

Mémoire de fin d'études
Présenté pour l'obtention du diplôme de Master d'Agronomie
Dominante : Agronomie Environnement

Screening de variétés de blé dur adaptées à l'agroforesterie

Par Mme CERVELLO Laura



Agroforesterie à Restinclières©Inra, C. Dupraz

Soutenu le 26 septembre 2016

Devant le jury : Sylvie GRANGER, Marie GOSME, Bernard NICOLARDOT, Christophe LECOMTE

Maître de stage : Marie GOSME, Chargée de recherche, UMR System

Enseignant responsable : Sylvie GRANGER, Maître de conférences, Agrosup Dijon

Remerciements

Je tiens dans un premier temps à remercier toutes les différentes personnes qui m'ont suivie et aidée dans mon travail.

Je voudrais tout d'abord remercier ma maître de stage, Marie Gosme, pour son encadrement inestimable et qui m'a initié au monde délicat des statistiques.

Je remercie aussi l'UMR System, et plus particulièrement Lydie Dufour, Jeff Bourdoncle et Alain Sellier pour leur accueil chaleureux et leurs précieux conseils techniques sur le déroulement de l'expérimentation.

Je remercie Daniel Inurreta Aguirre, actuellement en thèse à l'UMR System, pour les grandes discussions et le partage des connaissances que nous avons eu.

Et je remercie les stagiaires de la salle 010 du sous-sol de m'avoir accompagné au long de ce stage et d'avoir participé gracieusement aux travaux des champs. Merci à Ugo, Johanna, Fida, Arthur et Pacôme.

Enfin, je remercie ma tutrice, Sylvie Granger, qui a su me conseiller tout au long de ce stage.

Résumé

La sélection variétale se fait actuellement dans des conditions d'ensoleillement optimal. Mais avec le développement de l'agroforesterie, association d'arbres et de cultures, l'ombre devient un nouveau facteur qui peut impacter lourdement le rendement de ces variétés. L'enjeu actuel est de développer des variétés sélectionnées en situation d'ombrage et exprimant leur plein potentiel en situation d'agroforesterie. La problématique qui nous intéresse est donc : quelles variétés ou quelles caractéristiques variétales peuvent permettre d'optimiser la production en agroforesterie ? Notre étude se déroule en zone méditerranéenne et porte sur des variétés de blé dur. Douze variétés de blé dur, certaines déjà sélectionnées et d'autres dites anciennes (sans sélection préalables) ont été testées, avec deux modes de production (agroforesterie et témoin agricole) et trois répétitions. Le rendement et les composantes de rendement ont été étudiés afin d'observer s'il existe une tolérance à l'ombre pour ces variétés. L'année 2016 ayant été très nuageuse, le rayonnement disponible est devenu un facteur limitant pour les cultures en allées agroforestières. Le rendement d'agroforesterie est impacté négativement de 71,34 % par rapport au témoin agricole, et le nombre de grains par épi, qui est la composante la plus touchée par le manque de lumière, est réduit de 62,03 % par rapport au témoin agricole. Bien que l'identification d'une variété n'ait pas été possible, les tendances observées sont une tolérance à l'ombrage sur le rendement pour la variété Pop Algérie 2 qui est une variété ancienne et sur le nombre de grain par épi pour la variété Claudio qui est une variété sélectionnée.

Mots clés : Agroforesterie, blé dur, sélection variétale, ombre

Abstract

Nowadays, plant breeding is running in full sun condition. But with the agroforestry development, which is tree and crop association, the shade becomes a new factor that can heavily decrease the yield of this type of variety. The challenge now is to develop variety bred in shade condition, showing their full potential in agroforestry systems. The research question is: Which variety or varietal characteristics can provide optimization of agroforestry production? The study occurs in Mediterranean zone and on durum wheat. Twelve durum wheat varieties are tested; ones are stem from breeding programs and others known as ancient (without preliminary breeding). The experiment plan is composed by two types of production (agroforestry and crop control) and three repetitions. The yield and the component of the yield were studied in order to observe if shade tolerance exist for these varieties. This year was really cloudy, so the radiation available under the trees was a limiting factor for the crop. The agroforestry yield is negatively impacted with a reduction of 71,34 % compared to crop control. The number of grain per spike is the component the most impacted by the lack of light, and it is reduced by 62,03 % compared to the crop control. Even though the identification of a single variety was not possible, the trends observed are a shade tolerance on the yield for the variety Pop Algérie 2 (ancient variety) and on the number of grain per spike for the variety Claudio (bred variety).

Key words: Agroforestry, durum wheat, breeding, shade

Sommaire

REMERCIEMENTS	
RESUME	
SOMMAIRE	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES TABLEAUX	
INTRODUCTION	1
I. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE	3
A. Contexte scientifique	3
1. Caractéristiques des peuplements associés en agrisylviculture	3
a) Le microclimat agroforestier.....	3
b) Compétition et facilitation en agrisylviculture.....	3
c) Evaluation de la productivité en agrisylviculture	5
d) Bénéfice de l'agroforesterie pour l'environnement.....	5
2. Ecophysiologie du blé dur et influence supposée des conditions agroforestières 6	
a) Ecophysiologie du blé dur	6
(1) Le déroulement du cycle	6
(2) Impact des stress sur les composantes du rendement	8
b) Réponses supposées de l'écophysiologie du blé dur aux conditions agroforestières	9
B. Problématique de l'étude	10
1. Problématique générale	10
2. Le screening : première étape d'un programme de sélection	11
3. Objectif de l'étude	11
4. Hypothèses de recherche	11
II. MATERIEL ET METHODES	12
A. Le dispositif expérimental	12
1. Présentation de la parcelle étudiée.....	12
2. Matériel végétal	12
3. Plan d'expérience	13
B. Mesures et observations	13
1. Etude du microclimat agroforestier et témoin agricole	13
2. Etude du matériel végétal.....	13
a) Phénologie	13
b) Composantes du rendement	14
c) Fertilité des épis	14
C. Analyses statistiques	27
1. Analyse de la variance du rendement et de ses composantes	14
2. Analyse de la précocité	15

III. RESULTATS	16
A. Caractérisation du microclimat agroforestier	16
1. Température de l'air.....	16
2. Humidité relative de l'air.....	16
3. Rayonnement.....	33
B. Etude du rendement	17
C. Etude de la précocité	18
D. Etude des étapes de formation du rendement	19
1. Fertilité des épis.....	21
2. Indice de récolte.....	21
E. Etude de la tolérance à l'ombre	22
IV. DISCUSSION	22
A. Interprétation et discussion des résultats	43
1. Caractérisation du microclimat agroforestier.....	22
2. Précocité.....	23
3. Composantes du rendement et effet de l'agroforesterie.....	24
B. Conclusion et perspectives	24
BIBLIOGRAPHIE	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
ANNEXES	30

Liste des figures

Figure 1 : Evolution du rendement d'une céréale dans un peuplement agroforestier à fort encombrement, aux lignes orientées Est-Ouest. (Dupraz et Liagre, 2011).....	4
Figure 2 : Les arbres agroforestiers ont des enracinements plus profonds que ceux observés en forêt (Dupraz et Liagre, 2011).....	5
Figure 3 : Les périodes de formation des principales composantes du rendement.....	7
Figure 4 : Représentation schématique de la parcelle expérimentale.....	13
Figure 5 : Photographie aérienne de la parcelle étudiée.....	13
Figure 6 : Evolution de la température (en °C) de l'air en agroforesterie et en témoin agricole en fonction des heures de la journée lors de la période de croissance végétative des plantes	16
Figure 7 : Evolution de la température (en °C) de l'air en agroforesterie et en témoin agricole en fonction des heures de la journée lors de la période de formation du grain.....	16
Figure 8 : Evolution de l'humidité de l'air en agroforesterie et en témoin agricole en fonction des heures de la journée lors de la période de croissance végétative des plantes.....	16
Figure 9 : Evolution du rayonnement global (en W/m ²), en moyenne en fonction des heures de la journée lors de la période de croissance végétative (du 02/11/2015 au 25/04/2016).....	17
Figure 10 : Evolution du rayonnement global (en W/m ²), en moyenne en fonction des heures de la journée lors de la période de floraison (du 25/04/2016 au 25/05/2016).....	17
Figure 11 : Evolution du rayonnement global (en W/m ²), en moyenne en fonction des heures de la journée lors de la période de remplissage du grain (du 25/05/2016 au 28/06/2016).....	17
Figure 12 : Classement des variétés par leur rendement en témoin agricole (en orange).....	17
Figure 13 : Courbe de développement de la variété 1 (LA1823), évolution des stades de développement selon l'échelle de Zadoks en fonction des jours depuis semis. L'aire sous la courbe est grisée, et les lignes verticales représentent les dates de relevé phénologique.....	18
Figure 14 : Répartition des variétés selon leur développement, à gauche de la ligne rouge le groupe de variétés précoces et à droite le groupe de variétés tardives.....	18
Figure 15 : Elaboration du rendement en témoin agricole.....	19
Figure 16 : Elaboration du rendement en agroforesterie.....	19
Figure 17 : Le nombre de grains par épillet en fonction du mode de production, de la variété et du groupe de précocité.....	21
Figure 18 : Indice de récolte en fonction du mode de production, des variétés et des groupes de précocité.....	21
Figure 19 : Rendement en q/ha de l'agroforesterie en fonction du rendement en témoin agricole des variétés de chaque bloc.....	22

Liste des tableaux

Tableau 1 : Production d'une parcelle agroforestière peupliers-céréales d'hiver, de la plantation à la récolte des arbres à 15 ans (parcelles de Vézénobres, Gard) (Dupraz, 2011).....	5
Tableau 2 : Relation entre les stades phénologiques du blé dur, les facteurs et conditions climatiques limitants pouvant être présents lors de ces stades et les composantes du rendement impactées.....	8
Tableau 3 : Effets supposés de l'agroforesterie sur les composantes du rendement du blé dur (+ : augmentation de la composante ; - : diminution de la composante) d'après Dupraz et Liagre (2011), Gate (1995) et Hallema (2014).....	9
Tableau 4 : Itinéraire technique de la parcelle expérimentale.....	12
Tableau 5 : Variétés présentes sur la parcelle expérimentale.....	12
Tableau 6 : Etude statistique des élaborations du rendement du blé dur.....	20
Tableau 7 : Effet des variétés sur le nombre de grains par épillets.....	20
Tableau 8 : Effet des variétés sur l'indice de récolte.....	20

Introduction

L'art d'associer les arbres et les cultures annuelles est présent depuis le Moyen Age dans l'histoire agricole de l'Homme. Après la fin de la deuxième Guerre Mondiale, le monde agricole s'est tourné vers l'industrialisation des cultures, grâce à la mécanisation et aux intrants (fertilisants et pesticides), perdant ainsi la tradition des arbres présents dans les champs. Maintenant, face aux enjeux actuels de changement climatique, cette industrialisation laisse place à une nouvelle réflexion de l'agriculture : l'agro-écologie (science agronomique qui prend en compte les aspects sociaux, techniques et écologiques de la production agricole (Lasbleiz et Stokink, 2015)). La mise en place d'arbres associés aux cultures est alors de nouveau envisagée sous cette nouvelle approche de l'agriculture.

L'agroforesterie correspond à la mise en valeur du sol par une association (simultanée ou séquentielle) de ligneux et de cultures ou d'animaux afin d'obtenir des produits ou des services utiles à l'Homme (Torquebiau, 2007). Les enjeux actuels de l'agriculture tels que l'augmentation de la demande alimentaire, la préservation de l'environnement, l'assurance d'une rentabilité économique des exploitations, sont des sujets auxquels l'agroforesterie propose des réponses grâce à un accroissement de la productivité (Dupraz et Liagre, 2011), une réduction des pollutions (en particulier liées aux nitrates (Lacombe, 2007)) et une diversification des productions.

Afin de permettre le développement de l'agroforesterie, celle-ci doit être étudiée. Ainsi un projet européen AGFORWARD (AGroFOREstry that Will Advance Rural Development) débuté en janvier 2014 jusqu'en décembre 2017, permet la mise en commun de résultats de recherches dans le domaine de l'agroforesterie. Ce projet comporte neuf tâches dont l'une porte sur l'agroforesterie en grandes cultures. Les objectifs de cette tâche sont d'identifier les principaux défis qu'entraîne la mise en place de systèmes agroforestiers, ainsi que d'expérimenter des innovations permettant de répondre à ces défis et, à terme, de créer un guide pour les agriculteurs sur la façon d'intégrer des pratiques agroforestières économiquement viables dans un système de grandes cultures (AGFORWARD, 2013). L'INRA de Montpellier, à travers son unité mixte de recherche System (Fonctionnement et conduite des systèmes de culture tropicaux et méditerranéens), participe au projet européen. En effet, l'UMR System développe depuis plus de 20 ans des expérimentations sur la conception de nouvelles parcelles agroforestières et s'intéresse actuellement aux systèmes méditerranéens agrisylvicoles.

Le développement de l'agroforesterie et la création de projets comme AGFORWARD, conduisent de plus en plus d'agriculteurs à adopter ce mode de production, en effet l'agroforesterie représente 24 millions d'hectares en Europe, soit environ 14% de la surface agricole utile d'Europe (den Herder et al. 2015). Cependant les variétés cultivées actuellement en agriculture ont été sélectionnées en conditions d'éclairement maximum et sont fortement pénalisées par l'ombrage des arbres lorsqu'elles sont utilisées en agroforesterie.

L'enjeu actuel est donc de développer des variétés ayant été sélectionnées en situation d'ombrage et exprimant leur plein potentiel en situation d'agroforesterie.

La première étape d'un programme de sélection est d'évaluer la performance de variétés existantes afin d'identifier des parents intéressants pour un futur croisement.

La sélection variétale doit se faire de façon locale, des variétés performantes dans une zone pouvant ne pas l'être dans une autre. Le cadre de notre étude sera la zone méditerranéenne. Celle-ci se caractérise par un climat marqué par des hivers doux et des étés chauds, un ensoleillement importants et des vents violents fréquents, ainsi que de faibles précipitations (Météo France, 2010). Ainsi, les cultures en climat méditerranéens doivent être capables de résister à la sécheresse. Historiquement, la culture du blé dur s'est développée à l'époque antique dans le bassin méditerranéen. Bien que plus sensible au froid que le blé tendre, le blé dur est plus résistant à la sécheresse, et reste la seule espèce de blé cultivable en climat aride.

Notre étude portera sur l'étude des performances de plusieurs variétés de blé dur en système méditerranéen agrisylvicole. Pour ce faire nous présenterons en premier lieu les spécificités de conditions de culture agroforestière et les caractéristiques du blé dur. Nous verrons par la suite le matériel et les méthodes développées pour la réalisation de l'étude. Enfin nous étudierons les résultats obtenus par l'expérimentation, afin d'en tirer des conclusions sur les variétés de blé dur adaptées à l'agroforesterie.

I. Contexte et problématique de l'étude

A. Contexte scientifique

1. Caractéristiques des peuplements associés en agrisylviculture

a) Le microclimat agroforestier

L'association d'arbres et de cultures annuelles provoque de nombreux changements au sein du champ cultivé. L'un d'eux est le changement de climat, appelé alors microclimat, car il est spécifique à la zone où les arbres bordent les allées de culture. Différentes composantes du climat sont modifiées. Le vent circule de façon différente dans la parcelle agroforestière qu'en plein champ, car les arbres créent un effet « brise vent » réduisant sa vitesse à certaines zones, mais pouvant l'accélérer à d'autres par un effet « Venturi » (Dupraz et Liagre, 2011). De plus, dans cette situation d'espace semi-ouvert, les arbres transpirent davantage qu'en situation forestière du fait de l'éclaircissement plus important. L'humidité de l'air est donc plus élevée que dans un espace complètement ouvert (Burke, 1998 ; Campi et al, 2009). Les cultures sous les arbres étant ombragées et dans un environnement plus humide, transpirent moins et se dessèchent plus lentement. On observe aussi une différence dans la température présente sous le couvert arboré. En effet, le jour la température est réduite grâce à la présence de l'ombre des arbres et la nuit, la température est plus élevée sous les arbres car ils diminuent les pertes de chaleur du sol durant la nuit (Verheij, 2003). De plus, au niveau hydrologique, l'eau de pluie qui coule le long du tronc des arbres sature le sol à leur base, permettant ainsi d'augmenter l'humidité du sol (Olivier et al, 2015), ainsi que la présence des bandes enherbées sous les arbres qui permet une forte réduction du ruissèlement (Dupraz et Liagre, 2011). Ainsi, la réduction du rayonnement, la réduction de la vitesse du vent et l'augmentation de l'humidité de l'air, ainsi que l'augmentation de l'humidité du sol permettent de réduire la demande en eau des cultures associées aux arbres (Dupraz et Liagre, 2011). La présence du microclimat agroforestier permet de réduire les fluctuations importantes du climat évitant aux cultures des stress dûs à de trop grandes variations (Lin, 2007).

b) Compétition et facilitation en agrisylviculture

La coexistence de deux espèces entraîne l'installation d'une compétition pour les ressources communes, mais il existe certains mécanismes qui vont également accroître les ressources à partager, appelés « facilitation » (Brooker, 2006 ; Callaway, 1995 ; Dupraz et Liagre, 2011). La facilitation est la conséquence des interactions des plantes entre elles ; elle repose sur l'adaptation du comportement des plantes, grâce à leur plasticité morphologique et physiologique. On observe alors la modification de l'environnement d'une plante par l'autre plante, augmentant ainsi la disponibilité des ressources (eau, lumière, azote, éléments minéraux, carbone...) (annexe I).

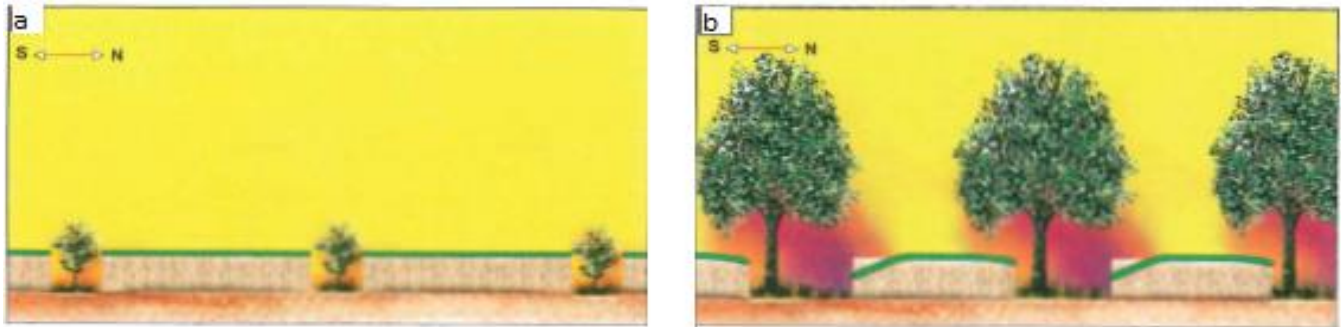


Figure 1 : Evolution du rendement d'une céréale dans un peuplement agroforestier à fort encombrement, aux lignes orientées Est-Ouest. (Dupraz et Liagre, 2011)

a : Lorsque les arbres sont jeunes aucun effet négatif sur le rendement n'est observé

b : Lorsque les arbres sont pleinement développés une baisse du rendement est observée dans la partie Sud de l'allée

La mise en place d'agrisylviculture est basée sur le principe qu'un système agroforestier, étant plus complexe qu'un système de cultures annuelles uniquement, présente une meilleure efficacité de capture et d'utilisation des ressources (lumière, eau, nutriments) grâce à des processus de facilitation et de complémentarité des prélèvements (Altieri, 1995).

