



HAL
open science

Plasticité phénotypique des céréales en réponse à la culture en agroforesterie en région méditerranéenne

Anais Hubert

► **To cite this version:**

Anais Hubert. Plasticité phénotypique des céréales en réponse à la culture en agroforesterie en région méditerranéenne. Sciences agricoles. 2017. hal-02789402

HAL Id: hal-02789402

<https://hal.inrae.fr/hal-02789402>

Submitted on 5 Jun 2020

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

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

**Plasticité phénotypique des céréales
en réponse à la culture en
agroforesterie en région
méditerranéenne**

Anaïs HUBERT

Option Agronomie, Productions Végétales et
Environnement

2017

VetAgro Sup

Mémoire de fin d'études d'ingénieur

Plasticité phénotypique des céréales en réponse à la culture en agroforesterie en région méditerranéenne

Anaïs HUBERT

Option Agronomie, Productions Végétales et
Environnement

2017

Maîtres de stage :

Marie GOSME
Pierre-Éric LAURI

Tutrice pédagogique :

Nathalie VASSAL-
COURTAILLAC

« L'étudiant conserve la qualité d'auteur ou d'inventeur au regard des dispositions du code de la propriété intellectuelle pour le contenu de son mémoire et assume l'intégralité de sa responsabilité civile, administrative et/ou pénale en cas de plagiat ou de toute autre faute administrative, civile ou pénale. Il ne saurait, en cas, seul ou avec des tiers, appeler en garantie VetAgro Sup. »

Résumé

L'agriculture de demain devra faire face à de nombreux enjeux environnementaux, économiques et sociétaux. Avec le changement climatique, l'évolution du climat en région méditerranéenne tend à augmenter les stress thermique et hydrique qui ont des conséquences préjudiciables sur le rendement du blé dur et de l'orge. L'agroforesterie, système agricole alliant la culture des arbres et des productions agricoles, peut présenter des avantages tels que la création d'un microclimat diminuant les stress thermique et hydrique. Cependant, les arbres imposent une compétition supplémentaire pour la ressource lumineuse et pour les ressources trophiques. Leur présence impacte sur la morphologie et le développement des cultures céréalières en diminuant leur rendement.

Différentes espèces (blé dur et orge) et variétés (précoce vs tardif) ont été étudiées dans le but d'identifier celles qui s'adaptent le mieux au contexte agroforestier. Leurs différences morphologiques et de croissance induites par ce système pourraient expliquer les différences de rendement. Par le biais de mesures de la taille des feuilles étendards, de la tige et de biomasse végétale, il a été observé des différences morphologiques telles que des feuilles plus fines en agroforesterie et une biomasse végétale plus faible. Cependant, la hauteur de la tige n'est pas modifiée. Le principal facteur limitant identifié responsable majoritairement des différences morphologiques et du rendement plus faible en agroforesterie est le manque de rayonnement en lien avec la compétition aérienne. Pour diminuer cet inconvénient, le décalage phénologique entre les arbres et les cultures reste important d'où l'intérêt de semer une variété précoce.

Mots clés : agroforesterie, blé dur, orge, morphologie, microclimat, compétition aérienne

Abstract

In the future, agriculture will have to face many environmental, economic and societal challenges. With global warming, climate change in the Mediterranean region tends to increase heat and water stress, which have detrimental consequences on durum wheat and barley yields. Agroforestry, an agricultural system combining the cultivation of trees with agricultural production, can have advantages such as the creation of a microclimate that reduces heat and water stress. However, trees impose additional competition for light and nutrients. Their presence has an impact on the morphology and development of cereal crops by reducing their yield.

Different species (durum wheat and barley) and varieties (early vs. late) were studied in order to identify those that would best adapt to the agroforestry context. Their differences in morphology and growth induced by this system may explain differences in yield. By measuring the size of flag leaves, stem and plant biomass, morphological differences such as finer leaves in agroforestry and lower plant biomass were observed. However, the height of the stem is not changed. The main limiting factor identified as being responsible for the majority of the morphological differences and lower yields in agroforestry is the lack of radiation associated with aerial competition. To reduce this disadvantage, the phenological gap between trees and crops is important, hence the advantage of sowing an early variety.

Keywords: agroforestry, durum wheat, barley, morphology, microclimate, light competition

Remerciements

D'abord, je tiens à remercier toute l'équipe de l'UMR System pour leur accueil amical dans une ambiance de travail agréable.

Je remercie grandement Pierre-Éric Lauri pour son aide précieuse dans l'appropriation de mon sujet de stage ainsi que pour sa disponibilité souvent immédiate lorsque j'avais des questionnements. Je remercie également Marie Gosme pour son aide précieuse dans l'analyse des résultats.

Mes remerciements vont aussi à Nathalie Vassal-Courtaillac, tutrice de stage à VetAgro Sup.

Un grand merci à Lydie Dufour pour sa gentillesse et ses conseils sur la partie terrain et aussi aux techniciens Jeff Bourdoncle et Alain Sellier pour leur accueil et pour leur aide.

Je remercie également les doctorants de l'unité pour leurs coups de main en statistiques, leur bonne humeur et chaleureux accueil : Léo, Sébastien et Annemarjin. Sans oublier Daniel que je remercie grandement pour m'avoir permis de contribuer au travail de sa thèse.

Et je n'oublie pas les stagiaires également présents, plus ou moins longtemps, pour leur entraide et avec lesquels je partageais des astuces sur les analyses statistiques et de résultats : Nicolas, Génise, Aurore, Jouanel et Nicolas. Je tiens à remercier tout particulièrement Benjamin, stagiaire aussi, pour ses précieux coups de main sur le terrain et pour nos discussions.

Enfin, je remercie mon entourage pour m'avoir soutenue pendant ce stage, et aidée à relire le document.

Table des matières

Introduction générale	1
Contexte scientifique.....	3
I. Impacts de la présence des arbres sur les cultures annuelles	3
1. L'agroforesterie, qu'est-ce c'est ?	3
2. Création d'un microclimat au sein de la parcelle agroforestière	3
3. Rapports de compétition entre arbre et culture	4
II. Présentation des cultures de blé dur et de l'orge.....	5
1. Présentation générale du blé dur et de l'orge.....	5
2. Présentation du cycle de développement du blé dur et de l'orge et impact des stress hydriques et thermiques sur la croissance et le développement.....	6
III. Effets attendus de l'agroforesterie sur la morphologie du blé dur et de l'orge	7
1. Plasticité phénotypique	7
2. Les rapports de compétition mis en évidence par les relations d'allométrie	8
3. Impact de l'ombre des arbres sur la morphologie de la plante	8
4. Impact du microclimat sur la morphologie de l'épi.....	9
IV. Problématique de l'étude.....	9
Matériels et Méthodes	11
I. Présentation du dispositif expérimental	11
1. Lieu d'expérimentation : le domaine de Restinclières	11
2. La parcelle d'agroforesterie d'étude	11
3. Le matériel végétal étudié.....	12
4. Le plan d'expérience.....	12
II. Mesures et observations réalisées	12
1. Mesures du microclimat	12
2. Suivi de la croissance.....	13
3. Etude de la morphologie	13
4. Etude du rendement	13
III. Analyse statistique.....	14
Résultats des essais agricoles et agroforestiers	15
I. Etude des données météorologiques : caractérisation du microclimat agroforestier	15
1. Température de l'air	15
2. Rayonnement	15
II. Etude de la croissance	15
III. Etude de la morphologie.....	16

1.	Résultats des observations sur la feuille étendard	16
2.	Résultats des observations sur la morphologie de l'épi.....	18
IV.	Etude du rendement.....	18
1.	Résultats des observations sur la biomasse aérienne	18
2.	Etude de l'indice de récolte	20
3.	Observations des rendements	21
	Discussion des résultats	22
I.	Conséquence de la culture en agroforesterie sur la morphologie et la croissance du blé dur et de l'orge	22
1.	Croissance de la tige et sa hauteur	22
2.	Morphologie de la feuille étendard	23
3.	Morphologie de l'épi	23
II.	Conséquence du système agroforestier sur le rendement	24
1.	Sur la biomasse aérienne	24
2.	Sur le rendement	24
III.	Discussion autour de la rusticité.....	25
IV.	Discussion autour de la précocité.....	25
V.	Analyse critique de l'expérimentation mise en place	26
1.	Dispositif expérimental.....	26
2.	Echantillonnage	26
	Conclusion et perspectives.....	28
	Bibliographie.....	29
	Annexe	33

Liste des figures

Figure 1 : Représentation schématique du Land Equivalent Ratio

Figure 2 : Représentation schématique des changements climatiques provoqués par la présence des arbres

Figure 3 : Représentation schématique de la répartition spatiale des racines

Figure 4 : Représentation schématique des principaux stades de développement chez le blé

Figure 5 : Localisation géographique du domaine de Restinclières

Figure 6 : Vue satellite du site de Restinclières avec la localisation de la parcelle d'agroforesterie étudiée

Figure 7 : Photographie aérienne de la parcelle d'agroforesterie d'étude

Figure 8 : Photographie du dispositif agroforestier

Figure 9 : Itinéraire technique de la parcelle d'étude

Figure 10 : Représentation schématique du dispositif agroforestier et agricole subdivisé en placettes

Figure 11 : Mesures réalisées sur la feuille étendard

Figure 12 : Mesures réalisées sur l'épi

Figure 13 : Evolution de la température moyenne, minimale et maximale au cours de la journée pour les deux dispositifs

Figure 14 : Evolution de la température moyenne, minimale et maximale au cours de la journée pour les deux dispositifs

Figure 15 : Evolution du rayonnement global du 10/02/2017 jusqu'au 19/06/2017 pour le témoin agricole (TA), l'allée A en agroforesterie (AF.A), l'allée D en agroforesterie (AF.D) et l'allée F en agroforesterie (AF.F)

Figure 16 : Evolution de la hauteur de la tige principale de blé dur précoce

Figure 17 : Evolution de la hauteur de la tige principale de blé dur tardif

Figure 18 : Evolution de la hauteur de la tige principale de l'orge précoce

Figure 19 : Evolution de la hauteur de la tige principale de l'orge tardive

Figure 20 : Représentation graphique des résultats issus des mesures de longueur de la feuille étendard pour les variétés tardives et précoces du blé dur et de l'orge

Figure 21 : Relation allométrique entre la surface (cm²) et la longueur x la largeur (cm²) pour la variété précoce du blé dur

Figure 22 : Relation allométrique entre la surface (cm²) et la longueur x la largeur (cm²) pour la variété tardive du blé dur

Figure 23 : Relation allométrique entre la surface (cm²) et la longueur x la largeur (cm²) pour la variété tardive de l'orge

Figure 24 : Relation allométrique entre la surface (cm²) et la longueur x la largeur (cm²) pour la variété précoce de l'orge

Figure 25 : Longueur moyenne des barbes (cm) par système et par variété chez le blé dur

Figure 26 : Longueur moyenne des barbes (cm) par système et par variété chez l'orge

Figure 28 : Biomasse totale aérienne (g) pour l'orge par variété et par système

Figure 27 : Biomasse totale aérienne (g) chez le blé dur par variété et par système

Figure 29 : Biomasse végétative (g) pour le blé dur par variété et par système

Figure 30 : Biomasse végétative (g) pour l'orge par variété et par système

Figure 31 : Indice de récolte du blé dur par variété et par système

Figure 32 : Indice de récolte de l'orge par variété et par système

Figure 33 : Rendement en q/ha pour le blé dur précoce en fonction des 4 systèmes

Figure 34 : Rendement en q/ha pour le blé dur tardif en fonction des 4 systèmes

Figure 35 : Rendement en q/ha pour l'orge précoce en fonction des 4 systèmes

Figure 36 : Rendement en q/ha pour l'orge tardif en fonction des 4 systèmes

Liste des tableaux

Tableau 1 : Tableau de sensibilité (faible/moyenne/forte) aux fortes températures et au manque d'intensité lumineuse de quelques stades de développement du blé dur et de l'orge

Tableau 2 : Sensibilité (faible/moyenne/élevée) des différents organes d'une céréale face au manque d'eau, d'azote et aux fortes températures

Tableau 3 : Caractéristiques générales des variétés de blé dur et d'orge étudiées

Tableau 4: Récapitulatif des différents résultats significativement différents sur la feuille étendard entre le blé dur et l'orge cultivés en système agroforestier (proche ou non des arbres "bordure vs centre" indiqué respectivement par AF.Nord, AF.Sud et AF.Centre) et en plein champ (TA)

Tableau 5: Synthèse des résultats issus des observations réalisées sur les mesures de biomasse sèche pour les deux variétés de blé dur et d'orge cultivés en système agroforestier (proche ou non des arbres "bordure vs centre" indiqué respectivement par AF.Nord, AF.Sud et AF.Centre) et en plein champ (TA)

Liste des annexes

Annexe 1 : Représentation graphique des résultats issus des mesures de largeur, de surface et de SLA pour la feuille étendard du blé dur tardif et précoce et de l'orge tardive et précoce.

Annexe 2 : Représentation graphique des résultats de l'analyse statistique sur la biomasse sèche pour les deux variétés du blé dur et les deux variétés de l'orge.

Fiche des abréviations

AF : Agroforesterie

GIEC : groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

ha : hectare

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

INSEE : Institut National de la Statistique et des Études Économiques

LER : Land Equivalent Ratio

OCDE : organisation de coopération et de développement économique

SEA : Surface Equivalente Assolée

SLA : Specific Leaf Area

TA : Témoin Agricole

Introduction générale

L'agriculture de demain devra faire face à de nombreux enjeux environnementaux, économiques et sociétaux. Elle devra rester productive pour répondre aux besoins d'une population mondiale croissante tout en respectant l'environnement.

D'abord, d'un point de vue environnemental, l'agriculture devra faire face au changement climatique. L'augmentation des aléas climatiques sera dommageable pour les rendements. La région méditerranéenne sera particulièrement affectée par ce changement avec une augmentation de la fréquence des périodes de sécheresse, une baisse de l'humidité du sol et une augmentation de la température des sols entraînant un assèchement accru des sols (GIEC 2013). Les productions céréalières telles que l'orge et le blé dur, sont sensibles aux stress thermique et hydrique impactant négativement leur rendement (Kiliç et Yağbasanlar 2010; Ayeneh et al. 2002). L'évolution du climat tend à augmenter ces stress, notamment en région méditerranéenne.

De plus, d'un point de vue économique, la tendance actuelle en France est à la diminution du prix de vente des matières premières (céréales, lait,...) et à l'augmentation des coûts de production (utilisation d'une grande quantité d'intrants tels que les produits phytosanitaires, les engrais et aliments pour l'élevage) (Girard 2014). La volatilité des prix des productions agricoles ne favorise pas la viabilité économique des exploitations ni le maintien d'un revenu convenable pour l'agriculteur. Même si le prix de vente des céréales s'est stabilisé l'an passé, il a au contraire baissé pour les productions animales (INSEE 2017). Le revenu des agriculteurs a considérablement diminué ces dernières années (Girard 2014).

Et enfin, d'un point de vue sociétal, l'opinion actuelle est de moins en moins favorable à l'utilisation massive de produits phytosanitaires. La population est de plus en plus éduquée pour respecter son environnement et polluer le moins possible. L'agriculture, très présente en France avec 54% des sols du territoire métropolitain (Agreste 2015), est considérée comme l'une des plus grosses pollueuses (pollution des eaux, des sols, de l'air, perte de biodiversité). En effet, selon un rapport de l'OCDE, le prix payé par le contribuable pour diminuer l'impact de l'agriculture sur l'environnement ne cesse d'augmenter depuis 1990 (La France Agricole 2013). Ainsi la recherche de nouvelles pratiques permettant de diminuer le recours aux intrants est de plus en plus développée. Tel est l'objectif de la politique de l'agroécologie lancée en 2012 par le ministère de l'agriculture (Ministère de L'Agriculture 2015).

La recherche agronomique actuelle s'oriente donc vers la conception de nouveaux systèmes agricoles à la fois performants sur le plan environnemental (diminution des pollutions de l'eau, de l'air et du sol, protection de la biodiversité) et sur le plan économique (assurer un revenu satisfaisant à l'agriculteur) tout en faisant face aux aléas climatiques aggravés par le changement climatique.

Un système agricole qui pourrait peut-être répondre à tous ces enjeux est l'agroforesterie. Il existe différents types d'agroforesterie avec différentes associations, d'étages de végétation, et de densité d'arbres. Nous allons nous intéresser à l'agroforesterie intra-parcellaire qui associe au sein d'une même parcelle des arbres et des productions agricoles. Ce système agricole permet la production de différents produits au sein d'une même parcelle (bois, nourriture, fourrage) et diminue les impacts négatifs de l'agriculture conventionnelle sur l'environnement en contribuant à l'amélioration de la qualité de l'air, de l'eau et du sol, à la favorisation de la biodiversité et à la réduction d'intrants chimiques grâce aux régulations naturelles des ravageurs (Smith et al. 2013).

Toutefois, ce système présente des inconvénients qu'il faut pouvoir limiter tels que la compétition entre les arbres et la culture annuelle pour l'eau, la lumière et les nutriments, les phénomènes allélopathiques et les difficultés pour la gestion mécanique de la parcelle. Il y a un besoin en recherche en agroforesterie pour comprendre toutes ces interactions de compétition-facilitation (Auclair et al. 1994). L'un des points importants à élucider est la capacité des plantes cultivées, qui

ont été sélectionnées en conditions de culture pure, à s'adapter aux conditions de culture en agroforesterie.

Cadre institutionnel de l'étude

L'INRA "Institut National de la Recherche Agronomique" est le premier institut de recherche agronomique en France. Il s'agit d'un institut public rattaché au ministère de la recherche et au ministère de l'agriculture. Ses principales missions sont : la production de connaissances scientifiques dans les domaines de l'alimentation, de l'agriculture et de l'environnement, et la conception de systèmes agricoles innovants (Inra 2017).

Au sein de cette structure, l'UMR System (Fonctionnement et conduite des systèmes de culture tropicaux et méditerranéens) est une Unité Mixte de Recherche Inra-Montpellier SupAgro-Cirad-CIHEAM dont l'objectif est de concevoir des systèmes de culture écologiquement intensifs, multifonctionnels et pouvant rester productifs face aux changements climatiques. Elle cherche aussi à étudier les associations d'espèces annuelles ou pérennes, herbacées ou ligneuses dans un même espace pour permettre de produire de manière plus durable et optimale tout en bénéficiant des différents services écosystémiques offerts par les cultures associées. Ainsi, cette unité axe principalement ses études sur les systèmes agroforestiers tempérés, méditerranéens et tropicaux, sur les systèmes céréaliers méditerranéens et sur les systèmes de culture viticole. Concernant l'agroforesterie, les principales questions de recherche portent sur la détermination des rapports de facilitation et de compétition au sein des systèmes agroforestiers pour expliquer leur productivité, l'étude des services écosystémiques rendus par les arbres et la compréhension des modifications du microclimat provoquées par la présence des arbres et leur impact sur la culture (Cirad 2017).

Mon stage vient en appui d'une thèse dont le sujet est l'étude des effets des arbres sur la croissance des céréales. Cette étude passe par la compréhension et la détermination des mécanismes de compétition et de facilitation entre les arbres et les céréales en s'intéressant principalement au stress thermique et au stress hydrique. L'objectif étant d'améliorer un modèle permettant de simuler les différentes méthodes de gestion de la parcelle agroforestière (distance entre l'alignement des arbres et la culture, élagage, cernage racinaire), pour ensuite l'utiliser afin de tester la robustesse d'un système agroforestier face au changement climatique.

Ce stage est financé dans le cadre du projet européen de recherche AGFORWARD dont l'objectif principal est la promotion des pratiques agroforestières en Europe et le développement sur le terrain d'expérimentations et de parcelles de démonstration dans le but d'améliorer la viabilité des systèmes agroforestiers (AGFORWARD 2015).

Cette étude porte sur l'adaptabilité morphologique du blé dur et de l'orge en système agroforestier méditerranéen. Nous commencerons par expliciter les effets des arbres sur les cultures sous-jacentes et rappeler les caractéristiques du blé dur et de l'orge. Ensuite, le matériel et les méthodes utilisés pour la réalisation de l'expérimentation seront présentés. Pour finir, les résultats seront détaillés et suivis de leur discussion.

■ LER: Land Equivalent Ratio

$$LER = Y_{ai}/Y_{am} + Y_{bi}/Y_{bm}$$

where Y_{ai} is the yield of species a (kg of a /ha) in an intercrop with species b , and Y_{am} is the yield of a when grown in monocrop. Equally, Y_{bi} and Y_{bm} are the intercrop and monocrop yields of species b .

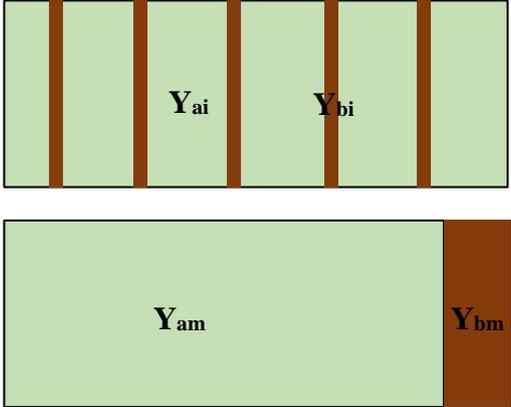


Figure 1 : Représentation schématique du Land Equivalent Ratio (Helenius 2016)

Y_{ai} représente le rendement de l'espèce a en association avec l'espèce b , et Y_{am} représente le rendement de l'espèce a en culture pure. De même pour Y_{bi} et Y_{bm} représentant les rendements de l'espèce b en association avec l'espèce a et en culture pure.

