispositifs d'envergure modeste**
Maintenance		
Bâches d'interception	Réparations régulières des jonctions avec les drisses et les gouttières	Vérification de la bonne tenue de la bâche
Gouttières	Réparations régulières des jonctions entre les éléments de gouttières suite à des contraintes de cisaillement et de torsion	-
Ergonomie de maintenance	Faible Proximité immédiate avec les zones d'exclusion	Bonne Maintenance en dehors de la zone d'exclusion
Intégration de l'itinéraire technique		
Labour/semis	AF : Nécessité de démonter des tendeurs et des cordages TA : Réalisation par microtracteur	- (Dispositifs absents, installés après)
Passage herbicide/engrais	AF : Nécessité de démonter des tendeurs et des cordages TA : Réalisation manuelle	Démontage ou marquage de la présence de l'embase pour évitement
Moisson		- (Dispositifs absents, installés après)
Identification des risques/dangers potentiels pour le personnel technique		
Lors des déploiements/rangements	-	-
Lorsque les dispositifs sont en place	Travail de nuit au milieu des cordages Gestion des situations orageuses problématiques	-

Annexe D - Chapitre 2

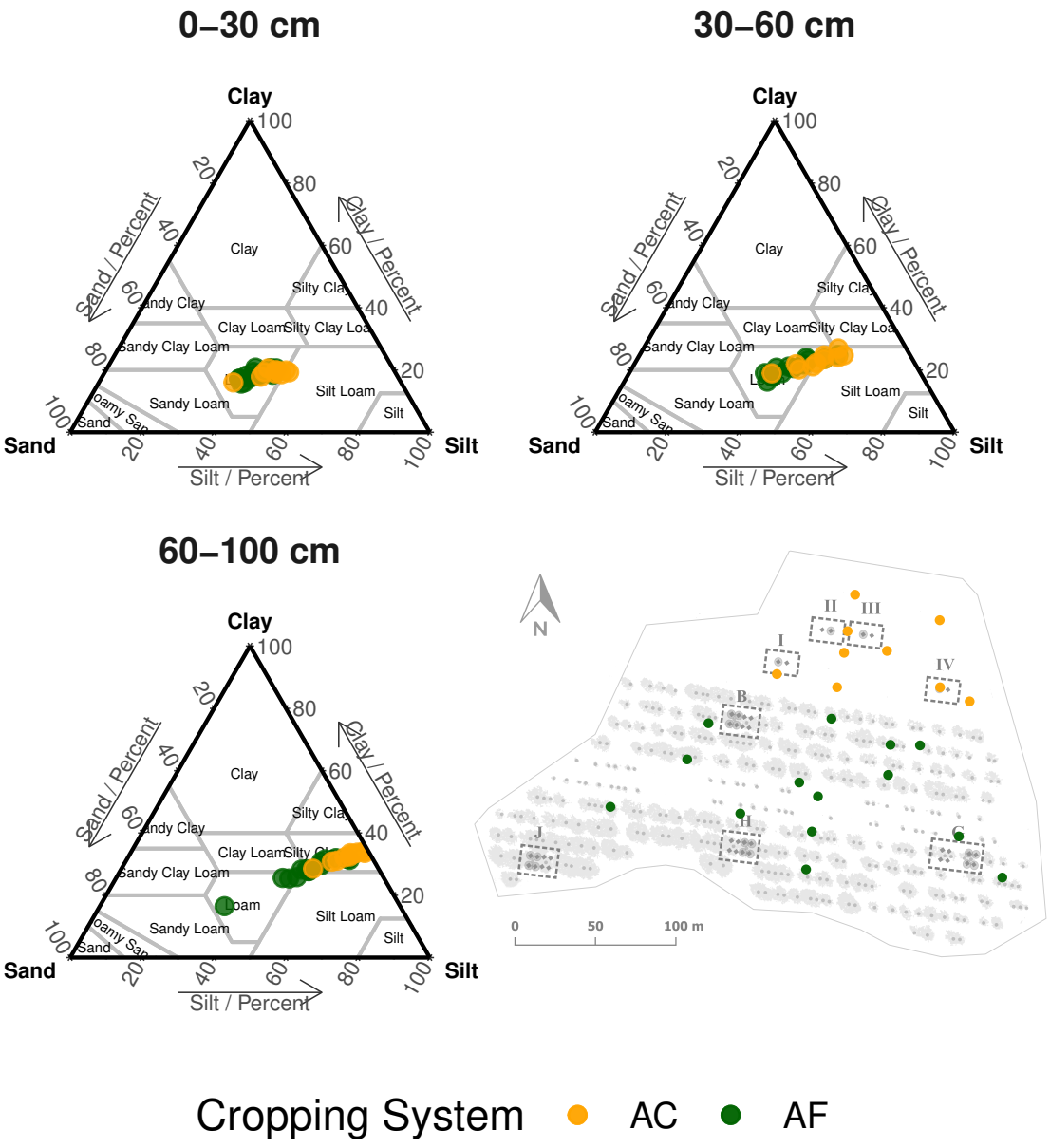


Figure D.1 Ternary diagrams of soil texture and the corresponding map of sampling location. Soil texture was characterized in 2012, as a preliminary study of Cardinael et al. (2015a).

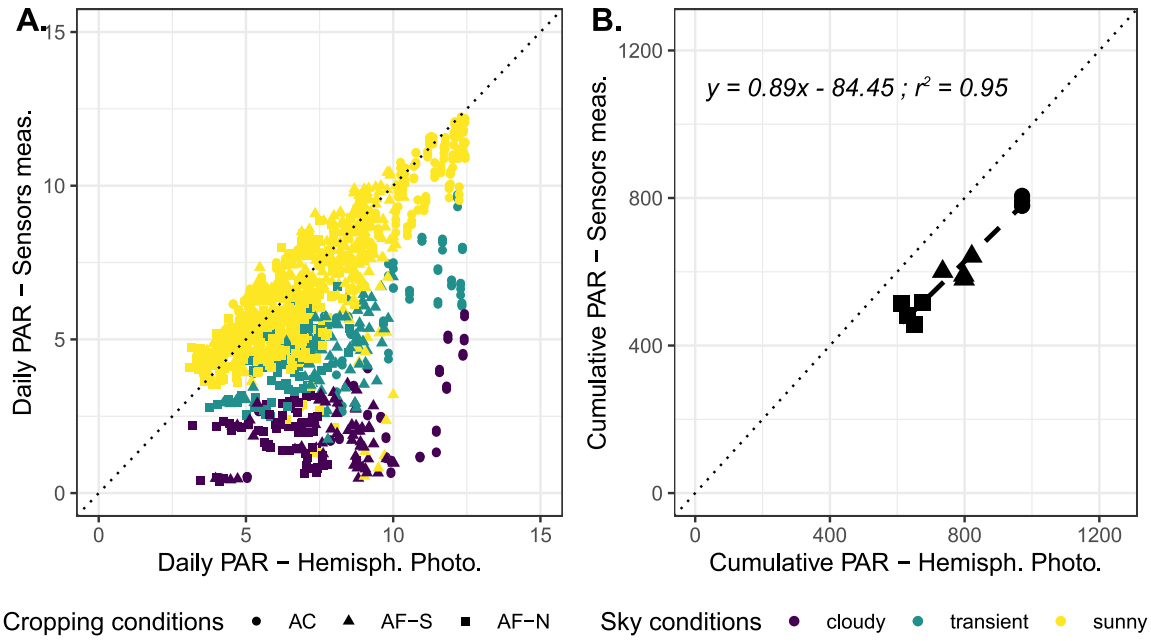


Figure D.2 Comparison of daily instantaneous PAR and daily cumulated PAR as estimated with PAR sensor measurements and hemispherical photographs analysis.