En agrisylviculture, la lumière est l'une des ressources pour laquelle la compétition est inégale : les arbres filtrent le rayonnement et ne laissent passer qu'une partie de celui-ci, qui arrive aux cultures annuelles. Ainsi, au fur et à mesure de la croissance des arbres et donc de l'augmentation de l'ombre résultante (figure 1), une diminution du rendement est observée du côté où l'ombre de l'arbre est projetée.

Afin de diminuer les pertes de rendement dûes à la compétition pour la lumière entre les arbres et les cultures, l'agrisylviculteur peut agir sur la gestion des parcelles. La densité de plantation et l'écartement des arbres doivent permettre à la culture de recevoir assez de lumière pour obtenir le niveau de production souhaité. Il est recommandé de pratiquer une densité de 50 à 100 arbres/ha et d'adapter la largeur des allées cultivées à deux fois la hauteur des arbres adultes (Dupraz et Liagre, 2011). De plus, un élagage régulier est fortement conseillé.

Le choix d'espèces avec des phénologies contrastées permet d'assurer une complémentarité pour l'utilisation de la lumière. Ainsi, plusieurs études montrent qu'avec des arbres à feuilles caduques, le rendement relatif des cultures d'hiver est plus élevé que celui des cultures d'été (Yin et He, 1997; Thevathasan et Gordon, 2004). Les arbres dont le débourrement est le plus tardif permettent aux cultures d'hiver de réaliser une grande partie de leur cycle végétatif sans souffrir de la compétition des arbres pour la lumière (Talbot, 2011).

Les phénomènes de compétition et de facilitation entre les espèces associées sur une parcelle agroforestière rendent d'autant plus important l'évaluation du rendement, afin de déterminer la productivité en agrisylviculture.

	Production moyenne de céréales qx/ha/an		Production moyenne de bois de qualité m ³ /ha/an		SEA
Parcelle agricole	39		0		
Peupleraie	0		11,5		
Parcelle agroforestière	21		9,3		
Rendement relatif	0,53	+	0,81	=	1,34

Tableau 1 : Production d'une parcelle agroforestière peupliers-céréales d'hiver, de la plantation à la récolte des arbres à 15 ans (parcelles de Vézénobres, Gard) (Dupraz, 2011)

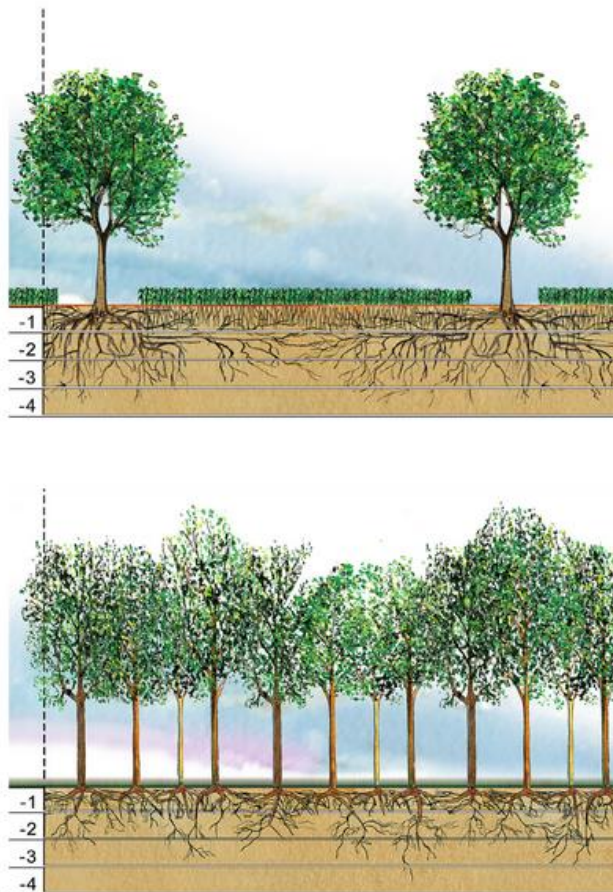


Figure 2 : Les arbres agroforestiers ont des enracinements plus profonds que ceux observés en forêt (Dupraz et Liagre, 2011)

c) Evaluation de la productivité en agrisylviculture

Afin d'évaluer la productivité d'une parcelle agroforestière, un indicateur particulier est utilisé : le Land Equivalent Ratio (LER ; Mead et Willey, 1980), aussi appelé Surface Equivalente Assolée (SEA ; Dupraz et Liagre, 2011). Il s'agit de comparer les rendements d'une parcelle de cultures associées aux rendements de cultures assolées, c'est-à-dire les mêmes espèces mais cultivées séparément.

Le LER se calcule de la façon suivante :

$$\text{LER} = \text{LER}_A + \text{LER}_B + \dots = \text{rdt}_{A\text{associé}}/\text{rdt}_{A\text{assolé}} + \text{rdt}_{B\text{associé}}/\text{rdt}_{B\text{assolé}} + \dots$$

Où $\text{rdt}_{A\text{associé}}$ est le rendement de la culture A en agroforesterie et le $\text{rdt}_{A\text{assolé}}$ le rendement de la culture A en culture pure, de même pour la culture B. Le LER peut être calculé pour plus de deux espèces et prendre en compte des durées de cultures différentes. Si $\text{LER} > 1$, la parcelle aux cultures associées est plus productive qu'une même surface en assolement de culture pure et forêt séparées ; inversement si $\text{LER} < 1$.

Ainsi, lorsque que cet indicateur est appliqué sur des parcelles agroforestières (tableau 1), il est égal à 1,34 ce qui signifie que la production de l'association arbres et cultures est 34% supérieure à la production des cultures séparées.

Le gain de production obtenue en agroforesterie témoigne de la présence de fortes complémentarités et /ou de facilitation entre les arbres et les cultures, compensant la compétition présente entre les deux cultures.

d) Bénéfice de l'agroforesterie pour l'environnement

L'agroforesterie, de par sa diversité de cultures, possède de nombreux effets positifs environnementaux.

Tout d'abord, l'agroforesterie permet un maintien de la biodiversité grâce aux habitats pérennes offerts par les arbres et la présence de bandes enherbées (Dupraz et Liagre, 2011 ; Torquebiau et al, 2002).

De plus, la présence d'arbres, en association avec des cultures ou de l'élevage, permet la mise en place d'un "filet de sécurité" contre les fuites de nitrates grâce aux racines des arbres situées au-delà de la zone explorée par les racines des cultures (Lacombe, 2007). En effet, les racines des arbres en agroforesterie vont plus profondément dans le sol que les arbres en milieu forestier du fait de la présence d'une compétition racinaire avec les cultures présentes en surface comme on peut l'observer sur la figure 2 (Dupraz et Liagre, 2011).

L'agroforesterie contribue aussi à la réduction de la désertification, notamment en Afrique de l'Ouest, par des services tels que l'augmentation de la fertilité des sols, la diminution de l'érosion éolienne et hydrique ou encore la fourniture de fourrage et de bois de chauffe en saison sèche (Simard-Rousseau, 2012). Dans cette même région, l'agroforesterie et, plus précisément les parcs agroforestiers traditionnels, contribuent à la conservation de la biodiversité aux niveaux régional, national et même international en favorisant le maintien d'une diversité d'espèces ligneuses (Fifanou et al, 2011).

Enfin, de façon générale, l'agroforesterie est un mode de production pouvant permettre l'atténuation du changement climatique ainsi que la diminution de la vulnérabilité de l'environnement face aux aléas climatiques par la création de conditions favorables en termes de modifications des microclimats, de conservation de la biodiversité, d'augmentation de la qualité du sol et de séquestration du carbone (par le biais de la photosynthèse). (Chavan et al., 2014 ; Maathai, 2012 ; Montagnini et Nair, 2004 ; Nair et al. 2009)

2. Ecophysiologie du blé dur et influence supposée des conditions agroforestières

a) Ecophysiologie du blé dur

Le blé dur (*Triticum turgidum* subsp. *durum*) est une céréale (Poacée) à graines annuelles. Il est cultivé dans des régions chaudes et sèches du globe, dont le bassin méditerranéen, sur 16,5 millions d'hectares représentant une production de 34,8 millions de tonnes de graines en 2015 (dont 1,8 million de tonnes en France) (France Agrimer, 2016). Le blé dur est transformé en semoule qui sert principalement à la production de pâtes alimentaires et à la production de couscous (Morancho, 2000).

(1) Le déroulement du cycle

La levée est le premier stade observé : elle est définie par l'apparition de la première feuille qui traverse le coléoptile, gaine rigide et protectrice enveloppant la première feuille. Ce stade englobe trois étapes successives : la germination de la graine, l'élongation du coléoptile et la croissance de la première feuille. Lorsque la plantule possède deux à trois feuilles, la première composante de l'élaboration du rendement, le nombre de plante par m², est potentiellement fixée (la mortalité hivernale pouvant être importante).

On observe ensuite le tallage qui se caractérise par la mise en place de nouvelles tiges, appelées talles, sur le maître-brin à l'aisselle de la feuille la plus âgée. Chacun de ces talles pourra potentiellement donner un épi supplémentaire, laissant présumer alors un nombre d'épis par plante. C'est lors de cette période que la plante met en place un enracinement profond.

Vient ensuite la montaison qui débute avec le stade épi à 1 cm, c'est-à-dire que le sommet de l'épi du maître-brin est distant de 1 cm du plateau de tallage.

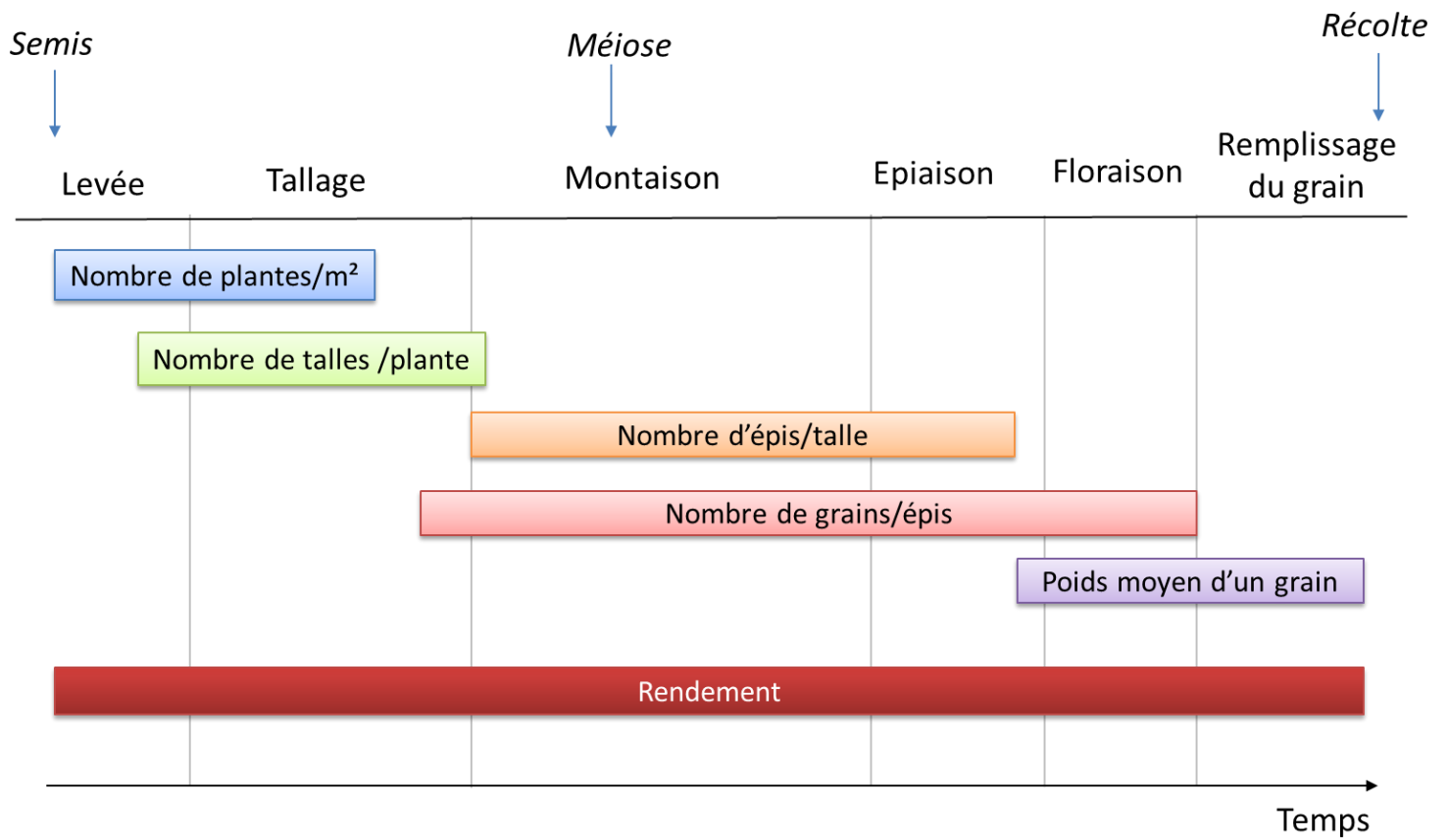


Figure 3: Les périodes de formation des principales composantes du rendement

Le stade épi à 1 cm marque l'arrêt définitif de la phase d'initiation des épillets, le nombre de rangs des épis est définitif, établissant alors le nombre de grains par épi. La montaison se poursuit jusqu'à l'apparition de la dernière feuille (feuille étendard), il y a alors élongation des entre-nœuds de la plante.

La phase suivante est la méiose. Bien qu'il s'agit d'une séquence d'évènements cellulaires, qui n'est pas observable à l'œil nu, elle détermine la fertilité des fleurs et donc a une forte relation avec le nombre de grains par épi.

Par la suite, l'épi s'extrait de la gaine de la dernière feuille, il s'agit de l'épiaison qui définit la fin de la période de montaison.

Par la suite, le stade de floraison englobe la croissance de l'épi et de ses organes reproducteurs. Le blé dur ayant une floraison de type ouverte, on observe les étamines pendiller à l'extérieur des épillets. La fécondation se déroule à ce stade du cycle, finalisant ainsi le nombre de grains par épi.

Enfin, le dernier stade est celui de la formation du grain, établissant la dernière composante du rendement : le poids moyen d'un grain. Ce stade est composé de trois étapes. Le stade grain laiteux voit la mise en place des enveloppes des futurs grains qui détermineront son poids potentiel. Ensuite, le stade grains pâteux où il y a expansion des cellules des enveloppes et remplissage de ces cellules par des sucres, essentiellement sous forme d'amidon. Enfin, la maturité physiologique a lieu lorsqu'il n'y a plus de migration de matière sèche vers le grain, à ce stade le poids sec du grain a atteint sa valeur maximum et définitive (Gate, 1995).

Le rendement se décompose de selon plusieurs composantes (figure 3) :

$$\text{Rendement} = \text{Nombre plantes/m}^2 * \text{Nombre de talles/Nombre de plantes} * \\ \text{Nombre d'épis/Nombre de talles} * \text{Nombre de grains/Nombre d'épi} * \text{Poids} \\ \text{moyen d'un grain}$$

Une autre façon, plus grossière de décomposer le rendement en mettant l'accent sur l'utilisation des ressources :

$$\text{Rendement} = \text{Biomasse} * \text{Indice de récolte}$$

Avec : Biomasse = Poids total de matière sèche

Et

$$\text{Indice de récolte} = \frac{\text{Poids total des grains}}{\text{Poids total de matière sèche}}$$

Cet indice est utilisé dans la sélection variétale. En sélectionnant des plantes ayant un fort indice de récolte, c'est-à-dire capables de produire une plus grande proportion de grains par rapport à la paille produite, il est ainsi possible d'obtenir des plantes ayant un rendement plus élevé. En effet la quantité de matière que la plante peut produire étant limitée par le temps, une meilleure distribution de la matière dans le grain que dans la paille serait la preuve d'une plante plus efficace (Singh et Stoskopf, 1971).

Stades phénologiques	Facteurs climatiques limitants					Composantes du rendement impactées
	Gel	Basses températures	Excès thermique	Déficit en eau	Défaut de rayonnement	
Semis-Levée	X					Nombre plantes/m ²
Tallage	X			X		Nombre épis/m ²
Montaison	X			X		Nombre épis/m ² Nombre grains/épi
Méiose		X	X	X	X	Nombre grains/épi
Floraison			X	X		Nombre grains/épi Poids de milles grains
Maturité physiologique			X			Poids de mille grains

Tableau 2 : Relation entre les stades phénologiques du blé dur, les facteurs et conditions climatiques limitants pouvant être présents lors de ces stades et les composantes du rendement impactées

(2) Impact des stress sur les composantes du rendement

Il existe de nombreux stress pouvant impacter les composantes du rendement. Pour cette étude, nous nous concentrerons sur les principaux facteurs climatiques qui peuvent limiter le rendement à différents stades phénologiques (tableau 2).

La réussite de la germination et de la levée du blé dur dépendent de la disponibilité en eau et de la chaleur, la température devant être supérieure à 0 °C. La présence de gel lors de la levée est un facteur limitant le nombre de plantes présentes au m². En conditions optimales le taux de germination est en général de 80 % (Agriculture et territoires).

Au stade suivant, le tallage, le blé dur est sensible au gel et au manque d'eau qui peuvent entraîner la régression de talles. Dans le cas du gel ce sont essentiellement des dégâts foliaires qui peuvent apparaître, ralentissant la croissance de la plante. Lorsqu'un déficit hydrique se présente lors de la phase de tallage, la vitesse d'émission des talles diminue et si le déficit s'accroît sévèrement, il y a arrêt du tallage (Gate, 1995). Le nombre d'épi par plante peut alors être fortement diminué du fait du faible nombre de talles.

Lors de la montaison, la plante est très sensible au gel (spécifiquement pour les variétés précoces semées tôt) et au manque d'eau, et cela peut être à l'origine de la diminution du nombre d'épis par plante et aussi du nombre de grains par épi. En effet, le gel comme le déficit hydrique, peuvent entraîner la régression de talles, mais aussi la régression d'épillets (Gate, 1995).

La méiose est un stade critique par rapport aux conditions d'alimentation instantanée de l'épi et à son environnement microclimatique. En effet, les excès thermique lors de la méiose peuvent fortement pénaliser la fertilité des épis (Tashiro et Wardlaw, 1990), constituant un facteur limitant important dans l'élaboration du nombre de grains. De même qu'un déficit en eau et la présence de températures basses (températures < 4°C) peuvent diminuer le nombre de fleurs fertiles par l'avortement de celles-ci. De plus, le rayonnement est un facteur limitant lors de cette phase, des rayonnements faibles appliqués autour de la méiose réduisent le nombre de grains par épis par le biais de la stérilité mâle (Acreche et al, 2009 ; Demotes-Mainard et al, 1996). Cela peut alors diminuer le nombre d'épillets fertiles et, selon Gate (1995), on observe en moyenne 12 % d'épillets ayant régressé par un effet d'ombrage où la réduction du rayonnement est de 70 %.