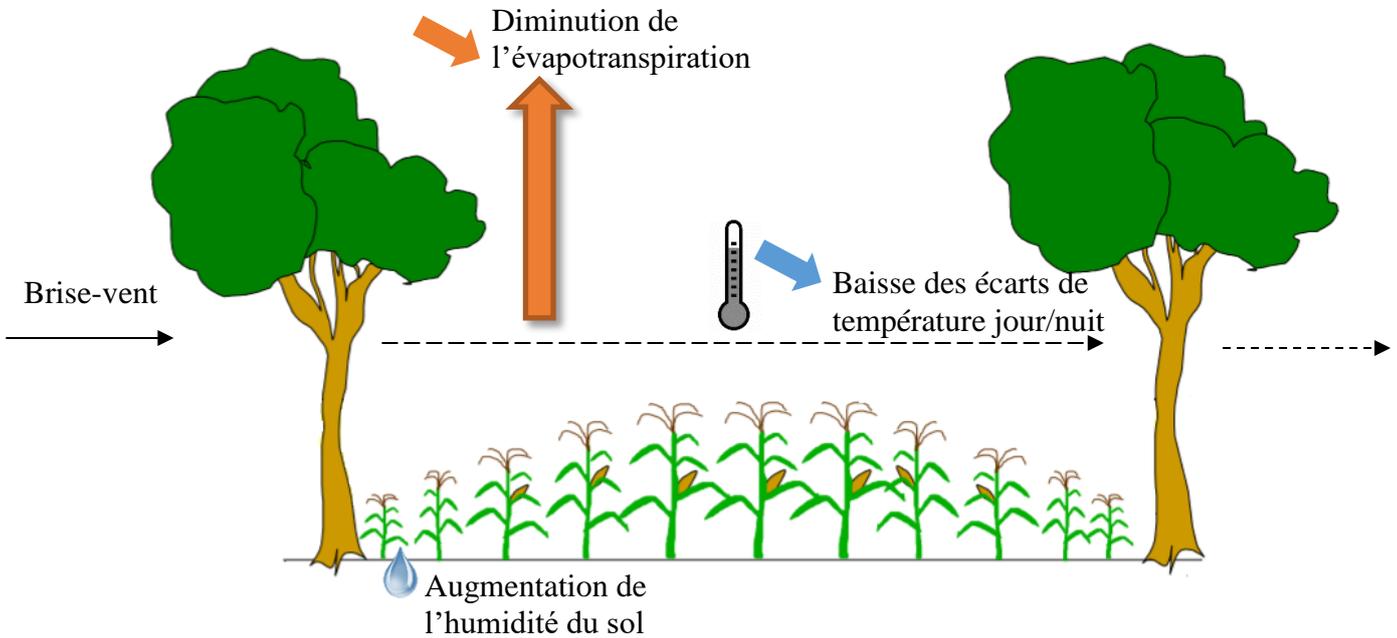


Figure 2 : Représentation schématique des changements climatiques provoqués par la présence des arbres

Contexte scientifique

I. Impacts de la présence des arbres sur les cultures annuelles

1. L'agroforesterie, qu'est-ce c'est ?

Ce système agricole associe dans l'espace et le temps une culture pérenne ligneuse et des cultures annuelles herbacées ou élevage d'animaux sur une même parcelle. Il existe trois caractéristiques que chaque système agroforestier possède théoriquement (Efadl 2015) :

- La **productivité** : l'agroforesterie a pour but de maintenir ou d'augmenter la productivité. Pour mesurer sa productivité, il faut savoir que l'agroforesterie implique la considération de productions qui se récoltent à des âges différents. Pour comparer ses résultats avec une parcelle agricole et une parcelle forestière, la SEA (surface équivalente assolée) soit la LER en anglais (Land equivalent ratio) est utilisée (figure 1). Celle-ci représente la surface nécessaire pour obtenir la même production qu'un hectare agroforestier en séparant arbres et cultures (Mead et Willey 1980). Si la SEA est supérieure à 1, alors le système agroforestier est plus productif. Par exemple, dans le Sud de la France, la SEA est souvent supérieure à 1 (Dupraz et al. 2008).
- La **durabilité** : le potentiel de production du sol est conservé principalement grâce à l'augmentation de la teneur en matière organique (Cardinael 2015), ou encore à une acidification réduite des sols (Nair 1993; Schwab et al. 2015)
- L'**adaptabilité** : un nouveau système agroforestier doit être conforme aux pratiques agricoles locales c'est-à-dire être adapté à la mécanisation agricole par exemple.

2. Création d'un microclimat au sein de la parcelle agroforestière

Chaque région possède un climat spécifique caractérisé par des moyennes de températures, de précipitations, de vent ou de rayonnement. Toutefois, plusieurs études ont montré que la présence de végétations pérennes pouvait modifier le climat local et créer un microclimat sous leur canopée. Celui-ci est généré grâce à l'ombre provoquée par les arbres et aussi par son effet brise-vent (Nair 1993). La température, l'humidité, les mouvements d'air au sein de la parcelle seront modifiés ainsi que l'humidité et la température au sol. En effet, il a été observé que la variation de température entre le jour et la nuit était davantage marquée dans une parcelle en plein champ que dans une parcelle agroforestière. De plus, la vitesse du vent est ralentie. Ces deux facteurs, température et vitesse du vent, ont un rôle dans l'évapotranspiration qui est réduite en contexte agroforestier par rapport à une culture pure (Sánchez et al. 2015). L'évapotranspiration est un élément important dans les régions où les étés sont chauds et secs et où la ressource en eau est limitante comme en région méditerranéenne. La diminution de l'évapotranspiration permet de limiter les pertes en eau du sol et donc de diminuer les stress hydriques (Sánchez et al. 2015; Svoma et al. 2016). De plus, la température du sol ainsi que la teneur en eau sont aussi modifiées grâce au microclimat (Sánchez et al. 2015). Celui-ci a l'avantage de conférer une humidité plus élevée au sol en période de sécheresse.

De plus, grâce à la présence d'ombre, les stress thermiques sont diminués. La température influe sur la croissance et l'activité photosynthétique de la plante. Une trop faible température, ou au contraire une température trop élevée, peut affecter la photosynthèse des feuilles entraînant une plus faible assimilation de CO₂ et donc une croissance ralentie de la plante (Zobayed et al. 2005). Dans le cas d'une trop forte température, la plante peut subir un stress thermique. Ce stress va engendrer des modifications physiologiques de la plante comme notamment une production plus importante de métabolites secondaires. Moins d'énergie et de métabolites primaires seront produits ce qui provoque un ralentissement de la croissance. De plus, les stress thermiques peuvent ralentir le remplissage des grains pour les céréales (Talbot 2011). Ainsi le microclimat agroforestier, qui

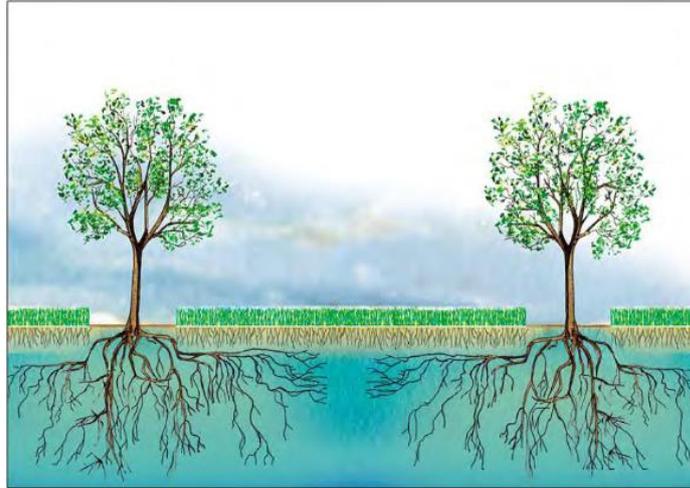


Figure 3 : Représentation schématique de la répartition spatiale des racines (Dupraz et Liagre 2008)

Les racines des arbres plongent en général en profondeur mais il faut réaliser un cernage racinaire pour éviter que les racines des arbres viennent trop concurrencer les racines des cultures.

présente des températures plus faibles durant la journée, permet d'atténuer les risques de stress thermiques et les pertes de rendement que cela entraîne.

3. Rapports de compétition entre arbre et culture

La mise en place des arbres implique un compétiteur supplémentaire pour les cultures annuelles en plus des éventuelles adventices. Les compétitions peuvent être divisées en deux sortes: les compétitions souterraines (eau, nutriments) et la compétition aérienne (lumière). Sachant que les arbres sont des plantes pérennes, leur système racinaire sera davantage développé que celui des cultures annuelles, qui doivent remettre en place un nouveau système racinaire chaque année. La compétition pour la lumière est également à l'avantage des arbres, qui occupent la strate supérieure. Cependant, il existe des complémentarités temporelles (cultures d'hiver/arbres à feuilles caduques) et spatiales (racines des cultures en surface/racines des arbres en profondeur) qui permettent aux cultures de se développer en agroforesterie.

1. Compétition racinaire

Cette compétition est liée à la capacité de prospection racinaire des plantes. Cette prospection peut être complémentaire s'il y a une ségrégation spatiale entre les racines des arbres et celles des cultures annuelles. En effet, si les essences d'arbre présentent une architecture racinaire ainsi qu'une stratégie de prospection racinaire quasi similaires à la culture annuelle, alors la compétition racinaire sera forte (Gillespie 1989). Les chênes et les noyers, par exemple, vont s'avérer complémentaires aux cultures annuelles en développant un réseau racinaire en dessous de la culture de blé (figure 3), permettant ainsi de limiter la fuite des nutriments. Tandis que d'autres essences telles que le peuplier, vont développer au contraire un réseau de racines fines allant directement faire concurrence aux racines des cultures annuelles (Borden et al. 2016). L'architecture racinaire des arbres est ainsi importante dans la compétition racinaire pouvant être préjudiciable dans le développement racinaire des cultures et donc pour l'accessibilité aux ressources trophiques.

Cependant, des études ont montré que chaque essence d'arbre n'adopte pas la même stratégie de prospection racinaire en contexte de compétition. Par exemple, en contexte forestier, les noyers développent un réseau de racines en surface tandis qu'en contexte agroforestier, les racines sont contraintes de prospecter en profondeur (Dupraz et al. 2008). La compétition entre les arbres et les cultures a dans ce cas, modifié la stratégie de prospection racinaire de l'arbre. Or cette plasticité racinaire est différente selon les essences d'arbres donc tous les arbres ne vont pas réagir de la même manière à la compétition avec les cultures annuelles.

Pour diminuer la compétition racinaire entre les arbres et les cultures, il existe quelques solutions. Par exemple, un cernage racinaire peut être réalisé. Il s'agit d'une technique utilisant une lame pour trancher les racines horizontales des arbres et ainsi stimuler leur enracinement en profondeur. Il est aussi possible de choisir des essences d'arbres avec un développement racinaire lent et une forte plasticité racinaire (Schroth 1995).

Finalement, cette compétition en ressources trophiques est difficile à observer car elle se situe sous terre, elle est donc compliquée à gérer et à étudier. Elle est liée aux ressources disponibles dans le sol et aux mécanismes d'absorption des plantes qui diffèrent selon les espèces. Il faut aussi considérer que la compétition pour les nutriments est en lien avec celle pour l'eau. L'eau est un élément important dans le sol afin de permettre la libre circulation des nutriments (Gillespie 1989).

2. Compétition aérienne

De nombreuses études ont montré que la présence d'arbres réduisait la radiation lumineuse reçue par les cultures annuelles et une diminution du rendement a souvent été observée (Reynolds et al. 2007; Rivest et al. 2009).

Cependant, il peut exister une complémentarité d'accès à la lumière lorsqu'il y a une ségrégation temporelle des stades phénologiques des arbres et des cultures. En effet, dans le cas de cultures d'hiver associées avec des arbres à débournement tardif, ces cultures peuvent se développer au moment où les arbres n'ont pas leurs feuilles. De cette manière, les cultures peuvent profiter de la lumière lors de leur cycle de développement (Dupraz et al. 2008).

Cette ségrégation temporelle est fortement dépendante des essences d'arbres utilisées ainsi que les variétés des cultures annuelles (variétés tardives ou précoces par exemple). Seuls les arbres à feuilles caduques ainsi que les cultures se récoltant avant l'été peuvent permettre cette ségrégation temporelle.

La ségrégation temporelle n'est pas toujours évidente à établir. Il existe donc d'autres moyens pour diminuer la compétition pour la lumière (Dupraz et al. 2008) :

- l'éclaircie dans la ligne d'arbres permettant de garder les meilleurs arbres tout en réduisant la compétition pour la lumière
- la hauteur d'élagage qui a aussi un effet sur l'emplacement de l'ombre dans l'inter-rang,
- la taille du houppier, selon sa forme (haut/étalé) l'ombre projetée sur les cultures n'est pas la même,
- la réduction de la largeur de la zone cultivée lorsque les arbres sont âgés car plus ils sont âgés plus le rendement en bordure des arbres est plus faible,
- l'orientation et la distance entre les lignes d'arbres. Il existe en effet, une hétérogénéité du rendement sur une parcelle agroforestière : les cultures les plus proches des arbres ayant généralement un rendement plus faible car elles sont, entre autres, les plus à l'ombre (Reynolds et al., 2007; Rivest et al., 2009).
- l'utilisation de cultivars tolérants à l'ombre. Pour les systèmes caféiers, cacaotiers et bananiers, par exemple, l'agroforesterie présente un fort avantage pour ces cultures tolérantes à l'ombre (Rodrigo et al. 2001; Mu et al. 2010).

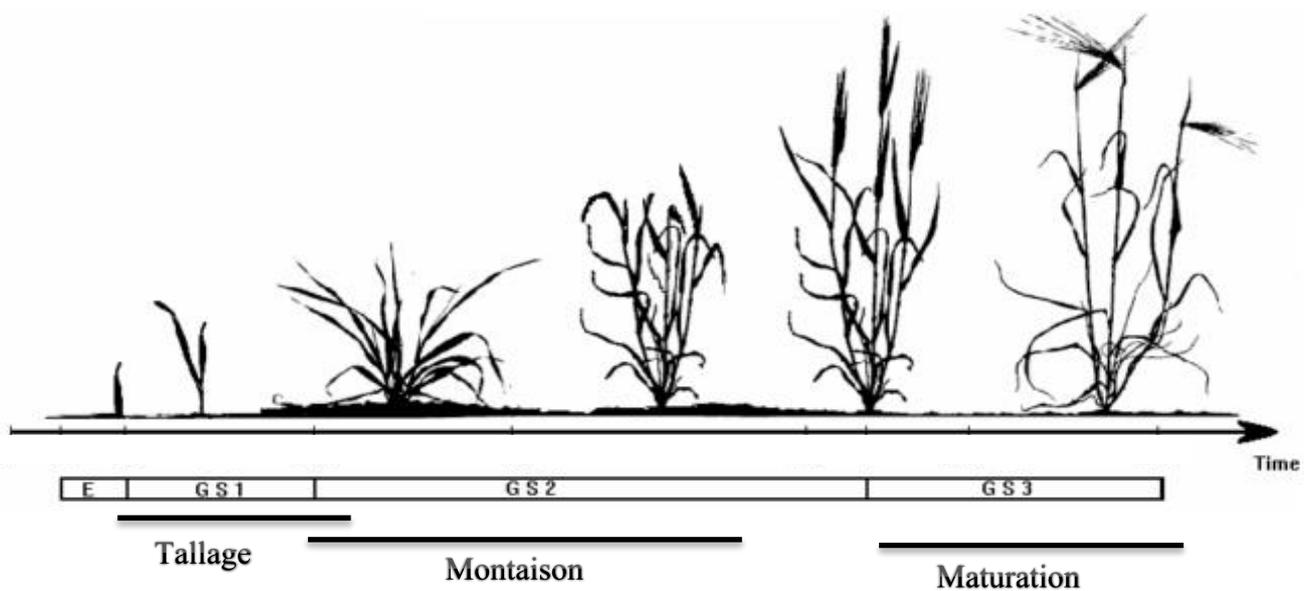
Les interactions instaurées entre les arbres et les cultures annuelles sont complexes et multiples. Elles peuvent être bénéfiques comme néfastes pour ces cultures. Toutefois, chaque culture ne réagit pas de la même manière. Nous allons nous intéresser spécifiquement à la culture de blé dur et d'orge, les deux cultures céréalières utilisées pour notre étude.

II. Présentation des cultures de blé dur et de l'orge

1. Présentation générale du blé dur et de l'orge

La culture de blé dur et la culture d'orge sont des cultures de céréales à paille. Elles sont cultivées dans de nombreux pays dont les plus gros producteurs sont l'Amérique du Nord, l'Union Européenne, la Russie et l'Ukraine. La production mondiale d'orge est en moyenne de 140 millions de tonnes dont 10 millions produits en France tandis que la production mondiale de blé dur s'élève à environ 38 millions de tonnes par an dont 2 millions produits en France (FranceAgriMer 2015).

Le blé dur est utilisé notamment pour la fabrication de pâte et de semoule (Peña 2002). Il s'agit de la première céréale cultivée en région méditerranéenne (Alliès et al. 2011) qui est principalement cultivée pour la consommation humaine à la différence de l'orge qui est utilisé, entre autres, pour l'alimentation animale. L'orge est cultivée autant dans les régions tempérées que les régions semi-arides. Il s'agit d'une culture s'adaptant facilement à des environnements différents. Par exemple, elle est cultivée à 4200m d'altitude sur les Andes Boliviennes mais aussi à 330m d'altitude près de la Mer Morte (Taner *et al.* 2004). Il s'agit donc d'une céréale ayant une plasticité phénotypique. De même, le blé est cultivé dans de nombreux pays à climat différent et possède aussi une plasticité phénotypique.



E : germination et levée

GS1 : de levée au stade double nœud

GS2 : du double nœud à l'anthèse

GS3 : de l'anthèse à la maturité

Figure 4 : Représentation schématique des principaux stades de développement chez le blé (Acevedo et al. 2002, adapted from Slafer and Rawson 1994)

De plus, ce sont des plantes en C3 qui sont mieux adaptées à l'ombre que les plantes en C4 (Bayala et al. 2012) conférant un avantage dans un contexte agroforestier.

2. Présentation du cycle de développement du blé dur et de l'orge et impact des stress hydriques et thermiques sur la croissance et le développement

Le cycle de développement des céréales se décomposent en deux grandes phases : une phase végétative et une phase reproductive. Leur cycle de développement peut se décomposer en 5 grandes étapes telles que représentées sur la figure 4 : d'abord un stade de germination et de levée (E), puis un premier stade de croissance de la levée jusqu'au 2^{ème} nœud (GS1), puis un deuxième stade de croissance du 2^{ème} nœud à l'anthesis (GS2) et enfin un troisième stade de croissance (GS3) allant de l'anthesis à la maturité comprenant le remplissage des grains. On considère que la maturité est atteinte lorsque l'épi et la feuille étandard deviennent entièrement jaunes, il n'y a plus concentration de la matière sèche vers le grain et son poids en eau diminue (Gate 1995). La durée de passage d'un stade phénologique à un autre dépend de la température, de la durée du jour et du génotype (Acevedo et al. 2002).

▪ Impacts des fortes températures sur les céréales (stress thermique)

La croissance de ces céréales est en partie déterminée par le taux d'assimilation du CO₂. Cette assimilation va dépendre en partie de la température et est en lien avec l'activité photosynthétique, métabolisme vital pour la plante produisant de l'énergie et des assimilats. Il existe une température optimale où l'activité photosynthétique est la plus active. Elle est liée aussi à la vigueur de la plante : plus la surface foliaire sera élevée, plus l'activité photosynthétique sera importante (Acevedo et al. 2002). La surface foliaire dépend à la fois du nombre de feuilles et de la surface de chaque feuille. Ce nombre final de feuilles dépend de la température (Gate 1995; Kirby 1988).

De très fortes températures seront responsables d'une accélération dans le cycle de développement des céréales et ainsi d'une taille réduite de la plante (Ayeneh et al. 2002). En effet, l'apparition de nouveaux organes végétatifs et reproducteurs est dépendante de la somme des températures : si les organes reproducteurs apparaissent plus tôt, les ressources nutritionnelles seront allouées à leur mise en place et non plus pour la croissance de la plante (Gate 1995). Une tige plus petite pourra être moins compétitive sur les adventices.

▪ Impacts d'un manque d'eau sur les céréales (stress hydrique)

Un stress hydrique impacte non seulement la croissance en la ralentissant, mais aussi la phénologie, en augmentant la vitesse de développement, ce qui limitera la production de biomasse. Il écourtera la durée de montaison et la durée de remplissage des grains si ce stress a lieu lors de ces stades de développement (Kiliç et al. 2010). Un manque d'eau provoque un arrêt de la turgescence, phénomène indispensable pour l'expansion cellulaire et l'ouverture/fermeture des stomates. Ces derniers se ferment en entraînant un ralentissement de l'activité photosynthétique. Ce métabolisme est essentiel pour fournir l'énergie et les assimilats nécessaires à la vie de la plante. S'il est altéré, la croissance du végétal est ralentie et les stades de développement sont écourtés (Gate 1995). Le manque d'eau peut aussi diminuer la quantité de matière sèche accumulée dans le grain s'il a lieu lors du remplissage de ce dernier (Gate 1995).

▪ Impacts d'un manque de rayonnement sur les céréales

Comme nous l'avons vu, l'activité photosynthétique est le métabolisme vital pour la plante et est responsable du bon déroulement de son développement. Cette activité, pour fonctionner de manière optimale, est très sensible à de nombreux facteurs : la température, le déficit en eau mais aussi au faible rayonnement. En effet, la photosynthèse a besoin pour fonctionner de l'énergie lumineuse. Dans le cas d'un faible rayonnement, ce processus biologique ne fonctionnera pas à son maximum pouvant être à l'origine d'une limitation de la croissance (Gate 1995).

Le tableau 1 résume ces effets en indiquant la sensibilité des stades de développement de la culture aux stress thermiques et hydriques.

Tableau 1 : Tableau de sensibilité (faible/moyenne/forte) aux fortes températures et au manque d'intensité lumineuse de quelques stades de développement du blé dur et de l'orge (Abrol et Ingram 1999)

Stade de développement	Fortes températures	Manque Intensité lumineuse
Levée	forte	faible
tallage	forte	forte
Montaison	Moyenne/forte	forte
Maturation	forte	moyenne

Les divers organes de la plante (tige, feuille et épi) ont une sensibilité différente aux facteurs abiotiques et à la compétition pour les ressources (cf tableau 2).

Tableau 2 : Sensibilité (faible/moyenne/élevée) des différents organes d'une céréale face au manque d'eau, d'azote et aux fortes températures (Blum 1986; Gastal 2002; Kiliç et Yağbasanlar 2010)

Organes	Déficit en eau	Déficit en azote	Fortes températures
Feuille	Forte	Forte	Forte
Tige	Forte	Forte	Moyenne
Epi	Moyenne	Moyenne	Moyenne

En contexte agroforestier, on peut supposer que la croissance des céréales est impactée négativement du fait de la concurrence pour les ressources en eau et en azote. Toutefois, cette compétition peut être compensée en partie par le microclimat agroforestier qui diminue les risques de stress hydriques et de stress thermiques. Ainsi en bénéficiant des interactions positives et en limitant les interactions négatives, le cycle de développement des cultures céréalières ainsi que leur croissance pourraient être moins affectés par la culture en agroforesterie.

Après avoir vu les interactions existant entre les arbres et les cultures, les facteurs abiotiques raccourcissant le cycle de développement et la croissance des cultures céréalières, nous allons nous intéresser à la plasticité phénotypique en réponse à la compétition avec les arbres et au microclimat agroforestier. Les plantes ont la faculté de s'adapter à leur environnement en modifiant leur morphologie. Mais comment le blé dur et l'orge réagissent-ils morphologiquement face à la présence des arbres ?

III. Effets attendus de l'agroforesterie sur la morphologie du blé dur et de l'orge

Ce qui nous intéresse dans cette partie est de déterminer comment ces plantes céréalières se comportent face à la compétition avec les arbres. Expérimentalement, les études sur ce sujet ont été réalisées soit dans les conditions naturelles, soit en conditions contrôlées en simulant la présence de l'arbre par la création d'un ombrage.

1. Plasticité phénotypique

La plasticité phénotypique est selon Bradshaw (1965), la capacité d'un génotype à exprimer différents phénotypes en fonction de son environnement. Les traits plastiques des plantes sont modifiés, sans changement du génotype, en réponse aux signaux environnementaux (Grenier 2011).

Le blé dur et l'orge sont deux céréales ayant une plasticité phénotypique, elles peuvent obtenir un phénotype adapté à leur environnement (Acevedo *et al.*, 2002; Taner *et al.*, 2004). Cette plasticité est différente selon les organes de la plante et les espèces, c'est-à-dire que plus la plasticité sera forte, plus la plante aura une capacité importante à modifier sa morphologie face aux changements environnementaux. Par exemple, pour le blé tendre, une forte plasticité de la tige (qui sera plus ou moins longue) est associée à une faible plasticité du rendement en haute altitude (Peltonen-Sainio *et al.* 2011).

Cette plasticité est d'autant plus intéressante qu'elle permettrait aux plantes de s'adapter à leur environnement. L'adaptation représente la capacité d'une plante à modifier un caractère anatomique ou un processus physiologique dans le but d'améliorer la survie et le succès reproducteur de la plante (Grenier 2011), et, dans le contexte agronomique, le rendement. Ainsi selon les contraintes imposées (compétition, microclimat), la plante compenserait la contrainte, ce qui permettrait d'obtenir un rendement moins affecté qu'une plante se développant sans ces contraintes.