Tableau D.1 Standard major axis (SMA) regression to test the interdependence of proxies for vegetative and reproductive components.

Proxy *(Proxy)*	Rainfall regime	n	r^2	*P*	Slope	Intercept
LAI *(Nb. pods/plant)*	-	39	0.34	**<0.001**	1.407	2.871
	CTL	20	0.20	**0.045**	1.797	1.271
	EXC	19	0.29	**0.017**	1.802	2.665
LAI *(Nb seeds/pod)*	-	39	0.10	**0.047**	-0.444	4.429
	CTL	20	0.01	0.874	0.320	2.212
	EXC	19	0.01	0.837	-1.213	5.573
LAI *(TKW)*	-	39	0.13	**0.022**	-18.468	185.365
	CTL	20	0.01	0.622	-20.223	194.991
	EXC	19	0.01	0.749	34.452	94.773
Nb. pods / plant *(Nb. seeds / pod)*	-	39	0.01	0.471	-0.316	5.335
	CTL	20	0.16	0.077	0.178	1.271
	EXC	19	0.14	0.107	-0.673	2.665
Nb. pods / plant *(TKW)*	-	39	0.02	0.387	13.127	60.92
	CTL	20	0.25	**0.024**	11.253	57.91
	EXC	19	0.01	0.730	19.118	43.82
Nb. seeds / pod *(TKW)*	-	39	0.23	**0.002**	41.597	1.127
	CTL	20	0.17	0.068	-67.649	63.220
	EXC	19	0.11	0.174	48.611	28.389

Annexe E - Chapitre 3

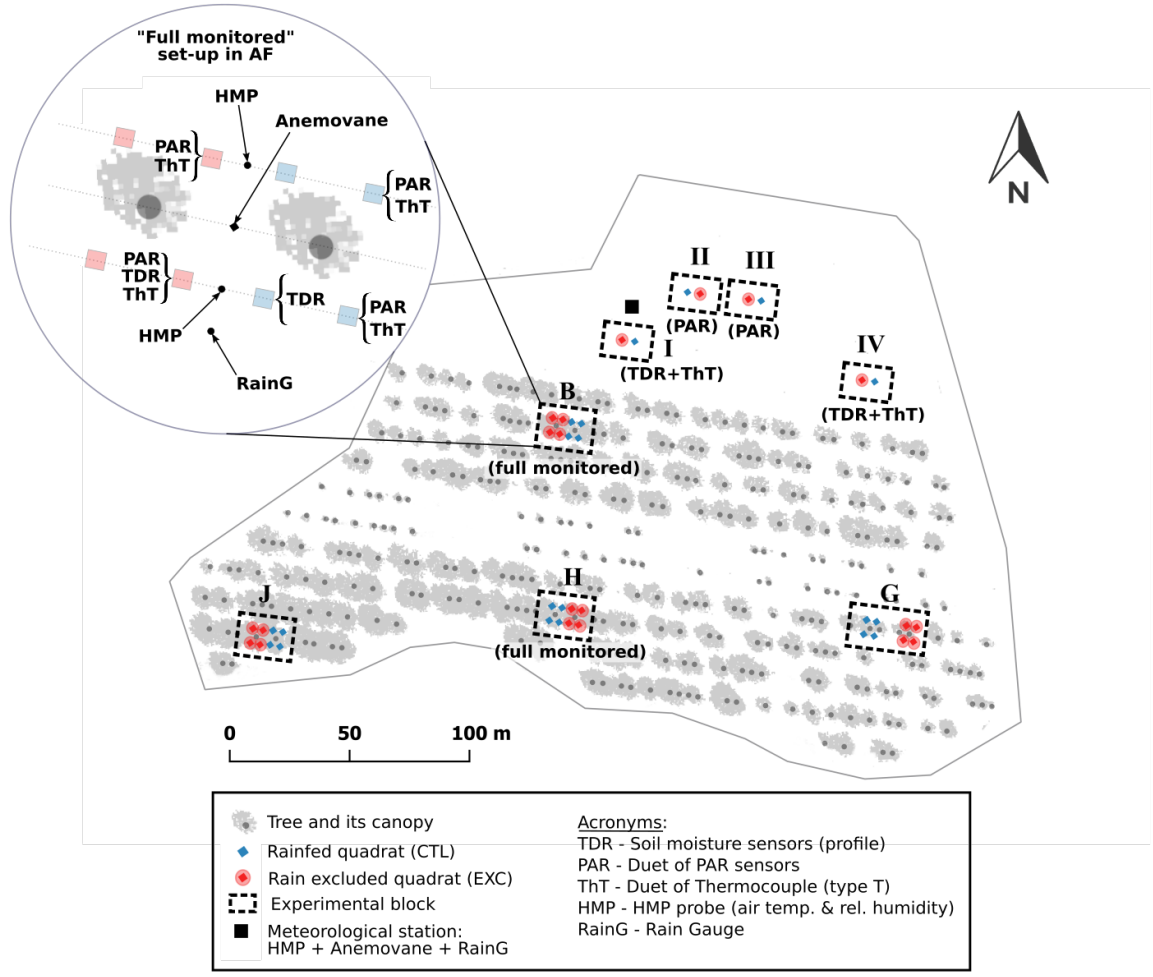


Figure E.1 Map of sensors set-up for monitoring soil moisture, local microclimate and PAR fluxes during the rainfall manipulation experiment.