Composante du rendement	Facteur climatique limitant	Effet de l'agroforesterie sur la composante du rendement
Biomasse totale	Défaut de rayonnement	-
Nombre d'épi par plante	Stress hydrique	+
Nombre de grains par épi	Excès thermique	+
	Défaut de rayonnement	-
Poids de mille grains	Stress hydrique	+
	Excès thermique	

Tableau 3 : Effets supposés de l'agroforesterie sur les composantes du rendement du blé dur (+ : augmentation de la composante ; - : diminution de la composante) d'après Dupraz et Liagre (2011), Gate (1995) et Hallema (2014).

Un excès thermique lors de la floraison peut entraîner une forte diminution du nombre de grains par épi. Selon Tashiro et Wardlaw (1990), une forte augmentation de la température (de l'ordre de 30°C) juste avant la floraison induit un taux de stérilité de l'ordre de 50 %. Après la floraison, une fois que le grain commence à se développer, les fortes températures (de l'ordre de 30°C) peuvent provoquer un taux d'avortements des fleurs de 4 % (Gate, 1995). Dans la période suivant la floraison, c'est le poids de mille grains qui peut être impacté par un déficit hydrique. En effet, il y a une diminution de la taille de l'enveloppe du grain, limitant l'aptitude de l'organe en croissance (le grain) à importer de la matière, mais aussi une réduction de l'activité et de la durée du fonctionnement des feuilles, organes fournissant la matière au grain, par une diminution de la photosynthèse.

Lors du remplissage du grain, lors de l'établissement du poids de mille grains, entre la floraison et la maturité physiologique, une élévation de la température a pour conséquence de diminuer le nombre de jours de remplissage. Cela induit une réduction du poids du grain.

La biomasse peut elle aussi être impactée par différents facteurs climatiques. Le stress hydrique va induire une perte de turgescence qui va avoir plusieurs effets : une réduction de la taille des feuilles par réduction de la vitesse de division cellulaire et une réduction de la photosynthèse par la fermeture des stomates. Cela va donc induire une réduction de la croissance de la plante et une réduction de la vitesse et de la durée de fonctionnement des feuilles (Gate, 1995), causant alors un ralentissement ou même l'arrêt de la production de biomasse par la plante. Le défaut de rayonnement est aussi un stress pouvant impacter la quantité de biomasse. En effet, celle-ci est produite en fonction du rayonnement intercepté par la culture et donc de l'efficacité de la photosynthèse (Baret et al, 1988; Varlet-Grancher et al, 1989).

b) Réponses supposées de l'écophysiologie du blé dur aux conditions agroforestières

Comme nous l'avons vu dans la première partie, la présence d'arbres associés aux cultures entraîne la création d'un microclimat qui a une influence sur la température, l'humidité (du sol et de l'air) et sur la vitesse du vent. Ces modifications pourraient avoir un effet sur l'écophysiologie du blé dur, et alors entraîner une modification dans les composantes du rendement (Tableau 3).

L'ombre que les arbres apportent à la culture diminue le rayonnement intercepté par celles-ci, ainsi l'efficacité de la photosynthèse est elle aussi diminuée. Cela peut entraîner alors une diminution de la biomasse totale (Dupraz et Liagre, 2011).

La présence du microclimat agroforestier peut entraîner une réduction du stress hydrique pour les arbres et les cultures (Hallema, 2014). Ainsi l'augmentation des ressources en eau, aux moments critiques du développement du blé dur, permet une optimisation du nombre de talles, et donc du nombre d'épi par plante.

Grâce à la présence des arbres et à la mise en place d'un microclimat, la température des cultures dans les allées arborées est moins élevée qu'en sol nu pendant la journée, diminuant alors le risque d'avortement des fleurs et d'augmentation de la stérilité. Le défaut de rayonnement qu'apporte le couvert arboré lors de la méiose peut aussi avoir un impact négatif sur le nombre de grains par épi en augmentant le nombre d'épillets stériles.

Enfin, le poids de mille grains est aussi une composante du rendement qui peut être influencée par la modification du couvert, en diminuant le stress hydrique et en réduisant l'évapotranspiration des cultures durant la maturation des grains. En effet, la mise en place de l'enveloppe du grain sera alors optimale et permettra à celui-ci de se remplir correctement. De même, la présence de l'ombre des arbres peut permettre d'éviter un excès thermique lors de la phase de remplissage du grain, laissant ainsi les jours nécessaires au remplissage du grain.

B. Problématique de l'étude

1. Problématique générale

Selon le rapport de l'IPCC (CHANGE, 2007), les conditions climatiques du bassin méditerranéen évolueront vers une importante sécheresse, provoquant des excès thermiques et des déficits en eau. Ce sont donc ces deux facteurs limitants qui nous intéresseront principalement. On observe dès à présent des baisses du rendement dans les cultures conventionnelles de blé en Beauce (Bellia et al, 2003). L'agroforesterie peut être une solution à ces problèmes climatiques grâce à la création d'un microclimat, protégeant les cultures des stress attendus dans le cadre du changement climatique, mais aussi une préservation du climat actuel par la séquestration de carbone (Saïdou et al, 2012). Afin de permettre le développement de systèmes agroforestiers, il est important que les semenciers puissent proposer aux agriculteurs des variétés adaptées à ce système de culture. Ainsi la question qui nous intéresse est : quelles variétés ou quelles caractéristiques variétales peuvent permettre d'optimiser la production en agroforesterie ?

2. Le screening : première étape d'un programme de sélection

La méthode la plus rapide pour faire un premier choix sur les variétés potentielles à croiser est le screening. Il s'agit d'une première comparaison entre différentes variétés qui pourront par la suite être intégrées dans un schéma de sélection plus important. Le screening permet d'identifier les parents intéressants pour des croisements qui seront effectués dans les années à venir.

Cette sélection doit aussi passer par la création d'un idéotype, qui correspond à un type de plantes dont les caractéristiques sélectionnées sont spécifiquement choisies car elles sont connues pour influencer le rendement (Donald, 1968). Dans le cadre de cette étude, l'idéotype voulu est tolérant à l'ombrage, ce qui permettrait d'augmenter le rendement en système agroforestier. En effet, l'ombrage implique un défaut de rayonnement qui est un des facteurs limitants de la production de céréales en système agroforestier, un idéotype tolérant à l'ombrage serait toujours impacté par le défaut de rayonnement mais dans de plus faibles proportions que des variétés sensibles. Afin de s'approcher au plus près de cet idéotype, un screening de différentes variétés en plein champ est réalisé.

3. Objectif de l'étude

Le stage a pour objectif de caractériser le comportement de différentes variétés de blé dur face à une situation de système agroforestier, afin de mettre en évidence des variétés tolérantes à l'ombrage c'est-à-dire ne subissant qu'une perte de rendement minimale lorsqu'elles sont cultivées sous couvert arboré, dans le but final de les intégrer dans un schéma de sélection, mais aussi d'identifier les caractéristiques de ces variétés qui leur confèrent leurs performances en système agroforestier afin de commencer à définir un idéotype et guider la sélection.

L'étude se réalise dans le cadre méditerranéen et s'intéresse plus précisément au blé dur, une culture emblématique du bassin méditerranéen. La question de recherche est:

Quelles sont les variétés de blé dur et leurs caractéristiques variétales les plus adaptées à l'ombrage, dans un système de cultures sous couvert arboré ?

4. Hypothèses de recherche

Pour répondre à cette question, on pose des hypothèses de recherche.

Première hypothèse : Les variétés tolérantes à l'ombre n'ont qu'une perte de rendement minimale sur les parcelles ombrées par rapport aux parcelles témoins.

Seconde hypothèse : Certaines étapes de la formation du rendement peuvent être favorisées en situation d'agroforesterie du fait de la présence d'un microclimat agroforestier.

D'après notre étude bibliographique, les composantes de rendement telles que le nombre d'épis par plante, le nombre de grains par épi et le poids de mille grains sont des étapes de formation du rendement dont l'amélioration est possible en système agroforestier.

Interventions	Date
Préparation du lit de semence	23 octobre 2015
Semis (densité de semis : 300 graines/m ² ; semence traitées [PREMIS 25FS]) avec 8 rangs sur 1,55m de large	2 novembre 2015
Désherbage chimique (Produit : Athlet à 3.6L/ha)	13 novembre 2015
Fertilisation (180 kg/ha d'ammonitrate et 33 unités de soufre)	12 janvier 2016
Désherbage manuel (1m sur 1,55m dans chaque placette : zone de suivi)	28 janvier 2016
Début du débourrement des frênes	15 mars 2016
Désherbage manuel des zones de suivi	22 mars 2016
Fertilisation Débourrement complet des frênes	29 mars 2016
Récolte manuelle du témoin agricole	28 juin 2016
Récolte manuelle de la partie agroforestière	6 juillet 2016

Tableau 4 : Itinéraire technique de la parcelle expérimentale

Variété	Génotype	Structure variétale
1	LA1823	Lignée pure
2	2007D003.109	Lignée pure
3	2007D010.255	Lignée pure
4	Pop Algérie 1	Population
5	Pop Algérie 2	Population
6	Pop Algérie 3	Population
7	Pop F2 + lég Salernes	Population
8	Pop F3 + lég Manguio	Population
9	Lign37à54_Pop_PROT	Population
10	Lign19à36_Pop_HR	Population
11	Claudio	Lignée pure
12	Dakter	Lignée pure

Tableau 5 : Variétés présentes sur la parcelle expérimentale

Troisième hypothèse : Le microclimat agroforestier permet de s'affranchir des stress hydrique et thermique de fin de cycle et permettrait de choisir des variétés plus tardives afin d'allonger leur cycle de développement et d'augmenter le potentiel de rendement de la variété.

II. Matériel et méthodes

A. Le dispositif expérimental

1. Présentation de la parcelle étudiée

Le Domaine de Restinclières, depuis 1990, appartient au Département de l'Hérault, qui y a installé la Maison Départementale de l'Environnement, tout en ouvrant largement le domaine au public. Depuis plus de 20 ans, ce domaine est le lieu d'expérimentations agroforestières organisées par l'INRA de Montpellier. Le domaine s'étend sur 200 hectares dont 50 en agroforesterie. La biodiversité est importante, grâce aux grandes zones de garrigue et aux rivières Lirou et Lez qui bordent le domaine et présentent une ripisylve étendue. La partie grandes cultures du domaine est cultivée par un agriculteur en relation avec le Conseil départemental, M Breton. Il conduit ses propres cultures, mais réalise certaines interventions sur les parcelles expérimentales, comme par exemple la fertilisation.

La parcelle expérimentale étudiée ici se trouve sur ce domaine. Le type de sol est limono-argileux calcaire profond. La parcelle a été plantée de frênes en 1995, et ils pourront être récoltés lorsque qu'ils auront entre 40 et 65 ans. Ils sont plantés à une densité de 128 arbres/ha et les allées qu'ils forment sont orientées Nord-Sud. Les trois allées réservées aux cultures mesurent environ 13 m de large. La rotation de culture de la parcelle sont : blé dur/ blé dur/ pois. L'itinéraire technique est détaillé dans le tableau 4.

Entre la préparation du lit de semence et la réalisation du semis, les frênes ont perdu leurs feuilles, couvrant la zone de semis d'une litière de feuilles de frênes. Une expérience parallèle a été réalisée afin d'observer un possible effet allélopathique (influence induite par des molécules chimiques pouvant inhiber la germination ou la croissance des plantes voisines (Delabays et Mermillod, 2002)) des feuilles de frênes sur le pouvoir germinatif du blé dur (Annexe II). Il en résulte que l'on observe uniquement une diminution du temps de germination, et non une diminution du taux de germination.

2. Matériel végétal

Douze variétés de blé dur ont été choisies par les sélectionneurs de l'INRA, membres de l'unité expérimentale Diascope sur la base d'une étude préalable en pot de tolérance à l'ombrage.

Les variétés choisies sont soit des variétés populations (variétés anciennes issues de la collection nationale de blé dur maintenue par l'unité Diascope) soit des lignées pures (tableau 5). Elles ont ensuite été semées sur les parcelles expérimentales de Restinclières.

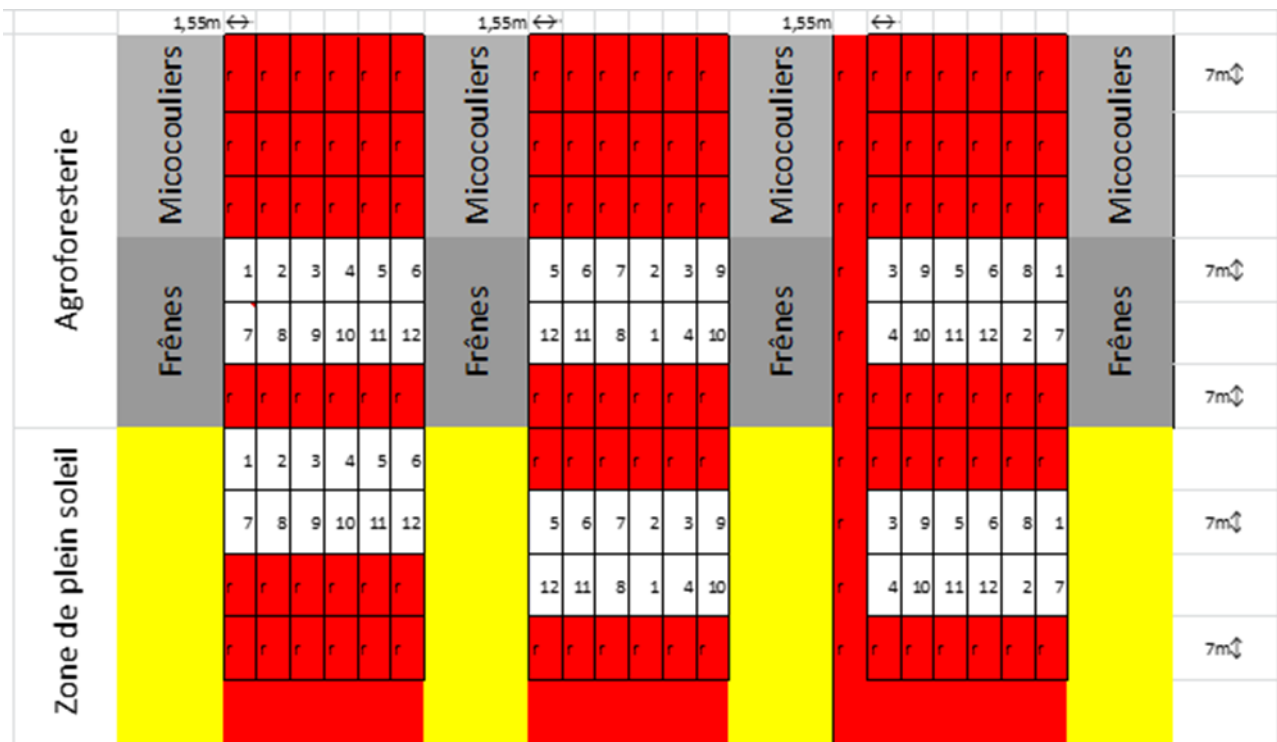


Figure 4 : Représentation schématique de la parcelle expérimentale

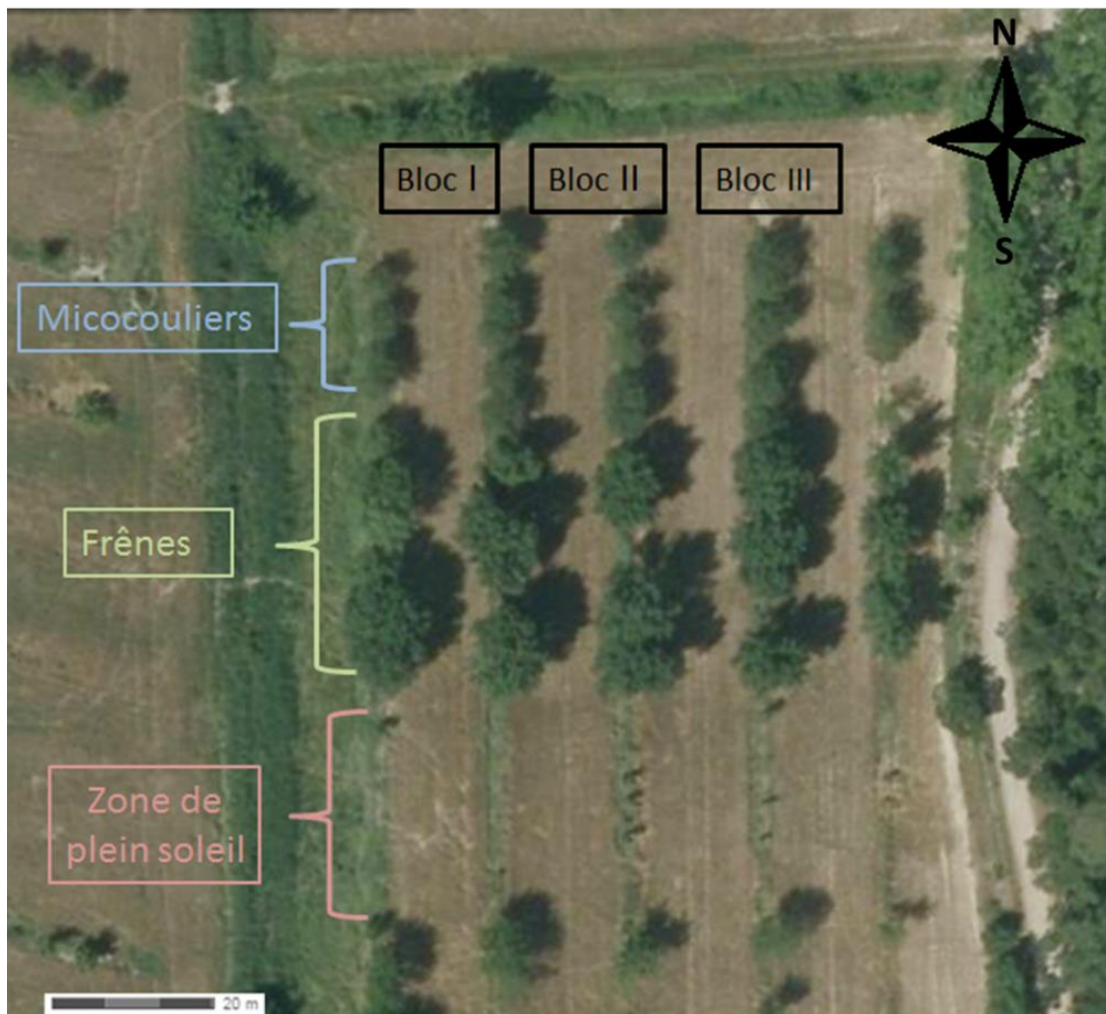


Figure 5 : Photographie aérienne de la parcelle étudiée

Les variétés 11 et 12 (Claudio et Dakter) sont des variétés de blé dur actuellement commercialisées, elles sont considérées comme précoces (Arvalis, 2016)

3. Plan d'expérience

Chaque allée cultivée constitue un bloc ; chaque bloc est divisé en deux conditions d'éclairement (ombre et soleil). La surface disponible dans chaque condition d'éclairement dans chaque bloc permet de faire 4 microparcelles de 1m55*7m dans chacune des 3 positions (Ouest, centre, Est de l'allée). Les 12 variétés ont donc été réparties en 3 groupes de 4 variétés et chaque groupe est présent dans l'une des 3 positions dans l'un des 3 blocs. Au sein d'une position d'un bloc, les 4 variétés sont réparties aléatoirement. La même répartition des variétés est utilisée à l'ombre (mode de production dit agroforestier) et au soleil (mode de production dit agricole). Le remplissage des zones tampon entre la partie à l'ombre et la partie au soleil est effectué avec la variété 1 (LA1823). (figure 4 et figure 5)

L'individu statistique étudié est la microparcelle de 1,55m * 7 m, parallèlement à la ligne des arbres. Le dispositif comporte 2 éclairagements x 12 variétés x 3 blocs soit 72 microparcelles.