2. Des rapports de compétition mis en évidence par les relations d'allométrie

Les relations d'allométrie consistent en des relations linéaires entre différents caractères d'une plante. Par exemple, il existe des relations permettant de déterminer la surface foliaire telles que la longueur et la largeur des feuilles sont corrélées avec la surface foliaire ou seulement la longueur ou la largeur corrélée avec la surface foliaire. La longueur, la largeur et la combinaison de ces deux variables sont des paramètres classiques pour établir des modèles de détermination de surface foliaire (Cho *et al.* 2007). Cependant, les rapports de compétition vont modifier la forme des plantes et ainsi modifier les relations d'allométrie (Weiner *et al.* 1992). Ces dernières permettent donc de mettre en évidence des rapports de compétition plus ou moins forts. On s'attend donc à ce que les relations allométriques soient différentes entre des plantes cultivées en culture pure et des plantes cultivées en agroforesterie, c'est-à-dire soumises à la compétition avec les arbres.

Les relations d'allométrie sont différentes pour chaque espèce et pour chaque variété (Semchenko *et al.* 2005).

3. Impact de l'ombre des arbres sur la morphologie de la plante

1. Sur les feuilles

Les arbres vont limiter par leur ombre, plus ou moins importante en fonction de la taille de leur houppier, l'interception de la lumière par les cultures annuelles. Celles-ci sont contraintes de s'adapter pour produire toujours autant de grains. Certaines études ont observé des adaptations morphologiques des cultures céréalières face au manque de lumière. Sous l'effet de l'ombre, les cultures ont tendance à développer des feuilles plus fines avec une surface plus grande (Valladares *et al.* 2003, Li *et al.* 2010). Il est nécessaire d'optimiser la capture de la lumière dans le cas d'une culture sous les arbres. La finesse des feuilles est déterminée par la SLA (Specific Leaf Area: surface foliaire par unité de poids). Il faut savoir que la SLA est utilisée comme un indicateur des processus basiques de la feuille tels que la capacité photosynthétique et le potentiel de croissance. Il a été montré que la SLA est inversement proportionnelle au rayonnement reçu par la plante (Rawson *et al.* 1987). En agroforesterie, l'ombre des arbres devrait donc conduire les céréales à mettre en place des feuilles plus fines que les feuilles des cultures en plein soleil.

Ce comportement des feuilles est aussi vérifié pour la feuille étendard. Cette feuille est la dernière à émerger avant l'épiaison. Son rôle est important dans le remplissage des grains (Nagelkirk *et al.* 2011) puisque celle-ci distribue principalement ses assimilats à l'épi (Rawson *et al.* 1969). D'après Li *et al.* (2010), un fort ombrage rendrait cette feuille plus fine comme pour les autres feuilles de la plante.

Ensuite, comme on l'a vu dans la partie sur le développement du blé et de l'orge, le nombre de feuilles des céréales est sensible au rayonnement pendant la phase végétative. Il est donc possible

que le nombre de feuilles soit différent selon que ces cultures sont cultivées ou non sous des arbres. Il a été observé chez l'avoine, une autre plante céréalière, que le nombre de feuilles variait en fonction de l'intensité lumineuse. Si l'intensité lumineuse est très faible, le nombre de feuilles est plus faible. Mais les différentes variétés d'avoine testées ne présentaient pas toutes les mêmes réponses face à une faible intensité lumineuse (Semchenko et al. 2005). Ainsi, même si aucune étude n'a étudié l'impact des arbres sur le nombre de feuilles de l'orge et du blé, on peut supposer que l'ombre des arbres réduirait le nombre de feuilles du blé et de l'orge puisque l'intensité lumineuse perçue par les cultures est plus faible en contexte agroforestier.

Un nombre de feuille plus faible ainsi qu'une épaisseur de feuilles réduites auront des conséquences sur l'activité photosynthétique qui sera moins importante. Or il a été montré qu'il existe un lien entre l'activité photosynthétique de la feuille étendard et la durée de remplissage des grains (Gelang et al. 2000). Cette feuille contribue au moins à 90% au poids du grain à la récolte (Gurnade et al. 1981). Beaucoup d'études montrent le lien entre l'épaisseur de la feuille étendard et le rendement (Merah et al. 2001; Evans 1983). En contexte agroforestier, on connaît peu l'impact des arbres sur ce trait morphologique excepté que l'effet d'ombrage jouerait sur l'épaisseur de la feuille.

Cette compétition pour la lumière aurait donc des répercussions sur la morphologie des feuilles des cultures annuelles. Elle se manifesterait par une diminution de l'épaisseur des feuilles lorsque la culture annuelle est proche de la ligne d'arbres et où l'ombrage est le plus conséquent. Cette diminution d'épaisseur engendre une activité photosynthétique moindre d'où un rendement plus faible (Mu et al. 2010). Cependant, cette diminution d'épaisseur de la feuille pourrait être atténuée lorsque les céréales sont tolérantes à l'ombre (Mu et al. 2010).

2. Sur la tige

Un manque de rayonnement peut aussi être à l'origine de la modification de la morphologie de la tige. En effet, pour faire face à cette contrainte, la plante cherche à maximiser la capture de la lumière ce qui entraîne une élongation plus importante de la tige (Valladares et al. 2003). On peut supposer, qu'en système agroforestier, les tiges seront plus hautes proches des arbres qu'au centre de l'inter-rang puisque l'ombre est plus importante proche des arbres.

4. Impact du microclimat sur la morphologie de l'épi

Le microclimat, comme nous l'avons vu dans la première partie, engendre des modifications de température de l'air au sein de l'inter-rang. Or la longueur des barbes des épis est corrélée à la différence de température entre leur température et celle de l'air ambiant. Les barbes jouent en effet, un rôle essentiel dans le rafraîchissement de la température de la canopée des céréales (Ferguson et al. 1973) et dans le remplissage des grains. Etant vertes lors de cette phase, elles ont encore une activité photosynthétique et leurs assimilats vont directement pour les futurs grains. En conséquence, la longueur des barbes a souvent été un critère de sélection pour améliorer le rendement dans les régions à fortes températures et pour lutter contre le stress thermique (Ayeneh et al. 2002; Blum 1986). Ainsi, comme la température est un peu plus faible dans l'inter-rang agroforestier, on peut supposer que les barbes auront des longueurs plus petites qu'en plein champ.

IV. Problématique de l'étude

Le développement et la croissance des cultures de blé dur et d'orge sont sensibles à la température, à l'intensité lumineuse et à la disponibilité en ressource en eau et en minéraux. Une faible intensité lumineuse, une carence en azote, un stress hydrique ou encore un stress thermique vont avoir des effets sur les feuilles en réduisant leur nombre, leur teneur en chlorophylle, en augmentant leur surface ou encore des effets sur la tige en modifiant leur longueur, et des effets sur

la production de biomasse. Ces modifications sur la morphologie et sur la croissance peuvent avoir un impact négatif sur le rendement ou positif en cas de stress thermique et/ou hydrique. Ces stress hydriques et stress thermiques risquent fortement d'augmenter dans les années à venir avec le changement climatique. Des solutions telles que la sélection génétique ou l'agroforesterie sont étudiées pour réduire l'impact de ces stress sur les cultures annuelles et ainsi sur leur rendement. L'agroforesterie, système agricole alliant la culture des arbres et des productions agricoles peut présenter des avantages tels que la création d'un microclimat diminuant les stress thermique et hydrique. Cependant, les arbres imposent une compétition supplémentaire pour la ressource lumineuse et pour les ressources en eau et en nutriments. Faut donc trouver le bon compromis entre les effets bénéfiques de l'agroforesterie et les impacts négatifs de la compétition. Beaucoup d'études ont explicité les interactions racinaires et aériennes qui existent entre les arbres et les cultures, et leur impact négatif ou positif sur le rendement. Cependant peu d'études se sont penchées sur les changements au niveau de la phénologie et de la morphologie de la plante, alors que ces modifications peuvent relever d'adaptations à la culture en agroforesterie, c'est à dire à la capacité de la culture céréalière à exprimer un fort rendement malgré des aléas climatiques ou des compétitions.

La problématique de l'étude qui est menée ici, est d'observer la capacité d'adaptation à l'agroforesterie de deux cultures céréalières (blé dur et orge) cultivées en région méditerranéenne au travers de leur plasticité phénotypique. La question générale qui en découle est : comment les espèces céréalières se comportent face à la compétition avec les arbres et au microclimat provoqué par ces derniers, en termes de morphologie (longueur de la tige, surface et épaisseur des feuilles) et de croissance (dynamique de croissance et rendement) ?

Nous allons par ailleurs nous demander quelles sont les espèces céréalières ou les variétés qui sont le mieux adaptées à la compétition avec les arbres tout en assurant un rendement correct pour l'agriculteur ?

D'après l'étude bibliographique, nous pouvons formuler les hypothèses suivantes, que nous tâcherons de tester expérimentalement :

- La présence des arbres se répercute sur la morphologie du blé dur et de l'orge, notamment sur :
 - Les feuilles qui seront plus petites et plus fines
 - La hauteur de la tige principale qui sera plus grande
 - Des épis plus petits avec des barbes plus courtes
- Ces modifications morphologiques auront un impact sur le rendement
 - La biomasse végétale aérienne sera plus faible

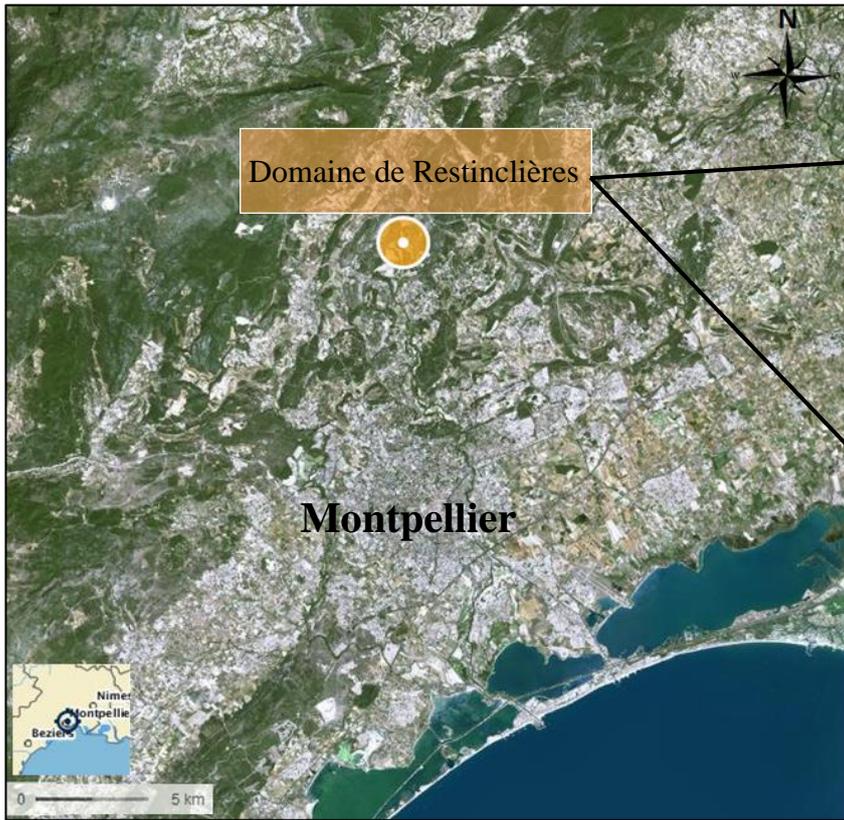


Figure 5 : Localisation géographique du domaine de Restinclières, source : *google maps*

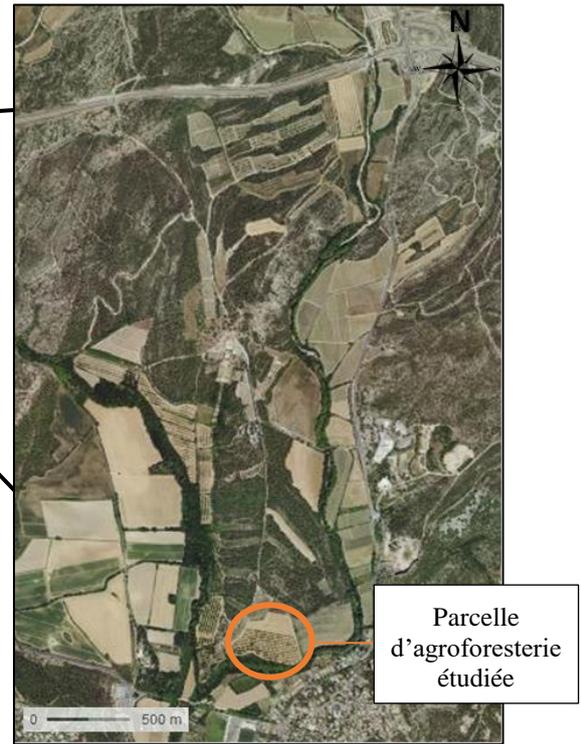


Figure 6 : Vue satellite du site de Restinclières avec la localisation de la parcelle d'agroforesterie étudiée, source : *géoportail*



Figure 7 : Photographie aérienne de la parcelle d'agroforesterie d'étude, source : *géoportail*

Matériels et Méthodes

I. Présentation du dispositif expérimental

1. Lieu d'expérimentation : le domaine de Restinclières

Le domaine de Restinclières se situe à une quinzaine de kilomètres au nord de Montpellier (figure 5). Sa surface s'élève à 220ha dont 54ha de terres cultivables. Il s'agit d'un domaine départemental où une expérimentation en agroforesterie a été mise en place il y a 20 ans. A l'origine, il s'agissait d'une volonté du conseil général de l'Hérault qui, pour se distinguer des habitudes politiques publiques en matière de gestion forestière et agricole, avait choisi de développer une expérience originale : l'agroforesterie. A l'époque, ce projet semblait marginal mais était cohérent avec la volonté de créer une ceinture verte autour de l'agglomération de Montpellier. L'aménagement agroforestier, réalisé dans les années 1990, a été élaboré en considérant les conditions agricoles modernes d'une exploitation (les distances de plantation ont été conçues de manière à laisser le passage des engins agricoles). Plusieurs essences d'arbres à bois précieux, telles que noyers et cormiers, ont été plantées en association avec des cultures pérennes comme la vigne ou des cultures annuelles comme le blé, l'orge et le colza (Fournier 2002).

Le climat est le climat méditerranéen caractérisé par des automnes et printemps doux et pluvieux, des hivers doux et secs, et des étés très chauds et secs. Le problème rencontré dans ce département reste les périodes de sécheresse, des vents violents et des pluies violentes (Chambre d'Agriculture de l'Hérault 2010).

2. La parcelle d'agroforesterie d'étude

1. Vue d'ensemble de la parcelle

La parcelle d'étude est située à l'extrémité sud du domaine (figure 6). La surface de cette parcelle s'élève à environ 5,5 ha dont 3,8 ha de culture en agroforesterie et 1,7 ha en plein champ (figure 7).

Le type de sol est limono-argileux. L'essence d'arbre plantée est le noyer hybride c'est-à-dire un croisement entre le noyer commun (européen) et le noyer noir (américain), qui, contrairement au noyer commun, ne donne pas de noix comestibles (CRPF Languedoc-Roussillon 2007) mais qui a une vitesse de croissance supérieure. Cette essence d'arbre est très recherchée pour sa qualité de bois en menuiserie. Toutefois, il nécessite des conditions d'implantation particulières : un sol profond et meuble avec une nappe phréatique accessible, un sol neutre ou légèrement calcaire et une pluviométrie autour de 700mm. Les lignes d'arbres sont orientées selon une direction Est-Ouest et séparées de 13 m les unes des autres, tandis que les arbres étaient espacés de 4m le long de la ligne au moment de la plantation. Au bout de 10 ans, une éclaircie a été effectuée pour conserver un arbre sur deux, en gardant, par groupe de 4 arbres, les 2 arbres de meilleure qualité. De ce fait la distance actuelle entre arbres le long de la ligne varie de 4 m (lorsque les deux meilleurs arbres étaient côte à côte) à 20 m maximum (lorsque les deux mauvais arbres d'un groupe de 4 jouxtaient les 2 mauvais arbres du groupe suivant) (figure 8). La densité d'arbres se situe entre 100 à 120 arbres/ha. Les arbres ont été plantés en 1995 et ils seront récoltés à l'âge de 35-40 ans.

La conduite agricole des parcelles est gérée par un agriculteur dont l'itinéraire technique pour la parcelle d'étude est représenté sur la figure 9. La gestion des arbres est à la charge du département. La rotation réalisée sur cette parcelle est une rotation blé-orge-pois.



Figure 8 : Photographie du dispositif agroforestier (09/06/2017)

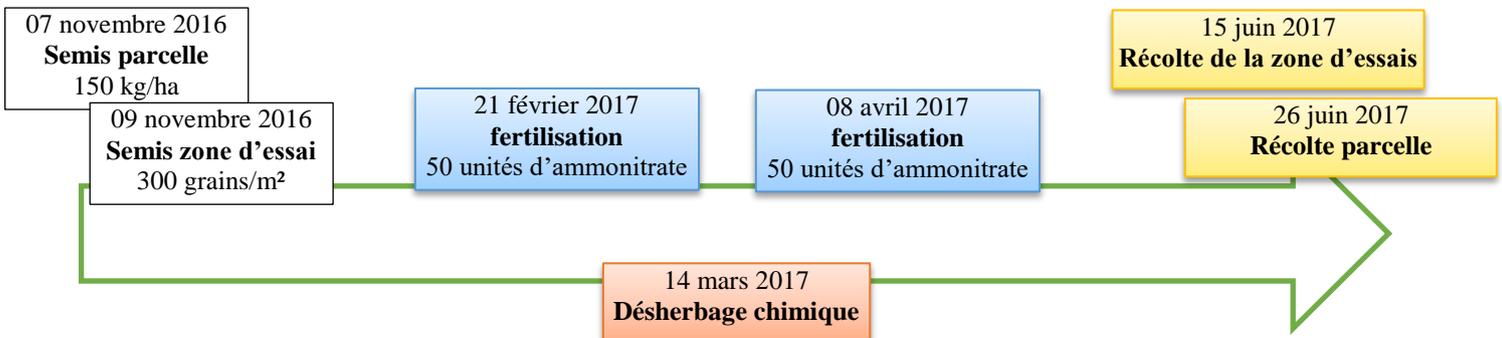


Figure 9 : Itinéraire technique de la parcelle d'étude

2. Les dispositifs étudiés

Sur cette parcelle expérimentale, 5 dispositifs ont été mis en place: un dispositif anti-pluie en agroforesterie, un témoin agroforestier sans traitement particulier, un dispositif dont les arbres ont été élagués, un dispositif où un cernage racinaire a été pratiqué et un dispositif combinant l'élagage des arbres et le cernage racinaire.

Dans cette étude, les mesures ont été réalisées seulement sur le dispositif agroforestier sans traitement particulier puis comparées aux mesures réalisées sur le témoin agricole (figure 7).

3. Le matériel végétal étudié

Deux espèces sont étudiées : le blé dur et l'orge. Pour chaque espèce, Deux variétés sont observées : une variété précoce et une variété tardive (chaque variété a donc un génotype différent de l'autre). Ce sont des variétés commercialisées et sélectionnées pour leur haut potentiel de rendement. Une variété précoce, à la différence d'une variété tardive, aura un cycle de développement plus rapide. Elle aura moins besoin de degré-jour (c'est-à-dire la somme de température depuis le semis) pour atteindre la maturité.

Tableau 3 : Caractéristiques générales des variétés de blé dur et d'orge étudiées (Arvalis 2016)

Espèce	Variété	Précocité	Tolérance au froid	PMG
Blé	Claudio	Précoce	Sensible	Gros grain
Blé	Karur	Tardif	Peu sensible	Gros grain
Orge	Orpaille	Précoce	Peu sensible	Très gros grain
Orge	Cassia	Tardif	Sensible	Gros grain

4. Le plan d'expérience

Dans cette étude, 2 modalités sont étudiées : le dispositif agroforestier et le témoin agricole. Le dispositif agroforestier est décomposé en 4 microparcelles de 1,55m de large et 10m de long dans chacune des 3 positions (Nord, centre et Sud de l'inter-rang) (figure 10). Dans chaque microparcelle, une variété de blé dur ou d'orge a été semée. La répartition des variétés a été réalisée au hasard. Au total, chaque variété de blé dur et d'orge qui a été plantée est présente dans les trois positions de l'inter-rang. De cette manière, l'influence des arbres devra être plus marquée sur les microparcelles adjacentes aux arbres que celles au centre du dispositif.

II. Mesures et observations réalisées

1. Mesures du microclimat

La présence des arbres induit un microclimat. Ce dernier est déterminé par la température, l'humidité relative de l'air et l'humidité du sol, le rayonnement et la pluviométrie. Des capteurs ont été posés sur le dispositif agroforestier et agricole. Les capteurs sont positionnés au niveau des trois positions étudiés c'est-à-dire au Nord de l'inter-rang, au centre ainsi qu'au Sud.

Les mesures de rayonnement global et de la température de l'air ont été réalisées automatiquement tout au long de l'expérimentation en continue par des capteurs (pyranomètre et thermistance) fixés horizontalement au-dessus du couvert végétal.

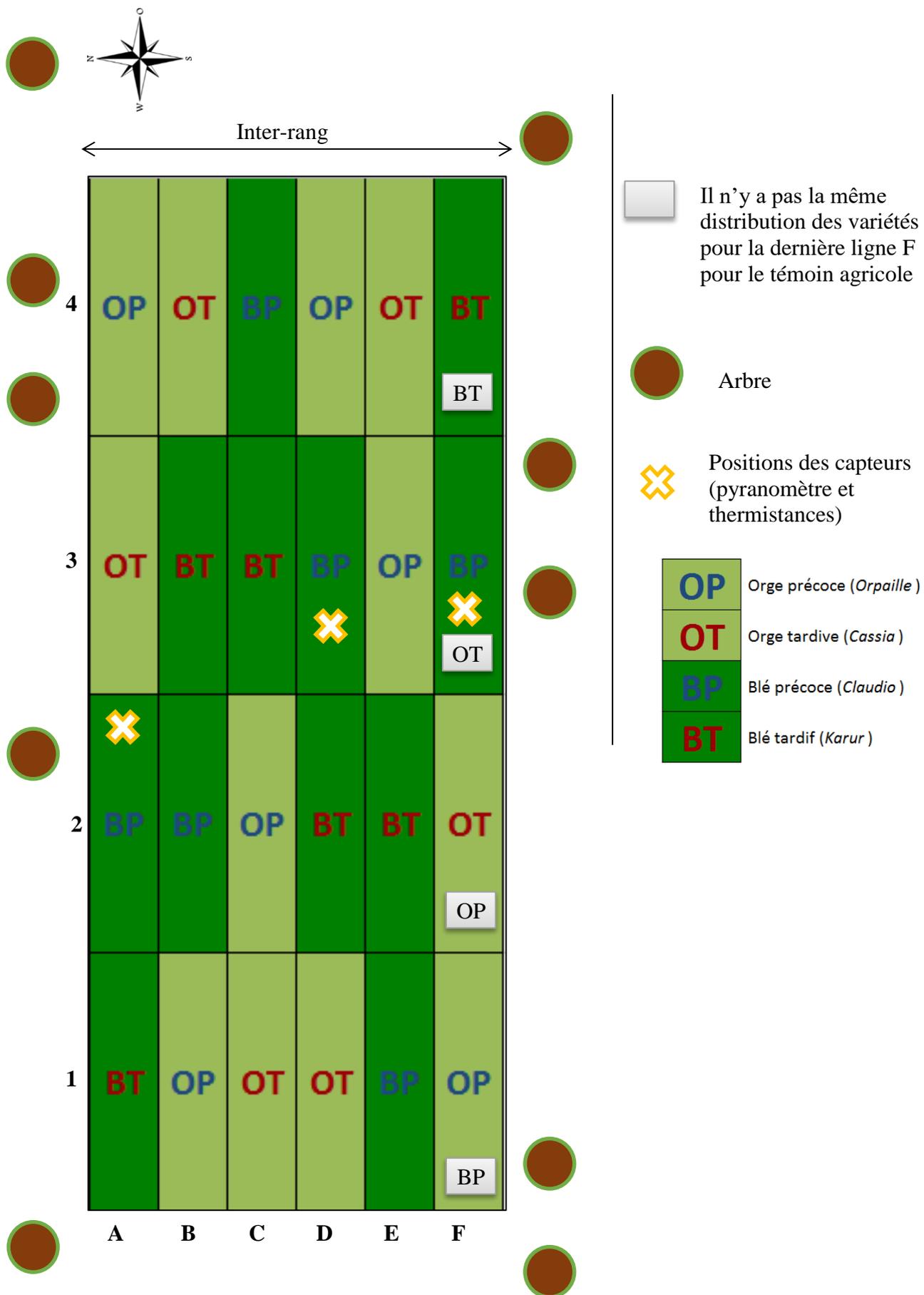


Figure 10 : Représentation schématique du dispositif agroforestier et agricole subdivisé en placettes

2. Suivi de la croissance

La croissance des tiges principales a été suivie pendant 6 semaines à partir du 26 avril 2017 jusqu'au 6 juin 2017. La hauteur de la tige a été mesurée une fois par semaine sur les mêmes plants de blé dur et d'orge. Dix plants ont été choisis aléatoirement dans chaque microparcelle des lignes A, D et F c'est-à-dire dans les trois positions : Nord, centre et Sud de l'inter-rang, dans le but d'identifier l'impact de la compétition aérienne et racinaire sur la hauteur de la tige. La base de la tige jusqu'à dessous l'épi a été mesurée à l'aide d'un mètre.