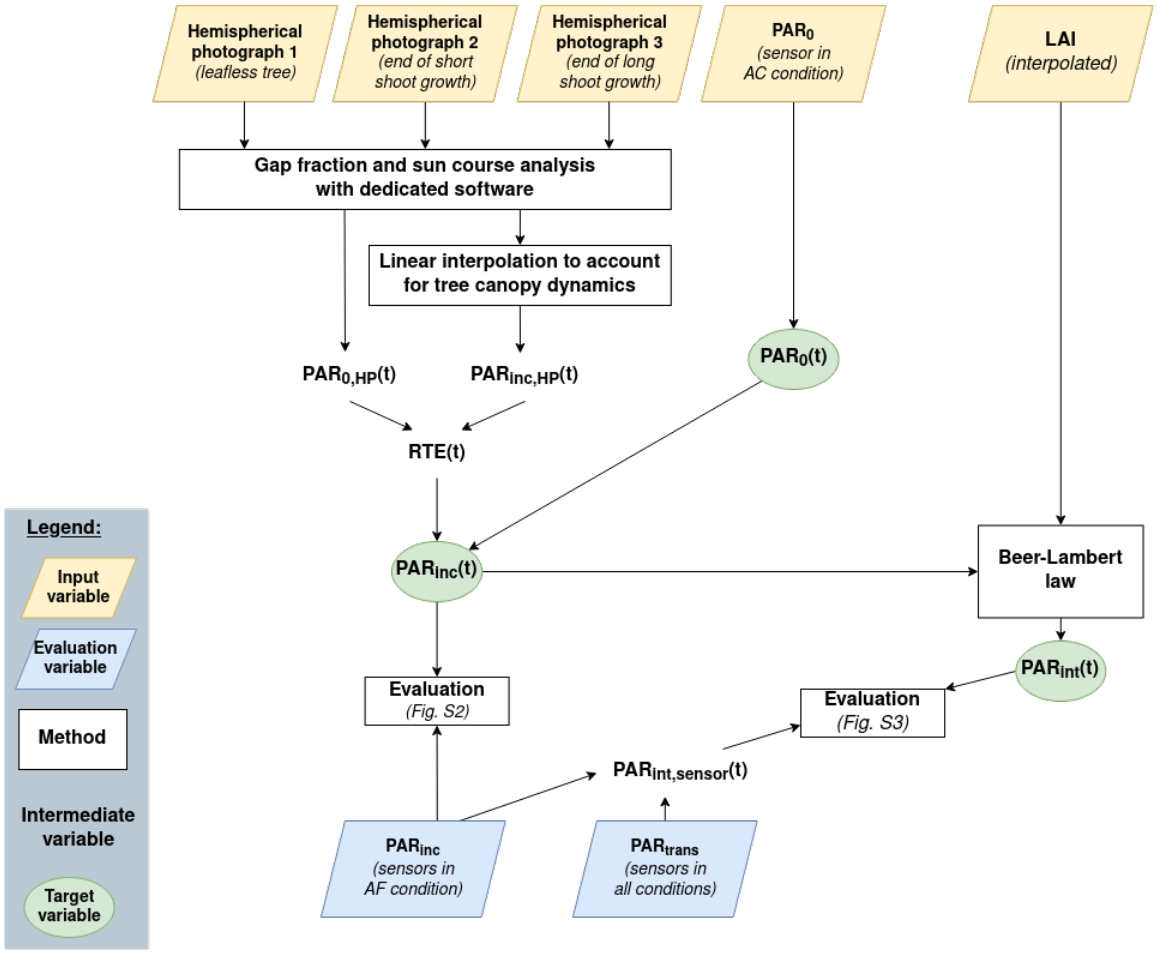


Figure E.2 Flowchart of the procedure for estimating and evaluating PAR fluxes at canopy level.

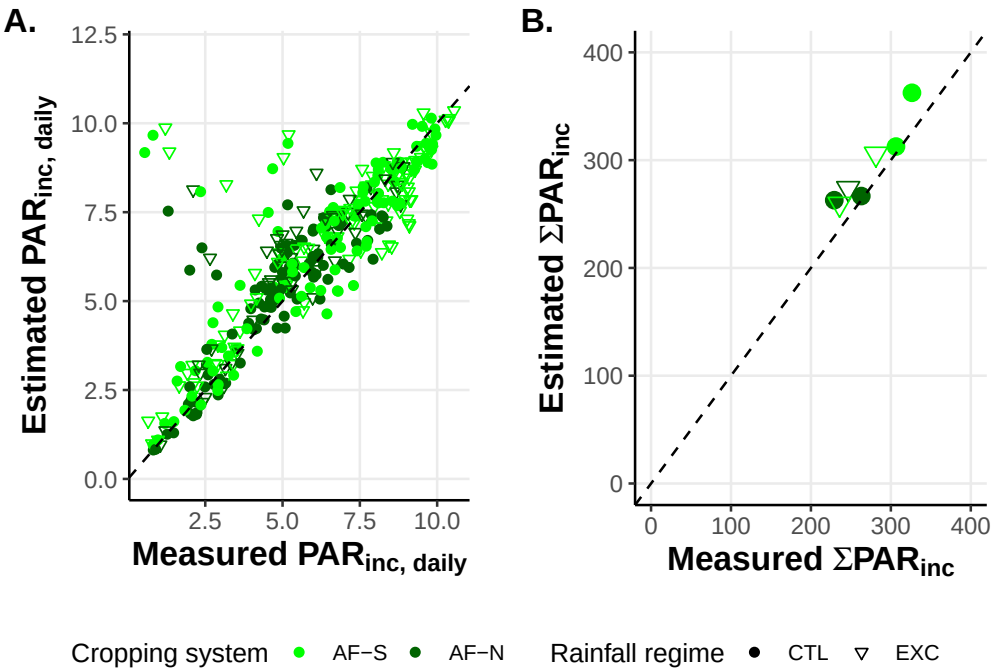


Figure E.3 Comparison of daily incident PAR (PAR_{inc}) measured with PAR sensors and estimated with hemispherical photographs in AF conditions. Dashed line represents 1 :1 line.