Les facteurs étudiés sont au nombre de trois. Tout d'abord le facteur mode de production, soit agroforestier soit agricole, permettra de mettre en évidence des différences existantes entre ces deux modes. Ensuite le facteur bloc, du fait de la mise en place de trois répétitions de l'expérience dans trois rangs agroforestiers. Enfin le facteur variété qui permettra l'identification de variétés adaptées ou non au système agroforestier.

B. Mesures et observations

1. Etude du microclimat agroforestier et témoin agricole

Le microclimat induit par la présence des arbres est comparé au microclimat du témoin agricole. Pour ce faire, la température de l'air, l'humidité relative de l'air et le rayonnement sont enregistrés de façon continue à l'aide de capteurs automatiques. Ces différents capteurs sont placés à la fois dans la zone agroforestière et dans le témoin agricole. Par ailleurs, la pluviométrie est mesurée par une station météo située dans une parcelle proche (< 1 km).

2. Etude du matériel végétal

a) Phénologie

Tout au long de la croissance des cultures, la phénologie des arbres et du blé est suivie deux fois par semaine, selon l'échelle BBCH qui permet d'identifier les stades de développement d'une plante (Witzenberger et Hack, 1989). Dans chaque placette, on note le stade phénologique de vingt plantes prises au hasard, le stade de la placette elle-même est déterminé par le stade atteint au moins 50% des plantes (Gate, 1995). Des relevés hebdomadaires de la hauteur du couvert végétal, de la surface verte à l'aide d'un Greenseeker et de l'indice de surface foliaire (ou LAI pour Leaf Area Index) ont été faits pour chaque microparcelle.

b) Composantes du rendement

Une récolte manuelle est réalisée sur 1 m linéaire sur 4 rangs centraux de la zone de suivi de chaque microparcelle. Le blé n'a pas été coupé à sa base mais arraché afin d'obtenir un comptage du nombre de plantes. Les adventices présentes entre ces rangs ont aussi été collectées puis séchées comme l'ensemble du blé. Les épis ont été comptés puis pesés, comme le reste de la partie aérienne de la plante. Les épis sont ensuite battus et le poids de 250 grains est mesuré. Cela permettra de calculer les différentes composantes du rendement final.

Les composantes du rendement sont aussi déterminées. Le nombre de plantes par m² a été compté à la sortie de l'hiver (nombre de plantes sur 2*1m linéaire) mais aussi lors de la récolte. Le nombre d'épis par plante a été compté une première fois à la floraison (sur 2*1m linéaire), avec le nombre de talles par plante, et une seconde fois à la récolte (sur 4*1m linéaire). Le nombre de grains par épis est déduit du nombre d'épis et du nombre de grains obtenus lors de la récolte (sur 4*1m linéaire). Et enfin le poids de mille grains a été obtenu lors de la récolte à partir d'un poids de 250 grains.

c) Fertilité des épis

Afin d'étudier la fertilité des épis, la décomposition du rendement peut se faire de façon plus précise. On peut ainsi obtenir le nombre de grains par cette décomposition : nombre de grains par épi = nombre de grains par épillet * nombre d'épillets par épi. Le nombre de grains par épillet nous permet d'avoir une idée de la fertilité des épis, car il est issu du nombre de fleurs fertiles par épillet. En effet, le nombre de grains par épillet peut se calculer par le nombre de fleurs par épillet * le taux de fertilité, mais il n'a pas été possible de compter le nombre de fleurs par épillets.

Pour obtenir ces composantes, dix épis par placette ont été récoltés. On a compté le nombre d'épillets présents sur chaque épi. Ces épis ont ensuite été battus et on a obtenu le nombre de grains présents dans les dix épis.

C. Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R.

1. Analyse de la variance du rendement et de ses composantes

Pour tester l'effet des facteurs qualitatifs (« mode de production », « bloc » et « variété ») sur les variables quantitatives (rendement, composantes du rendement), nous avons utilisé l'analyse de la variance. On teste tout d'abord les trois facteurs et leurs interactions dans un même modèle, puis selon les résultats obtenus on diminue le nombre d'interactions et le nombre de facteurs. Le modèle finalement utilisé est choisi selon son BIC (Bayesian Information Criterion), ce critère de sélection prend en compte le nombre et la vraisemblance des données (Lebarbiet et Mary-Huard, 2006). Les résidus de ce modèle sont supposés indépendants compte tenu des conditions expérimentales de mesure. La normalité des résidus et l'homogénéité des variances sont évaluées à l'aide de graphiques.

Lorsque la normalité n'est pas confirmée, le modèle est transformé par un logarithme népérien, puis à nouveau choisi selon son BIC, la normalité des résidus et l'homogénéité des variances sont à nouveau évaluées. Lorsque cela est nécessaire, la comparaison multiple des moyennes a été faite à l'aide du test de Tukey, au seuil de probabilité 5%.

2. Analyse de la précocité

Afin d'étudier la précocité des différentes variétés, on réalise une courbe pour chaque placette du stade phénologique en fonction du nombre de jours depuis le semis. L'aire sous cette courbe est ensuite utilisée en tant que variable quantitative, et on teste l'effet des facteurs qualitatifs étudiés grâce à une analyse des variances.

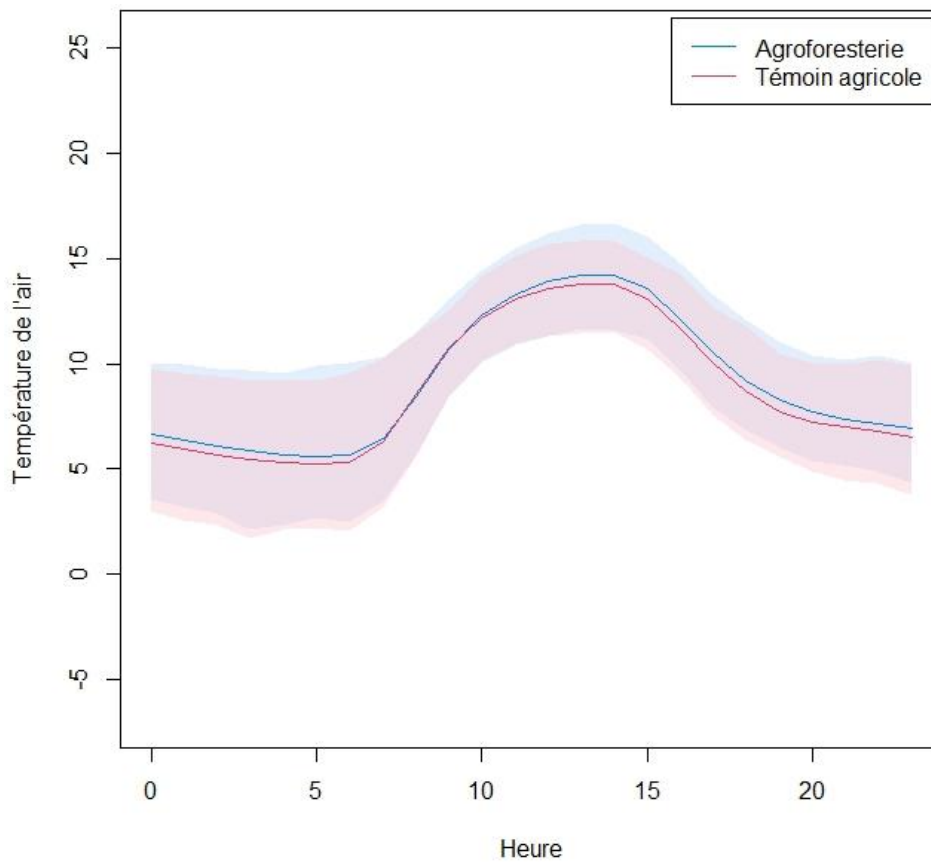


Figure 6 : Evolution de la température (en °C) de l'air en agroforesterie et en témoin agricole en fonction des heures de la journée lors de la période de croissance végétative des plantes

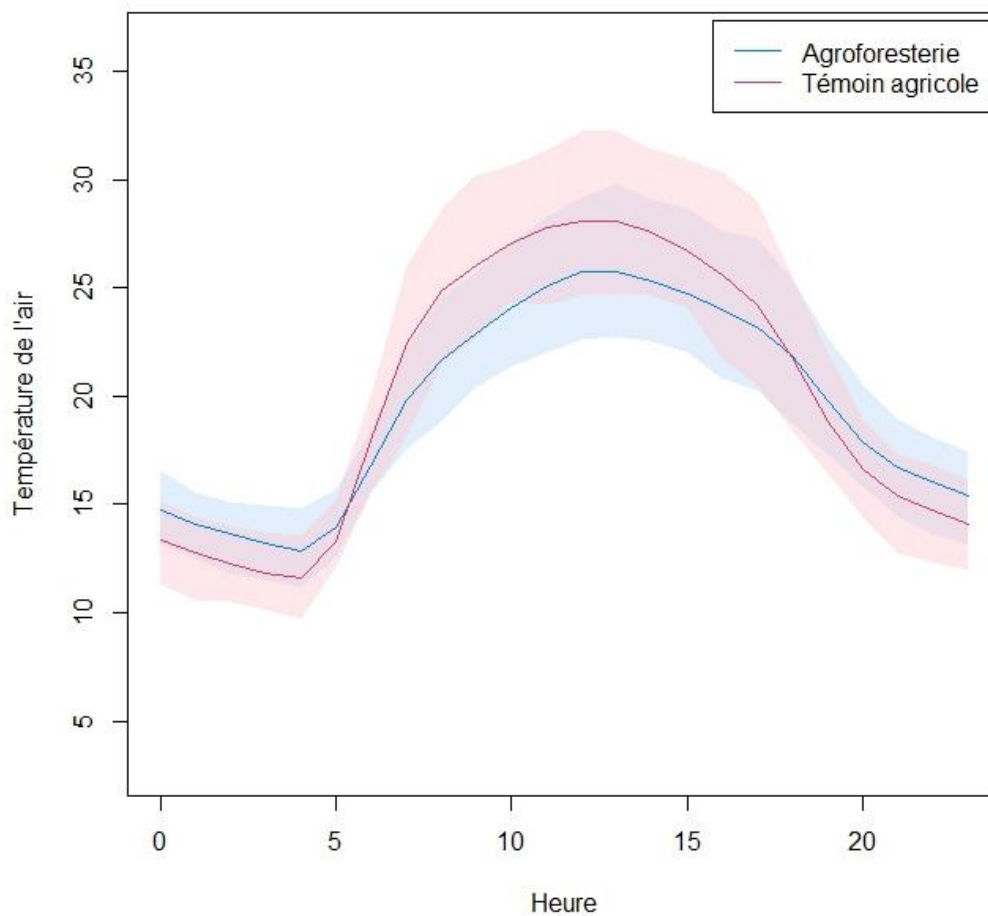


Figure 7 : Evolution de la température (en °C) de l'air en agroforesterie et en témoin agricole en fonction des heures de la journée lors de la période de formation du grain

III. Résultats

Nous allons tout d'abord étudier les résultats de l'étude du microclimat agroforestier, puis des différentes composantes de rendement.

A. Caractérisation du microclimat agroforestier

1. Température de l'air

On s'intéresse aux températures sur deux périodes importantes pour les cultures annuelles : la croissance végétative, la formation du grain.

Lors de la période de croissance végétative (figure 6), les températures des deux modes de production ne sont pas différentes l'une de l'autre.

Lors de la période de formation du grain (figure 7) on aperçoit une différence entre les deux températures. La température en agroforesterie est plus élevée la nuit et plus basse le jour, par rapport au témoin agricole.

2. Humidité relative de l'air

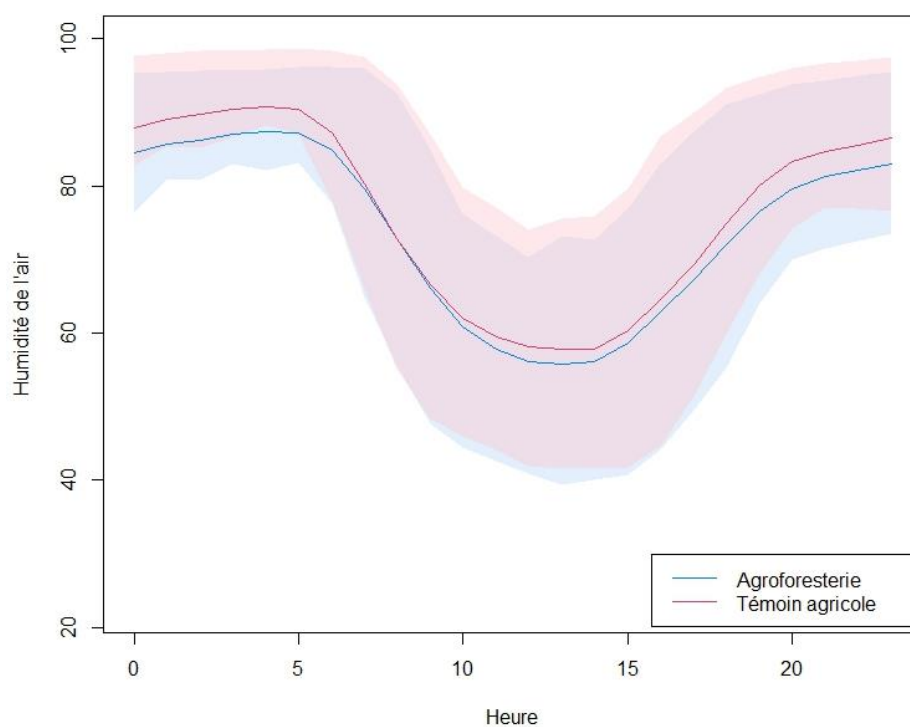


Figure 8 : Evolution de l'humidité de l'air en agroforesterie et en témoin agricole en fonction des heures de la journée lors de la période de croissance végétative des plantes

On observe une faible différence entre les deux modes de production, l'humidité de l'air est légèrement plus faible en milieu agroforestier.

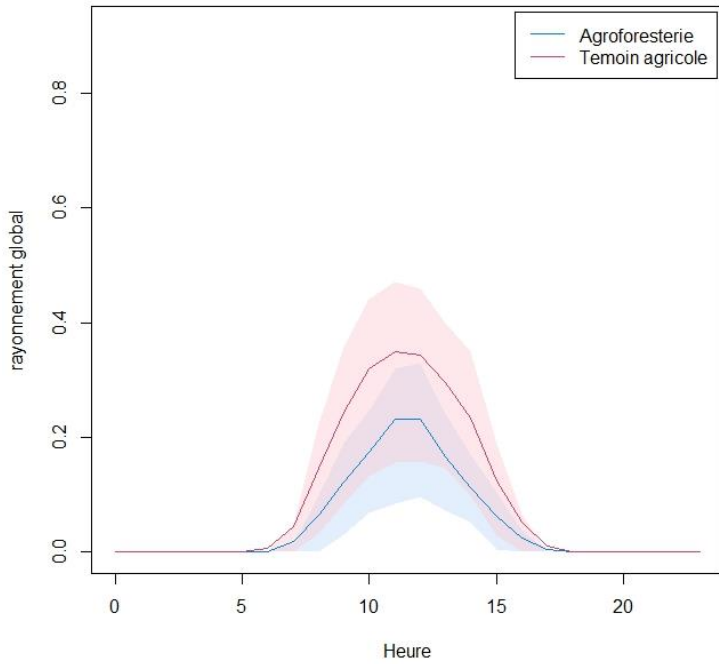


Figure 9 : Evolution du rayonnement global (en W/m^2), en moyenne en fonction des heures de la journée lors de la période de croissance végétative (du 02/11/2015 au 25/04/2016)

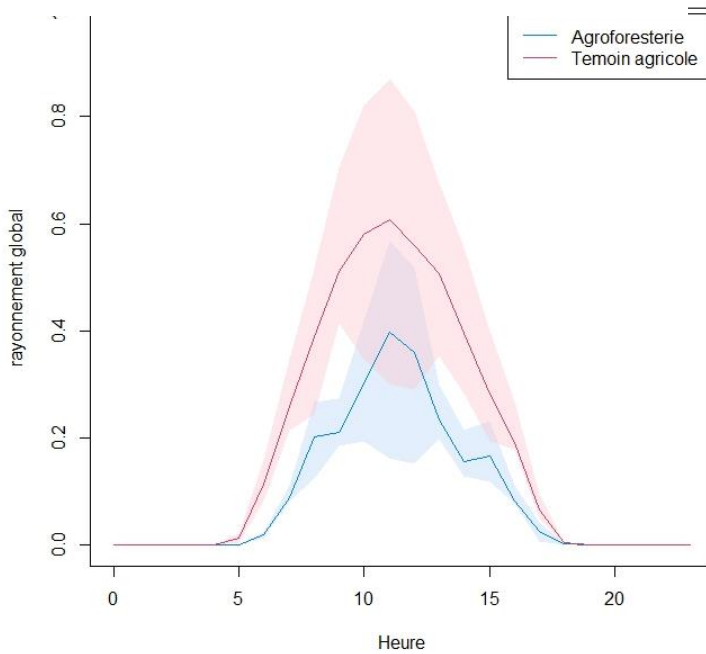


Figure 10 : Evolution du rayonnement global (en W/m^2), en moyenne en fonction des heures de la journée lors de la période de floraison (du 25/04/2016 au 25/05/2016)

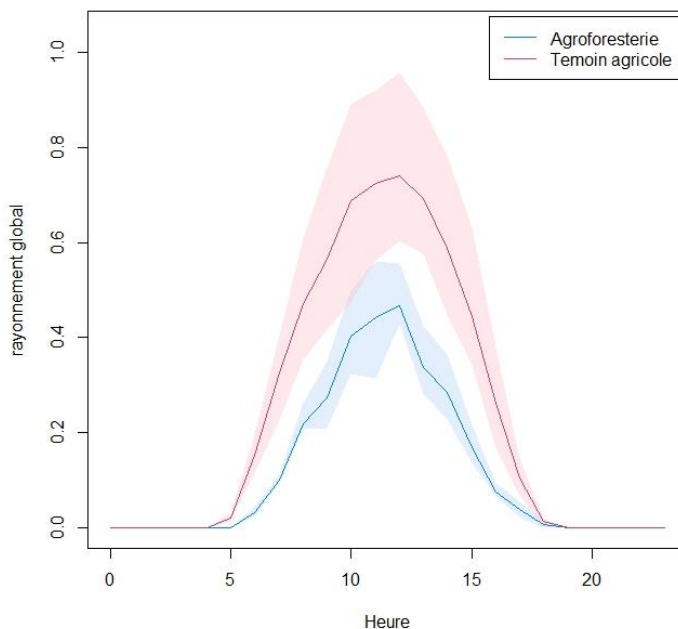


Figure 11 : Evolution du rayonnement global (en W/m^2), en moyenne en fonction des heures de la journée lors de la période de remplissage du grain (du 25/05/2016 au 28/06/2016)

3. Rayonnement

Le rayonnement reçu en agroforesterie représente 53,3 % du rayonnement reçu en témoin agricole, soit une réduction de 46,7 % du rayonnement global, sur l'ensemble du cycle.