Les mêmes microparcelles ont été prises pour le témoin agricole et le dispositif agroforestier.

3. Etude de la morphologie

1. La feuille étendard

L'influence du facteur variété et espèce sur la morphologie de la feuille étendard du blé dur et de l'orge est étudiée. De plus, pour le système agroforestier, l'influence de la répartition spatiale est aussi étudiée pour déterminer une éventuelle différence au niveau de la morphologie foliaire entre les céréales cultivées proche des arbres et celles au centre. Cela permettra de mettre en évidence une compétition racinaire plus forte lorsque les plantes sont situées proche des arbres.

15 feuilles étendards ont été prélevées au hasard sur 8 microparcelles sur le système agroforestier (4 au centre et 4 en bordure qui sont respectivement les microparcelles A3, A4, B2, C1, C2, D2, F3 et F4) et sur 4 microparcelles choisies au hasard sur le témoin agricole (les microparcelles A3, D2, D3 et D4).

La longueur et la largeur des feuilles étendards ont été mesurées (figure 11) ainsi que la surface avec le logiciel Winfolia. Puis les feuilles ont été laissées à l'étuve pendant 72h à 60°C pour ensuite les peser et obtenir leur poids sec. La SLA (Specific Leaf Area) a ensuite été calculée en divisant la surface (cm²) par le poids sec (g).

2. L'épi

Sur les mêmes microparcelles de prélèvement, mais sur des plants différents, d'autres mesures ont été réalisées. La longueur, la largeur de l'épi et la longueur des barbes ont été mesurées (figure 12). De même, les mesures ont été prises sur 15 plants arrachés en entier dans les 8 microparcelles en agroforesterie et les 4 microparcelles en témoin agricole. Après les mesures de longueurs, les épis ont été placés à l'étuve à 60°C pendant 72h. Puis ils ont été pesés et le nombre de grains comptés pour chaque épi.

4. Etude du rendement

Le rendement a été étudié par le biais des mesures de la biomasse aérienne. Celle-ci représente la quantité de feuilles et de tige produite par la plante. Une grande quantité de feuilles permet une activité photosynthétique plus importante. Cependant, une compétition en allocation des ressources existe entre la production de feuilles et des autres organes non reproducteurs et la production des épis. Les variétés céréalières les plus intéressantes économiquement seront donc celles qui produisent le plus de grains avec une stratégie de production de biomasse végétative moins importante.

En plus des mesures réalisées sur l'épi, les biomasses végétales ont été pesées après avoir passé 72h à l'étuve à 60°C. La biomasse reproductrice concerne l'épi tandis que la biomasse végétative concerne la tige ainsi que toutes les feuilles.



Figure 11 : Mesures réalisées sur la feuille étendard
source : Leaf.Repulseweb.Net

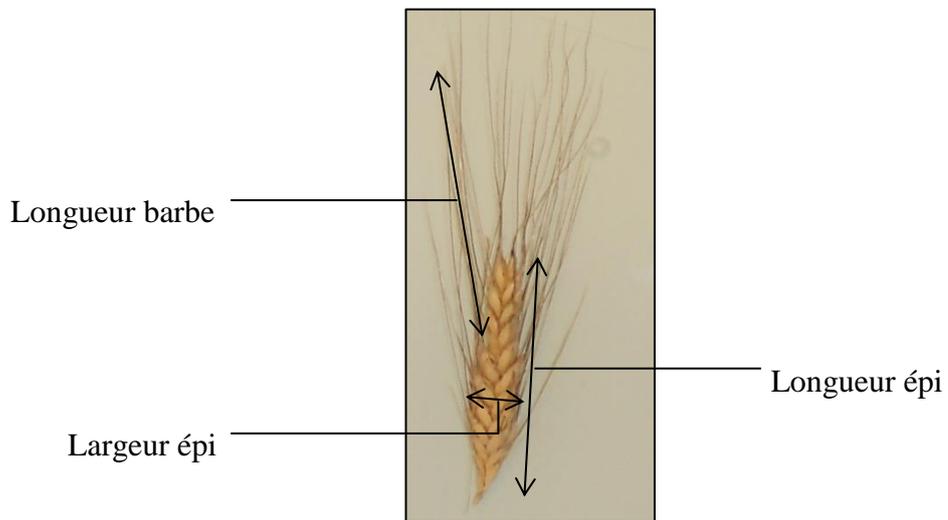


Figure 12 : Mesures réalisées sur l'épi

De cette manière, l'indice de récolte a pu être déterminé pour chaque échantillon en divisant le poids total de tous les grains d'un plant par la biomasse totale aérienne (comprenant la tige, les feuilles et l'épi). L'indice de récolte permet, en effet, d'identifier la production de biomasse totale et la production de grains. Cela permet de mettre en évidence la stratégie de la plante dans l'allocation de ses ressources, que ce soit dans la production de biomasse végétative ou dans la production des graines

III. Analyse statistique

Les analyses statistiques ont été réalisées sur le logiciel R. L'outil utilisé est une analyse de variance (ANOVA). Cette analyse permet de comparer des moyennes de k populations à partir d'échantillons prélevés aléatoirement. Les variables quantitatives à expliquer sont des surfaces, longueurs ou largeurs. Les facteurs étudiés pouvant moduler ces variables quantitatives sont le mode de production (agricole et agroforestier), l'espèce (blé dur et orge), la variété (précoce et tardive) et la répartition spatiale pour le système agroforestier (proche des arbres ou au centre). L'individu statistique considéré est le plant. Les résultats sont considérés significatifs lorsque la p-value $< 0,05$ et le package « agricolae » a été utilisé.

Lorsque les hypothèses de la première analyse ne sont pas validées, des tests non paramétriques (Kruskal Wallis) ont été utilisés notamment dans le cas de l'étude des données de biomasse végétale et de hauteur de tige. L'étude a été réalisée en séparant les deux espèces blé dur et orge et en analysant les différences de moyenne entre les deux systèmes au sein d'une variété (il n'y a pas eu de comparaison de moyenne entre variétés). Ces tests ont permis de mettre en évidence les groupes statistiques.

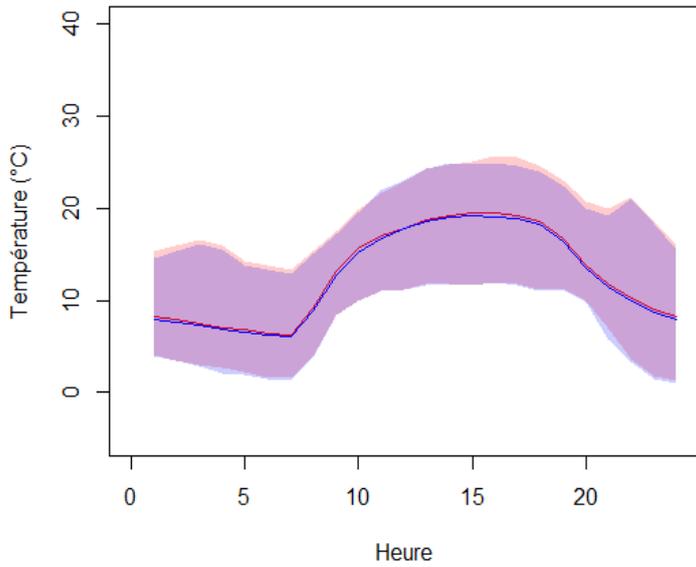


Figure 13 : Evolution de la température moyenne, minimale et maximale au cours de la journée pour les deux dispositifs (Témoin agricole en rouge et Agroforesterie en bleu). Il s'agit de moyenne de température par heure pour la période du 21/03/2017 jusqu'au 21/04/2017 correspondant au moment où les arbres n'ont pas encore leurs feuilles.

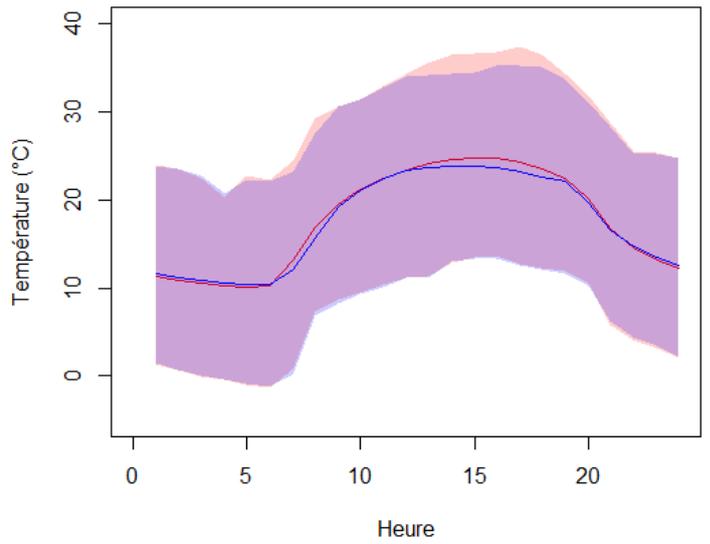


Figure 14 : Evolution de la température moyenne, minimale et maximale au cours de la journée pour les deux dispositifs (Témoin agricole en rouge et Agroforesterie en bleu). Il s'agit de moyenne de température par heure pour la période du 22/04/2017 jusqu'au 19/06/2017 correspondant au moment où les arbres débourraient et avaient ensuite complètement leurs feuilles.

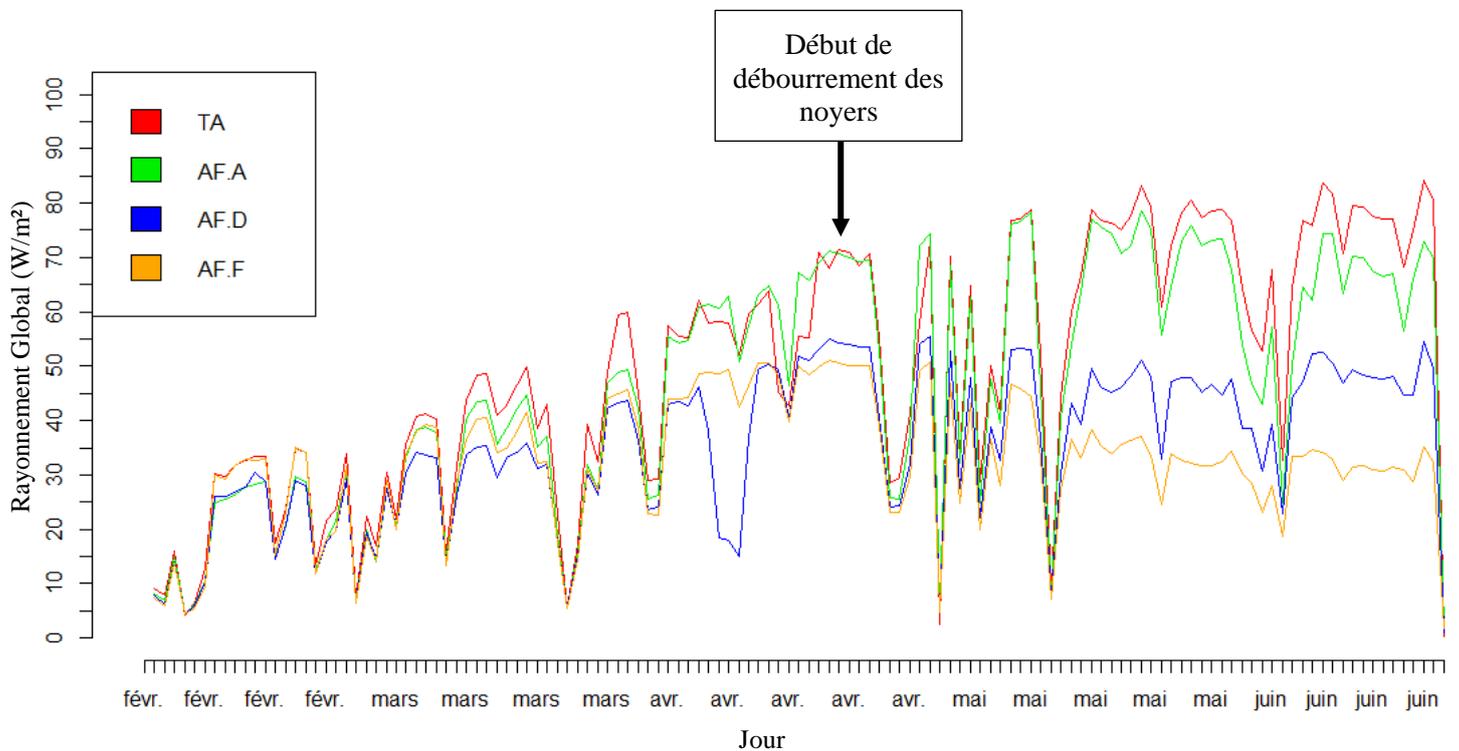


Figure 15 : Evolution du rayonnement global du 10/02/2017 jusqu'au 19/06/2017 pour le témoin agricole (TA), l'allée A en agroforesterie (AF.A), l'allée D en agroforesterie (AF.D) et l'allée F en agroforesterie (AF.F)

Résultats des essais agricoles et agroforestiers

I. Etude des données météorologiques : caractérisation du microclimat agroforestier

1. Température de l'air

On constate sur la figure 13 que les courbes de température moyenne au cours d'une journée en témoin agricole et en système agroforestier se superposent quasiment avant le débourrement des arbres. Le débourrement correspond à la phase de reprise de végétation, les bourgeons végétatifs et floraux se développent pour ensuite laisser apparaître leurs feuilles et leurs fleurs. Après débourrement, la température moyenne et la température maximale est un peu plus fraîche en agroforesterie qu'en plein champ dans l'après-midi. Pendant la période où les feuilles des arbres ne sont pas encore apparues, les différences de température entre les deux systèmes demeurent minimales. Par contre, en lisant la figure 14, les différences de température moyenne au cours de la journée sont plus marquées entre les deux systèmes. En effet, on remarque qu'il fait légèrement plus chaud la nuit dans le système agroforestier qu'en plein champ, tandis qu'il fait plus frais le jour en agroforesterie. Les moyennes de températures minimales sont identiques entre les deux systèmes. On note seulement une différence au niveau des moyennes de températures maximales. Vers 14h-15h, on observe au moins 1°C de différence entre les deux systèmes.

2. Rayonnement

La figure 15 montre l'évolution du rayonnement global pour le témoin agricole (TA), et pour l'agroforesterie dans trois positions différentes au sein de l'inter-rang (AF.Nord, AF.Centre et AF.Sud). Il s'agit des cumuls journaliers de rayonnement perçu par les cultures. Les fortes variations d'amplitude des courbes correspondent aux journées caractérisées par la présence des nuages. Ces derniers limitent en effet, le rayonnement perçu.

On remarque que le rayonnement global est approximativement le même pour le TA et l'AF.Nord (au Nord de l'allée, donc au Sud des arbres). Cependant, la baisse de rayonnement est surtout notable début mai lorsque que tous les noyers commencent à débourrer. Le rayonnement en AF.Sud, situé au Sud de l'inter-rang, est plus faible que celui du TA mais aussi plus faible que celui de l'AF.Centre. A partir de mi-mai, le rayonnement global est divisé par deux par rapport au TA. L'allée au Sud de l'inter-rang est donc la moins exposée au soleil.

II. Etude de la croissance

L'étude de la croissance n'a finalement pu être réalisée que sur la hauteur de la tige principale. La croissance de la feuille étandard n'a malheureusement pas pu être suivie car cette feuille poussait extrêmement vite et atteignait sa taille finale en quelques jours.

La figure 16 montre que la hauteur de la tige de la variété précoce de blé en agroforesterie est plus importante qu'en témoin agricole pendant les trois premières semaines (du 26 avril au 09 mai). Ensuite, après la 4^{ème} semaine (s4), la hauteur de la tige du témoin agricole devient plus grande de quelques centimètres que les hauteurs de tige au centre et en bordure Sud de l'inter-rang. La tige est toujours plus haute en AF.Nord par rapport aux autres positions dans l'inter-rang. L'analyse statistique des hauteurs de tige à chaque semaine montre que celles de l'AF.Nord sont significativement plus élevées que le TA et l'AF.Centre, mais qu'à partir de la 3^{ème} semaine (s3), elles sont aussi plus élevées que celles de l'AF.Sud. Et enfin, à partir de la 5^{ème} semaine (s5), les hauteurs des tiges de l'AF.Nord ne sont pas différentes de celles du TA mais demeurent plus hautes que celles de l'AF.Sud et l'AF.Centre. Les hauteurs de tiges des positions centre et Sud de l'inter-rang et du TA ne sont pas significativement différentes.

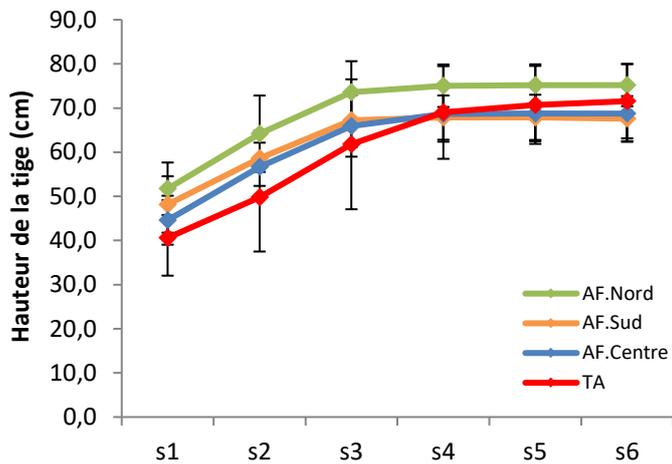


Figure 16 : Evolution de la hauteur de la tige principale de blé dur précoce.

S1 (26/04/2017), s2 (03/05/2017), s3 (09/05/2017), s4 (19/05/2017), s5 (26/05/2017), s6 (02/06/2017)

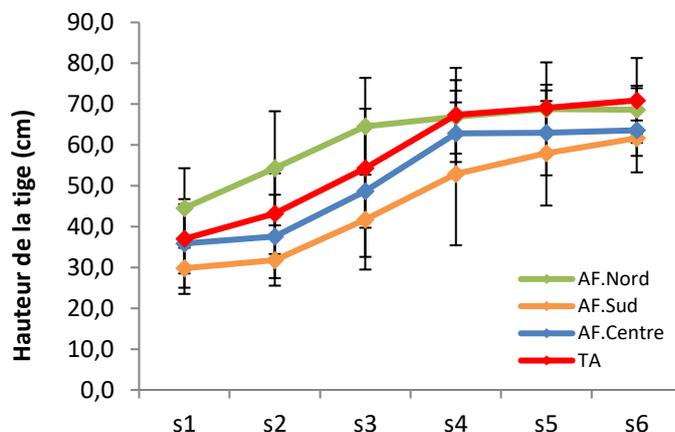


Figure 17 : Evolution de la hauteur de la tige principale de blé dur tardif.

S1 (26/04/2017), s2 (03/05/2017), s3 (09/05/2017), s4 (19/05/2017), s5 (26/05/2017), s6 (02/06/2017)

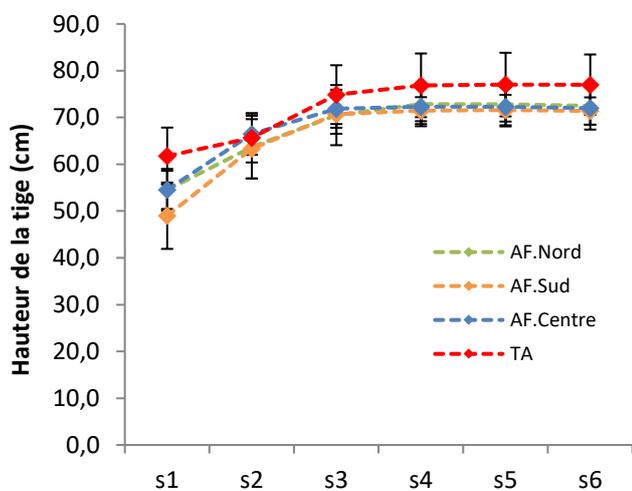


Figure 18 : Evolution de la hauteur de la tige principale de l'orge précoce. S1 (26/04/2017), s2 (03/05/2017), s3 (09/05/2017), s4 (19/05/2017), s5 (26/05/2017), s6 (02/06/2017)

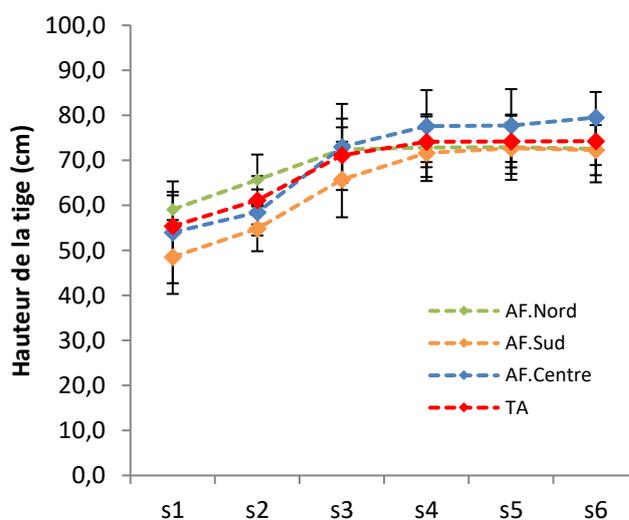


Figure 19 : Evolution de la hauteur de la tige principale de l'orge tardive. S1 (26/04/2017), s2 (03/05/2017), s3 (09/05/2017), s4 (19/05/2017), s5 (26/05/2017), s6 (02/06/2017)

La figure 17 montre que la hauteur de la tige du blé dur tardif est plus élevée en AF.Nord les 4 premières semaines de mesures (du 26 avril au 19 mai), puis devient similaire à celle du TA. La hauteur de tige pour l'AF.Sud et pour l'AF.Centre demeure toujours inférieure à celle du TA. Statistiquement, la hauteur de la tige est significativement plus grande pour l'AF.Nord les trois premières semaines (s1,s2 et s3), puis devient similaire à celle du TA. La tige de l'AF.Sud est quant à elle inférieure aux deux autres positions dans l'inter-rang et au TA à partir de la 4^{ème} semaine (s4) jusqu'à la fin des mesures, mais elle est identique à celle de l'AF.Centre pendant les trois premières semaines.