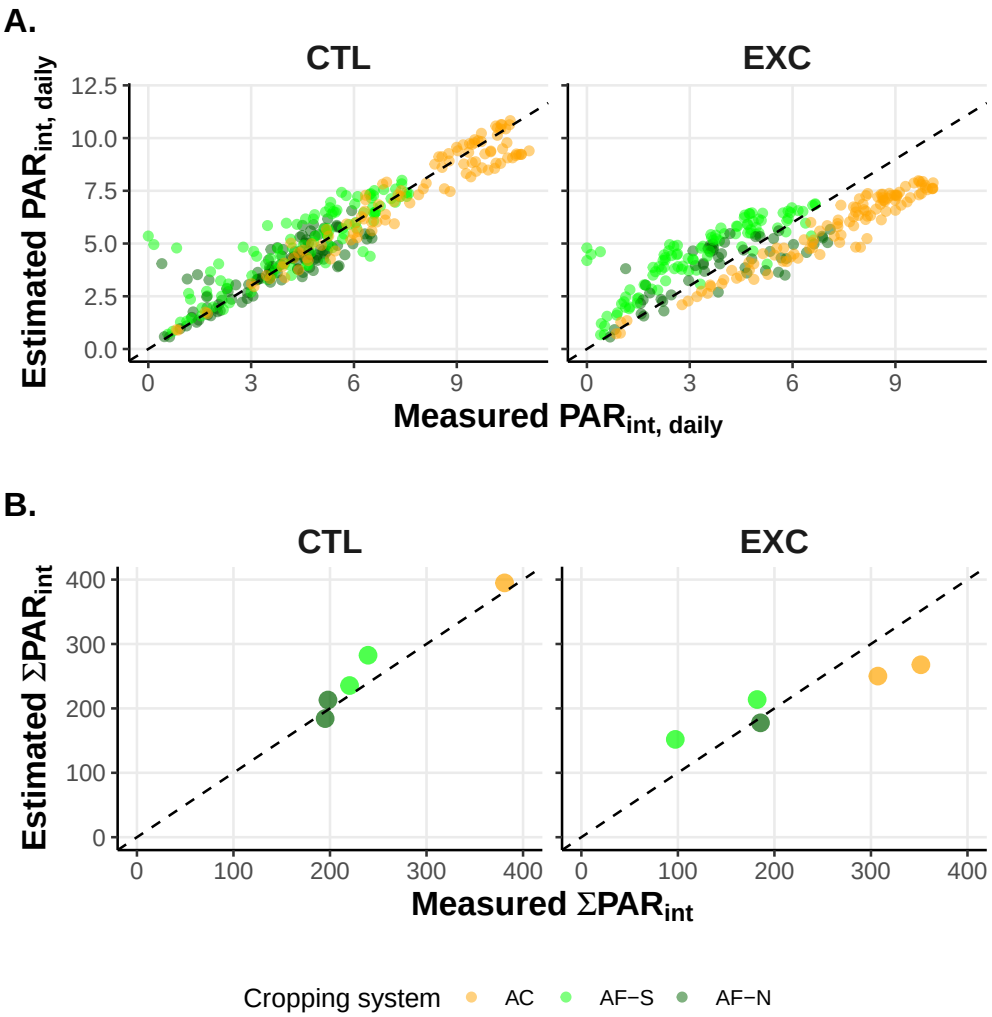


Figure E.4 Comparison of daily intercepted PAR (PAR_{int}) measured with PAR sensors and calculated from the LAI value using the Beer's law in all cropping conditions. Dashed line represents 1 :1 line.

Specific comment : To some extent, these data show that there was a mismatch between observed and estimated values of intercepted PAR by pea canopy in AF-S and AC in case of drought. Nevertheless, the proposed method proved to be acceptable in all cropping conditions in CTL. Drought treatment severely impacted crop LAI (average maximal LAI = 1.78). Field observations showed that low LAI conditions tended to increase pea canopy clumpiness in the monitored quadrats. Because of the drought treatment, we reached the limit of the validity domain of Beer's Lambert approach : when pea crop canopy is not an homogeneous porous media, then either the estimation by Beer's Lambert law and field measurement might be affected by errors.

However, observed mismatch did not change the proposed interpretation in this study. Errors on $\sum PAR_{int}$ would affect log-proportionally lnRR(RIE) and log-inversely lnRR(RUE). In AC, it means that lnRR(RIE) would be slightly increased and lnRR(RUE) would be decreased. The opposite effect would be observed in AF-S. Thus, the interpretation proposed in the discussion remains valid.

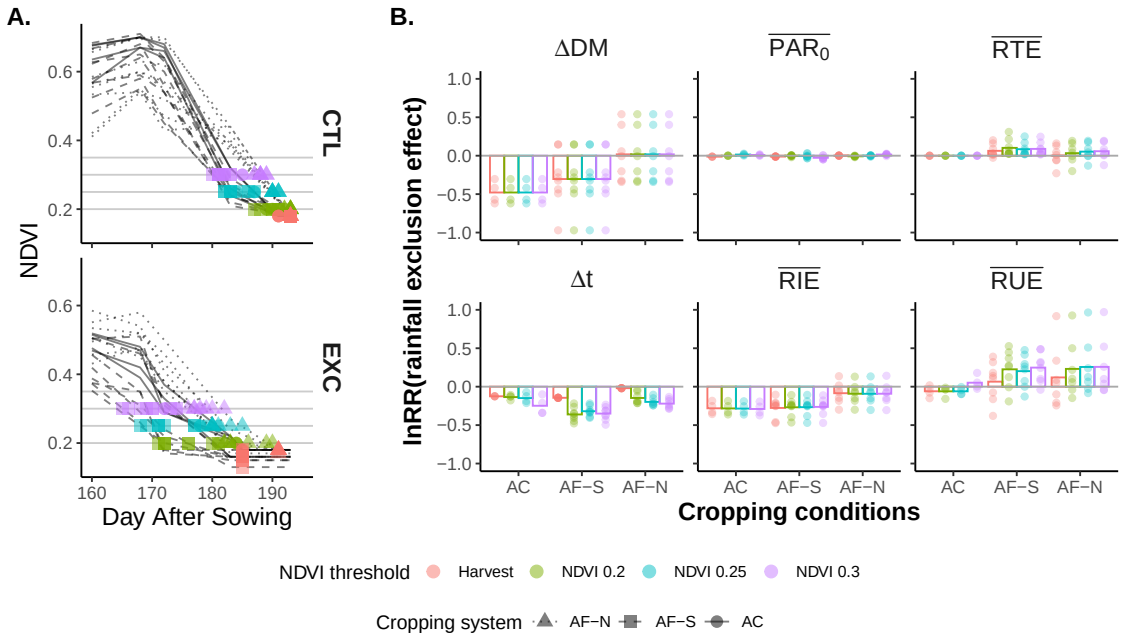


Figure E.5 Sensitivity analysis of the log-relative contributions of the six determinants of Monteith's equation according to different NDVI thresholds for determining the date of complete senescence.

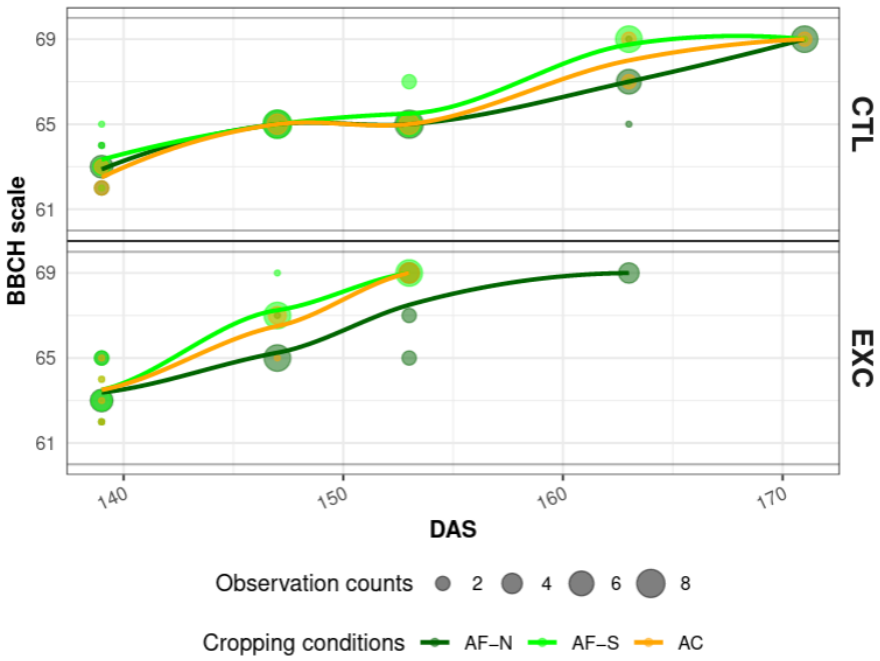


Figure E.6 Observation counts of the different phenological stages during pea flowering. Loess curve lines were used to depict the overall trend for a cropping condition. According to the BBCH scale, stage 61, 65, 67 and 69 correspond respectively to the beginning of flowering (10% of the flowers are opened), full flowering (50% of the flowers are opened), the decline of flowering and the end of flowering (Hack et al., 1992).