Le rayonnement intercepté par les cultures avant le débourrement des frênes est de 56,3% et de 51,1 % après leur débourrement.

On s'intéresse aux caractéristiques du rayonnement sur trois périodes importantes pour les cultures annuelles : la croissance végétative, la floraison et le remplissage du grain (figures 9, 10 et 11). On peut observer que la différence de rayonnement intercepté par les cultures dans les deux systèmes est de plus en plus importante. Cela correspond à l'augmentation du rayonnement direct qui évolue selon les saisons, et à la mise en place du feuillage des arbres.

B. Etude du rendement

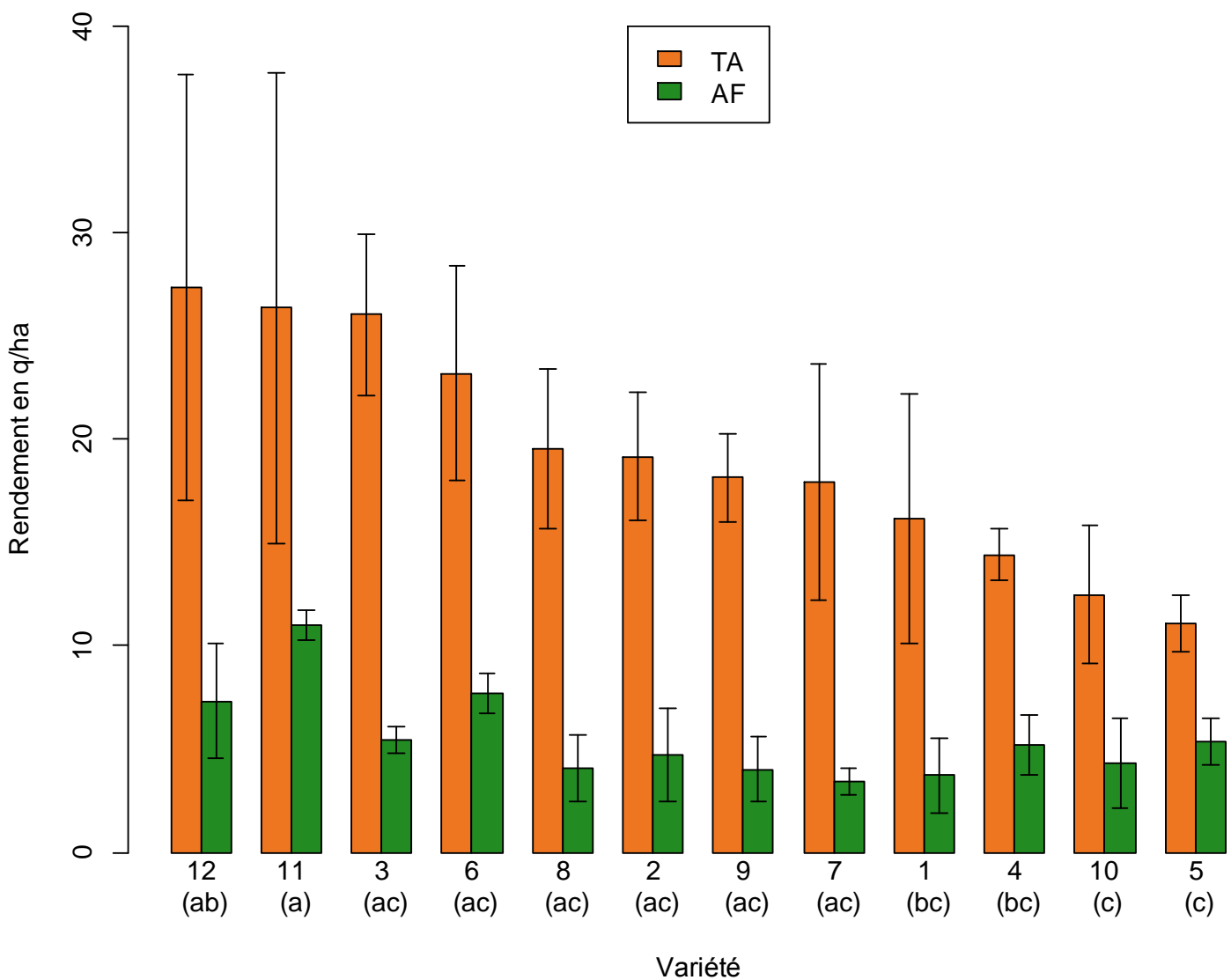


Figure 12 : Classement des variétés par leur rendement en témoin agricole (en orange). Deux variétés qui partagent une lettre ne sont pas significativement différentes.

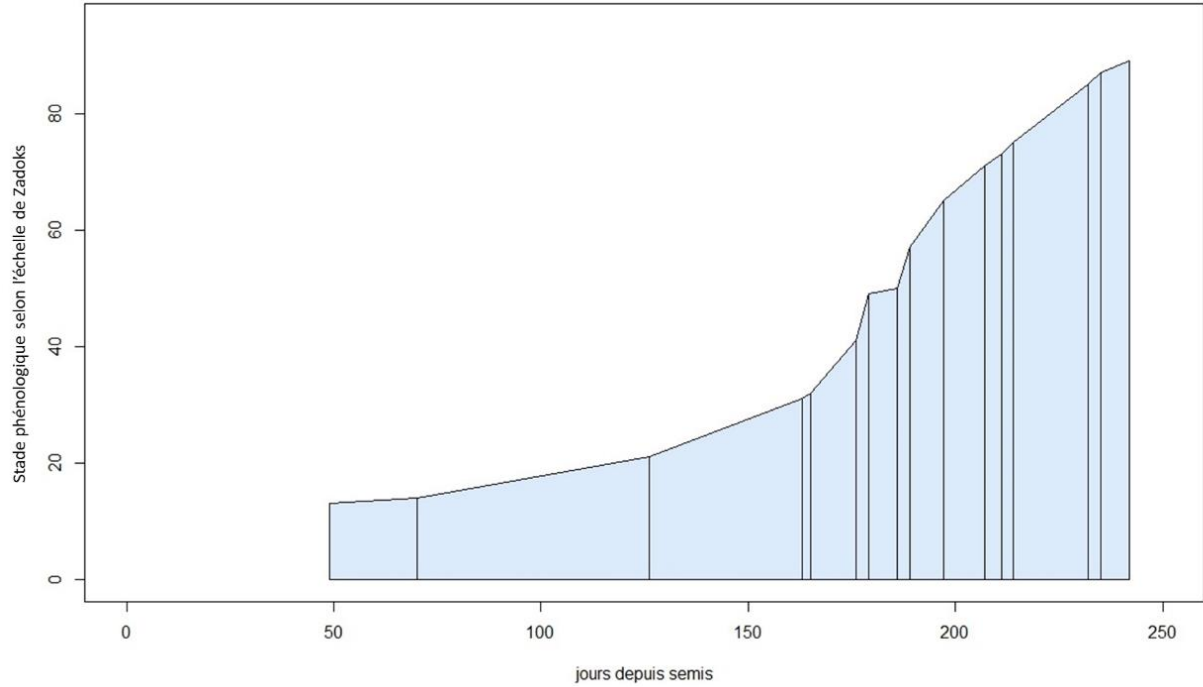


Figure 13 : Courbe de développement de la variété 1 (LA1823), évolution des stades de développement selon l'échelle de Zadoks en fonction des jours depuis semis. L'aire sous la courbe est grisée, et les lignes verticales représentent les dates de relevés phénologiques.

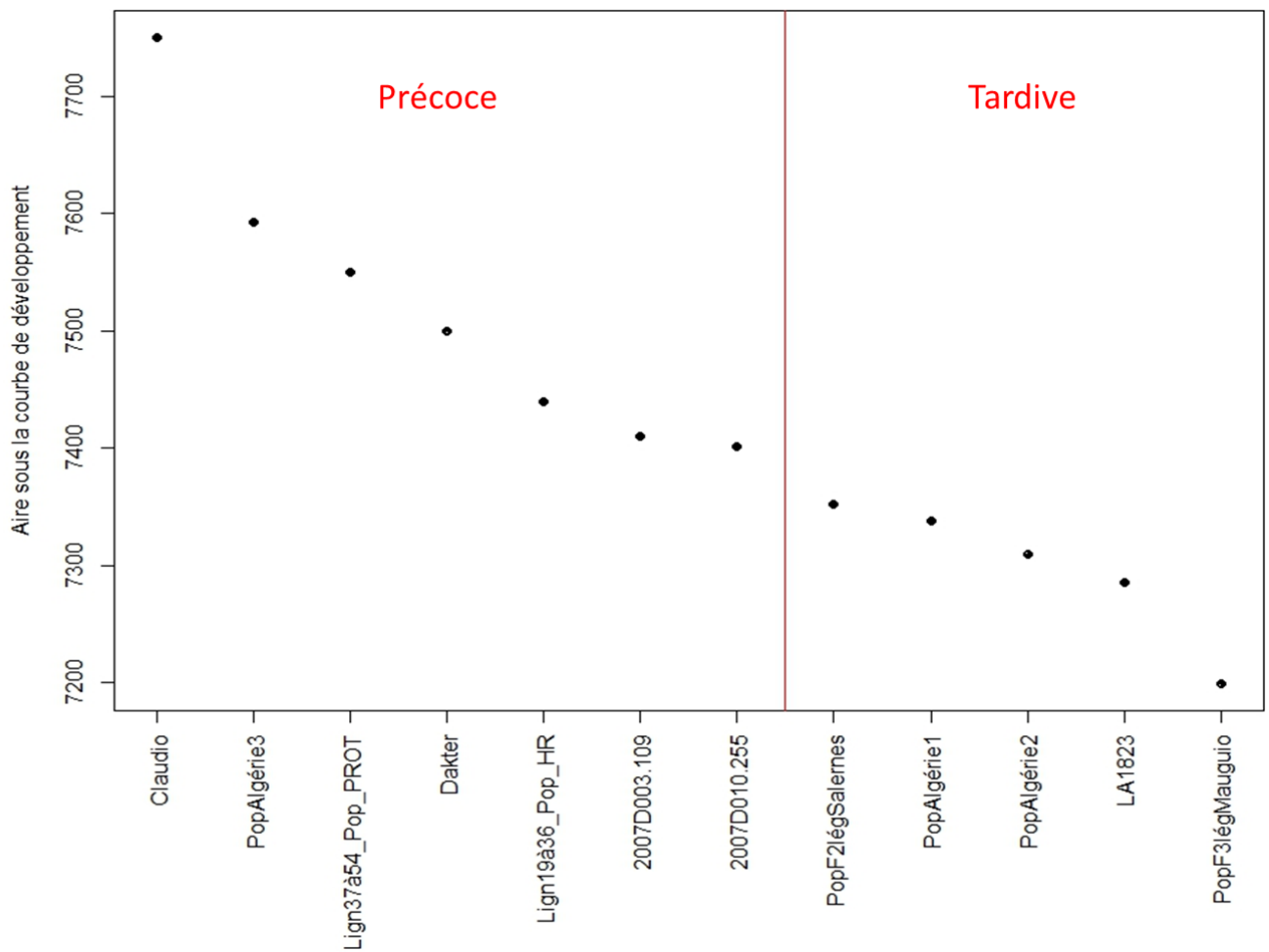


Figure 14 : Répartition des variétés selon leur développement, à gauche de la ligne rouge le groupe de variétés précoces et à droite le groupe de variétés tardives.

Comme on peut l'observer sur la figure 12, le classement du rendement en témoin agricole ne se reflète pas dans le classement du rendement en système agroforestier. Cela montre l'intérêt de mener une sélection pour les systèmes agroforestiers en situation agroforestière : il ne suffit pas de prendre les variétés les plus performantes en témoin agricole pour obtenir les variétés les plus performantes en agroforesterie.

C. Etude de la précocité

Pour étudier la précocité des variétés étudiées on trace les courbes de développement des plantes grâce aux relevés phénologiques réalisés sur toute la période de culture. (Figure 13). En réalisant la moyenne des aires sous la courbe de chaque variété en témoin agricole, on obtient un indice de précocité; plus l'aire sous la courbe de développement est grande, plus le développement de la plante est court, car les stades sont atteints plus tôt. Ainsi, d'après la figure 14 on réalise deux groupes de variétés, sept variétés précoces et cinq variétés tardives. Nous avons décidés de ne pas séparer les variétés 2007D003.109 et 2007D010.255 car il n'y qu'une faible différence entre leurs aires.

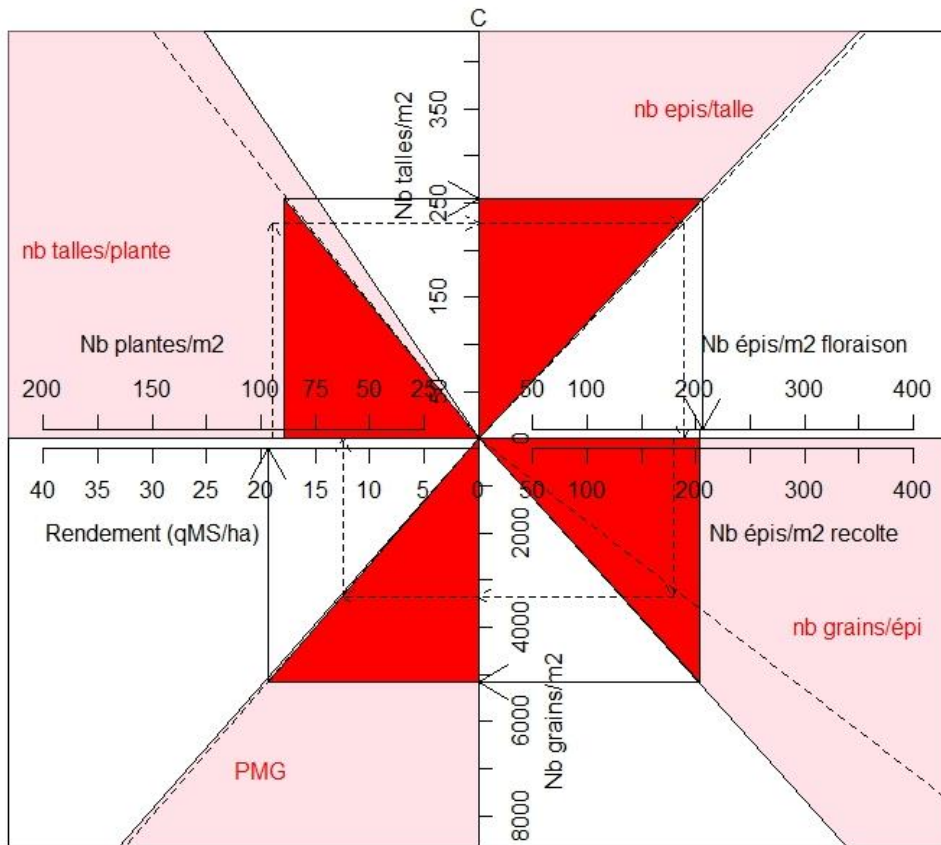


Figure 15 : Elaboration du rendement en témoin agricole

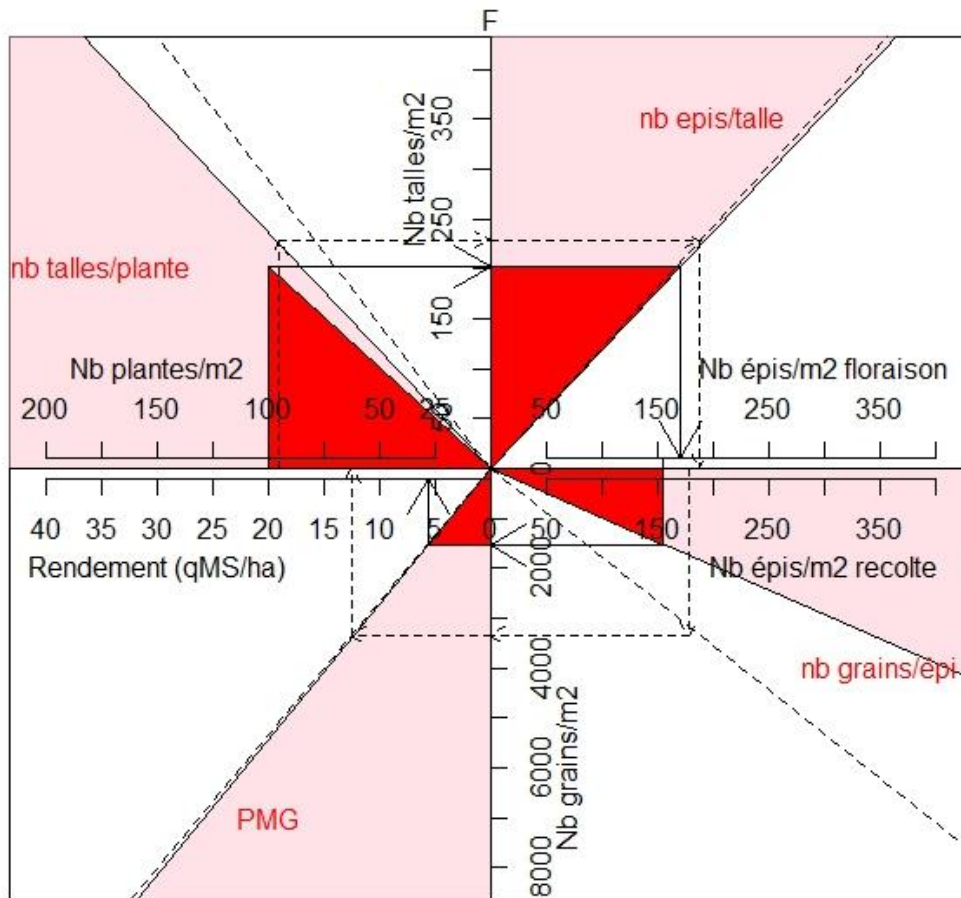


Figure 16 : Elaboration du rendement en agroforesterie

D. Etude des étapes de formation du rendement

On étudie les différentes composantes du rendement et les différents effets des facteurs étudiés sur ces composantes. Dans certaines analyses, le facteur « variétés » est remplacé par les facteurs « groupes de précocité » (variétés précoce et variétés tardives) ou « structure variétale » (lignée pure et population).