Globalement pour l'orge, on observe moins de variations de croissance de la tige principale.

Pour la variété précoce, la figure 18 montre que la hauteur de la tige est constamment plus élevée en TA qu'en système agroforestier. Entre les trois positions en agroforesterie, on ne distingue pas de fortes différences. Les trois courbes de croissance semblent même se superposer. L'analyse statistique montre que la hauteur de la tige pour le TA est toujours significativement supérieure aux trois autres positions dans l'inter-rang agroforestier, sauf en semaine 2 (s2). Les hauteurs de tige pour les trois positions en agroforesterie ne sont pas significativement différentes.

Pour la variété tardive, graphiquement la figure 19 montre que la courbe de croissance de l'AF.Sud est en dessous lors des 4 premières semaines (s1 à s4), puis vient se superposer à celle de l'AF.Nord. La courbe de croissance en TA est au début au-dessus de celle de l'AF.Centre, puis à partir de la semaine 3 (s3), elle passe en dessous. Pour l'AF.Nord, on a un bon démarrage avec une hauteur de tige supérieure au TA et aux autres positions en agroforesterie, mais à partir de la semaine 3, la croissance semble se ralentir voire s'arrêter. Statistiquement, la hauteur de la tige de l'AF.Centre se distingue, en étant plus grande, des autres positions en agroforesterie et du TA à partir de la semaine 4 jusqu'à la semaine 6.

III. Etude de la morphologie

1. Résultats des observations sur la feuille étendard

Pour le blé dur, on observe sur la figure 20 que la feuille étendard est significativement plus longue en témoin agricole qu'en dispositif agroforestier. Tandis que pour l'orge, il n'y a pas de différences de longueurs entre le témoin agricole (TA) et les deux positions dans l'inter-rang en agroforesterie.

Les résultats sur les largeurs, poids secs, surfaces foliaires et SLA sont présentés en ANNEXE 1.

Les largeurs sont plus petites pour les plants de blé agroforestier. Tandis que pour l'orge, il n'y a pas de différences significatives entre les 3 systèmes.

Les surfaces foliaires du blé dur agroforestier sont significativement inférieures à celles du blé dur du témoin agricole. Cela s'avère logique puisque la largeur et la longueur étaient de même plus faibles. Pour l'orge, les résultats sont différents : la surface est non significativement différente entre les 3 systèmes.

Au niveau de la matière sèche de la feuille, pour le blé dur, on observe de même une différence significative entre le témoin agricole et le dispositif agroforestier. Pour l'orge, il n'y a pas de différence significative entre les 3 systèmes.

Pour la SLA, on constate que pour le blé dur les feuilles apparaissent plus épaisses que les feuilles d'orge. Les feuilles sont significativement plus fines en dispositif agroforestier qu'en plein champ. De même, pour l'orge, les feuilles sont plus fines en agroforesterie qu'en témoin agricole.

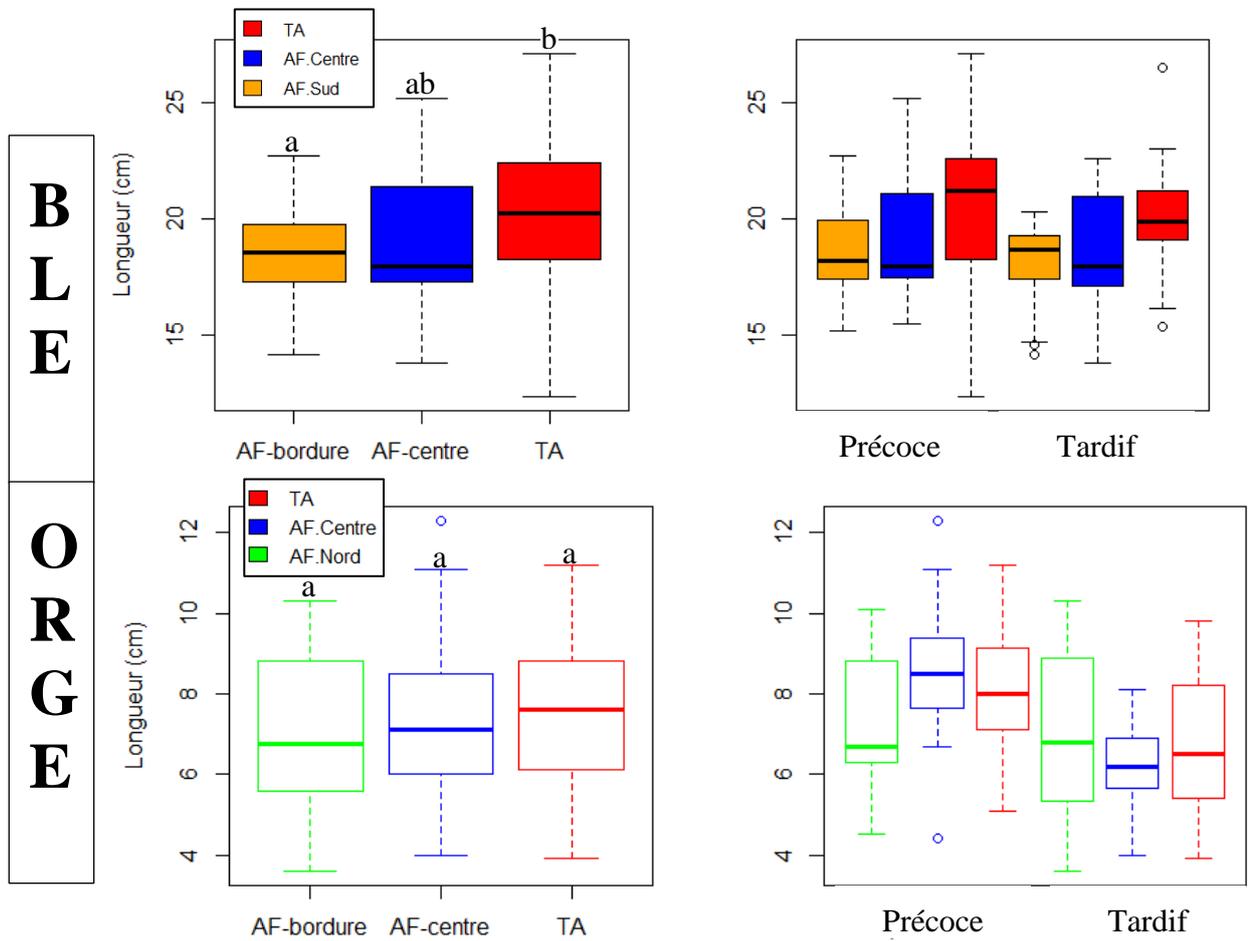


Figure 20 : Représentation graphique des résultats issus des mesures de longueur de la feuille étendue pour les variétés tardives et précoces du blé dur et de l'orge

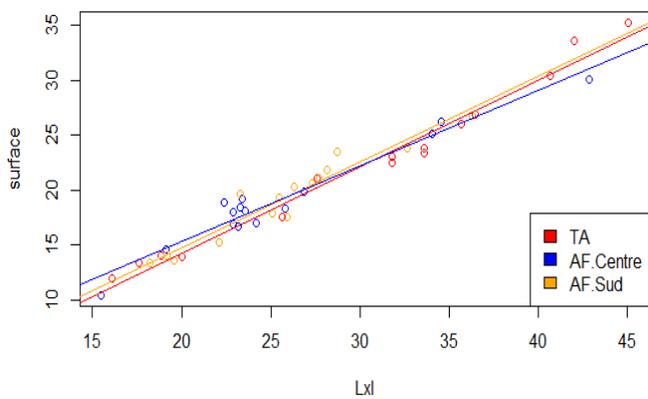


Figure 21 : Relation allométrique entre la surface (cm²) et la longueur x la largeur (cm²) pour la variété précoce du blé dur en témoin agricole TA et la position centre (AF.Centre) et Sud (AF.Sud) de l'inter-rang agroforestier

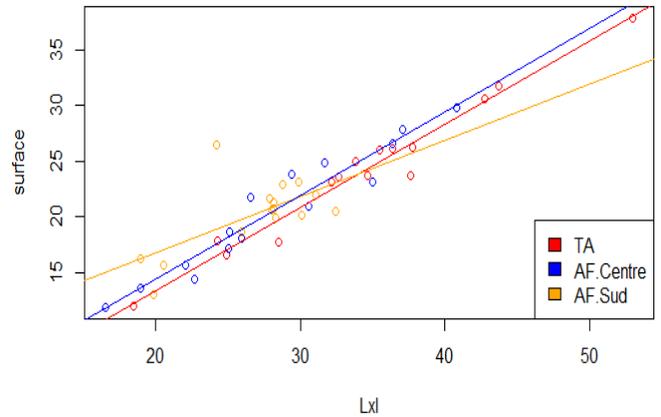


Figure 22 : Relation allométrique entre la surface (cm²) et la longueur x la largeur (cm²) pour la variété tardive du blé en témoin agricole TA et la position centre (AF.Centre) et Sud (AF.Sud) de l'inter-rang agroforestier

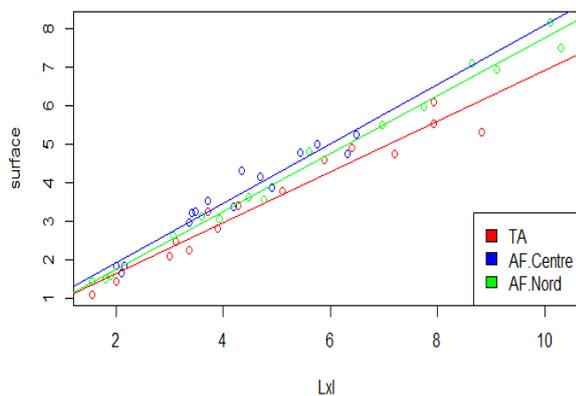


Figure 23 : Relation allométrique entre la surface (cm²) et la longueur x la largeur (cm²) pour la variété tardive de l'orge selon les 3 systèmes

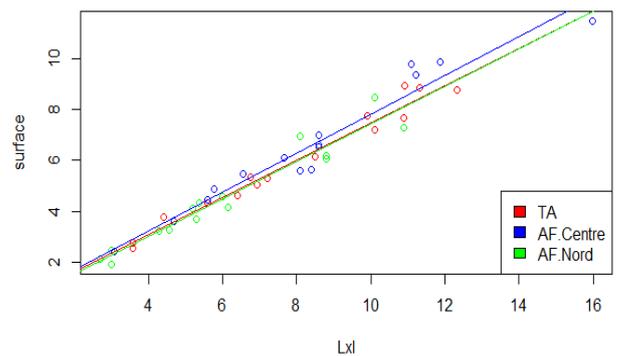


Figure 24 : Relation allométrique entre la surface (cm²) et la longueur x la largeur (cm²) pour la variété précoce de l'orge selon les 3 systèmes

Tableau 4: Récapitulatif des différents résultats significativement différents sur la feuille étendard entre le blé dur et l'orge cultivés en système agroforestier (proche ou non des arbres "bordure vs centre" indiqué respectivement par AF.Nord, AF.Sud et AF.Centre) et en plein champ (TA). Les lettres représentent les groupes statistiques pour chaque espèce et variété. Les couleurs rouges représentent une quantité inférieure tandis que les vertes une quantité supérieure.

BLE						ORGE					
Variété tardive			Variété précoce			Variété tardive			Variété précoce		
AF.Nord	AF.Centre	TA	AF.Nord	AF.Centre	TA	AF.Sud	AF.Centre	TA	AF.Sud	AF.Centre	TA
Longueur des feuilles											
a	a	a	b	ab	a	a	a	a	a	a	a
Largeur des feuilles											
b	b	a	a	a	a	a	a	a	b	a	a
Surface des feuilles											
a	a	a	a	a	a	a	a	a	b	a	ab
Poids sec des feuilles											
b	b	a	b	b	a	a	a	a	b	a	a
SLA											
a	a	b	a	a	b	b	a	b	a	b	c

Globalement, on a un effet de l'agroforesterie significatif sur la morphologie de la feuille étendard pour le blé dur. Les feuilles étendards en agroforesterie pour les deux positions dans l'inter-rang confondues sont plus petites et plus fines que le témoin agricole. Pour l'orge, il n'y a pas d'effet de l'agroforesterie significatif sur la variété tardive excepté une feuille plus fine au centre de l'inter-rang par rapport à la bordure Sud et au témoin agricole.

▪ Relations allométriques

Les figures 21 et 22 illustrent les régressions linéaires existant entre la surface de la feuille étendard du blé et la longueur multipliée par la largeur (Lxl). La variété précoce du blé semble présenter moins de dispersion de points autour de la droite linéaire que pour la variété tardive. Cette dernière a une droite de régression pour l'AF.Sud avec un coefficient de régression r^2 inférieur à 0,45. Beaucoup de points sont dispersés par rapport à la droite, il est donc difficile d'établir une relation linéaire entre les variables surface et Lxl.

Pour l'orge, les figures 23 et 24 montrent que les points semblent suivre les droites de régression autant pour la variété précoce que pour la variété tardive. Les coefficients de régression linéaire sont tous supérieurs à 0,9 traduisant une bonne relation linéaire entre la surface et la longueur multipliée par la largeur.

Globalement, pour les deux espèces et les deux variétés, on peut établir une relation d'allométrie entre la surface et Lxl pour la feuille étendard. Il n'y a qu'une seule relation d'allométrie qui ne peut être établie pour la variété tardive du blé dur cultivée en bordure des arbres puisque la relation linéaire n'est pas vérifiée (les points sont trop dispersés autour de la droite).

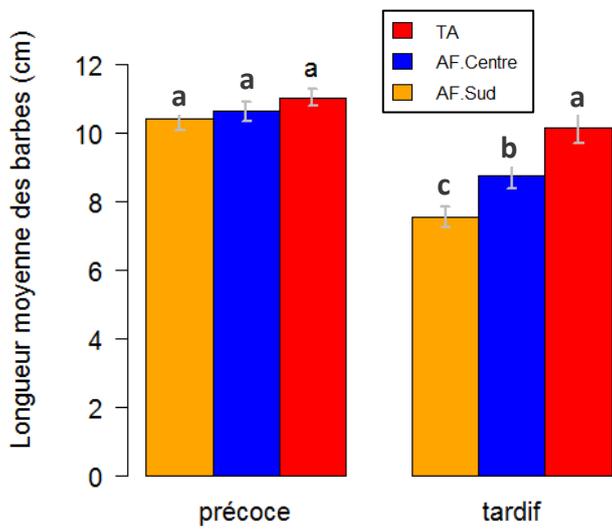


Figure 25 : Longueur moyenne des barbes (cm) par système et par variété chez le blé dur. Les barres d'erreur représentent l'écart type de la moyenne.

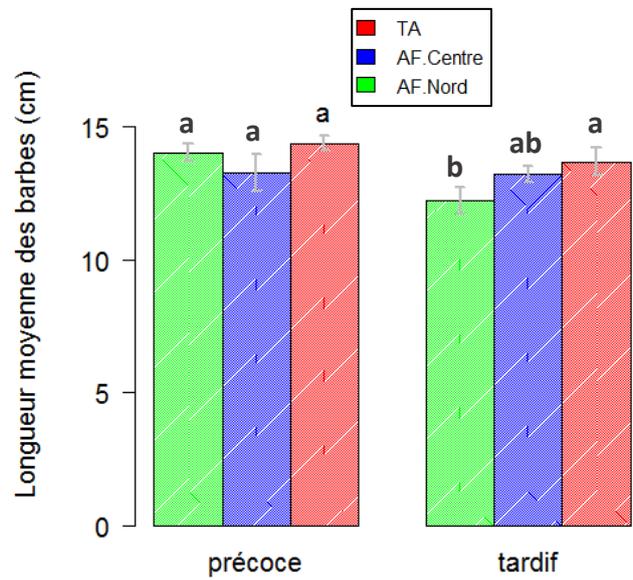


Figure 26 : Longueur moyenne des barbes (cm) par système et par variété chez l'orge. . Les barres d'erreur représentent l'écart type de la moyenne.

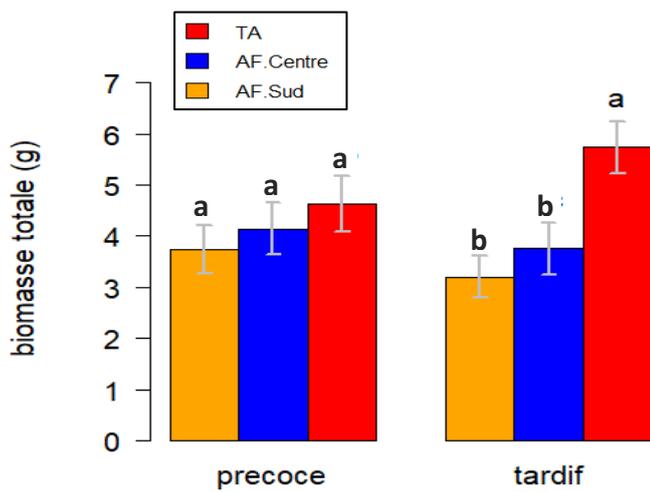


Figure 27 : Biomasse totale aérienne (g) chez le blé dur par variété et par système (témoin agricole et 2 positions dans l'inter-rang agroforestier). Les barres d'erreur représentent l'écart type de la moyenne.

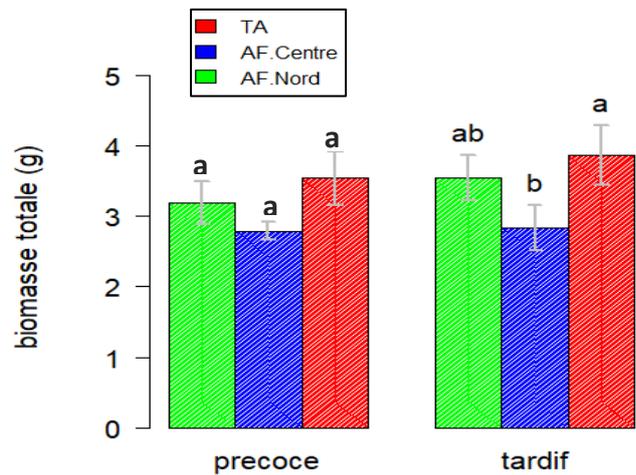


Figure 28 : Biomasse totale aérienne (g) pour l'orge par variété et par système (témoin agricole et 2 positions dans l'inter-rang agroforestier). Les barres d'erreur représentent l'écart type de la moyenne

2. Résultats des observations sur la morphologie de l'épi

▪ Observation de la longueur des barbes

Pour la variété précoce du blé dur, la figure 25 montre qu'il n'y a pas de différences entre le système agroforestier et le témoin agricole. Par contre, pour la variété tardive, les barbes sont les plus petites en AF.Sud et les plus grandes en témoin agricole.

De même pour l'orge, il n'y a pas de différences pour la variété précoce entre système agroforestier et le témoin agricole contrairement à la variété tardive où les barbes sont plus petites en AF.Nord qu'en témoin agricole.

▪ Observation de la longueur de l'épi

L'analyse statistique montre que pour la longueur de l'épi, il y a une plus forte variabilité pour le blé dur que pour l'orge. Il n'y a pas de différences entre le système agroforestier et le témoin agricole pour l'orge. Pour le blé dur, l'épi en agroforesterie est plus petit d'un centimètre pour la variété tardive par rapport au témoin agricole. Par contre, pour la variété précoce, l'épi est plus petit au centre de l'inter-rang qu'en témoin agricole.

▪ Observation de la largeur de l'épi

Peu de différences au niveau de la largeur de l'épi ont été observées. Il est à noter que la largeur variait peu entre échantillons. Les valeurs oscillaient entre 0,7 cm et 1,5 cm.

L'analyse statistique montre pour l'orge, qu'il n'y a pas de différences entre le système agroforestier et le témoin agricole. Mais pour le blé dur, la largeur au Nord de l'inter-rang en agroforesterie est plus petite pour la variété précoce par rapport au centre de l'inter-rang et au témoin agricole.

IV. Etude du rendement

1. Résultats des observations sur la biomasse aérienne

La biomasse aérienne représente la quantité de feuilles et de tige produite par la plante.

La figure 27 montre que pour la variété précoce du blé dur, il n'y a pas de différences significatives entre l'agroforesterie et le témoin agricole, contrairement à la variété tardive qui présente une biomasse totale aérienne plus faible en agroforesterie qu'en témoin agricole. Il n'y a pas de différences en biomasse aérienne entre les deux positions au sein de l'inter-rang : la plante peut être proche des arbres ou au centre de l'inter-rang, sa production de biomasse totale aérienne ne semble pas être impactée.

La figure 28 montre que pour l'orge, il y a une différence significative entre l'AF.Centre et le témoin agricole seulement pour la variété tardive. De même que pour le blé dur, la variété précoce semble être moins affectée par le contexte agroforestier avec une biomasse aérienne non différente significativement à celle du témoin agricole.

Etudions maintenant si les différences entre l'agroforesterie et le témoin agricole se trouvent au niveau de la production d'épi ou de la production de biomasse végétative.

Maintenant, nous allons regarder la biomasse végétative. La figure 29 montre que pour la variété précoce du blé dur, il n'y a pas de différences significatives entre les deux systèmes. Par contre, pour la variété tardive, on remarque que la biomasse végétative est plus faible pour le système agroforestier (pour les deux positions) par rapport au témoin agricole.

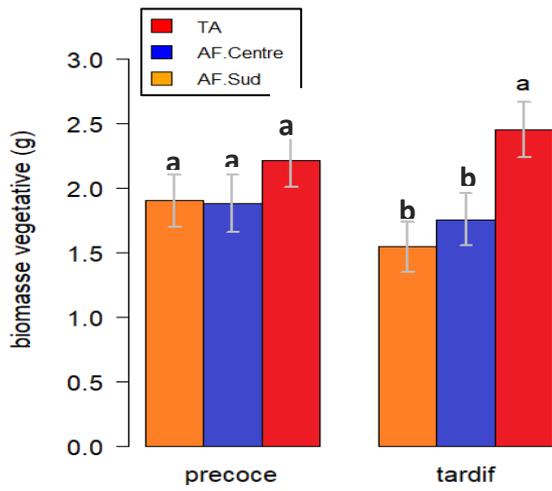


Figure 29 : Biomasse végétative (g) pour le blé dur par variété et par système (témoin agricole et 2 positions dans l'inter-rang agroforestier). Les barres d'erreur représentent l'écart type de la moyenne.

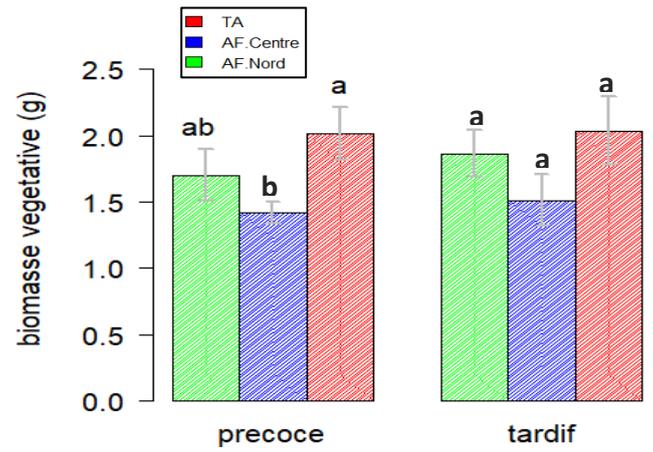


Figure 30 : Biomasse végétative (g) pour l'orge par variété et par système (témoin agricole et 2 positions dans l'inter-rang agroforestier). Les barres d'erreur représentent l'écart type de la moyenne.

