
Perspectives du relay cropping froment d'hiver-soja en Belgique

Auteur : Lacroix, Christophe

Promoteur(s) : Dumont, Benjamin; Pierreux, Jérôme

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : sciences agronomiques, à finalité spécialisée

Année académique : 2020-2021

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/11113>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

PERSPECTIVES DU RELAY CROPPING FROMENT D'HIVER-SOJA EN BELGIQUE

CHRISTOPHE LACROIX

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES**

ANNÉE ACADEMIQUE 2020-2021

CO-PROMOTEURS: DUMONT BENJAMIN, PIERREUX JÉRÔME

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique¹ de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

¹ Dans ce cas, l'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre du personnel(s) enseignant de GxABT

PERSPECTIVES DU RELAY CROPPING FROMENT D'HIVER-SOJA EN BELGIQUE

CHRISTOPHE LACROIX

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2020-2021

CO-PROMOTEURS: DUMONT BENJAMIN, PIERREUX JÉRÔME

Remerciements

Pour commencer, je tiens à remercier mes co-promoteurs, Jérôme Pierreux et Benjamin Dumont de m'avoir encadré pendant toute la réalisation de ce travail de fin d'études. Vos conseils, aussi bien pratiques que théoriques, m'ont été d'une utilité primordiale.

Je voudrais remercier tout le personnel de la ferme expérimentale et de l'unité de phytotechnie tempérée qui m'ont gentiment accueilli ainsi que pour l'ensemble des opérations réalisées sur le champ d'essais. Sans l'équipe, cette expérimentation n'aurait pas pu aboutir. Je remercie particulièrement Carine Demazy pour l'aide apportée lors des comptages d'adventices et du dénombrement des nodosités.

Je remercie également Laura Fagnant pour ses précieux conseils lors du traitement statistique et pour sa précieuse aide dans R.

Un grand merci à mes amis de la faculté qui m'ont fait vivre 5 années inoubliables, je pense, tout particulièrement à Adèle, Sophie, Robin, Lucas, Marie, Cédric... pour tous les bons moments passés. Je ne peux oublier de remercier les irréductibles agro : Mathys et Lisa pour le soutien et l'entraide durant la réalisation du Master. Je remercie également Laurie pour son soutien durant les derniers mois de mon travail de fin d'études quand l'ensemble de nos amis avaient quitté ces vieux murs de Gembloux.

Je remercie mes sœurs et mes parents qui m'ont soutenu moralement pendant ces études, et qui ont toujours eu confiance en moi.

Enfin je souhaite remercier Lisa pour les nombreux travaux réalisés ensemble pendant ce Master ainsi que pour m'avoir offert un pied à terre sur Gembloux. Je la remercie pour ses relectures successives du travail et pour ses conseils avisés qui m'ont permis de me surpasser.

Résumé

La volonté de l'Union Européenne d'augmenter son autonomie en protéines végétales pousse ses membres à accroître les surfaces cultivées de *Fabaceae*. Dans un contexte de changement climatique et suite à une sélection adaptée du soja, il devient envisageable de cultiver cette plante sous des latitudes élevées. La technique de relay cropping est une technique prometteuse d'association de cultures qui consiste à implanter une deuxième culture au sein d'une première avant que celle-ci ne soit récoltée. L'association permet d'augmenter le rendement global par hectare. Dans ce contexte, la technique de relay cropping a été étudiée en réalisant une association du froment d'hiver et du soja en Belgique. Deux configurations d'implantation (alternance de deux ou trois lignes de chaque culture, respectivement appelée 2*2 et 3*3) et trois densités différentes de semis du soja ont été testées.

Cette expérimentation a été réalisée pendant une année culturale (2019-2020) avec un printemps et un été sec. Le relay cropping froment-soja a eu un « land equivalent ratio » (LER) inférieur à 1 pour la biomasse totale ainsi que pour le rendement. Le soja a subi une compétition trop importante pour la ressource hydrique en relay cropping, empêchant tout bon développement. Le soja en relay cropping n'a pas pu être récolté à cause d'une production de gousses trop faible. Peu de différence entre les deux dispositions et les différentes densités de semis au sein du relay cropping ont été observées. Il semblerait que la configuration en 2*2 augmente le rendement en blé.