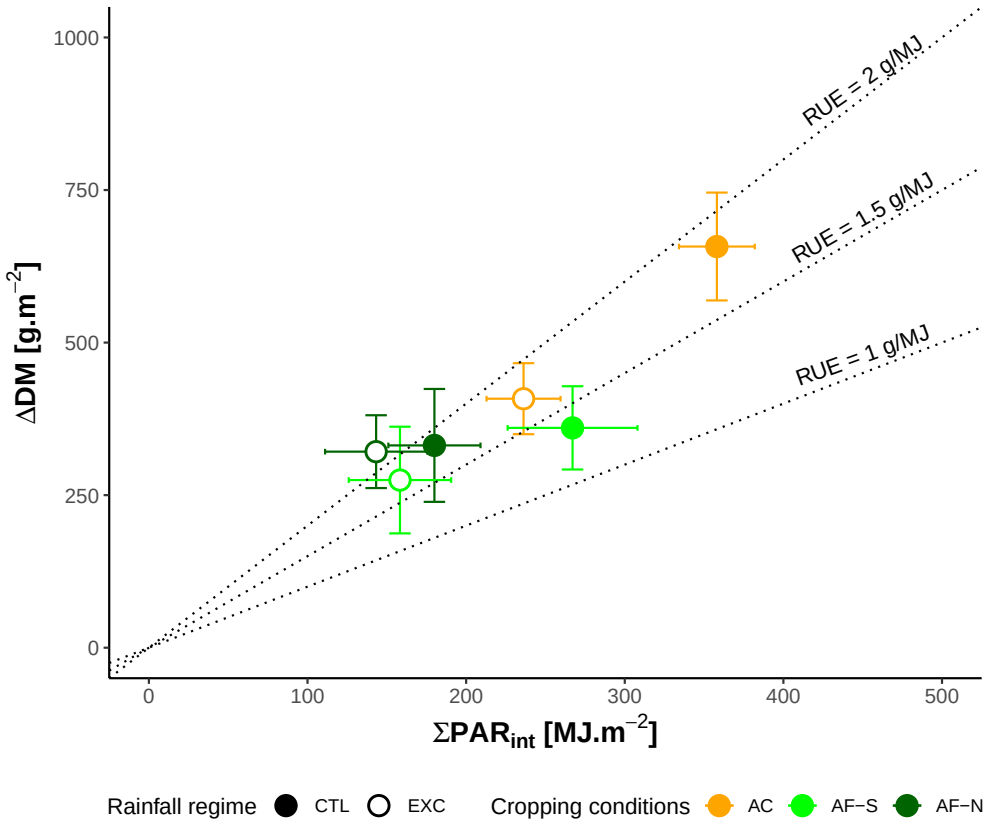


Figure E.7 Pea biomass increment in relation to the cumulated intercepted PAR from flowering to full senescence, cropping conditions and rainfall regime. Dotted lines indicate corresponding apparent radiation use efficiency.

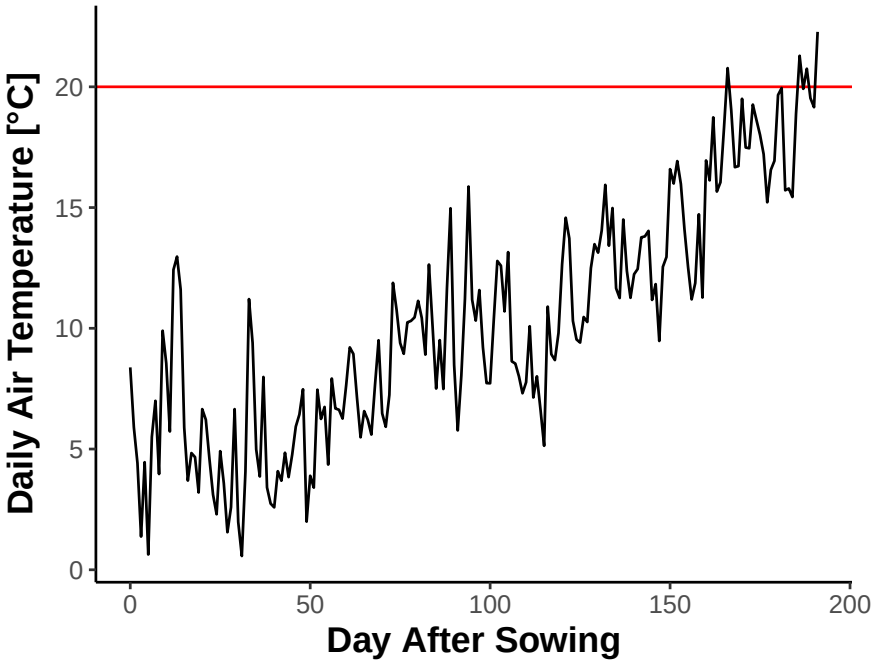


Figure E.8 Mean daily air temperature from sowing to harvest in the Agricultural Control. Horizontal red line indicates 20°C, considered as a threshold for heat stress in pea crop (Guilioni and Jeuffroy, 2010)