Pour l'orge (figure 30), c'est la variété tardive qui ne présente pas de différences significatives entre les 2 systèmes, par contre, pour la variété précoce, il existe une différence significative entre l'AF.Centre et le TA avec une biomasse plus faible pour l'AF.Centre par rapport au témoin agricole.

Identifions si ces différences se situent au niveau de la biomasse foliaire ou au niveau de la biomasse de la tige (les figures sont représentées en ANNEXE 2).

Il n'y avait aucune différence de biomasse foliaire entre positions au sein de l'inter-rang et entre systèmes, que ce soit pour l'orge ou pour le blé.

En ce qui concerne la biomasse de la tige, les résultats sont similaires entre le blé et l'orge : pour le blé dur, la biomasse de la tige est plus faible en agroforesterie (pour les 2 positions dans l'inter-rang) qu'en témoin agricole, excepté pour la variété précoce d'AF.Centre. Pour l'orge, La variété tardive d'AF.Centre a une biomasse plus faible que le témoin agricole ; par contre, la variété précoce ne présente pas de différences entre les deux systèmes.

Ensuite, étudions la biomasse reproductrice. Les mêmes types de graphiques présentés en annexe permettent d'établir les résultats suivants :

Concernant la biomasse reproductrice (poids sec de l'épi), on remarque que pour la variété précoce du blé dur, il n'y a pas de différences significatives entre les deux systèmes. Par contre, pour la variété tardive du blé dur, la biomasse reproductrice est plus faible pour le système agroforestier (pour les deux positions) par rapport au témoin agricole. Pour l'orge, c'est la variété tardive qui ne présente pas de différences significatives entre les deux systèmes. Par contre, pour la variété précoce, la biomasse reproductrice est plus faible pour l'AF.Centre par rapport à celle de l'AF.Sud et du TA.

On peut ensuite vérifier avec le nombre de grains : si la biomasse reproductrice est plus élevée, alors le nombre de grains est plus élevé ou les grains plus gros.

La variété tardive du blé dur du témoin agricole a une dizaine de grains en plus qu'en agroforesterie. Pour la variété précoce, il n'y a pas de différences significatives pour le nombre de grains entre les deux systèmes. Pour l'orge, il n'y a pas de différences significatives entre les deux systèmes pour la variété tardive. Par contre, pour la variété précoce, le nombre de grains est plus faible au centre de l'inter-rang par rapport au témoin agricole.

On peut ensuite regarder le poids d'un seul grain, car si le nombre de grains peut paraître plus faible en agroforesterie pour la variété précoce de l'orge et la variété tardive du blé, le poids d'un grain est peut-être plus élevé, ce qui indiquerait des conditions plus favorables pendant la période de remplissage des grains ou une plus longue durée de remplissage des grains. En regardant le poids d'un seul grain, les tendances changent. En effet, pour la variété précoce du blé dur, le poids d'un seul grain est plus élevé au centre de l'inter-rang par rapport au témoin agricole et le Sud de l'inter-rang alors que le nombre de grains n'étaient pas significativement différents entre les deux systèmes. Pour la variété tardive, le poids d'un seul grain est le plus faible pour l'AF.Sud par rapport à l'AF.Centre et au TA. L'AF.Centre a aussi des grains plus légers que le TA. Pour l'orge, il n'y a pas de différences significatives entre les deux systèmes de culture pour la variété tardive. Pour la variété précoce, les grains sont plus gros pour au Nord de l'inter-rang par rapport au témoin agricole.

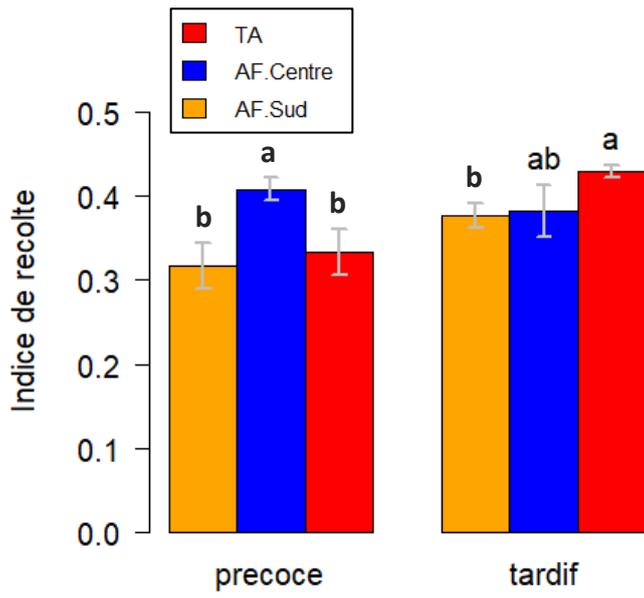


Figure 31 : Indice de récolte du blé dur par variété et par système

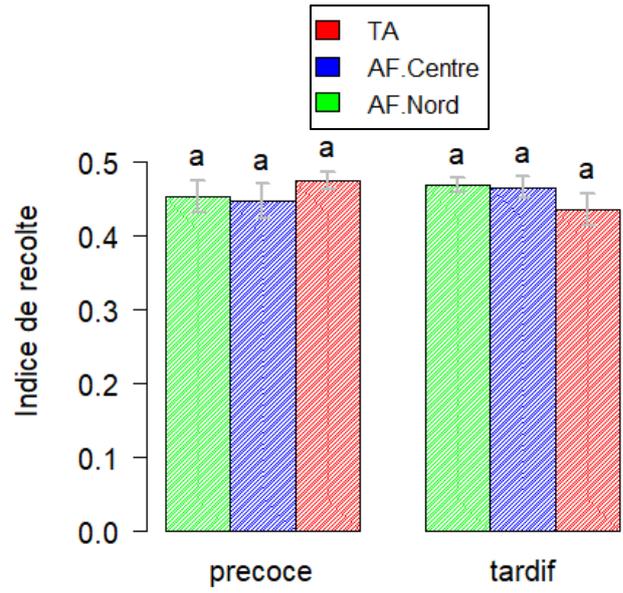


Figure 32 : Indice de récolte d'orge par variété et par système

Un tableau de synthèse (tableau 5) permet de résumer tous ces résultats.

Tableau 5: Synthèse des résultats issus des observations réalisées sur les mesures de biomasse sèche pour les deux variétés de blé dur et d'orge cultivés en système agroforestier (proche ou non des arbres "bordure vs centre" indiqué respectivement par AF.Nord, AF.Sud et AF.Centre) et en plein champ (TA). Les lettres représentent les groupes statistiques pour chaque espèce et variété. Les couleurs rouges représentent une quantité inférieure tandis que les vertes une quantité supérieure.

BLE						ORGE					
Variété tardive			Variété précoce			Variété tardive			Variété précoce		
AF.Sud	AF.Centre	TA	AF.Sud	AF.Centre	TA	AF.Nord	AF.Centre	TA	AF.Nord	AF.Centre	TA
Biomasse sèche totale											
b	b	a	a	a	a	a	b	a	a	a	a
Biomasse sèche reproductive											
b	b	a	a	a	a	a	a	a	a	b	a
Biomasse sèche végétative											
b	b	a	a	a	a	a	b	a	a	a	a
Nombres de grains											
b	b	a	a	a	a	a	a	a	ab	b	a
Poids sec d'un grain											
b	a	b	b	a	a	a	a	a	a	ab	b
Biomasses sèches foliaires											
a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
Biomasse sèche tige											
b	b	a	b	a	a	a	b	a	a	a	a

Ces observations de biomasse sèche montrent qu'il y a une différence de comportement face aux différents systèmes entre la variété tardive et la variété précoce du blé dur. En effet, peu de différences significatives sont observées pour la variété précoce, excepté au niveau du poids sec d'un seul grain et de la biomasse sèche de la tige (plus faible en bordure des arbres). Au contraire pour la variété tardive, l'effet de l'agroforesterie impacte négativement la biomasse sèche.

Pour l'orge, il y a moins de différences au sein des trois systèmes pour les deux variétés. On identifie un effet de l'agroforesterie visible seulement au centre de l'inter-rang.

2. Etude de l'indice de récolte

Pour le blé dur (figure 31), on observe que pour la variété précoce, l'indice de récolte est significativement plus grand au centre de l'inter-rang par rapport au Sud et au témoin agricole. Pour la variété tardive, on remarque une différence significative seulement entre l'AF.Sud et le TA avec un indice plus faible pour AF.Sud.

Pour l'orge (figure 32), on observe que pour la variété précoce il n'y a pas de différences significatives entre les deux systèmes. De même, pour la variété tardive, l'indice de récolte ne diffère pas entre les deux systèmes de culture.

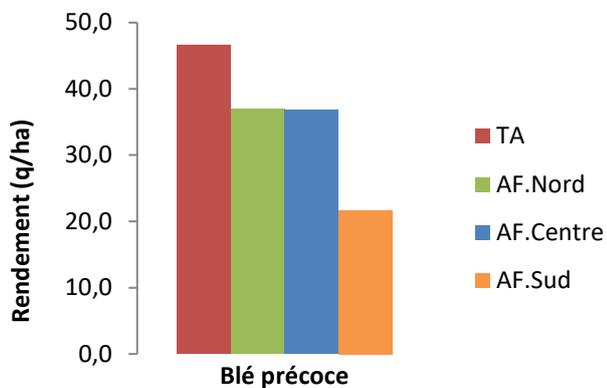


Figure 33 : Rendement en q/ha pour le blé dur précoce par systèmes (TA = Témoin Agricole, AF.Nord et AF.Sud : cultures proche des arbres et AF.Centre : culture au milieu de l'inter-rang)

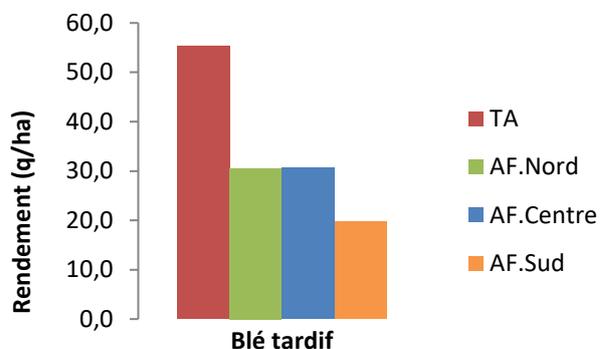


Figure 34 : Rendement en q/ha pour le blé dur tardif par systèmes (TA = Témoin Agricole, AF.Nord et AF.Sud : cultures proche des arbres et AF.Centre : culture au milieu de l'inter-rang)

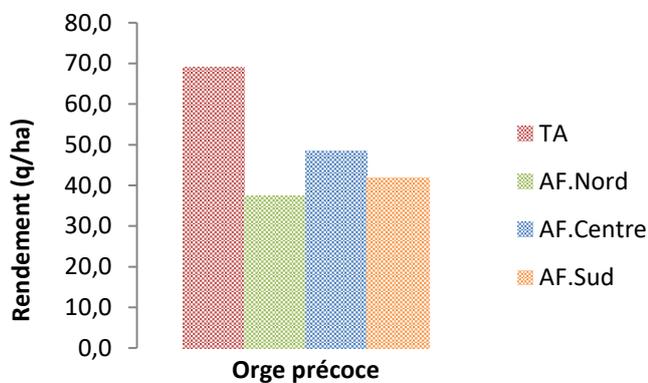


Figure 35 : Rendement en q/ha pour l'orge précoce par systèmes (TA = Témoin Agricole, AF.Nord et AF.Sud : cultures proche des arbres et AF.Centre : culture au milieu de l'inter-rang)

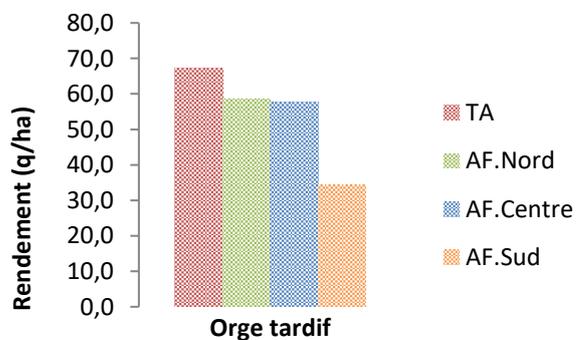


Figure 36 : Rendement en q/ha pour l'orge tardif par systèmes (TA = Témoin Agricole, AF.Nord et AF.Sud : cultures proche des arbres et AF.Centre : culture au milieu de l'inter-rang)

3. Observations des rendements

A partir des figures 33 et 34, on observe une plus forte différence de rendement pour le blé tardif, entre l'agroforesterie et le témoin agricole, que pour le blé précoce. En effet, pour la variété tardive, le rendement en AF.Nord et AF.Centre est 45% plus faible par rapport au témoin agricole, et il est même diminué de 64% pour l'AF.Sud par rapport au TA. Pour la variété précoce, on observe seulement une différence d'environ 10 q/ha entre le témoin agricole et l'AF.Centre et l'AF.Nord. Pour les deux variétés, l'AF.Sud présente les plus faibles rendements.

Pour l'orge, on distingue une différence de rendement plus importante entre l'agroforesterie et le témoin agricole, pour la variété précoce que pour la variété tardive. En effet, pour la variété précoce, le plus haut rendement en agroforesterie se trouve au centre de l'inter-rang qui est d'environ 20 q/ha plus faible que le témoin agricole. Pour la variété tardive, le rendement est quasi équivalent entre l'AF.Nord et l'AF.Centre qui est seulement 10 q/ha plus faible que le témoin agricole (figure 35 et 36).

Discussion des résultats

I. Conséquence de la culture en agroforesterie sur la morphologie et la croissance du blé dur et de l'orge

1. Croissance de la tige et sa hauteur

Pour le blé dur, on constate des différences de comportement entre les deux variétés. Pour la variété précoce, les croissances sont plus rapides en agroforesterie, les céréales atteignent plus rapidement leur hauteur finale qu'en témoin agricole. Mais à la fin de la croissance, seules les céréales cultivées au centre de l'inter-rang ont une hauteur plus élevée qu'à l'extrémité Sud de l'inter-rang.

La différence entre les positions au sein de l'inter-rang en agroforesterie est le rayonnement perçu par les cultures. En effet, nous avons vu que le rayonnement, en général plus faible en agroforesterie qu'en témoin agricole, était beaucoup plus faible au Sud de l'inter-rang par rapport aux autres positions. A l'extrémité Nord de l'inter-rang, le rayonnement perçu est quasi équivalent à celui du témoin agricole. Ainsi, comme les lignes d'arbres sont orientées Est-Ouest, l'extrémité Sud de l'inter-rang est celle la plus exposée à l'ombre, puis il s'agit du centre de l'inter-rang et enfin l'extrémité Nord est la moins exposée à l'ombre.

Ensuite, comme les arbres ne sont pas régulièrement répartis le long de la ligne, le blé dur au Nord de l'inter-rang n'avait pas d'arbre juste à côté de lui contrairement au blé à l'extrémité Sud de l'inter-rang. Ainsi, la compétition pour les ressources trophiques est plus élevée au Sud qu'au Nord de l'inter-rang.

Le manque de rayonnement n'a donc pas limité la hauteur de la tige des céréales puisque celles-ci est la même entre l'agroforesterie (au centre et au Nord de l'inter-rang) et le témoin agricole. Toutefois, à l'extrémité Sud de l'inter-rang, la tige est plus petite. On peut penser que la compétition racinaire en plus du très faible rayonnement ont provoqué cette réponse morphologique. Ce serait la combinaison de deux compétitions qui diminueraient la hauteur de la tige.

En définitive, la hauteur de la tige n'est pas réduite dans le seul cas d'une diminution du rayonnement mais dans la combinaison des compétitions racinaires et aériennes. En effet, les mêmes observations ont été faites pour la variété tardive du blé dur. La tige est plus petite dans au Sud de l'inter-rang que celle au Nord de l'inter-rang.

Pour l'orge, on distingue moins de différences. Les hauteurs finales de tige sont globalement identiques, autant pour la variété précoce que pour la variété tardive. L'orge, comparativement au blé dur, semble donc mieux se comporter en contexte agroforestier et sa morphologie de la tige est peu modifiée.

Toutefois, on s'attendait à avoir des tiges plus hautes en agroforesterie qu'en témoin agricole puisque l'ombre a tendance à stimuler la croissance de la tige pour avoir accès à la lumière (Li et al. 2010). Les céréales peuvent augmenter leur hauteur de tige mais cette croissance peut être limitée en raison d'une limitation en ressource en eau et nutriments, ne pouvant ainsi pas pousser au-delà de l'élément lui faisant de l'ombre. La hauteur de leur tige n'est finalement pas modifiée. On peut aussi supposer que cela dépend du temps d'exposition de la tige à l'ombre. Dans notre cas, l'élongation des tiges a commencé au moment où il n'y avait pas de feuilles aux arbres. Ainsi on peut supposer que l'effet de l'ombre impacte moins la hauteur de la tige lorsque l'élongation est quasiment terminée ou alors, la plasticité de la tige est faible.

2. Morphologie de la feuille étandard

Les résultats ont montré que pour le blé dur les feuilles étendards présentaient des différences morphologiques entre les plantes cultivées en agroforesterie et celles en plein champ. Pour l'orge, il y a moins de différences significatives entre l'agroforesterie et le témoin agricole.

Les feuilles étendards sont globalement plus fines pour les céréales cultivées en agroforesterie. Cette finesse peut s'expliquer par le manque de rayonnement reçu par les cultures en agroforesterie. Elles sont en effet apparues mi-avril, moment où les noyers commençaient à débourrer un par un. Comme nous l'avons noté, le rayonnement reçu a nettement diminué en agroforesterie, à partir de mi-avril, par rapport au témoin agricole. Il a été souvent montré que la SLA est inversement proportionnelle au rayonnement (Rawson et al. 1987) – nos résultats sont en accord avec les résultats de la littérature. Cette finesse aura des conséquences sur l'activité photosynthétique des feuilles étendards. En effet, l'activité photosynthétique est plus importante, et donc contribue plus au remplissage des grains, lorsque la feuille est épaisse (Wang et al. 2008), ceci est d'autant plus vrai pour la feuille étandard, qui est celle qui contribue le plus au remplissage du grain. Ainsi avec les feuilles étendards plus fines en agroforesterie, on peut s'attendre à avoir des grains plus légers puisque le remplissage n'aura pas pu être optimal.

Des relations d'allométrie entre la surface et la longueur multipliée par la largeur ont pu être établies pour toutes les variétés et espèces, sauf pour la variété tardive du blé dur en bordure Sud de l'allée. Une interprétation possible serait que la feuille étandard du blé dur tardif ayant émergé au moment où les feuilles des arbres apparaissaient, leurs ombres auraient engendré un développement non homogène de cette feuille étandard. L'orge et le blé dur précoce, quant à eux, avaient déjà fini le développement de leur feuille étandard au moment du débourrement des arbres.

3. Morphologie de l'épi

L'orge présente peu de différences de morphologie de l'épi (longueur des barbes, largeur et longueur de l'épi) par rapport au blé dur. La seule différence se trouve au niveau de la longueur des barbes qui s'avère plus faible pour la variété tardive en bordure, comparée au témoin agricole.

Pour le blé dur, on a une différence de morphologie de l'épi avec, d'une manière générale, des épis plus petits en agroforesterie qu'en témoin agricole. On retrouve, de même que pour l'orge, des barbes plus petites pour la variété tardive en bordure.

Ces longueurs de barbes plus petites pourraient s'expliquer par une température plus faible en bordure. En effet, il a été montré que la longueur des barbes est corrélée à la différence de température entre l'air ambiant et les barbes (Ayeneh et al. 2002). Leur longueur dépend ainsi de la température de l'air ambiant et de celle des différents organes de la plante qui dépend directement de l'énergie lumineuse reçue. Dans un système agroforestier, la présence des arbres, qui provoquent de l'ombre, diminue la température entre les lignes d'arbres. Une diminution de longueur des barbes a été observée à proximité des arbres. Cette diminution montre que, par son microclimat, l'agroforesterie peut être à l'origine d'un changement de morphologie pour les céréales. Cependant, cette différence de longueur a été observée uniquement pour les variétés tardives. Ayant un décalage phénologique, les barbes ont dû pousser au moment où les différences de températures entre l'air ambiant et le couvert étaient les plus fortes en plein champ et les plus faibles à proximité des arbres.

En conclusion sur la morphologie de l'épi, il existe bel et bien un effet de l'agroforesterie, mais seulement sur le blé dur (épi et barbes plus petits) et la variété tardive de l'orge (barbes plus petites). Ainsi, l'orge serait moins sensible que le blé aux conditions rencontrées en agroforesterie.

Alternativement, il est possible que la plasticité de l'orge au niveau de l'épi soit plus faible que celle du blé.

II. Conséquence du système agroforestier sur le rendement

1. Sur la biomasse aérienne

Pour la biomasse aérienne, l'effet de l'agroforesterie est plus prononcé sur le blé dur que sur l'orge. En effet, pour le blé dur tardif, les biomasses végétatives et reproductives sont toujours plus faibles en agroforesterie par rapport au témoin agricole. Les grains, étant moins nombreux, sont néanmoins plus gros au centre de l'inter-rang. Il y a peut-être un effet de compensation : les grains sont plus gros mais moins nombreux. Toutefois, on ne retrouve pas cette compensation pour le blé dur précoce : les grains sont moins nombreux en agroforesterie qu'en témoin agricole, mais pas plus gros.

Pour l'orge, il y a moins d'hétérogénéités de biomasse entre les systèmes. Autant pour la variété précoce que tardive. Les céréales au centre de l'allée présentent toutefois des biomasses plus faibles qu'en bordure et en témoin agricole. Ce constat est valable pour les deux variétés. L'orge étudiée proche des arbres était située au Nord de l'allée, c'est-à-dire à la bordure de l'arbre la moins soumise à l'ombre. Dans ce cas, l'ombre semble être le facteur limitant le développement de la biomasse aérienne.

2. Sur le rendement

Cette campagne 2016/2017 a été meilleure sur le plan climatique que la précédente. Les rendements s'avèrent donc meilleurs. Toutefois, elle a été marquée par quelques particularités météorologiques (Arvalis 2017) :

- Un printemps très chaud a accéléré le développement et la croissance des plantes céréalières
- Des pluies bien réparties en février, mars et mai
- Gels très tardifs vers le 20 avril
- Une sécheresse en fin de cycle accompagnée d'un coup de chaleur fin mai

Selon les données fournies par l'Agreste, le rendement est meilleur pour le blé dur et l'orge que la campagne 2016 au niveau national. Cependant, ce n'est pas ce qui est observé pour la région Occitanie avec une baisse de rendement entre 2016 et 2017 (Agreste 2017). Le rayonnement n'a pas été un problème cette année contrairement à l'an passé, mais le gel tardif d'avril et la sécheresse semblent avoir diminué le potentiel de rendement des variétés. Cependant, les baisses de rendement du blé dur par rapport à la moyenne quinquennale ont été observées en Midi-Pyrénées, tandis qu'en Languedoc Roussillon, les rendements sont corrects (autour de la moyenne) (La France Agricole 2017). Toutefois, l'orge a été davantage impactée par ce gel tardif avec des rendements décevants. Cette période gélive en avril est responsable d'un nombre de grain/épi plus faible que la moyenne quinquennale. En effet, un gel tardif juste avant l'épiaison perturbe un stade clé du développement : la méiose pollinique. Ce stade est très sensible aux aléas climatiques (basses températures, excès thermique, faible rayonnement, stress hydrique...) (Gate 1995). Il est difficile de voir morphologiquement l'impact de ce gel puisque la croissance n'est pas limitée et la structure de l'épi reste intacte. Ce sont les fleurs qui sont impactées et qui, pour certaines, ne vont pas donner de grains. Mais comme le rayonnement a été correct, les dégâts ont été limités.