Observons tout d'abord les figures 15 et 16, elles représentent les étapes de formation du rendement. Leur lecture débute au quart haut gauche avec le nombre de plantes par m^2 qui passe à un nombre de talles par m^2 en multipliant le nombre de plantes par m^2 par le nombre de talles par plantes (représenté par la pente du triangle rouge) (les lignes pointillées représentant la moyenne). On observe un léger décalage au niveau du nombre de talles par plante, cela est dû au fait que les comptages du nombre de talles s'est réalisé à la floraison et celui du nombre de plante par m^2 lors de la récolte. Puis dans le quart haut droite, on passe du nombre de talles par m^2 au nombre d'épis par m^2 comptés à la floraison via le nombre d'épis par talles. Ensuite, dans le quart bas droite, on part du nombre d'épis par m^2 compté lors de la récolte, il permet de passer au nombre de grains par m^2 en le multipliant par le nombre de grains par épis. On peut voir que c'est avec le nombre de grains par épi que se crée un écart très important entre le témoin agricole et l'agroforesterie. Enfin, dans le dernier quart, la dernière composant est mise en place, le poids de mille grain, avant d'arriver au rendement final.

Variable	Effet significatif	Modalité	Moyenne (\pm écart type)	Pourcentage de perte (%)	P value
Biomasse totale en gr	Mode de production	TA	546.73 (\pm 129.29)		< 2.2e-16
		AF	215.02 (\pm 66.09)	-39.33	
Nombre de plantes par m ²	Aucun		94.8 (\pm 38.15)		>0.05
Nombre de talles par m ²	Mode de production	TA	254.74 (\pm 51.82)		9.83e-06
		AF	202.98 (\pm 39.18)	-20.32	
Nombre d'épis par talles	Aucun		0.83 (\pm 0.095)		>0.05
Nombre de grains par épis	Mode de production	TA	25.61 (\pm 8.83)		< 2.2e-16
		AF	9.72 (\pm 3.48)	-62.05	
Nombre de grains par épillet	Mode de production	TA	1.70 (\pm 0.33)		<2.22e-16
		AF	0.98 (\pm 0.35)	-42.35	
	Variétés	Variété 1 à 11	Cf. Tableau 7		1.906e-06
	Précocité	Précoce	1.45 (\pm 0.54)		0.00032
Tardif		1.18 (\pm 0.37)	-18.62		
Nombre d'épillets par épi	Mode de production	TA	20.10 (\pm 1.67)		< 2.2e-16
		AF	14.97 (\pm 2.07)	-25.52	
Poids de mille grains en gr	Structure variétale	Lignée pure	39.61 (\pm 4.60)		0.00123
		Population	36.02 (\pm 4.48)	-9.06	
Rendement en q/ha	Mode de production	TA	19.33 (\pm 7.09)		<2.2e-16
		AF	5.54 (\pm 2.51)	-71.34	
	Structure variétale	Lignée pure	14.74 (\pm 10.31)		0.0062
		Population	10.79 (\pm 7.06)	-26.78	
Précocité	Précoce	14.09 (\pm 9.63)		0.00116	
	Tardif	10.10 (\pm 6.74)	-28.32		
Indice de récolte	Mode de production	TA	0.285 (\pm 0.092)		8.370e-06
		AF	0.213 (\pm 0.067)	-25.26	
	Variétés	Variété 1 à 11	Cf. Tableau 8		1.072e-05
	Structure variétale	Lignée pure	0.278 (\pm 0.072)		0.001859
		Population	0.228 (\pm 0.091)	-17.98	
	Précocité	Précoce	0.273(\pm 0.069)		0.00165
Tardif		0.214 (\pm 0.099)	-21.63		

Tableau 6 : Etude statistique des élaborations du rendement du blé dur

Toutes les composantes du rendement ont été analysées et les effets significatifs sont présentés dans le tableau 6. Aucune des interactions entre facteurs n'était significative. Le mode de production a un effet sur de nombreuses composantes et cet effet est toujours une diminution de la composante étudiée en agroforesterie. Le rendement est de 19.33 (± 7.09) q/ha en témoin agricole et de 5.54 (± 2.51) q/ha en agroforesterie, soit une perte de 71% pour l'agroforesterie.

Variété	Génotype	Moyenne (\pm écart type) en nombre de grains par épillets	
11	Claudio	1.91 (± 0.33)	a
3	2007D010.255	1.68 (± 0.68)	ab
6	Pop Algérie 3	1.58 (± 0.41)	ac
12	Dakter	1.39 (± 0.37)	bc
10	Lign19à36_Pop_HR	1.35 (± 0.54)	bc
7	Pop F2 + lég Salernes	1.34 (± 0.41)	bc
5	Pop Algérie 2	1.27 (± 0.30)	bc
2	2007D003.109	1.24 (± 0.65)	bc
4	Pop Algérie 1	1.13 (± 0.35)	c
9	Lign37à54_Pop_PROT	1.13 (± 0.51)	c
1	LA1823	1.10 (± 0.33)	c
8	Pop F3 + lég Mauguio	1.09 (± 0.48)	c

Tableau 7 : Effet des variétés sur le nombre de grains par épillets

Variété	Génotype	Moyenne (\pm écart type) sans unité	
11	Claudio	0.364 (± 0.0312)	a
3	2007D010.255	0.306 (± 0.0475)	ab
8	Pop F3 + lég Mauguio	0.292 (± 0.1861)	ab
12	Dakter	0.285 (± 0.0343)	ab
6	Pop Algérie 3	0.284 (± 0.0695)	ab
9	Lign37à54_Pop_PROT	0.239 (± 0.0722)	bc
2	2007D003.109	0.229 (± 0.0539)	bc
7	Pop F2 + lég Salernes	0.228 (± 0.0605)	bc
1	LA1823	0.208 (± 0.0660)	bc
10	Lign19à36_Pop_HR	0.207 (± 0.0363)	bc
4	Pop Algérie 1	0.184 (± 0.0219)	bc
5	Pop Algérie 2	0.161 (± 0.0489)	c

Tableau 8: Effet des variétés sur l'indice de récolte

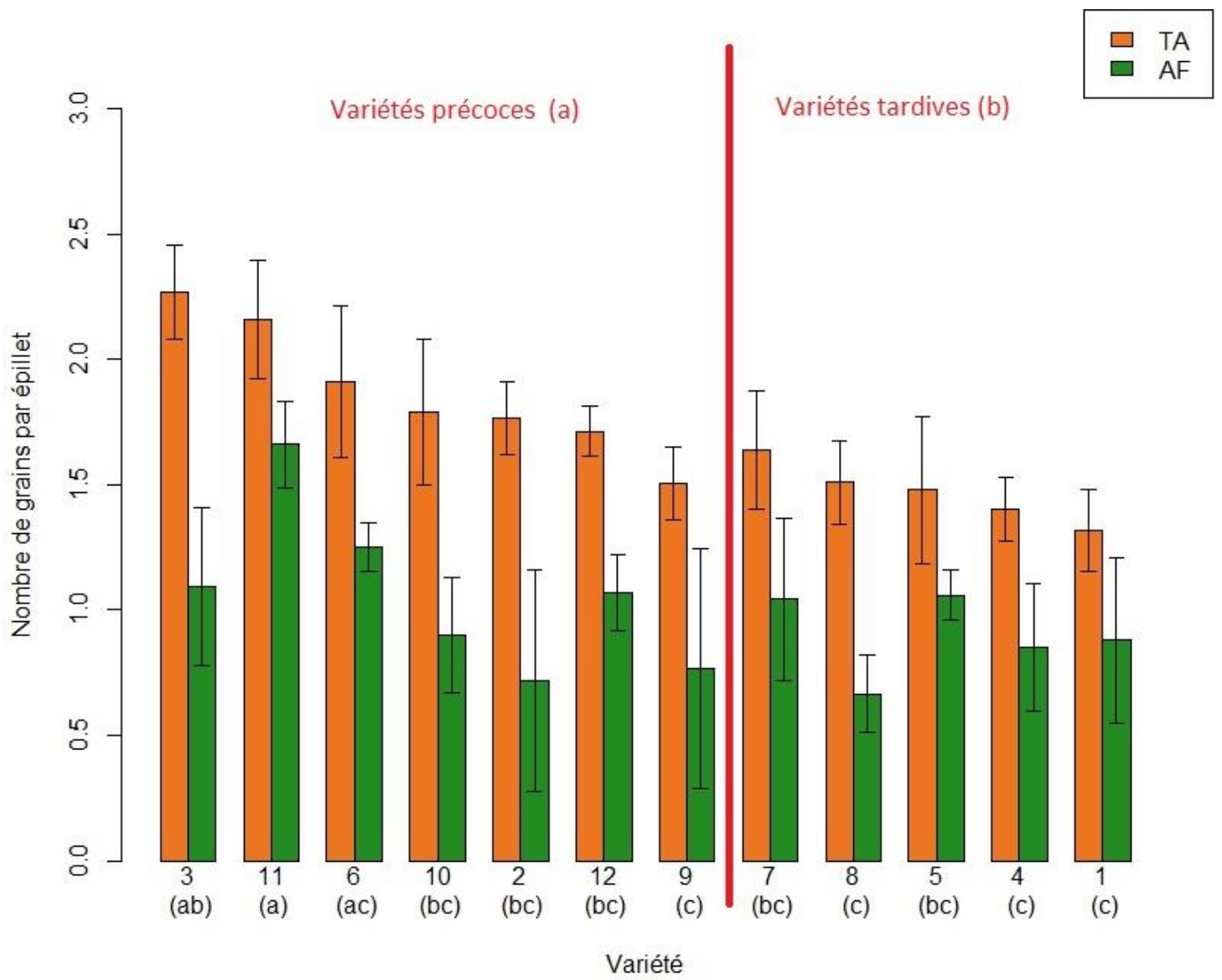


Figure 17 : Le nombre de grains par épillet en fonction du mode de production, de la variété et du groupe de précocité.

1. Fertilité des épis

Pour étudier plus précisément la fertilité des épis, il est possible de décomposer le nombre de grains par épis en nombre de grains par épillet*le nombre d'épillets par épis. Le nombre de grains par épillets prend en compte à la fois le nombre de fleurs par épillets mais aussi le taux de fertilité.

On peut observer sur la figure 17 qu'en plus d'un effet du mode de production, la variabilité génétique a une forte influence sur le nombre de grains par épillets. Contrairement au nombre d'épillets par épi qui n'est influencé que par le mode production. De plus, on peut observer comme pour le classement du rendement, le classement du nombre de grains par épillet du témoin agricole n'est pas le même que celui de l'agroforesterie. Cette composante de rendement pourrait être une des caractéristiques sur laquelle un programme de sélection pourrait être mené.

2. Indice de récolte

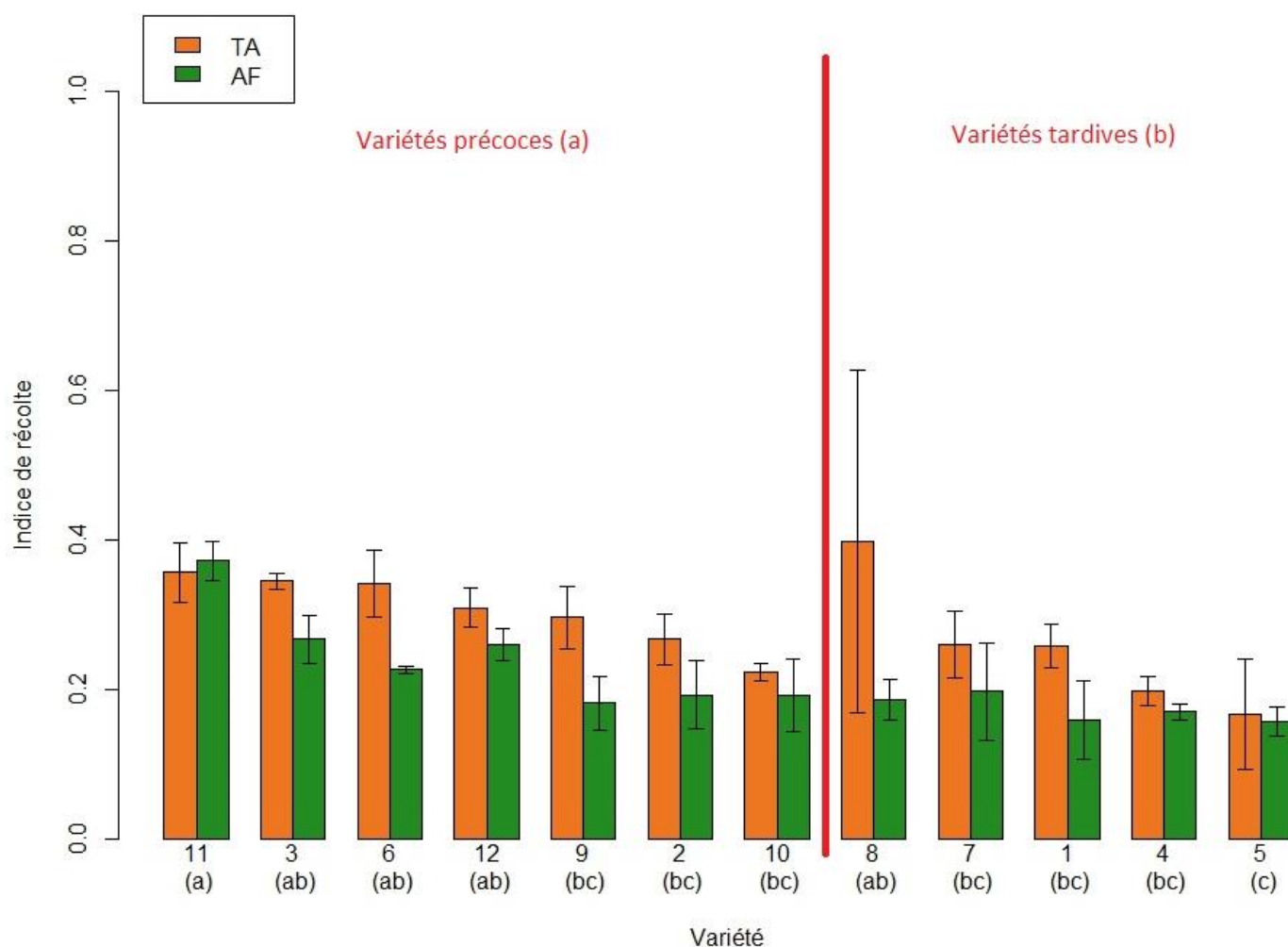


Figure 18 : Indice de récolte en fonction du mode de production, des variétés et des groupes de précocité.

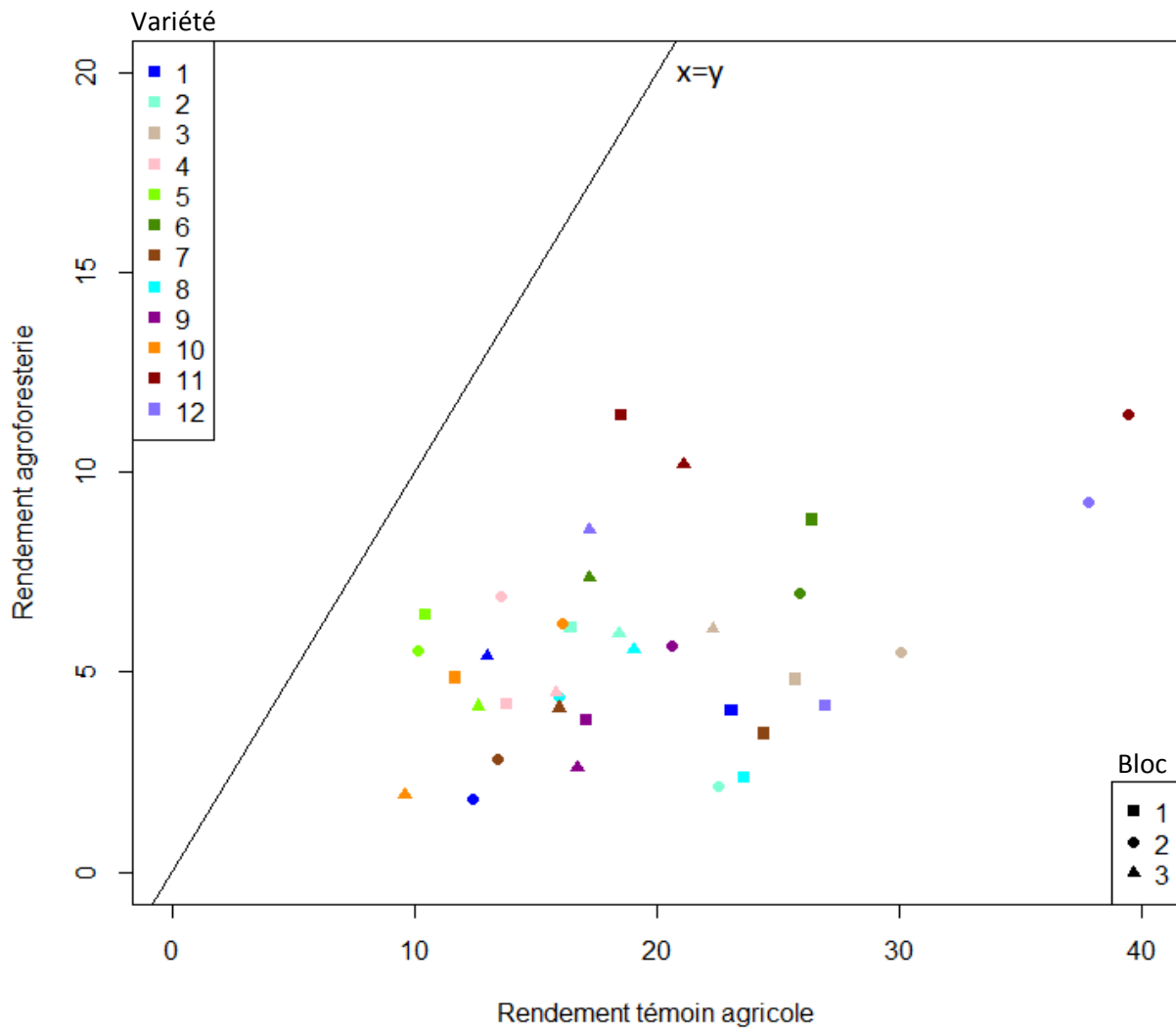


Figure 19 : Rendement en q/ha de l'agroforesterie en fonction du rendement en témoin agricole des variétés de chaque bloc.

L'indice de récolte est influencé par la variabilité génétique, en plus du mode de production. Il faut savoir que les variétés lignées pures possèdent des gènes de nanisme que ne possèdent pas les populations, cela joue sur la taille des pailles et donc la biomasse utilisée pour calculer l'indice de récolte. On observe en effet une perte de 17.98 % d'indice de récolte entre les variétés lignées pures et les populations.

E. Etude de la tolérance à l'ombre

Le ratio de toutes les composantes en agroforesterie et en témoin agricole n'a pas pu être statistiquement analysé du fait du nombre trop faible de répétitions (le mode de culture disparaissant par construction). En classant les variétés par groupe de précocité le ratio des composantes a pu être analysé, mais aucune différence significative n'est apparue.

De façon descriptive, on observe figure 19 le rendement en agroforesterie en fonction du rendement du témoin agricole des placettes par variétés et par bloc. On observe que le rendement du témoin agricole est supérieur au rendement agroforestier pour toutes les placettes. Les variétés tolérantes à l'ombrage auraient été les variétés le plus proches de la droite $x=y$, du fait d'une différence minime entre les deux rendements. On peut observer que la variété 5 (Pop Algérie 2) est la plus proche de l'axe.