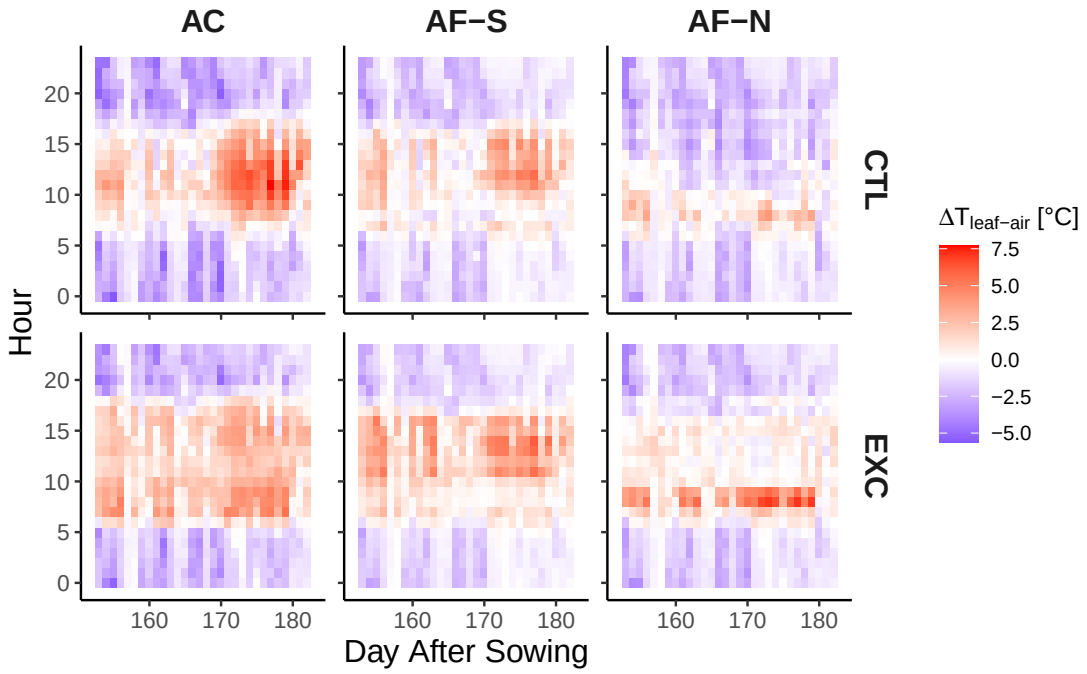


Figure E.9 Difference between leaf and air temperatures from mid-flowering until seed maturation, in different cropping systems and rainfall regimes.

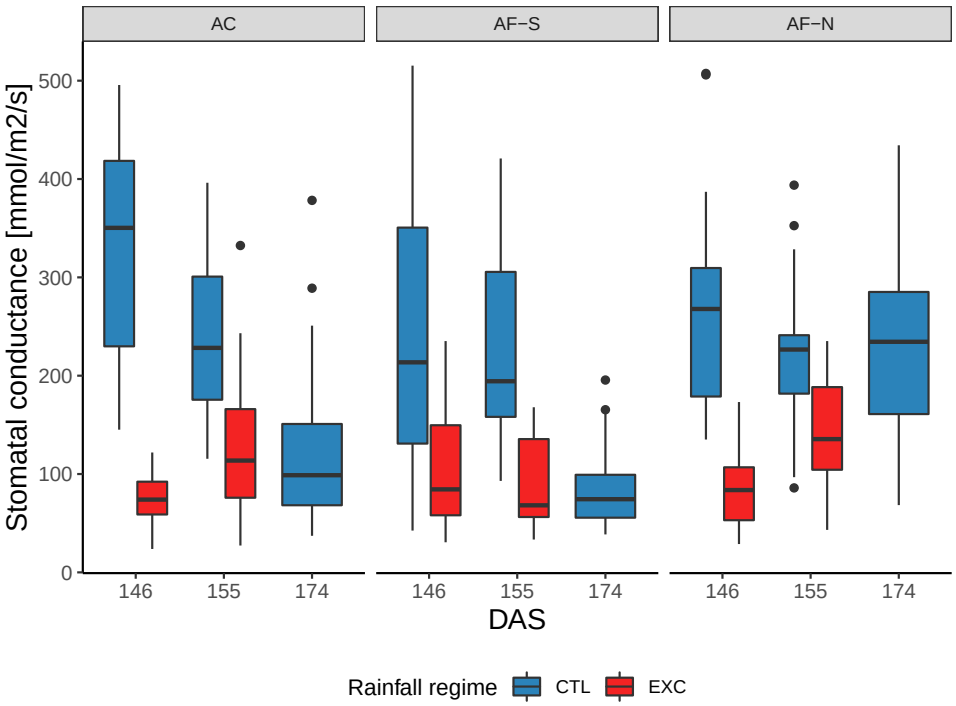
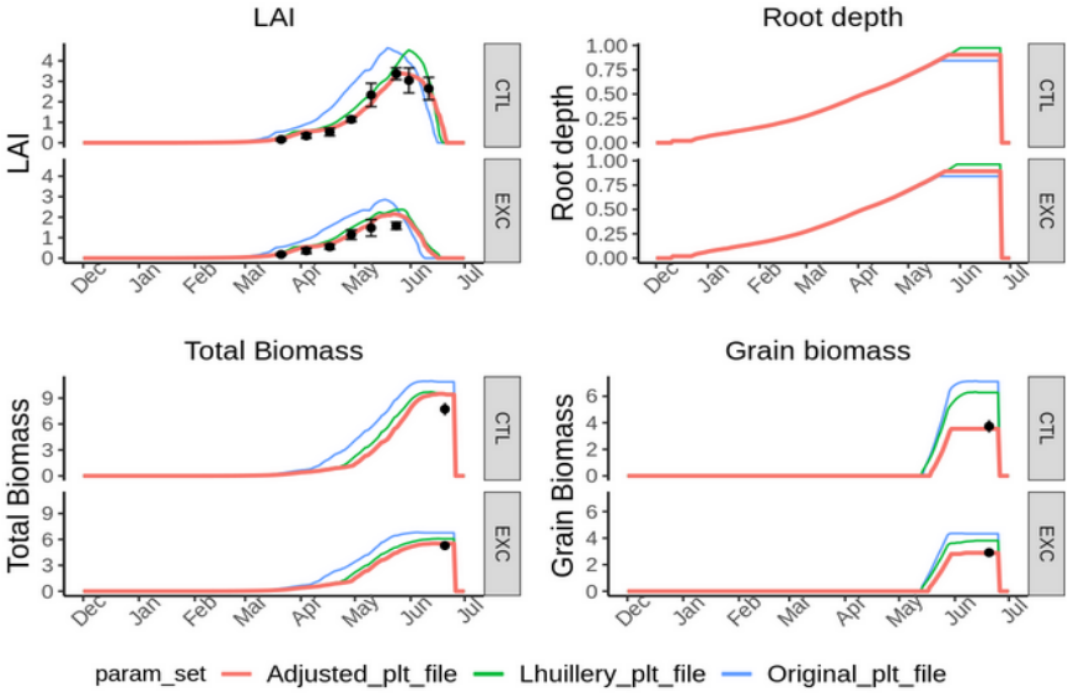


Figure E.10 Stomatal conductance of pea plant according to cropping conditions, rainfall regime and date.