De ce fait, le rendement en témoin agricole est correct voire très correct par rapport aux données régionales, en dépit de la période de gel du 20 avril. Le rendement en agroforesterie est inférieur à celui du témoin agricole, sauf dans le cas du blé dur précoce et l'orge tardive. Les céréales semées

sont sélectionnées pour être cultivées en plein soleil. Elles ont donc perdu leur adaptabilité à l'ombre.

Cependant, on a une dissymétrie du rendement : il est plus faible à la bordure Sud de l'inter-rang. Dans cette allée, le rayonnement perçu par les cultures est divisé par deux par rapport au témoin agricole, d'où un manque de rayonnement conséquent impactant négativement le rendement. Ces résultats sont en accord avec la littérature, qui prévoit des rendements inférieurs au Nord des arbres pour un alignement Est-Ouest (Dupraz et al. 2008).

III. Discussion autour de la rusticité

La rusticité met en évidence l'aptitude d'une plante à survivre dans des conditions de milieux difficiles. Dans notre cas, on considère que la présence des arbres apporte des contraintes supplémentaires, notamment au niveau de l'absorption lumineuse qui sera réduite pour la culture à l'ombre et au niveau de l'absorption racinaire d'eau et de nutriments. On s'attend ainsi à identifier des différences morphologiques entre le système agroforestier et le témoin agricole avec des organes plus petits en taille en agroforesterie par rapport au témoin agricole.

Globalement, l'orge présente moins de différences morphologiques entre les deux systèmes que le blé dur. L'orge est une espèce plus rustique que le blé dur (Hamza 1998), nos résultats laissent supposer qu'elle est également plus apte à faire face aux contraintes de compétition aérienne et racinaire imposées par les arbres. En effet, il a été aussi observé sur le domaine de Restinclières qu'une autre variété précoce d'orge produisait le même rendement entre l'agroforesterie et le témoin agricole.

IV. Discussion autour de la précocité

Par abus de langage tout au long du mémoire, les variétés ont été appelées « variété précoce » et « variété tardive ». Or ces deux types variétés n'ont pas le même génotype, ce qui implique qu'il peut exister des différences morphologiques autres que le simple caractère de précocité. Il est donc possible d'avoir des différences morphologiques entre les variétés de blé dur et d'orge qui seront liées à leur génotype. Notre observation se concentrait sur les différences de plasticité phénotypique lorsque les variétés étaient cultivées dans un autre contexte qu'en plein champ. Le but était d'observer, au sein d'une même variété, s'il y avait des différences morphologiques entre les systèmes (témoin agricole et agroforesterie) en corrélation avec le microclimat agroforestier. Toutefois, on ne cherchait pas à comparer la morphologie entre les variétés.

Pour le blé dur, les différences au niveau phénologique des deux variétés étaient bien marquées. En revanche pour l'orge, à partir de l'anthèse jusqu'à la fin du remplissage des grains, il n'y avait plus de différences visibles dans la phénologie. La différence de précocité entre les variétés d'orge et les variétés de blé n'est pas la même, c'est-à-dire que le retard de développement était plus marqué pour la variété tardive du blé que pour celle de l'orge. C'est probablement pour cette raison qu'on observe moins de différences entre les variétés d'orge qu'entre les variétés de blé au niveau de la morphologie de l'épi, mais aussi au niveau du rendement.

De plus, les deux variétés ont été semées le même jour et récoltées le même jour, tandis que normalement, la précocité d'une variété permet de décaler les dates de semis et de récolte. C'est peut-être en partie pour cette raison qu'on observe une différence de rendement entre les deux variétés.

V. Analyse critique de l'expérimentation mise en place

1. Dispositif expérimental

Le système agroforestier de Restinclières possède des alignements d'arbres non homogènes : en effet, une éclaircie a été effectuée en 2004 afin de réduire la densité d'arbres de 50%. Afin de garder uniquement les arbres ayant le meilleur potentiel de commercialisation, l'éclaircie d'un arbre sur deux le long du rang a été effectuée par séquences de 4 arbres : les deux meilleurs arbres de la séquence étaient conservés, au lieu d'enlever systématiquement un arbre sur deux. De ce fait, il peut y avoir des "trous" dans l'alignement d'arbres. A l'endroit où les variétés d'orge et de blé dur ont été semées, il y avait peu d'arbres du côté Ouest du dispositif. Les compétitions racinaires sont peut-être différentes ainsi que l'ombre provoquée sur les cultures. Une solution aurait été de réaliser une autre expérimentation, suivant le même plan d'expérimentation (c'est-à-dire la même disposition des variétés et espèces au sein de l'inter-rang) à un autre endroit dans la parcelle agroforestière avec la présence d'arbres à l'Ouest de ce nouveau dispositif.

Entre le témoin agricole et le système agroforestier, les modalités de semis sont différentes : en agroforesterie, le semis a été réalisé au semoir expérimental standard, mais la pluie a interrompu le semis et a rendu la parcelle impraticable pour au moins 15 jours. De ce fait, le témoin agricole a été semé en utilisant un semoir manuel. La distance entre lignes de semis a dû être légèrement augmentée pour compenser une densité de semis plus importante le long de la ligne et conserver la densité de plantes/m² voulue. Mais la distance entre lignes de semis et entre plantes d'une même ligne a un effet sur la compétition intra-spécifique : une forte densité aura un impact négatif sur la quantité de talles produite par plante par exemple (Puckridge et al. 1967). Pour une prochaine expérimentation, il serait donc nécessaire d'avoir une homogénéisation des semis pour qu'il y ait le même point de départ entre le témoin agricole et le système agroforestier.

Les variétés étudiées ont été semées et récoltées le même jour, or la précocité permet de déplacer les dates de semis et de récolte pour éviter des aléas climatiques fréquents pouvant endommager fortement le rendement tel que des gels tardifs, des coups de chaud ou encore des sécheresses. Pour profiter pleinement des avantages de la précocité, une solution aurait été de semer à des dates différentes les variétés tardives et les variétés précoces. De même, la date de récolte aurait été différente entre les deux variétés.

2. Echantillonnage

Les mesures de biomasses sèches ont été prises lorsque les plants étaient totalement sénescents ; de ce fait, les feuilles n'étaient pas toutes présentes au moment de la mesure, car elles ont tendance à se détacher très facilement du plant, ce qui conduit à sous-estimer la biomasse sèche totale des feuilles. Aussi, il aurait été préférable de réaliser cette mesure lorsque la dernière feuille était sortie, sans attendre la sénescence complète. Toutefois, il y a une impossibilité d'avoir sur une même plante une bonne estimation de la biomasse des feuilles et des épis car il faut attendre la maturité. Il faut aussi savoir que, lors de la maturité de la plante, il y a une remobilisation de la biomasse du végétatif vers le reproducteur. La réalisation de mesures à des moments différents biaiserait donc les résultats en surestimant la biomasse totale. Par ailleurs, les mesures de biomasse sont des mesures destructrices. Les mesures simultanées et destructrices n'ont donc pas été prises sur les mêmes plants d'une même placette. L'hypothèse faite alors était que les plantes étaient homogènes par placette.

Par ailleurs, pour certaines mesures (celles sur la feuille étendard et la biomasse aérienne), on souhaitait étudier la présence proche des arbres pour mettre en évidence la compétition racinaire. Or du fait de la randomisation de la position des génotypes le long d'un passage de semoir, pour l'orge, les prélèvements ont été réalisés sur l'extrémité Nord de l'inter-rang, celle la plus exposée au

soleil par rapport aux autres endroits de l'inter-rang. Elle est donc certes plus exposée à la compétition racinaire, mais elle n'est pas soumise au manque de rayonnement. Alors que pour le blé dur, il s'agit de l'extrémité Sud qui a été étudiée. Cela peut expliquer pourquoi on observe peu de différences entre les deux positions dans l'inter-rang pour l'orge par rapport au blé. Une solution aurait été de semer des placettes d'orge proche des arbres.

Conclusion et perspectives

Cette étude a montré que l'agroforesterie pouvait être responsable des modifications morphologiques des céréales et de leur baisse de rendement à cause des compétitions aérienne et racinaire.

Le manque de rayonnement semble être le principal responsable des différences morphologiques et de rendement observées entre le système agroforestier et le témoin agricole. La présence des arbres génère en effet de l'ombre aux cultures céréalières et le rayonnement perçu par celles-ci est dissymétrique selon la position dans l'inter-rang dans le cas d'un alignement des arbres Est-Ouest. Les rendements en agroforesterie pour la bordure Sud de l'inter-rang étaient beaucoup plus faibles que pour la bordure Nord, qui étaient équivalents à ceux du centre de l'inter-rang. Si la compétition racinaire était prépondérante, on s'attendrait à avoir plus de compétition sur les deux bordures qu'au centre. Or elle a été moins préjudiciable que la compétition pour la lumière.

Ces compétitions dépendent de la phénologie de l'arbre et des cultures. Les variétés précoces peuvent présenter un avantage certain en contexte agroforestier. En effet, il faut profiter au maximum du décalage phénologique entre les cultures céréalières et les arbres pour avoir un maximum de rayonnement perçu par la culture lors de son développement. Mais les variétés qui ont su le mieux s'adapter en contexte agroforestier sont la variété précoce du blé dur et la variété tardive de l'orge. Même si la différence de précocité entre les deux variétés d'orge était moins marquée que pour le blé dur.

Cependant, les variétés ne diffèrent pas uniquement sur la précocité, elles avaient un fond génétique différent et peut-être des capacités d'adaptation à l'agroforesterie différentes. Il faut aussi veiller à la plasticité phénotypique des différents organes traduisant une capacité des plantes à s'adapter à son environnement. Nous avons vu que pour l'orge, la plasticité de l'épi était faible, de même pour la tige. Par contre, les feuilles étendards ont une plasticité plus forte : elles étaient plus fines en agroforesterie qu'en témoin agricole pour le blé dur et l'orge pour les deux variétés.

L'impact du microclimat agroforestier identifié dans notre parcelle n'a pas pu montrer les avantages qu'il confère notamment dans le cas de fortes chaleurs ou de manque d'eau. En effet, cette année, il n'y a pas eu de stress hydrique et thermique réduisant considérablement le rendement en témoin agricole. Une solution serait de mettre en place des dispositifs anti-pluie dans le but de provoquer un stress hydrique et des résistances pour augmenter la température du couvert végétal dans le but de provoquer un stress thermique. De cette manière, l'impact du microclimat agroforestier pourrait être mieux évalué.

Notre étude a montré que l'agroforesterie présente des inconvénients réduisant le rendement. Toutefois, les variétés testées sont des variétés de blé dur et d'orge longtemps sélectionnées pour être cultivées en plein champ et donc en plein soleil. Ce sont des variétés très sensibles à un manque de rayonnement. De ce fait, il serait intéressant d'étudier des variétés tolérantes à l'ombre qui seront ainsi plus adaptées au système agroforestier. Il existe peut-être des variétés anciennes tolérantes à l'ombre mais avec l'inconvénient d'un potentiel de rendement plus faible que les variétés récentes. Tant que la sélection variétale sera réalisée en plein champ, les variétés ne seront pas adaptées à la présence des arbres et ne pourront exprimer leur potentiel de rendement dans ces conditions.

Bibliographie

- Abrol, Y. P., et K. T. Ingram. 1999. « Les effets de la hausse des températures diurnes et nocturnes sur la croissance et les rendements de certaines plantes cultivées ». In *Changement du climat et production agricole : effets directs et indirects du changement des processus hydrologiques, pédologiques et physiologiques des végétaux*, Economica, 472. Rome: FAO.
- Acevedo, E., P. Silva, et H. Silva. 2002. « Wheat growth and physiology ». In *BREAD WHEAT Improvement and Production*, 544. Rome: FAO.
- AGFORWARD. 2015. « Accueil - Agforward - France » [En ligne]. (page consultée le 10/07/2017) <http://www.agforward.eu/index.php/fr/home.html>.
- Agreste. 2015. « Le territoire » [En ligne]. (page consultée le 18/07/2017) <http://agreste.agriculture.gouv.fr/publications/mementos-951/article/memento-de-la-statistique-agricole-12652>.
- Agreste. 2017. « En 2017, un redressement du rendement des cultures d'hiver, limité par la chaleur en juin et la sécheresse du printemps ». *Agreste Infos rapides - Grandes cultures et fourrages*.
- Alliès, A., J.F. Devaux, F. Fénéon, J.M. Gillot, C. Lafon, P. Lopez, et P. Pianetti. 2011. « Blé dur : Les bases de la culture ». *Fiche technique Blé-dur*, 1-3.
- Arvalis. 2016. « Les fiches Arvalis Variétés, Produits, Accidents, Couverts ».
- Arvalis. 2017. « 1ers résultats 2017 Région méditerranée - Variétés de blé dur ». *Choisir & Décider*.
- Auclair, D., et F. Cailliez. 1994. « Les besoins de recherche en agroforesterie ». *Revue forestière française XLVI* (sp.): 141-51.
- Ayeneh, A., M. Van Ginkel, M. P. Reynolds, et K. Ammar. 2002. « Comparison of leaf , spike , peduncle and canopy temperature depression in wheat under heat stress ». *Field Crops Research* 79: 173-84.
- Bayala, J., et A. Ræbild. 2012. « Testing the shade tolerance of selected crops under *Parkia biglobosa* (Jacq .) Benth . in an agroforestry parkland in Burkina Faso , West Africa », 477-88.
- Blum, A. 1986. « The Effect of Heat Stress on Wheat Leaf and Ear Photosynthesis ». *Journal of Experimental Botany* 37 (174): 111-18.
- Borden, K. A., S. C. Thomas, et M. E. Isaac. 2016. « Interspecific variation of tree root architecture in a temperate agroforestry system characterized using ground-penetrating radar ». *Plant and Soil*. Plant and Soil, 1-12.
- Cardinael, R. 2015. « Stockage de carbone et dynamique des matières organiques des sols en agroforesterie sous climat méditerranéen et tempéré ». Paris-Saclay.
- Chambre d'Agriculture de l'Hérault. 2010. « Le Climat » [En ligne]. (page consultée le 15/05/2017) <http://www.herault.chambagri.fr/lherault-copie-1/climat.html>.
- Cho, Y. Y., S. Oh, M. Min Oh, et J. Eek Son. 2007. « Estimation of individual leaf area, fresh weight, and dry weight of hydroponically grown cucumbers (*Cucumis sativus* L.) using leaf length, width, and SPAD value ». *Scientia Horticulturae* 111 (4): 330-34.
- Cirad. 2017. « Projet scientifique » [En ligne]. (page consultée le 16/05/2017) <http://umr-system.cirad.fr/l-unite/projet-scientifique>.
- CRPF Languedoc-Roussillon. 2007. « Fiche-Essence : Noyer hybride », 1-2.
- Dupraz, C., et F. Liagre. 2008. *Agroforesterie, Des arbres et des cultures*. France Agr. Paris.
- Efadl, M. 2015. « Agroforestry as interdisciplinary concept ». In , édité par University of Helsinki/Department of Forest Sciences, 41. Helsinki: Viikki Tropical Resources Institute (VITRI).
- Ferguson, H., R.F. Eslick, et J.K Aase. 1973. « Canopy temperatures barely as influenced by morphological characteristics ». *Agronomy Journal* 65: 425-28.

- Fournier, C. 2002. « L'agroforesterie du Domaine départemental de Restinclières (Hérault) : une expérience originale au service des professionnels du bois et de l'agriculture ». *Forêt méditerranéenne* XXIII (4): 327-31.
- La France Agricole. 2013. « De gros progrès en 10 ans, des craintes demeurent pour l'avenir (OCDE) » [En ligne]. (page consultée le 08/07/2017) <http://www.lafranceagricole.fr/actualites/impact-environnemental-de-l-agriculture-de-gros-progres-en-10-ans-des-craintes-demeurent-pour-l-avenir-ocde-1,0,87659796.html>.
- La France Agricole. 2017. « Rendements et qualité passent entre les gouttes ». [En ligne]. (page consultée le 20/08/2017) <http://www.lafranceagricole.fr/actualites/moissons-rendements-et-qualite-passent-entre-les-gouttes-1,1,3961255482.html>.
- FranceAgriMer. 2015. « Céréales - Données et bilans, campagne 2014/15, perspectives 2015/16 ». [En ligne]. (page consultée le 20/08/2017) <http://www.franceagrimer.fr/content/download/39367/364581/file/MEP-SMEF-UGC-DonnéeBilans-2014-15.pdf>.
- Gastal, F. 2002. « N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective ». *Journal of Experimental Botany* 53 (370): 789-99.
- Gate, P. 1995. *Ecophysiologie du Blé, De la Plante à la Culture*. Lavoisier, Paris.
- GIEC. 2013. *Changements climatiques 2013, Les éléments scientifiques, Résumé à l'intention des décideurs, résumé technique et foire aux questions*.
- Gillespie, A. R. 1989. « Modelling nutrient flux and interspecies root competition in agroforestry interplantings ». *Agroforestry Systems* 8 (3): 257-65.
- Girard, L. 2014. « Malgré une production en hausse, les revenus des agriculteurs français de nouveau en baisse ». *Le Monde Economie*. [En ligne]. (page consultée le 20/08/2017) http://www.lemonde.fr/economie/article/2014/12/15/les-revenus-des-agriculteurs-francais-de-nouveau-en-baisse_4540545_3234.html.
- Grenier, S. 2011. « La plasticité phénotypique et de la sélection sur l'évolution morphologique et génétique des populations: le cas d'une graminée pérenne, *Lolium perenne* ». Poitiers.
- Hamza, M. A. 1998. « Les céréales dans le Maroc du Centre-ouest ». *Méditerranée* 88: 27-32.
- Helenius, J. 2016. « Agricultural crop production and management within agroforestry systems: the role of competition ».
- Inra. 2017. « Qui sommes-nous ? » [En ligne]. (page consultée le 01/05/2017) <http://institut.inra.fr/>.
- INSEE. 2017. « L'agriculture en 2016, Rapport sur les comptes », 1-33.
- Kiliç, H., et T. Yağbasanlar. 2010. « The Effect of Drought Stress on Grain Yield , Yield Components and some Quality Traits of Durum Wheat (*Triticum turgidum* ssp . durum) Cultivars ». *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 38 (1): 164-70.
- Kirby, E. J. M. 1988. « Analysis of leaf, stem and ear growth in wheat from terminal spikelet stage to anthesis ». *Field Crops Research* 18 (2-3): 127-40.
- Li, H., D. Jiang, B. Wollenweber, T. Dai, et W. Cao. 2010. « Effects of shading on morphology, physiology and grain yield of winter wheat ». *European Journal of Agronomy* 33 (4). Elsevier B.V.: 267-75.
- Mead, R., et R. W. Willey. 1980. « The Concept of a 'Land Equivalent Ratio' and Advantages in Yields from Intercropping ». *Experimental Agriculture* 16 (03). Montpellier SupAgro: 217.
- Ministère de L'Agriculture. 2015. « Les fondamentaux de l'agroécologie ». [En ligne]. (page consultée le 01/05/2017) <http://agriculture.gouv.fr/infographie-les-fondamentaux-de-lagro-ecologie>.
- Mu, H., D. Jiang, B. Wollenweber, T. Dai, Q. Jing, et W. Cao. 2010. « Long-term low radiation decreases leaf photosynthesis, photochemical efficiency and grain yield in winter wheat ». *Journal of Agronomy and Crop Science* 196 (1): 38-47.

- Nair, P. K. 1993. *Classification of agroforestry systems. An introduction to agroforestry*. doi:10.1016/0378-1127(95)90008-X.
- Peltonen-Sainio, P., L. Jauhiainen, et V. O. Sadras. 2011. « Phenotypic plasticity of yield and agronomic traits in cereals and rapeseed at high latitudes ». *Field Crops Research* 124 (2). Elsevier B.V.: 261-69.
- Peña, R.J. 2002. « Wheat for bread and other foods ». In *BREAD WHEAT Improvement and Production*, 544. Rome: FAO.
- Puckridge, D. W., et C. M. Donal. 1967. « Competition among wheat plants sown at a wide range of densities ». *Australian Journal of Agricultural Research* 18 (2): 193-211.
- Rawson, H. M., P. A. Gardner, et M. J. Long. 1987. « Sources of Variation in Specific Leaf Area in Wheat Grown at High Temperature ». *Australian Journal of Plant Physiology* 14 (3): 287-98.
- Reynolds, P. E., J. A. Simpson, N. V. Thevathasan, et A. M. Gordon. 2007. « Effects of tree competition on corn and soybean photosynthesis, growth, and yield in a temperate tree-based agroforestry intercropping system in southern Ontario, Canada ». *Ecological Engineering* 29 (4): 362-71.
- Rivest, D., A. Cogliastro, A. Vanasse, et A. Olivier. 2009. « Production of soybean associated with different hybrid poplar clones in a tree-based intercropping system in southwestern Québec, Canada ». *Agriculture, Ecosystems and Environment* 131 (1-2): 51-60.
- Rodrigo, V. H. L., C. M. Stirling, Z. Teklehaimanot, et A. Nugawela. 2001. « Intercropping with banana to improve fractional interception and radiation-use efficiency of immature rubber plantations ». *Field Crops Research* 69 (3): 237-49.
- Sánchez, I. A., et D. McCollin. 2015. « A comparison of microclimate and environmental modification produced by hedgerows and dehesa in the Mediterranean region: A study in the Guadarrama region, Spain ». *Landscape and Urban Planning* 143. Elsevier B.V.: 230-37.
- Schroth, G. 1995. « Tree Root Characteristics as Criteria for Species Selection and Systems-Design in Agroforestry ». *Agroforestry Systems* 30: 125-43.
- Schwab, N., U. Schickhoff, et E. Fischer. 2015. « Transition to agroforestry significantly improves soil quality: A case study in the central mid-hills of Nepal ». *Agriculture, Ecosystems and Environment* 205. Elsevier B.V.: 57-69.
- Semchenko, M., et K. Zobel. 2005. « The effect of breeding on allometry and phenotypic plasticity in four varieties of oat (*Avena sativa* L.) ». *Field Crops Research* 93 (2-3): 151-68.
- Smith, J., B. D. Pearce, et M. S. Wolfe. 2013. « Reconciling productivity with protection of the environment: Is temperate agroforestry the answer? ». *Renewable Agriculture and Food Systems* 28 (01): 80-92.
- Svoma, B. M., N. I. Fox, Q. Pallardy, et R. P. Udawatta. 2016. « Evapotranspiration differences between agroforestry and grass buffer systems ». *Agricultural Water Management* 176. Elsevier B.V.: 214-21.
- 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 Doctotat*, Université Montpellier II, 281.
- Taner, A., A. Muzaffer, et D. Fazil. 2004. « Barley: Post-harvest Operations ». *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, 1-64.
- Valladares, F., L. G. Hernandez, I. Dobarro, C. Garcia-Pérez, R. Sanz, et F. I. Pugnaire. 2003. « The ratio of leaf to total photosynthetic area influences shade survival and plastic response to light of green-stemmed leguminous shrub seedlings ». *Annals of Botany* 91 (5): 577-84.
- Wang, H., T. N. McCaig, R. M. DePauw, et J. M. Clarke. 2008. « Flag leaf physiological traits in two high-yielding Canada Western Red Spring wheat cultivars ». *Canadian Journal of Plant Science* 88 (1): 35-42.
- Weiner, J., et S. C. Thomas. 1992. « Competition and allometry in three species of annual plants ». *Ecology* 73 (2): 648-56.