Compte tenu de la saison de croissance particulièrement sèche, la ressource hydrique a été le facteur le plus limitant en relay cropping. Dans de telles conditions, les résultats issus de la présente étude semblent indiquer que le relay cropping n'est pas avantageux.

Mots clés :

Soja - *Glycine max*- Froment - *Triticum aestivum* - Relay cropping - Relay intercropping - densité de semis - Belgique

Abstract

The will of the European Union to increase its autonomy in vegetable proteins pushes its members to increase the cultivated areas of Fabaceae. In the context of climate change and following an adapted selection of soybean, it is becoming possible to cultivate this plant in high latitudes. Relay cropping is a promising crop combination technique that consists of planting a second crop within a first crop before it is harvested. The combination makes it possible to increase the overall yield per hectare. In this context, the relay cropping technique was studied by combining winter wheat and soybean in Belgium. Two planting configurations (alternating two or three rows of each crop, respectively called 2*2 and 3*3) and three different soybean sowing densities were tested.

This experiment was carried out during one crop year (2019-2020) with a dry spring and summer. Relay cropping wheat-soybean had a land equivalent ratio (LER) lower than 1 for both total biomass and yield. Soybean has been competing for too much water in relay cropping, preventing good development. Relay cropping soybeans could not be harvested due to low pod production. Little difference between the two arrangements and the different sowing densities within relay cropping were observed. It would seem that the 2*2 configuration increases wheat yield.

Given the particularly dry year, the most limiting factor in relay cropping was water resources. Under such conditions, the results of the present study seem to indicate that relay cropping is not advantageous.

Keywords

Soybean - *Glycine max* – Wheat - *Triticum aestivum* - Relay cropping - Relay intercropping - seed density
.-.Belgium

Liste des abréviations

ATP: Adénosine triphosphate
FAO: Food and Agriculture Organization
glm: modèle linéaire généralisé
LER: Land Equivalent Ratio
MS: matière sèche
PCA: Analyse en composantes principales
PCoA: Analyse en Coordonnées Principales
PMG: poids de mille grains
RC: relay cropping
SAU: Surface Agricole Utile
SNK: Student-Newman et Keuls
UE: Union Européenne
USDA: United States Department of Agriculture

Table des matières

Introduction.....	1
1 Revue de la littérature scientifique	3
1.1 Le soja.....	3
1.1.1 Classification.....	3
1.1.2 Caractérisation	3
1.1.2.1 La graine	5
1.1.2.2 Système racinaire et formation des nodules.....	5
1.1.3 Activité fixatrice des nodosités.....	6
1.2 Défi de la culture du soja en Belgique.....	7
1.3 Le froment d’hiver	8
1.3.1 Classification.....	8
1.3.2 Caractérisation du froment	8
1.3.2.1 La graine	9
1.3.2.2 Degré jour.....	10
1.3.2.3 Développement du froment :.....	10
1.3.3 Fertilisation.....	10
1.4 Association de culture froment-soja	11
1.4.1 Intercropping.....	11
1.4.2 Relay cropping	11
1.4.2.1 Généralités	11
1.4.2.2 Relay cropping soja.....	12
1.4.2.3 Relay cropping froment-soja	13
2 Objectifs.....	15
3 Matériels et méthodes	17
3.1 L’essai expérimental.....	17
3.1.1 Localisation de l’essai	17
3.1.2 Conditions climatiques et données météorologiques.....	17
3.1.3 Dispositif expérimental	18
3.1.4 Opérations culturales	19
3.2 Observations et paramètres mesurés	20
3.2.1 Observations des stades de développement du froment et du soja	23
3.2.2 Levée du soja	23
3.2.3 Relevé des adventices	23