Annexe F - Discussion



- **Vegetative phenological stage**

Parameter	Range	Initial set	Lhuillery set	Calibrated set
stlevamf	0-6000	510	720	840
stamflax	0-6000	543	450	325

- **Reproductive phenological stage**

Parameter	Range	Initial set	Lhuillery set	Calibrated set
stlevdrp	0-6000	980		1050
stdrpmat	0-2000	561		561

- **Yield formation**

Parameter	Range	Initial set	Lhuillery set	Calibrated set
cgrain	0.01-1	0.038		
cgrain_v0	0-15000	0		
nbjgrain	5-40	15		
viticarb_t	5e-5 - 2e-3	0.001		

- **Yield components threshold**

Parameter	Range	Initial set	Lhuillery set	Calibrated set
nbgrmax	0-1000000	3950		3500
pgraimax	0.003-5	0.28		0.16

Figure F.1 Aperçu du travail de calibration des paramètres variétaux pour le pois sous la version 3.5 de Hi-sAFe.

Tableau F.1 Paramètres nécessaires au calcul du nombre de grains dans STICS pour les plantes "déterminées" - voir équation 4.2 du livre rouge (Brisson et al., 2009)

Nom du paramètre STICS	Description du paramètre
NBJGRAIN	Durée de la période d'initiation des grains en jours
CGRAIN	Coefficient de proportionalité entre le nombre de grains et la vitesse moyenne d'accumulation de biomasse pendant la durée NBJGRAIN
NBGRMIN	Valeur minimale du nombre de grains (paramètre d'espèce)
NBGRMAX	Valeur maximale du nombre de grains (paramètre variétal)

Tableau F.2 Paramètres nécessaires au calcul du nombre de grains dans STICS pour les plantes "déterminées" - voir équation 4.2 du livre rouge (Brisson et al., 2009)

Nom du paramètre STICS	Description du paramètre
Si codeir = 1 (indice de récolte dépendant du nombre de jour)	
VITIRCARB	Taux d'augmentation de l'indice de récolte en fonction du nombre de jours (entre les stades ILAT et IDRP)
IRMAX	Indice de récolte maximal
PGRAINMAXI	Valeur maximale du poids d'un grain (paramètre variétal)
Si codeir = 2 (indice de récolte dépendant du nombre de degré-jour)	
VITIRCARBT	Taux d'augmentation de l'indice de récolte en fonction de la température (entre les stades ILAT et IDRP)
PGRAINMAXI	Valeur maximale du poids d'un grain

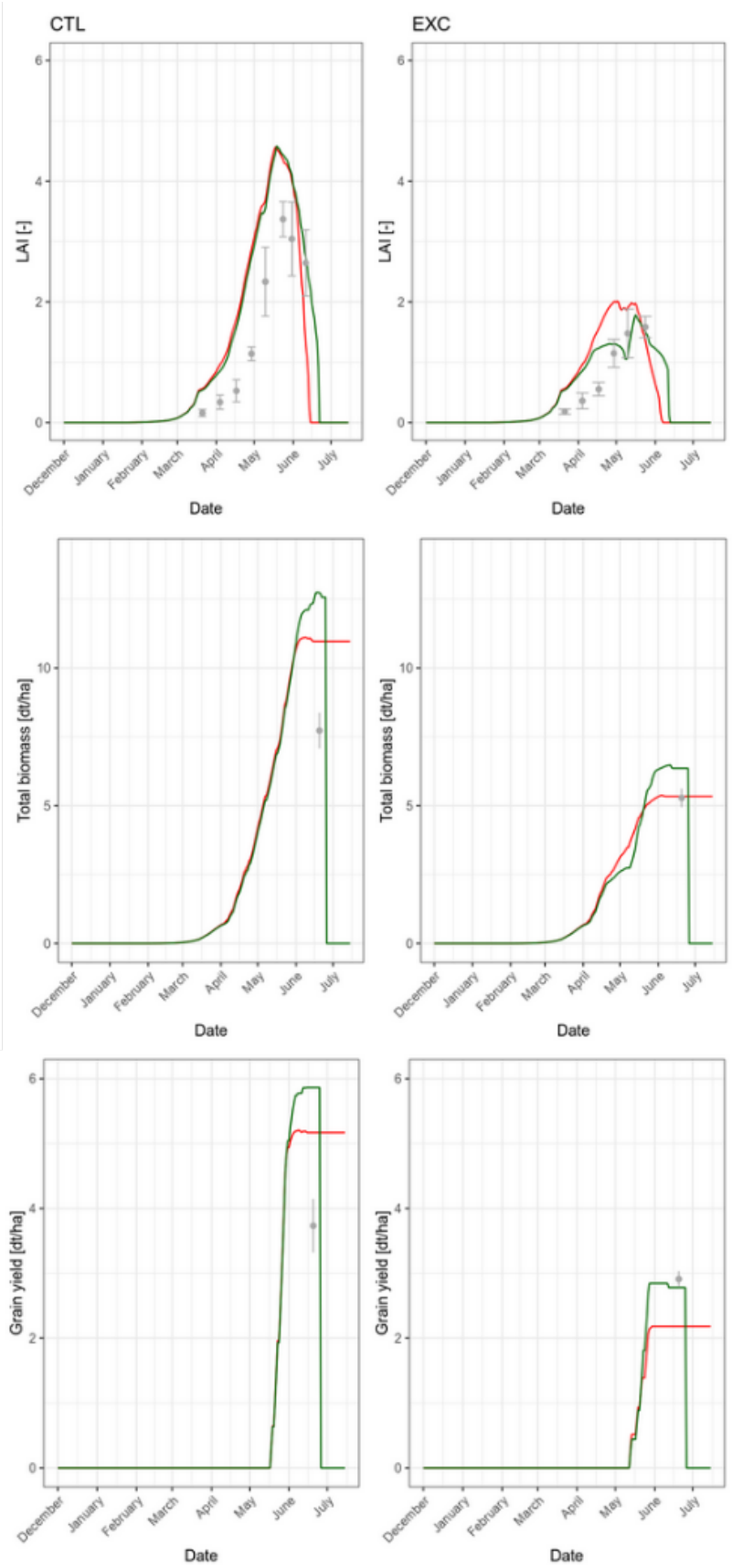


Figure F.2 Comparaison de la dynamique de LAI du pois d'hiver pour des scènes "identiques" entre Hi-sAFe 4.1 et STICS standalone (8.5) selon les deux régimes de pluie. Les observations sont présentées en gris, les simulations Hi-sAFe en vert foncé et les simulations STICS en rouge.