IV. Discussion

D'après les résultats obtenus, nous pouvons observer de façon générale que, cette année, le système agroforestier a eu un effet très négatif sur le rendement et sur de nombreuses composantes de celui-ci. De plus, les variétés précoces et les variétés issues de lignée pure ont des résultats supérieurs pour certaines composantes du rendement aux variétés tardives et aux variétés issues de population.

De plus, nous avons pu observer (annexe III) que les cultures d'orge en système agroforestier ont aussi été impactées négativement par l'agroforesterie, avec une perte de 75 % du rendement par rapport au témoin agricole.

Ces résultats peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs, que nous allons détailler ci-dessous.

A. Interprétation et discussion des résultats

1. Caractérisation du microclimat agroforestier

Cette année a été particulière d'un point de vue climatique. Selon les bilans climatiques de l'Association Climatologique de l'Hérault (2016) les mois de Mars, Avril et Mai ont été très pluvieux, avec des températures plutôt fraîches. Les mois de Juin et Juillet n'ont pas eu des températures supérieures aux normales saisonnières. Ainsi, cette année n'a vu ni stress hydrique ni excès thermique, le facteur limitant du rendement étant probablement le rayonnement.

Ainsi, les différences de températures observées entre les deux systèmes étudiés ne sont pas très importantes, même si l'on observe des différences correspondant à ce que l'on attendait (températures plus basses le jour et plus hautes la nuit pour le système agroforestier).

L'humidité relative de l'air est elle aussi peu différente entre les deux systèmes, et nous avons observé une diminution de l'humidité de l'air dans le système agroforestier, alors que l'effet inverse était attendu, du fait de la transpiration des arbres. Cela peut être dû à l'effet Venturi qui peut survenir dans les allées agroforestière. Le brassage de l'air dû à la présence du vent et la faible longueur des allées pourrait être la raison de la différence observée.

L'étude du rayonnement intercepté par les cultures a montré que la réduction du rayonnement en système agroforestier est importante (46.3%) mais correspond à la perte de rayonnement attendue par rapport au design de la parcelle étudiée (hauteur des arbres et largeur de l'allée cultivée) (Dupraz et Liagre, 2011). Par contre, la différence de rayonnement avant et après le débourrement des frênes est très faible, créant une ombre très importante tout au long du cycle des cultures. Habituellement, cette différence est beaucoup plus importante, les cultures recevant plus de rayonnement avant le débourrement des arbres. Cela peut s'expliquer par l'architecture du frêne dont les branches, même sans feuilles, ont créé un ombrage particulièrement important.

D'après Dupraz et Liagre (2011), l'ombre n'impacte pas le rendement lorsque que le rayonnement intercepté par les cultures intercalaires est égal ou supérieur à 80 %, lorsque celui-ci est inférieur à 50% (ce qui est proche de notre cas d'étude) la croissance et le rendement se verront fortement affectés. Cela explique la perte importante de rendement que nous avons pu observer.

Or, du fait de cette année nuageuse observée sur toute la France, le rayonnement était probablement le facteur limitant cette année. La combinaison des conditions climatiques particulières de cette année et de l'espèce d'arbre choisie pour cette expérimentation explique donc l'impact négatif de l'agroforesterie sur le rendement, bien supérieur à celui habituellement observé. En effet, Ivezic et Van der Werf (2016) ont montré que, dans la région méditerranéenne, la productivité relative des systèmes agroforestiers est supérieure à celle des systèmes en cultures sans association d'espèces.

2. Précocité

Lors de l'étude des groupes de précocité, nous avons pu voir que pour certaines composantes du rendement, comme le nombre de grain par épillet, les variétés précoces obtiennent de meilleurs résultats. Selon Talbot (2011), lorsque des variétés précoces et des arbres à débourrement tardif sont associés le taux de fertilité peut n'être que très peu diminué, le rayonnement intercepté lors de la floraison par les cultures étant alors plus important pour les variétés précoces que tardives. Mais dans notre étude les frênes ont débourrés à la fin du mois de Mars, alors que la floraison s'est déroulée essentiellement le mois de Mai, ainsi les résultats observés ne sont pas explicables par le décalage phénologiques des arbres et des cultures. Il est possible que ces résultats observés soient issus d'un biais expérimental.

En effet, le groupe de variétés précoces contient les variétés 11 et 12 (Claudio et Dakter) qui sont des variétés de blé dur sélectionnées et déjà sur le marché, considérées comme précoce. Lors des analyses réalisées par rapport aux groupes de précocité il est impossible de séparer l'effet précocité de l'effet performance de ces variétés, les variétés utilisées pour la comparaison auraient dû être elles aussi présentes sur le marché et considérées comme tardives pour pouvoir juger pleinement de l'effet précocité. Ces variétés étant aussi des lignées pures, il en va de même pour les différences significatives observées entre les lignées pures et les populations.

3. Composantes du rendement et effet de l'agroforesterie

Nous avons établi grâce à l'étude bibliographique les effets supposés de l'agroforesterie sur différentes composantes du rendement. Les résultats obtenus nous montrent que seuls les effets négatifs de l'agroforesterie sont observables cette année, comme la diminution de biomasse totale et du nombre de grain par épi, alors que les effets positifs sur le nombre d'épi par plante et le poids de mille grains ne sont pas présents. Cela peut être expliqué par l'absence de stress (hydrique et thermique), qui permettent à l'agroforesterie d'être plus performante que les systèmes classiques de production.

On a pu voir dans les résultats obtenus que c'est le nombre de grains par épis qui impacte le plus la réduction de rendement entre les deux systèmes, ce qui est en accord avec la littérature (Abbate et al, 1997 ; Dufour et al, 2013 ; Slafer, 1995). En effet, le nombre de grain par épis est diminué de plus de 60 % en système agroforestier. Du fait du faible rayonnement direct obtenu lors de la floraison, la lumière est devenue un facteur limitant. Mais cette importante différence peut être aussi due à la présence d'un ravageur, en effet, nous avons pu observer, sans les quantifier, que des larves de cécidomye orangée étaient présentes dans de nombreuses fleurs, se nourrissant du grain en devenir. Mais ces larves étant présentes dans les deux systèmes étudiés, il n'est pas possible d'en établir l'impact sur le rendement et ses composantes.

Par ailleurs, l'effet du déficit du rayonnement dans notre étude semble plus préjudiciable au nombre de grains par épi que dans l'étude de Dufour et al (2013), qui montre une perte de nombre de grains par épi, en moyenne, de 0,86 % par pourcent de réduction de rayonnement, nos résultats montrant une perte de 1,33% du nombre de grains par épis par pourcent de réduction du rayonnement. De plus, lorsque l'on étudie la fertilité des épis plus en détails, on voit qu'avec une diminution du rayonnement d'environ 46,7 %, on obtient une réduction de 42,35 % du nombre de grains par épillet. Ces résultats sont en contradiction avec ceux de Gate (1995) qui a montré qu'avec une réduction de 70% du rayonnement, seulement 12 % de diminution du nombre d'épillets fertiles été observée.

Malgré cette importante réduction, il est possible d'identifier une variété où cette diminution est moindre : la variété 11, Claudio. Cette variété a le plus grand nombre de grains par épillet (tableau 8) et semble avoir la plus faible différence de nombre de grains par épillet entre le témoin agricole et le système agroforestier (figure 18).

Cette variété étant déjà issue d'un programme de sélection, il se peut qu'elle ait été choisie pour sa caractéristique de fort nombre de grains par épis.

B. Conclusion et perspectives

Cette année n'ayant pas été favorable aux systèmes agroforestiers, l'identification de variétés adaptées à l'agroforesterie n'a pas été concluante. Malgré cela nous avons pu identifier certaines variétés comme tolérante à l'ombre sur certaines caractéristiques, comme la variété population Algérie 2 pour son rendement, et la variété Claudio pour son nombre de grains par épis. L'hypothèse selon laquelle certaines variétés peuvent être tolérantes à l'ombre est donc partiellement validée : certaines variétés sont tolérantes à l'ombre pour une caractéristique précise. Ces caractéristiques peuvent nous permettre de commencer à mettre en place un idéotype, regroupant les caractères favorables à la tolérance à l'ombre. Ainsi, grâce à la sélection variétale, réalisée avec des variétés dont les caractéristiques de tolérance à l'ombre sont identifiées, il sera possible de regrouper les différents caractères favorables à l'agroforesterie en une seule variété.

Du fait de la particularité climatique de cette année, la favorisation d'une composante de rendement par le microclimat agroforestier n'a pas pu être observée. Cette hypothèse est donc elle invalidée. Enfin, l'hypothèse selon laquelle les variétés tardives pouvaient être favorisées par la protection du microclimat agroforestier face aux stress hydrique et thermique n'a pu être validée du fait, principalement, de l'absence de ces stress cette année.

Les perspectives de futures expérimentations sur la sélection variétale de plantes adaptées à l'agroforesterie sont diverses. Tout d'abord, en sachant qu'un programme de sélection s'étale sur une dizaine d'année, le climat peut évoluer vers un climat plus aride, il semble intéressant de réaliser ces sélections dans un milieu où les deux stress principaux de la sécheresse sont présents (hydrique et thermique), il est possible de recréer des stress hydrique par la mise en place de bâches anti-pluie, ainsi que le stress thermique par la mise en place de résistances chauffantes dans le sol ou de lampes infrarouge, mais leurs mises en place demanderait une réduction de la surface expérimentée, et une complexification du protocole expérimentale. Il serait alors intéressant de réaliser ces expérimentations dans des zones méditerranéennes où ce genre de stress est susceptible d'être présent.

Les futures expérimentations pourraient être réalisées en prenant en compte plus de caractéristiques qu'il n'a été fait cette année, et qui peuvent avoir une influence sur le facteur limitant qu'est la lumière. Par exemple, le port des plantes (des feuilles étalées plutôt que droites permettraient d'avoir une surface mieux orientée pour caper la lumière) et la surface foliaire (une plus grande surface foliaire augmenterait la surface d'échange photosynthétique).

La mise en place de variétés anciennes dans notre expérimentation s'appuie sur le désir d'observer des caractéristiques variétales particulières, qui ne seraient observables que dans ce pool génétique encore non sélectionné, c'est-à-dire des caractéristiques qui auraient pu être perdues lors des sélections, comme par exemple la capacité de produire des « feuilles d'ombre »,

c'est-à-dire de feuilles où la photosynthèse est plus efficace en situation d'ombre que des feuilles normales dans la même situation. Mais, en mettant en comparaison des variétés anciennes et des variétés déjà sélectionnées nous avons pu voir que les variétés sélectionnées sont beaucoup plus performantes par nature, et la sélection à partir de variétés anciennes demanderait beaucoup plus de temps de sélection pour atteindre le rendement potentiel des variétés sur le marché. Ainsi, pour une prochaine expérience similaire, il serait intéressant d'utiliser des variétés déjà sélectionnées, dont les caractéristiques de culture en plein soleil sont bien connues, afin d'étudier l'évolution de ces caractéristiques en système agroforestier.

De plus, nous avons pu voir que le frêne, de par son architecture et son débournement précoce, n'est pas très adapté aux systèmes agroforestiers. Le choix des arbres en agroforesterie est très important, les arbres étant implantés pour longtemps (entre 30 et 50 ans). Ainsi, il serait judicieux de choisir, pour une future expérimentation, des arbres qu'on sait déjà adaptés à l'agroforesterie, comme les noyers (Dufour et al, 2013 ; Dufour et al, 2016) dont le débournement tardif favorise les cultures intercalaires.

Pour rendre les futures expérimentations plus efficiente sur le nombre de variétés étudiées et donc sur de potentielle identification de variétés adaptées à l'agroforesterie, un agrandissement de la zone de sélection serait nécessaire. L'utilisation de nouvelles technologies de sélection variétale permettrait d'augmenter la zone de sélection et le nombre de variétés à sélectionner. Par exemple, la start-up Hi-phen propose une robotisation du phénotypage (Hi-phen, 2014), créant ainsi un gain de temps aux expérimentateurs. En utilisant un tel robot nous aurions pu étudier plus de 200 variétés au lieu de 12, sur une surface bien plus grande et avec un nombre réduit de main d'œuvre.

Enfin, la qualité du blé est un aspect qui n'a pas pu être étudié mais qui peut être important. En effet, le taux de protéines est une variable très importante pour la commercialisation du blé dur. Malgré cela, on observe aujourd'hui une baisse de la quantité de protéines présente dans le blé (Moynier, 2014). Or, les cultures de blé en agroforesterie peuvent avoir des taux de protéines élevés (Dufour et al, 2013 ; Dupraz et Liagre, 2011), l'agroforesterie peut donc être une des solutions à ce problème particulier.

Bibliographies

- Abbate, P. E., Andrade, F. H., Culot, J. P., & Bindraban, P. S. (1997). Grain yield in wheat: effects of radiation during spike growth period. *Field Crops Research*, 54(2), 245-257.
- Acreche, M. M., Briceño-Félix, G., Sánchez, J. A. M., & Slafer, G. A. (2009). Grain number determination in an old and a modern Mediterranean wheat as affected by pre-anthesis shading. *Crop and Pasture Science*, 60(3), 271-279.
- AGFORWARD. Work Package 4 [en ligne] (Page consultée le 19/05/2016). <http://www.agforward.eu/index.php/en/sylvoarable-agroforestry.html>
- Altier, MA. (1995) *Agroecology: The science of Sustainable Agriculture*. 2nd éd. Westview Press, Boulder, 433p
- Agriculture et territoires, Chambre d'agriculture de l'Hérault [en ligne] Fiche technique du blé dur. Les bases de la culture. (Page consultée le 10/07/2016)
- Association Climatologique de l'Hérault (2016), Bulletin agroclimatique de l'Hérault, Infoclim 34 n°186 à n°192
- Avalis, [en ligne] Les fiches Variétés blé dur Dakter et Claudio (page consultée le 28/07/2016)
- Fiche Claudio : http://www.fiches.arvalis-infos.fr/fiche_variete/fiches_varietes.php?id_espece=034&mode=fv&id_variete=4653
- Fiche Dakter : http://www.fiches.arvalis-infos.fr/fiche_variete/fiches_varietes.php?id_espece=034&mode=fv&id_variete=4664
- Baldy, C., Dupraz, C., & Schilizzi, S. (1993). Vers de nouvelles agroforesteries en climats tempérés et méditerranéens I. Aspects agronomiques. *Cahiers Agricultures*, 2(6), 375-386.
- Baret, F., Guyot, G., Teres, J. M., & Rigal, D. (1988, April). Profil spectral et estimation de la biomasse. In *Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing* (Vol. 287, p. 93).
- Bellia S., Delécolle TM., Douguedroit W., (2003) La sensibilité de l'agriculture aux changements climatiques : le cas du blé d'hiver en Beauce. Publication de l'Association Internationale de Climatologie, Vol.15
- Bellouezane, S. & Cosnard, D. (2016) Blé: la moisson catastrophique plonge les céréaliers dans la crise, *Le Monde*, 9 août.
- Burke, S. (1998). *Windbreaks*. Gulf Professional Publishing. 133 p.
- Brooker, R. W. (2006). *Plant–plant interactions and environmental change*. *New Phytologist*, 171(2), 271-284.
- Callaway, R. M. (1995). *Positive interactions among plants*. *The Botanical Review*, 61(4), 306-349.
- Campi, P., Palumbo, A. D., & Mastrorilli, M. (2009). Effects of tree windbreak on microclimate and wheat productivity in a Mediterranean environment. *European Journal of Agronomy*, 30(3), 220-227.

CHANGE, Intergovernmental Panel On Climate. Climate change 2007: The physical science basis. Agenda, 2007, vol. 6, no 07, p. 333.

Chavan, S., Newaj, R., Keerthika, A., Ram, A., Jha, A., & Kumar, A. (2014). Agroforestry for adaptation and mitigation of climate change. *Popular Kheti*, 2(3), 214-220.

Delabays, N., & Mermillod, G. (2002). Phenomenes d'allelopathie: premieres observations au champ. *Revue suisse d'agriculture*, 34(5), 231-237.

Demotes-Mainard, S., Doussinault, G., & Meynard, J. M. (1996). Abnormalities in the male developmental programme of winter wheat induced by climatic stress at meiosis. *Agronomie-Sciences des Productions Vegetales et de l'Environnement*, 16(8), 505-516.

den Herder M., Moreno G., Mosquera-Losada M.R., Palma J.H.N., Sidiropoulo A., Santagio Freijanes J., Crous-Duran J., Paulo J., Tomé M., Panterra A., Papanastasis V., Mantzanas K., Pachana P., Burgess P.J. (2015). Deliverable D1.2 Current extent and trends of agroforestry in the EU27 including maps. AGFORWARD 613520. 99pp. <http://www.agforward.eu/index.php/fr/current-extent-and-trends-of-agroforestry-in-the-eu27.html>

Donald, C. M. T. (1968). *The breeding of crop ideotypes*. *Euphytica*, 17(3), 385-403.

Dufour, L., André, J., Le Bec, J., & Dupraz, C. (2016) Influence of tree pollarding on crop yield in a Mediterranean agroforestry system, Book of abstract 3rd European Agroforestry Conference, Abstract 48, p308-310.

Dufour, L., Metay, A., Talbot, G., & 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, 217-227

Dupraz, C., Liagre, F., (2011) *Agroforesterie : Des arbres et des cultures*, 2^{ème} édition, Paris : Editions France agricole, p57 p 38 , Agriproduction

Fifanou, V. G., Ousmane, C., Gauthier, B., & Brice, S. (2011). *Traditional agroforestry systems and biodiversity conservation in Benin (West Africa)*. *Agroforestry systems*, 82(1), 1-13.

France Agrimer (2016). Point spécifique sur le blé dur [en ligne] (Page consultée le 11/07/16)

<http://www.franceagrimer.fr/fam/content/download/44783/427711/file/04%20-%20Point%20sp%C3%A9cifique%20bl%C3%A9%20dur.pdf>

Gate, P (1995) *Ecophysiologie du blé : de la plante à la culture*, Paris : Lavoisier

Hallema, D. W., Rousseau, A. N., Gumiere, S. J., Périard, Y., Hiemstra, P. H., Bouttier, L., ... & Olivier, A. (2014). Framework for studying the hydrological impact of climate change in an alley cropping system. *Journal of Hydrology*, 517, 547-556

Hi-phen (2014) Developper of integrated plant phenotyping systems [en ligne] (Page consultée le 07/09/2016) <http://www.hiphen-plant.com/>

Ivezic, V., Van der Werf, W., (2016) *Relative crop yield of European silvoarable agroforestry systems*, Book of abstract 3rd European Agroforestry Conference, Abstract 45, p291.

Lacombe, S. (2007). *Diminution des pertes du nitrate par lixiviation et augmentation de la diversité microbienne dans les systèmes agroforestiers*. Université de Sherbrooke

Lasbleiz, R., & Stokkink, D. (2015) *L'AGROÉCOLOGIE: Inscrire l'agriculture dans la transition*.

Lebarbier, É., & Mary-Huard, T. (2006). Une introduction au critère BIC: fondements théoriques et interprétation. *Journal de la Société française de statistique*, 147(1), 39-57.

Lin, B. B. (2007). Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology*, 144(1), 85-94.

Maathai, W. (2012). Agroforestry, Climate Change and Habitat Protection. In *Agroforestry-The Future of Global Land Use* (pp. 3-6). Springer Netherlands.