3.2.4	Temps de désherbage	23
3.2.5	Maladies et ravageurs	23
3.2.6	Hauteur.....	24
3.2.7	Biomasse aérienne	24
3.2.8	Longueur entre-nœud, diamètre de la tige, hauteur première gousse.....	24
3.2.9	Nodosités.....	25
3.2.10	Poids de mille grains.....	25
3.2.11	Rendement en grain du froment et du soja.....	25
3.2.12	Nombre de gousses, de graines par gousse, nombre d'étages de gousse.....	25
3.2.13	Taux de protéine, humidité, poids à l'hectolitre	25
3.3	Traitements statistiques.....	26
4	Résultats et discussions.....	29
4.1	Stade de développement du froment et du soja	29
4.2	Levée du soja.....	30
4.3	Maladies et ravageurs	31
4.4	Relevé des adventices	33
4.5	Temps de désherbage	38
4.6	Hauteur des plantes	39
4.7	Biomasse aérienne	41
4.8	LER de la biomasse aérienne	44
4.9	Longueur entre-nœud, diamètre de la tige, hauteur première gousse.....	46
4.10	Nodosité	49
4.11	Poids de mille grains.....	52
4.12	Rendement en grain du froment et du soja.....	53
4.13	LER rendement.....	54
4.14	Nombre de gousses, de graines par gousse, nombre d'étages de gousse.....	55
4.15	Taux de protéine	57
4.16	Analyse globale, corrélation et PCA	58
5	Conclusion	63
6	Annexes	73

Table des figures

Figure 1: Schéma d'une plante de soja au stade végétatif.....	4
Figure 2: Schéma d'une plante de soja avec développement des fruits et graines.....	4
Figure 3: Principe de formation des nodules.	6
Figure 4: Morphologie du blé.....	9
Figure 5: Graphique des précipitations moyennes et des températures minimales, maximales et moyennes à Gembloux en fonction du mois.....	17
Figure 6: Schéma des deux dispositions d'implantations en relay cropping.	18
Figure 7: Plan expérimental du relay cropping froment-soja.	19
Figure 8: Ligne du temps présentant les dates des mesures et opérations réalisées.	22
Figure 9: Schéma des différents niveaux de test statistique.....	26
Figure 10: Pourcentage de levée du soja en fonction de la densité de semis et de l'association.	30
Figure 11: Photo d'une racine de soja nécrosée.	32
Figure 12: Photo d'une feuille de soja avec nécroses blanchâtres entourées d'un halo brunâtre lui-même entouré d'une zone de dépigmentation en mosaïque.	32
Figure 13: Nombre total d'adventices en fonction de la date de relevé.....	33
Figure 14: Biomasse aérienne d'adventices en fonction de la densité de semis et de l'association. ...	34
Figure 15: Pourcentage de la biomasse d'adventices par rapport à la biomasse totale en fonction de la densité de semis et de l'association.....	35
Figure 16: PCoA réalisée sur la flore d'adventices selon l'association.....	36
Figure 17: Représentation des différentes variables selon les 2 axes de la PCoA réalisée sur la flore d'adventice selon l'association.....	36
Figure 18: Temps de désherbage manuel en fonction de l'association.	38
Figure 19: Hauteur du froment à maturité en fonction de la densité de semis et de l'association.	39
Figure 20: Hauteur du soja après moisson du froment en fonction de la densité de semis et de l'association.	40
Figure 21: Régression linéaire de la biomasse totale du froment en fonction de la somme des degrés jours.....	41
Figure 22: Régression linéaire de la biomasse totale du soja en fonction de la somme des degrés jours.	42
Figure 23: Biomasse aérienne du froment au stade maturation des grains en fonction de l'association et de la densité de semis.....	43
Figure 24: LER de la biomasse en fonction de l'association et de la densité.	45
Figure 25: Longueur du premier entre-noeud en fonction de l'association et de la densité de semis.	46
Figure 26: Diamètre de la tige au premier noeud en fonction de l'association et de la densité de semis.	47
Figure 27: Hauteur de la première gousse de soja en fonction de l'association et de la densité de semis.	48
Figure 28: glm du nombre de nodosités en fonction de la somme des degrés jours, de l'association et de la densité.	49
Figure 29: Nombre de nodosités totales par plante le 24 août en fonction de l'association et de la densité de semis.....	50
Figure 30: Nombre de nodosités par plante en fonction du type de relay cropping.....	50

Figure 31: Nombre de nodosités en fonction de la date, de l'association, de la densité et selon l'activité des nodules.	51
Figure 32: Poids de mille grains du froment d'hiver en fonction de l'association et de la densité.	53
Figure 33: Rendement en froment à 15% d'humidité (en kg/ha) en fonction de l'association et de la densité de semis.....	54
Figure 34: Nombre d'étages de gousse de soja en fonction de l'association et de la densité de semis.	56
Figure 35: Nombre moyen de grains par gousse en fonction de l'association et de la densité de semis.	56
Figure 36: Nombre de gousses de soja par plante en fonction de l'association et de la densité de semis.	57
Figure 37: Taux de protéine en fonction de l'association et de la densité de semis.	58
Figure 38: Corrélacion entre les paramètres mesurés sur soja.	59
Figure 39: Corrélacion entre les paramètres mesurés sur froment.	59
Figure 40: PCA des différentes variables pour les trois types d'associations	61
Figure 41: Représentation des différentes variables selon les 2 axes de la PCA.	61