Tableau F.3 Paramètres nécessaires au calcul des stress trophiques à l'échelle de la plante dans le modèle de culture STICS - trois stress trophiques sont distinguées, pour la croissance foliaire (SPLAI), pour le nombre de fruit (SPFRUIT) et pour la croissance du fruit (SOURCEPUITS) - voir chap 3.4.3. (Brisson et al., 2009)

Nom du paramètre STICS	Description du paramètre
SPLAIMIN	Valeur minimale du rapport sources/puits pour la croissance foliaire
SPLAIMAX	Valeur maximale du rapport sources/puits qui déclenche le calcul d'un stress trophique pour la croissance foliaire
SPFRMIN	Valeur minimale du rapport sources/puits qui déclenche le calcul d'un stress trophique lors de la mise en place des fruits
SPFRMAX	Valeur maximale du rapport sources/puits qui déclenche le calcul d'un stress trophique pour la mise en place des fruits

Tableau F.4 Paramètres nécessaires au calcul du nombre de fruits pour les plantes "indéterminées" dans STICS (voir Eq. 4.8 et Eq. 4.9 de Brisson et al. 2009)

Nom du paramètre STICS	Description du paramètre
Si codcalinflo = 1 (nombre d'inflorescence fixé)	
AFRUITSPv	Nombre potentiel de fruits par inflorescence et par degré jour
NBINFLO	Nombre d'inflorescences
Si codcalinflo = 2 (nombre d'inflorescence calculé à partir de la biomasse)	
AFRUITSPv	Nombre potentiel de fruits par inflorescence et par degré jour
PENTEINFLORES	Pente de la courbe de prédiction du nombre d'inflorescence en fonction de la biomasse
INFLOMAX	Nombre maximal d'inflorescences

Tableau F.5 Paramètres nécessaires au calcul du remplissage des grains pour les plantes "indéterminées" dans STICS (voir Eq. 4.8 et Eq. 4.9 de Brisson et al. 2009)

Nom du paramètre STICS	Description du paramètre
DUREEFRUIT	Durée de remplissage d'un fruit en jours (paramètre variétal)
NBOITE	Nombre de cohortes de fruits
CFPF	Paramètre 1 de la croissance exponentielle (division cellulaire) du fruit
DFPF	Paramètre 2 de la croissance exponentielle (division cellulaire) du fruit
AFPF	Paramètre 1 de la croissance logistique (croissance cellulaire) du fruit
BFPF	Paramètre 2 de la croissance logistique (croissance cellulaire) du fruit
ALLOCFRMAX	Valeur maximale de l'allocation de la biomasse journalière vers un fruit
PGRAINMAXI	Poids maximal d'un fruit (grain)

RÉSUMÉ

La résilience des systèmes agroforestiers face au changement climatique : analyse de la réponse de cultures annuelles face à la sécheresse dans un système à base de noyer sous climat méditerranéen.

En Europe, et plus particulièrement dans le bassin Méditerranéen, la fréquence des épisodes de sécheresse et de canicule augmente sous l'effet du changement climatique et menace la productivité des systèmes agricoles. L'agroforesterie, et plus particulièrement une de ses déclinaisons combinant des alignements d'arbres et des cultures intercalaires, s'avère particulièrement productive et intéresse de plus en plus les agriculteurs. Mais de tels systèmes sont-ils efficaces pour limiter l'impact d'aléas climatiques de plus en plus intenses ? Les connaissances scientifiques disponibles sur le sujet sont très limitées. Nous avons étudié les effets de la sécheresse sur des cultures annuelles en contexte agroforestier à l'aide de dispositifs d'exclusion de pluie.

Dans le premier chapitre, nous discutons les enjeux scientifiques et les défis méthodologiques liés à l'étude des effets de la sécheresse avec des dispositifs de manipulation du régime des pluies en contexte agroforestier. Cette discussion combine une revue bibliographique et un retour d'expérience sur deux dispositifs différents d'exclusion de pluie que nous avons mis en place sur une des parcelles agroforestières du domaine de Restinclières (Hérault, France). Dans les chapitres suivants, nous analysons les résultats obtenus sur une culture de pois d'hiver au cours de la saison 2018-2019. Dans le second chapitre, nous testons l'hypothèse d'une protection de la culture annuelle contre la sécheresse de printemps par les arbres agroforestiers, en comparant des cultures en plein soleil et sous les arbres, avec et sans exclusion de pluie. A travers l'analyse de 1) la dynamique de l'eau dans le sol et 2) les composantes de rendements du pois, nous montrons que 1) la compétition entre l'arbre et la culture est faible pour la ressource en eau et 2) qu'il existe des mécanismes de compensation au niveau de la plante qui limitent les pertes de rendement en grains en contexte agroforestier lors d'une sécheresse. Dans le troisième chapitre, nous cherchons à comprendre pourquoi la production globale de biomasse est maintenue en conditions ombragées. L'analyse des processus lumineux à l'échelle du couvert montre que trois processus sont impliqués, à savoir la sénescence, la dynamique foliaire et l'efficience d'utilisation lumineuse. La modification du microclimat sous les arbres réduit aussi sensiblement la demande évaporative et les températures de culture, ce qui contribue à réduire le stress hydrique.

Ce travail de thèse met en évidence une méconnaissance relative des interactions sécheresse-ombrage pour les cultures annuelles en agroforesterie. Cela ouvre des perspectives de recherches interdisciplinaires, entre agronomie, écologie, écophysiologie et modélisation pour une meilleure compréhension du fonctionnement des systèmes agroforestiers en zone méditerranéenne.

Mots clefs : agroforesterie intercalaire, dispositifs d'exclusion de pluie, pois d'hiver, stress hydrique, ombrage.

ABSTRACT

Resilience of agroforestry systems in the face of climate change : an analysis of drought response of annual crops in a walnut-based alley cropping system under Mediterranean climate.

In Europe, and more particularly in the Mediterranean basin, the frequency of droughts and heat waves is increasing due to climate change and threatens the productivity of agricultural systems. Agroforestry, and more particularly one of its variations combining tree rows and annual crops, is proving to be particularly productive and is of increasing interest to farmers. But are such systems effective in limiting the impact of increasingly intense climatic hazards ? The scientific knowledge available on the subject is very limited. We studied the effects of drought on annual crops in an alley cropping system using rainout shelters.

In the first chapter, we discuss the scientific issues and methodological challenges of studying drought effects with rainfall manipulation experiments in agroforestry systems. This discussion combines a literature review and feedback on two different types of rainout shelter that we have implemented on one of the agroforestry plots of the Restinclières farm estate (Hérault, France). In the following chapters, we analyze the results obtained on a winter pea crop during the 2018-2019 season. In the second chapter, we test the hypothesis of protection of the annual crop against spring drought by agroforestry trees, by comparing crops in full sun and under trees, with and without rain exclusion. Through the analysis of 1) soil water dynamics and 2) pea yield components, we show that 1) there is little competition between the tree and the crop for soil water resources and 2) that there are compensatory mechanisms at the plant level that limit grain yield losses under tree shade after a spring drought event. In the third chapter, we seek to understand why the overall biomass production is maintained under shade conditions. The analysis of light processes at the canopy level shows that three processes are involved, namely the senescence, the leaf dynamics and the light use efficiency. The microclimate modification under the trees also significantly reduces evaporative demand and growing temperatures, which contribute to reduce water stress.

This thesis highlights a relative lack of knowledge of drought-shade interactions for annual crops grown in agroforestry. This opens perspectives for interdisciplinary research, between agronomy, ecology, ecophysiology and modelling for a better understanding of the functioning of agroforestry systems in the Mediterranean area.

Key words : alley cropping, rainout shelter, winter pea, water stress, shade.