Mead, R., & Willey, R. W. (1980). *The concept of a 'land equivalent ratio' and advantages in yields from intercropping*. *Experimental Agriculture*, 16(03), 217-228.

Météo France (2010). Le climat en métropole [en ligne] (Page consultée le 21/06/2016) <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climat-en-france/le-climat-en-metropole>

Morancho, J. (2000). Production et commercialisation du blé dur dans le monde. *Durum Wheat Improvement in the Mediterranean Region: New Challenges; Options Méditerranéennes*, 40, 29-33.

Montagnini, F., & Nair, P. K. R. (2004). Carbon sequestration: an underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry systems*, 61(1-3), 281-295.

Moynier, J.F. (2014) Les leviers techniques pour l'amélioration de la teneur en protéines des blés [en ligne], *Arvalis*, (Page consultée le 06/09/2016) http://www.arvalisinstitutduvegetal.fr/_plugins/WMS_BO_Gallery/page/getElementStream.jsp?id=23766&prop=file

Olivier, A., Paquette, A., Cogliastro, A., Rousseau, A. N., Messier, C., Revéret, J. P., & Domenicano, S. (2015) Contribution de systèmes agroforestiers intercalaires à l'adaptation aux changements climatiques des agroécosystèmes.

Ramachandran Nair, P. K., Mohan Kumar, B., & Nair, V. D. (2009). Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of plant nutrition and soil science*, 172(1), 10-23.

Thevathasan, N. V., & Gordon, A. M. (2004). *Ecology of tree intercropping systems in the North temperate region: Experiences from southern Ontario, Canada*. *Agroforestry systems*, 61(1-3), 257-268.

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? Thèse de doctorat: Ecosystèmes, Montpellier: Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc.

- Tashiro, T., & Wardlaw, I. F. (1990). The response to high temperature shock and humidity changes prior to and during the early stages of grain development in wheat. *Functional Plant Biology*, 17(5), 551-561.
- Torquebiau, E. (2007) *L'Agroforesterie : des arbres et des champs*, Paris : L'Harmattan, p , Biologie, Ecologie, Agronomie
- Torquebiau, E., Mary, F., & Sibelet, N. (2002). Les associations agroforestières et leurs multiples enjeux. *Bois et forêts des tropiques*, (271), 23-35.
- Rowe, E. C., Hairiah, K., Giller, K. E., Van Noordwijk, M., & Cadisch, G. (1999). Testing the safety-net role of hedgerow tree roots by 15N placement at different soil depths. In *Agroforestry for Sustainable Land-Use Fundamental Research and Modeling with Emphasis on Temperate and Mediterranean Applications* (pp. 81-93). Springer Netherlands.
- Saïdou A., Dossa A. F. E., Gnanglè P. C., Balogoun I. and Aho N. (2012) *Evaluation du stock de carbone dans les systèmes agroforestiers à karité (Vitellaria paradoxa C.F. Gaertn.) et à néré (Parkia biglobosa Jacq. G. Don) en zone Soudanienne du Bénin*. Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin p 1-9
- Slafer, G. A., (1995) Wheat development as affected by radiation at two temperatures. *J. Agron. Crop Sci.* 175, 249–263.
- Simard-Rousseau, N (2012) *La contribution de l'agroforesterie à la lutte contre la désertification*, Essai de maîtrise : Biogéosciences de l'environnement, Québec : Université de Laval.
- Singh, I. D., & Stoskopf, N. C. (1971). Harvest index in cereals. *Agronomy Journal*, 63(2), 224-226.
- Varlet-Grancher, C., Gosse, G., Chartier, M., Sinoquet, H., Bonhomme, R., & Allirand, J. M. (1989). Mise au point: rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal. *Agronomie*, 9(5), 419-439.
- Verheij, E. (2003). *Agroforesterie*. Agromisa Foundation. 96 p.
- Witzenberger, A., & Hack, H. (1989). Erlaeuterungen zum BBCH-Dezimal-Code fuer die Entwicklungsstadien des Getreides-mit Abbildungen. *Gesunde Pflanzen*.
- Yin, R., & He, Q. (1997). *The spatial and temporal effects of paulownia intercropping: the case of northern China*. *Agroforestry Systems*, 37(1), 91-109.

ANNEXES

Annexe I : Facilitations fréquemment rencontrées dans les associations agroforestières en zone tempérée. Type de facilitation : 1 Directe par augmentation de la ressource ; 2 Indirecte par plasticité architecturale ; 3 Indirecte par plasticité physiologique ; 4 Autre (Dupraz,2011)

Ressource	Mécanisme	Type de facilitation			
		1	2	3	4
Eau	Cycles de croissance décalés, permettant d'utiliser la ressource en eau sur des périodes plus grandes	X			
	Approfondissement des systèmes racinaires sous l'effet de la compétition		X		
	Amélioration de l'infiltration par couverture du sol	X			
	Amélioration de la capacité de rétention en eau du sol par la matière organique apportée par une espèce.	X			
	Amélioration de l'efficacité de transpiration par effet brise-vent			X	
	Réduction de l'ETP par humidification de l'air par les arbres	X			
	Réduction du drainage par une utilisation plus complète dans le temps et l'espace de l'eau du sol	X			
	Captage de précipitations occultes par les arbres (condensation du brouillard)	X			
	Blocage des vents desséchants par les arbres (effet oasis)	X			
Lumière	Cycles de croissances décalés, permettant de valoriser la lumière sur des périodes plus longues	X			
	Réduction des stress thermiques à l'ombre			X	
	Protection des cultures sciaphiles (qui aime l'ombre)			X	
	Piégeage du rayonnement augmenté grâce aux réflexions multiples entre arbres et cultures	X			
Azote	Transfert d'azote fixé d'une espèce fixatrice à une espèce non fixatrice	X			
	Stimulation de la fixation d'une espèce fixatrice par la compétition d'une espèce non fixatrice			X	
	Récupération en profondeur d'azote lixivié par un enracinement profond de l'espèce associée		X		
Eléments minéraux (P, K, Ca, Mg)	Mobilisation par les racines profondes des arbres dans les zones d'altération de la roche-mère		X		
Carbone	Réduction des attaques parasitaires dans des peuplements mixtes (qui équivaut à un gain de carbone pour la plante)	X			
Multiple	Affaiblissement des adventices par l'ombre des arbres en période sans culture	X			
Information	Présence permanente dans les parcelles pour gérer les cultures permettant d'observer les arbres et d'intervenir en cas de problème				X

Annexe II : Expérience sur l'effet allélopathique de la litière de feuilles de frênes sur le pouvoir germinatif du blé dur

Objectif : La présence de feuilles mortes sur les champs après ou lors du semis est peut-être à l'origine d'une diminution de pouvoir germinatif du blé dur par une allélopathie à effet négatif des feuilles de frênes sur le blé.

Protocole :

Réalisation de l'extrait : Extraction à chaud dans de l'eau distillée

Des feuilles de frênes ramassées le 22 mars 2016, sous forme d'ancienne litière mêlée à des feuilles de micocouliers, une quantité pesant 39.97 gr est ajoutée à un volume de 300 ml d'eau osmosée. La solution est donc d'une concentration de 133.3 g/l. La préparation infuse pendant 48h à 60°. Puis elle est filtrée à travers du papier filtre, équivalent filtre à café.

Réalisation de l'expérience : Sur une couche de coton, 10 graines de blé dur de la variété de remplissage (LA 1823) sont posées, représentant environ la densité de semis réalisées dans les champs, elles sont recouverte par un papier absorbant (qui permet de mimer la pression qu'une graine enfouie reçoit par la terre qui la recouvre). Les boîtes témoins sont imbibés de 40 ml d'eau distillée et les autres de 40 ml d'extrait de feuille de frêne, l'opération est réalisée 3 fois (afin d'obtenir 3 répétitions). Il y a donc trois boîtes témoins, humidifiée par de l'eau distillée et contenant chacune dix graines, et trois boîtes humidifiées par l'extrait contenant chacune dix graines.

Les boîtes sont laissées dans une salle obscure où la température est de 9 degrés, d'après le nombre de degrés jour nécessaire à la levée (180°), la levée devrait se réaliser en 20 jours, mais seul la germination nous intéresse.

Résultats

Traitement	Numéro Boîte	05-avril	07-avril	08-avril
Témoin	1a	7	8	8
Témoin	2a	9	9	9
Témoin	3a	9	9	9
Extrait	1b	4	6	7
Extrait	2b	5	6	7
Extrait	3b	5	7	7

Tableau représentant le nombre de graines germées par boîte et par jour, l'expérience ayant débutée le 1^{er} avril.

On observe l'apparition de moisissures sur les graines dès le 7 avril, que ce soit dans les boîtes témoins ou dans les boîtes contenant l'extrait.

Un test de χ^2 a été réalisée à chacune des dates, afin d'observer un possible effet du traitement.

On observe une différence entre les traitements pour le 5 avril ($p=0.00679$), mais pas de différence entre les traitements pour les dates suivantes, le 7 avril ($p=0.0736$) et le 8 avril ($p=0.21$).

Ainsi nous pouvons déduire que le traitement, donc un extrait de litière de frêne, ralentit le processus de germination mais ne limite pas le nombre de graines germées. Ainsi le pouvoir germinatif du blé n'est pas impacté par la présence de litière de frêne. Ainsi, la litière de frêne ne possède pas d'effet allélopathique sur le blé.

Pour la réalisation de ce protocole nous nous sommes appuyés sur la bibliographie présente sur la reconnaissance d'un effet allélopathique (Nandal et Dhillon, 2005 ; Saadoui et al, 2014), mais ici le témoin est constitué d'eau distillée, or il serait possible qu'un extrait d'une litière quelconque (plante herbacée ou feuille d'arbres) serait plus adaptée en tant que témoin. De plus la litière utilisée dans cette expérience datait de 4 mois, il serait intéressant de renouveler cette expérience avec des feuilles de frênes fraîchement tombées de l'arbre.

Bibliographie et extrait de protocole étudié

Expérimentation réalisée avec des Eucalyptus

"The aqueous extracts were prepared from dry plant material. A mass of 90 g of each plant material was soaked into 1 liter of distilled water and kept at 60°C for 48 h before filtration to prepare extract of 90 g/l. "

SAADAOU, Ezzeddine, GHAZEL, Naziha, et ROMDHANE, Chokri Ben (2014). Allelopathic Effects of Aqueous Extracts of Eucalyptus occidentalis, Acacia ampliceps and Prosopis juliflora on the Germination of Three Cultivated Species. Plant Protection, vol. 9, p. 11-16.

Expérimentation réalisée avec des peupliers

"In laboratory studies, all the varieties of wheat grown in the field were screened for allelopathic effect of poplar leaf extracts by using four extract concentrations of control, 5, 10 and 20 per cent. The treatments were replicated four times in a completely randomized block design. The aqueous extracts of senescent oven dried leaf samples of poplar were prepared by soaking 5, 10 and 20 per cent by weight in distilled water for 48 hrs. Aqueous extract thus obtained was filtered through Whatman No.1 filter paper. Twenty seeds of each variety were placed in petridishes lined with doubled layer of filter paper. The seeds were moistened with 10 ml of the respective extract on first day and 5 ml on subsequent days as and when required. Distilled water was used as control. Germination and growth parameters were recorded on the seventh day after sowing."

Nandal, D. P. S., & Dhillon, A. (2005). Allelopathic effects of poplar (*Populus deltoides* Bartr Ex Marsh): an assessment on the response of wheat varieties under laboratory and field conditions. In Fourth World Congress in Allelopathy,, Wagga Wagga, NSW Australia.

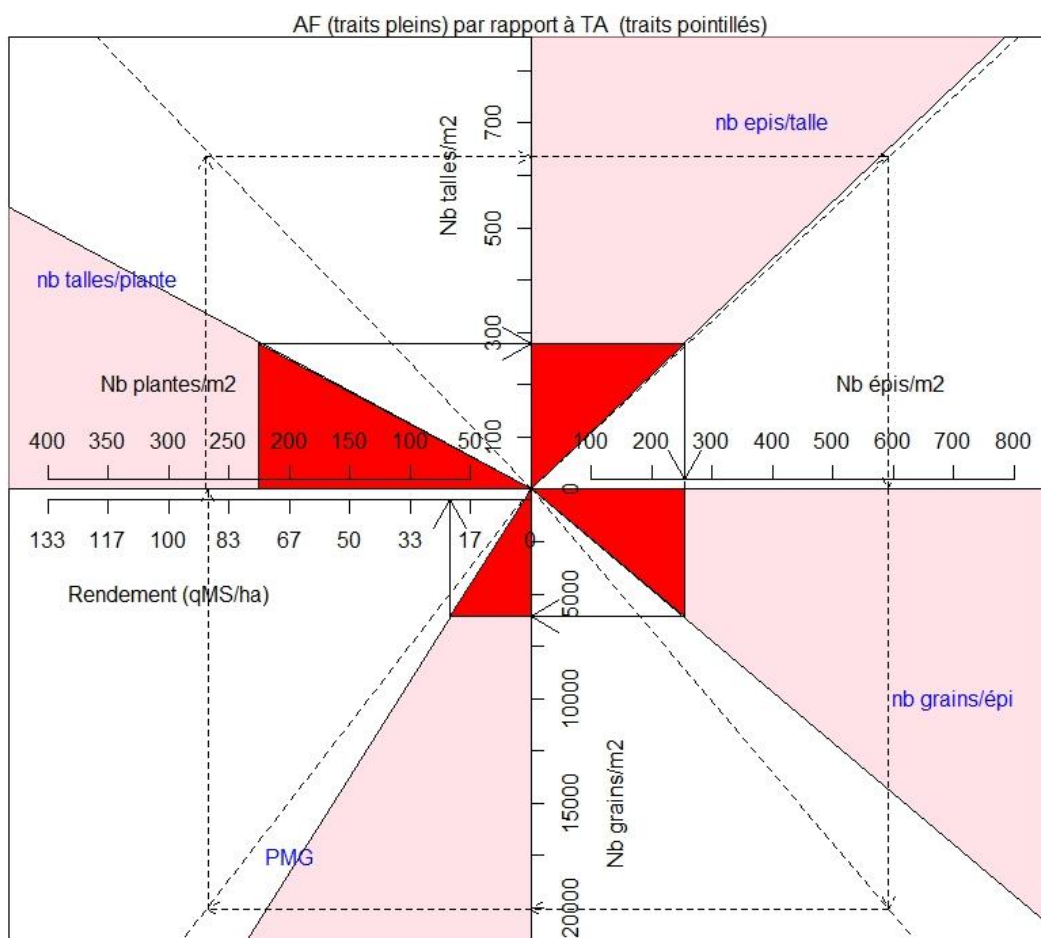


Figure 1 : Elaboration du rendement de l'orge en agroforesterie (traits pleins) et en témoin agricole (traits pointillés)

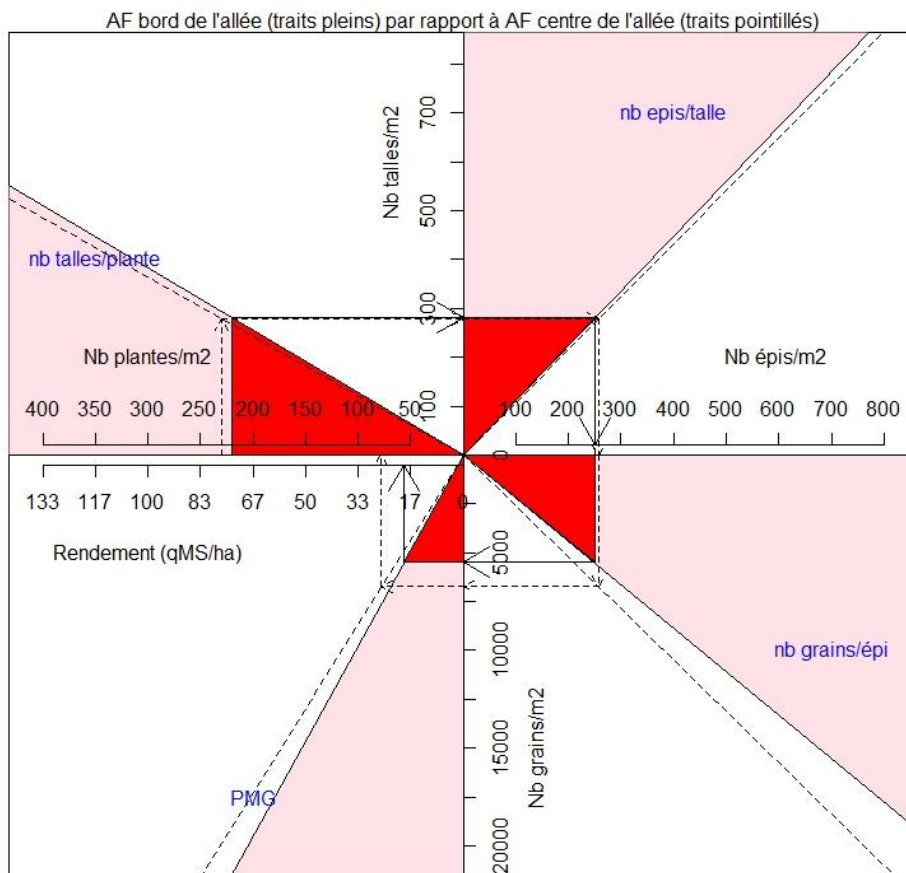


Figure 2 : Elaboration du rendement de l'orge en agroforesterie sur le bord des allées (traits pleins) et au centre des allées (traits pointillés)

Annexe III : Analyse descriptive de culture intercalaire d'orge selon le mode de production et selon la place dans l'allée cultivée en agroforesterie

Objectif : Une des allée à proximité de notre plan d'expérience (allée à l'est du bloc III sur la figure 6) a été semée avec de l'orge, dans un but de production de semences. L'allée possédant aussi les deux modes de production du fait de son agencement, il est intéressant d'étudier les composantes de rendement de l'orge.

Protocole : Une récolte manuelle a été réalisée le 14 juin 2016, le prélèvement s'est fait sur trois mètre linéaire avec trois répétitions pour chaque modalité. Deux facteurs sont étudiés : le mode de production et le placement dans l'allée cultivées (centre et bord de l'allée). En effet, on a pu observer des différences de développement de l'orge selon sa place dans l'allée, au centre de l'allée l'ombre est moins importante que sur les bords et l'orge plus développé. La récolte a été réalisée de façon à obtenir les composantes du rendement (nombre de plantes, nombre de talles, nombre d'épis) puis les épis ont été battus afin d'obtenir un nombre de grains et un poids de milles grains.

Résultats :

Nous avons réalisé deux schémas de l'élaboration du rendement avec la même méthode que pour les figures 16 et 17.

On observe (figure 1) une grande différence à partir du nombre de talles par plantes entre les deux modes de production. Il y a une perte du rendement de près de 75 % en agroforesterie par rapport au témoin agricole.

On observe sur la figure 2 une différence dans le nombre de grains par épis, il est plus important au centre de l'allée que sur les bords. On a pu observer que la répartition de la lumière est différente selon le placement dans la largeur de l'allée. L'ombre des arbres est réduite au centre de l'allée, les canopées des arbres ne se touchent pas. Comme le facteur limitant du nombre de grains par épi est principalement le rayonnement, on peut expliquer la différence observé par le rayonnement plus important au centre de l'allée.