Table des tableaux

Tableau 1: Classification de l'espèce Glycine Max. de son nom vernaculaire soja.	3
Tableau 2: Classification de l'espèce Triticum aestivum L. de son nom vernaculaire blé tendre ou encore froment.....	8
Tableau 3 : Modalités de l'essai relay cropping froment-soja.	18
Tableau 4: Opérations culturales réalisées sur l'essai de relay cropping froment-soja.....	20
Tableau 5: Observations et mesures réalisées sur les cultures du froment et du soja.....	21
Tableau 6: Tableau de l'évolution des stades et de la somme des degrés jours calculée depuis la levée de manière hebdomadaire, pour le soja et le froment d'hiver.....	29
Tableau 7: Caractéristiques des régressions linéaires de la biomasse aérienne du froment en fonction de l'accumulations des degrés jours.	42
Tableau 8 : Caractéristiques des régressions linéaires de la biomasse aérienne du soja en fonction de l'accumulation des degrés jours.....	43

Introduction

La population mondiale ne cesse de croître. Selon la Food and Agriculture Organization (FAO), en prévoyant une population qui atteindra les 9.1 milliards en 2050, la production alimentaire doit s'accroître de 70% (FAO, 2009) pour subvenir à la demande. De plus, la demande de la société à avoir une agriculture plus durable et la nécessité d'avoir une production résiliente face au changement climatique poussent le monde agricole à développer de nouvelles techniques culturales mieux adaptées à ces enjeux. L'association de cultures est une des réponses possibles pour l'agriculture du futur (Corre-Hellou *et al.*, 2013; Bedoussac *et al.*, 2015; Sandler, Nelson et Dudenhoeffer, 2015; Duchene, Vian et Celette, 2017; Tanveer *et al.*, 2017). Le relay cropping est un type d'association de cultures pour lequel la date de semis et de récolte des deux plantes associées diffère. Le relay cropping se caractérise donc par une période de croissance seule et une période de croissance commune (Tanveer *et al.*, 2017). Cette technique est déjà largement utilisée en Asie et en Amérique, mais est encore peu développée en Europe (Zhang, Li et Sun, 2001; Liu *et al.*, 2015; Sandler, Nelson et Dudenhoeffer, 2015)

L'Union Européenne (UE) est une grande consommatrice de protéines végétales (consommation totale de 27 millions de tonnes de protéines brutes (année 2016-2017)), dont la source principale provient du soja (14.3 millions de tonnes de protéines brutes (année 2016-2017)), alors que son autosuffisance en soja n'est que de 5%. Ainsi, la dépendance à l'importation de l'UE pour les produits riches en protéines est grande. Cette dépendance augmente les risques de problème d'approvisionnement (Commission Européenne, 2018). De plus, la production de soja importé des Amériques a un impact lourd sur l'environnement, notamment dû aux changements d'allocation des terres qui en résultent (WWF, 2014; Fehlenberg *et al.*, 2017). Pour résoudre ces problèmes, le Parlement européen a adopté une résolution le 27/03/2018 concernant la stratégie européenne pour la promotion des cultures protéagineuses (Denanot, 2018). Afin d'augmenter la production en protéines en Belgique, plusieurs voies sont envisagées dont : (1) augmenter la production de cultures protéagineuses déjà cultivées et augmenter la fréquence dans la rotation, car seulement 3% des terres arables sont actuellement destinées aux *Fabaceae* (Commission Européenne, 2018); (2) introduire de nouvelles cultures protéagineuses plus riches en protéines, telles que le soja. En effet, sous l'impact du réchauffement climatique et grâce à une sélection variétale adaptée, il devient envisageable de cultiver des plantes comme le soja à des latitudes élevées (Olesen *et al.*, 2011; Kurasch, Hahn, Leiser, Starck, *et al.*, 2017; Pannecouque, Goormachtigh, Heungens, *et al.*, 2018; Lamichhane *et al.*, 2019; Schoving *et al.*, 2020).