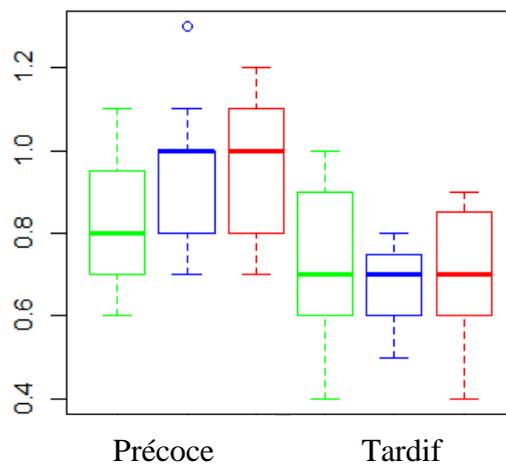
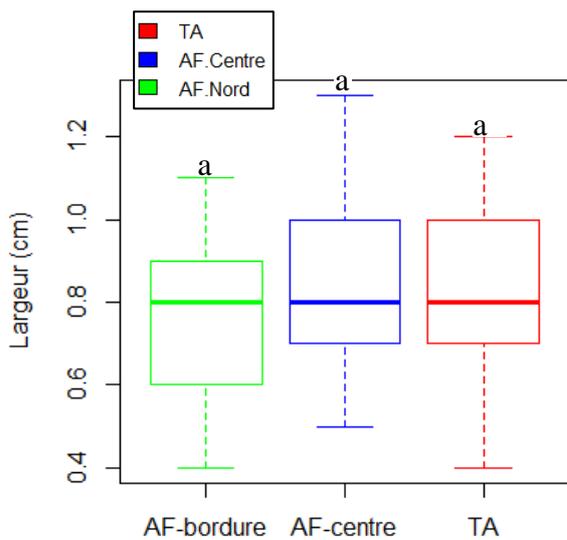
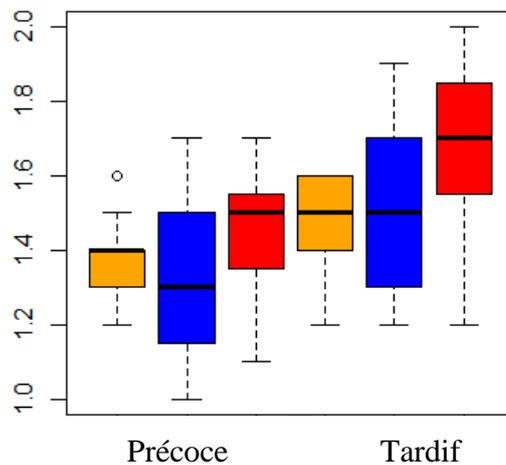
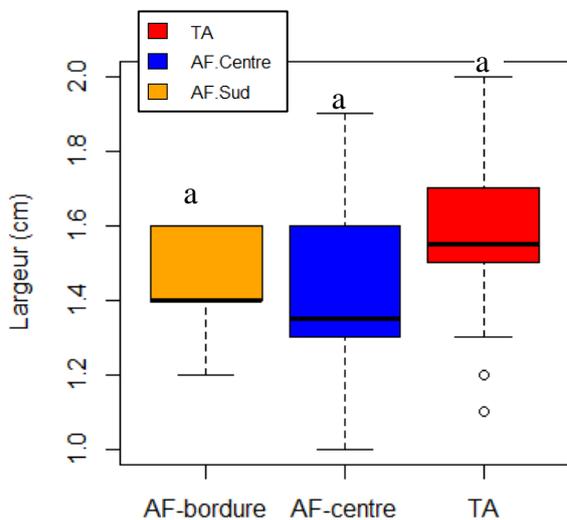
Zobayed, S. M. A., F. Afreen, et T. Kozai. 2005. « Temperature stress can alter the photosynthetic efficiency and secondary metabolite concentrations in St . John ' s wort ». *Plant Physiology and Biochemistry* 43: 977-84.

Annexe

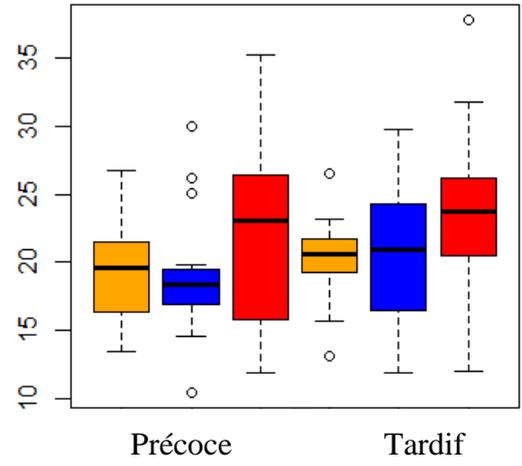
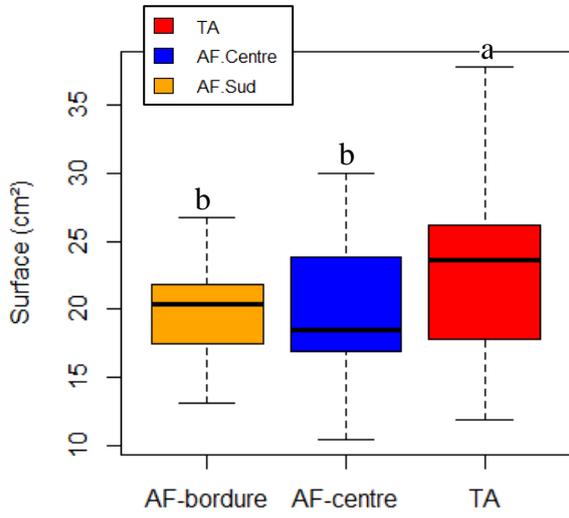
ANNEXE 1 : Représentation graphique des résultats issus des mesures de largeur, de surface et de SLA pour la feuille étendard du blé dur tardif et précoce et de l'orge tardive et précoce.

**B
L
E**

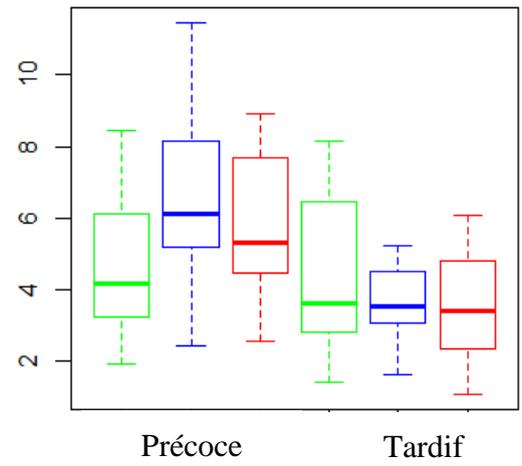
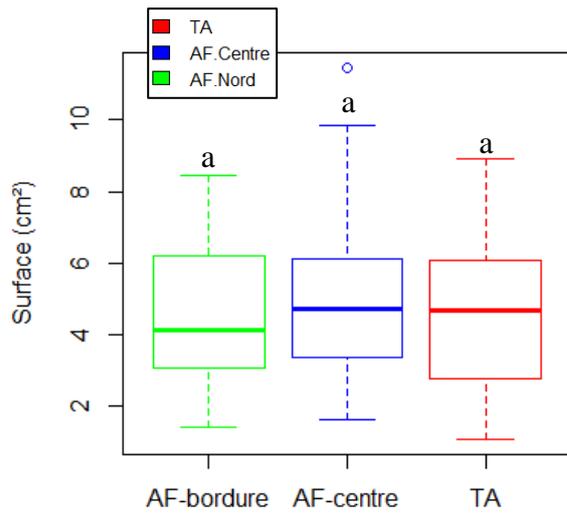
**O
R
G
E**



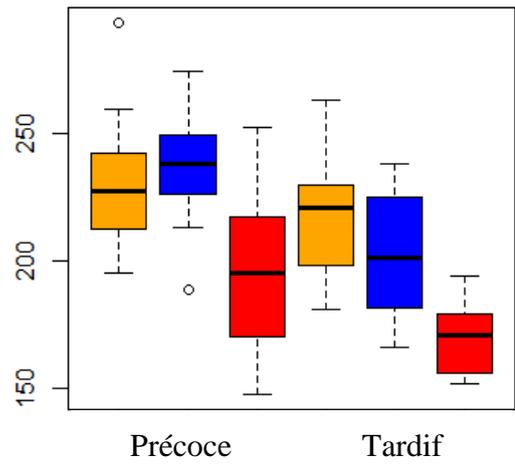
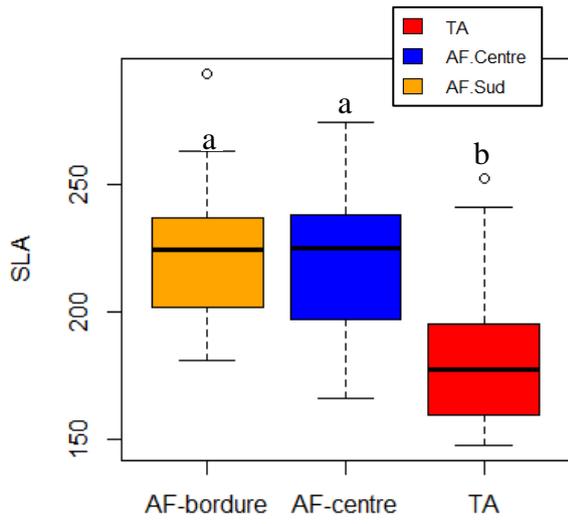
**B
L
E**



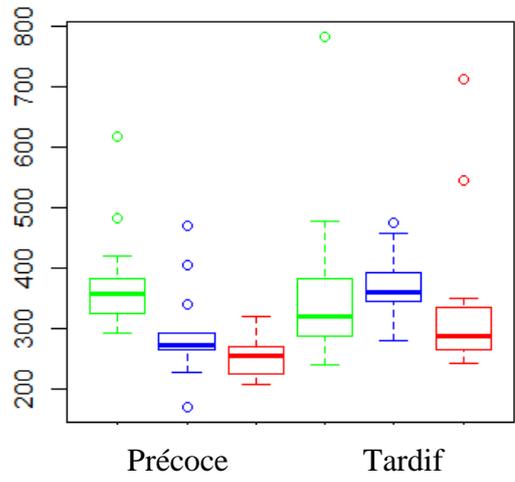
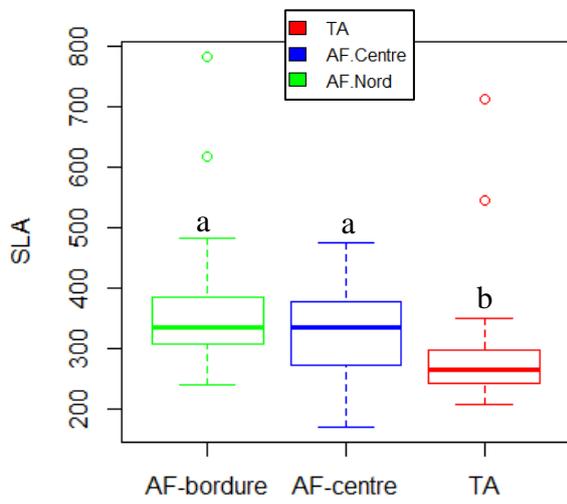
**O
R
G
E**



**B
L
E**



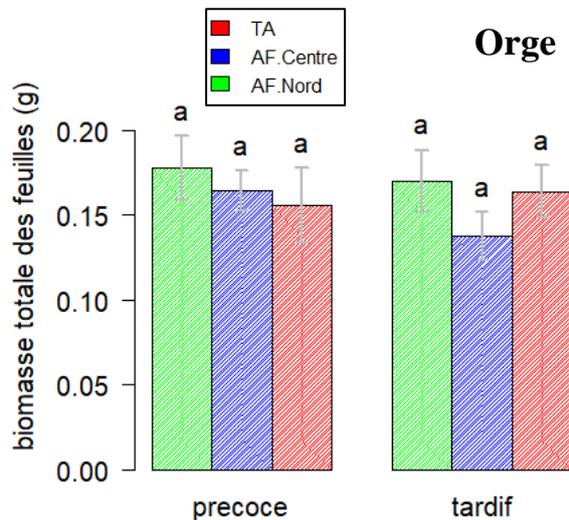
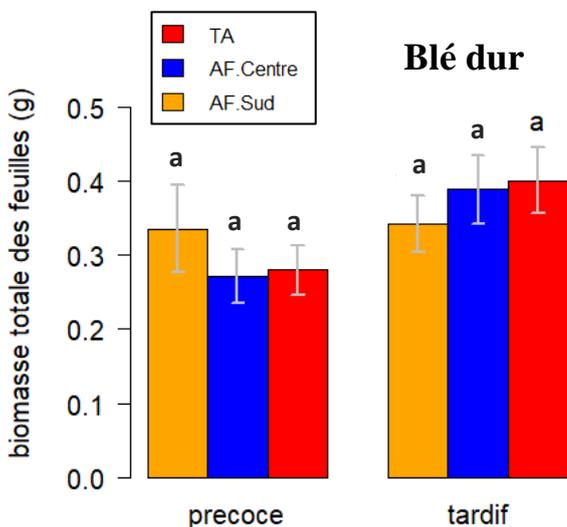
**O
R
G
E**



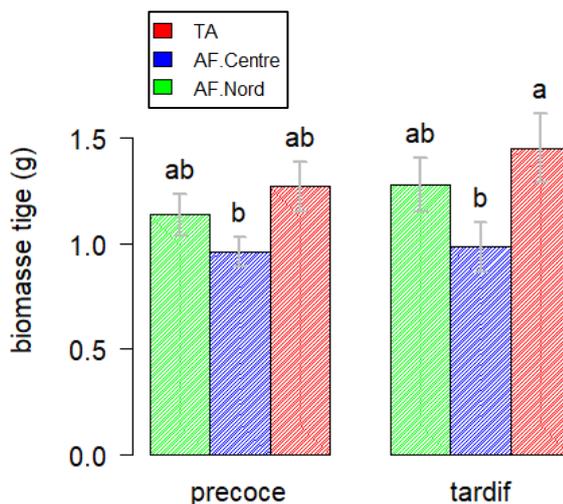
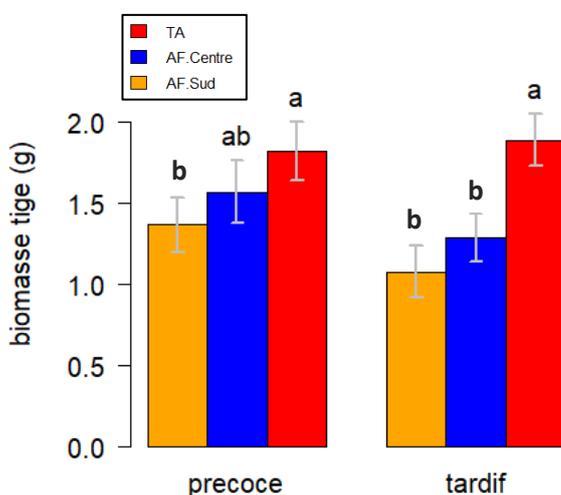
ANNEXE 2 : Représentation graphique des résultats de l'analyse statistique sur la biomasse sèche pour les deux variétés du blé dur et les deux variétés de l'orge.

Chaque espèce a été étudiée séparément et chaque variété étudiée séparément. Les groupes statistiques sont issus de la comparaison de moyenne au sein d'une variété entre le témoin agricole et les deux positions dans l'inter-rang en agroforesterie. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard.

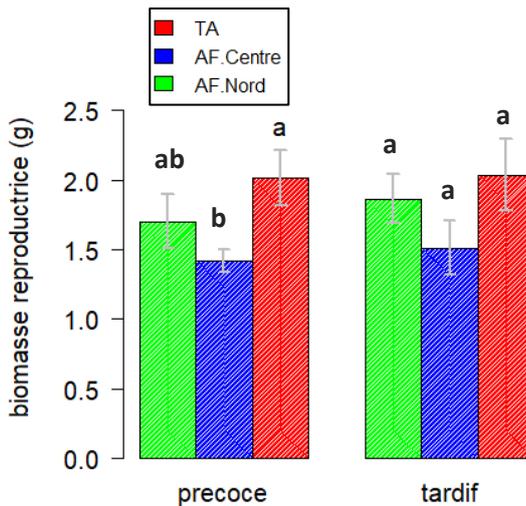
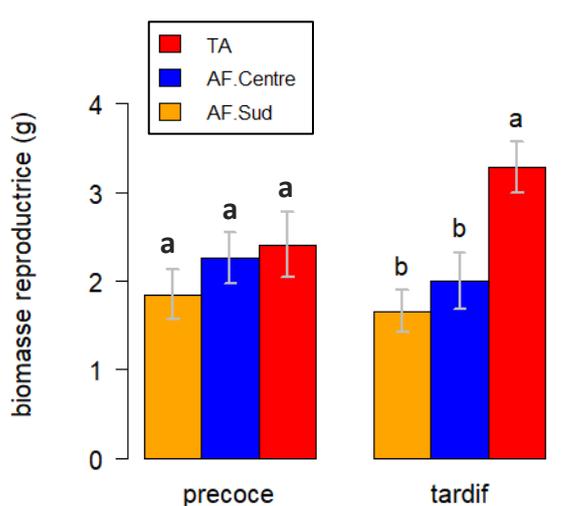
• **Biomasse sèche foliaire**



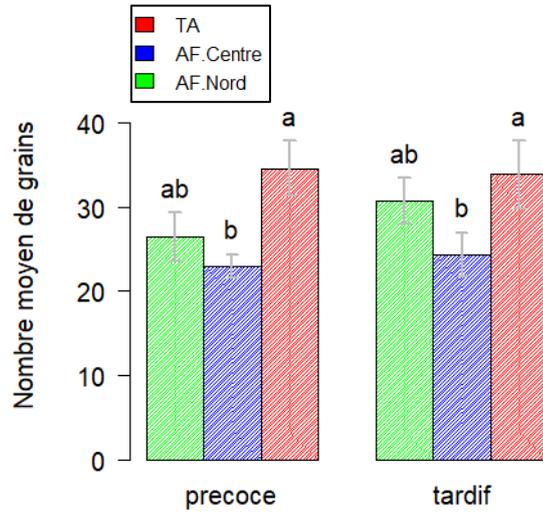
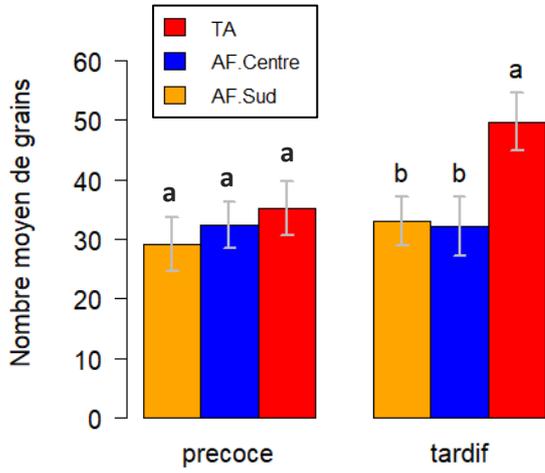
• **Biomasse sèche de la tige**



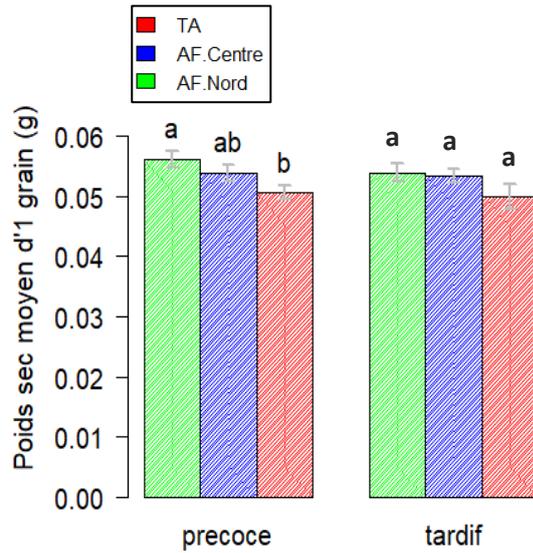
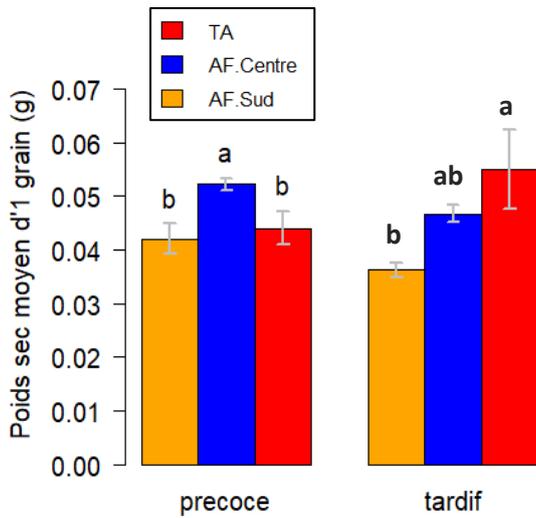
• **Biomasse reproductrice**



• **Nombre de grains moyen par plant**



• **Poids d'un seul grain**





HUBERT, Anaïs, 2017, Plasticité phénotypique des céréales en réponse à la culture en agroforesterie en région méditerranéenne, 37p, mémoire de fin d'études, Clermont-Ferrand, 2017.

STRUCTURE D'ACCUEIL ET INSTITUTIONS ASSOCIEES:

- ◆ Institut National de Recherche Agronomique (INRA)

ENCADRANTS :

- ◆ Maîtres de stage : GOSME, Marie (INRA)
LAURI, Pierre-Eric (INRA)
- ◆ Tuteur pédagogique : VASSAL-COURTAILLAC, Nathalie (VetAgro Sup)

OPTION : Agronomie, Productions Végétales, Environnement

RESUME

L'agriculture de demain devra faire face à de nombreux enjeux environnementaux, économiques et sociétaux. Avec le changement climatique, l'évolution du climat en région méditerranéenne tend à augmenter les stress thermique et hydrique qui ont des conséquences préjudiciables sur le rendement du blé dur et de l'orge. L'agroforesterie, système agricole alliant la culture des arbres et des productions agricoles, peut présenter des avantages tels que la création d'un microclimat diminuant les stress thermique et hydrique. Cependant, les arbres imposent une compétition supplémentaire pour la ressource lumineuse et pour les ressources trophiques. Leur présence impacte sur la morphologie et le développement des cultures céréalières en diminuant leur rendement.

Différentes espèces (blé dur et orge) et variétés (précoce vs tardif) ont été étudiées dans le but d'identifier celles qui s'adapteraient le mieux au contexte agroforestier. Leurs différences morphologiques et de croissance induites par ce système pourraient expliquer les différences de rendement. Par le biais de mesures de la taille des feuilles étendards, de la tige et de biomasse végétale, il a été observé des différences morphologiques telles que des feuilles plus fines en agroforesterie et une biomasse végétale plus faible. Cependant, la hauteur de la tige n'est pas modifiée. Le principal facteur limitant identifié responsable majoritairement des différences morphologiques et du rendement plus faible en agroforesterie est le manque de rayonnement en lien avec la compétition aérienne. Pour diminuer cet inconvénient, le décalage phénologique entre les arbres et les cultures reste important d'où l'intérêt de semer une variété précoce.

Mots clés : agroforesterie, blé dur, orge, morphologie, microclimat, compétition aérienne, compétition racinaire