Par conséquent, en Belgique, l'introduction de la culture de soja en relay cropping avec le froment est considérée. Ceci pourrait permettre une meilleure résilience de la protéagineuse et une augmentation du rendement à l'hectare, comme cela a été rapporté en Amérique et en Asie (Zhang, Li et Sun, 2001; Nelson, Massey et Burdick, 2011). L'objectif de ce travail de fin d'études est d'initier l'étude de cette culture innovante en Belgique.

1 Revue de la littérature scientifique

1.1 Le soja

La culture du soja est une des cultures les plus développées au monde avec un commerce international intense (FAOSTAT, 2020). Un compte rendu de la situation internationale ainsi qu'europpéenne est disponible en Annexe 1.

1.1.1 Classification

Une classification taxonomique du soja proposée par le service de conservation des ressources naturelles du United States Department of Agriculture (USDA) est basée sur la classification de Cronquist et est présentée dans le Tableau 1.

Tableau 1: Classification de l'espèce *Glycine Max.* de son nom vernaculaire soja (Classification | USDA PLANTS).

Classification	Cronquist
Règne	Plantae
sous-règne	Tracheobionta
Super division	Spermatophyta
Division	Magnoliophyta (Angiosperme)
Classe	Magnoliopsida (Dicotylédon)
sous classe	Rosidae
ordre	Fabales
Famille	Fabaceae
genre	<i>Glycine</i> Willd.
espèces	<i>Glycine max</i> (L.) Merr.

1.1.2 Caractérisation

Glycine max est une espèce tétraploïde diploïdisée ($2n=40$) annuelle, herbacée de port dressé originaire d'Asie (Annexe 2). La plante peut mesurer jusqu'à 1.5m de haut. La majorité des variétés sont couvertes de trichomes, d'autres sont toutefois glabres (Agence canadienne d'inspection des aliments, 1996).

Le premier nœud porte des feuilles simples opposées tandis que les feuilles suivantes sont trifoliées alternes (Fehr et Caviness, 1977) (Figure 1). L'inflorescence se développe au niveau de chaque nœud de la tige principale (Mcwilliams, Berglund et Endres, 1999). La fleur est de type *Papilionaceae*, elle possède 10 étamines (9 soudées et une libre) et un carpelle (Agence canadienne d'inspection des aliments, 1996). La plante est principalement autogame avec un taux de pollinisation croisée estimé à moins de 1% des cas (Caviness, 1966; Agence canadienne d'inspection des aliments, 1996). Les fruits

sont des gousses mesurant 2 à 7cm de long et possédant entre 2 et 4 graines rondes (Figure 2) (Fehr et Caviness, 1977; Munger *et al.*, 1997 ; Soltner, 1999)

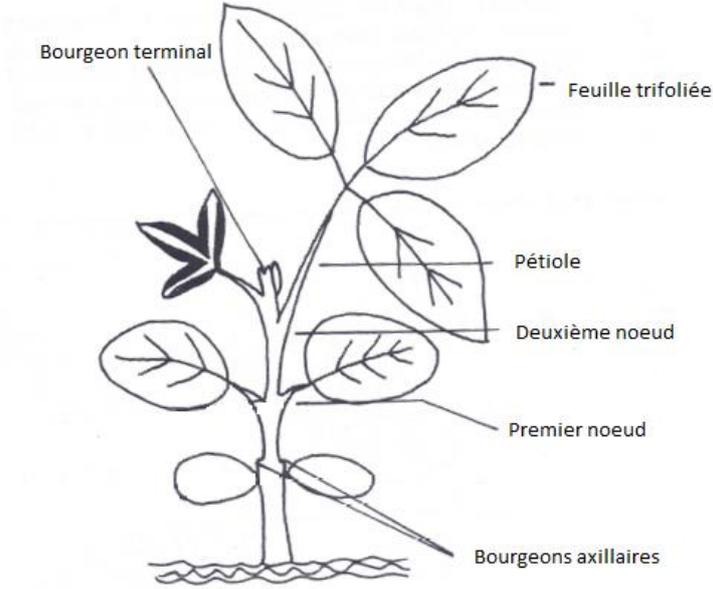


Figure 1: Schéma d'une plante de soja au stade végétatif (Fehr et Caviness ,1977).

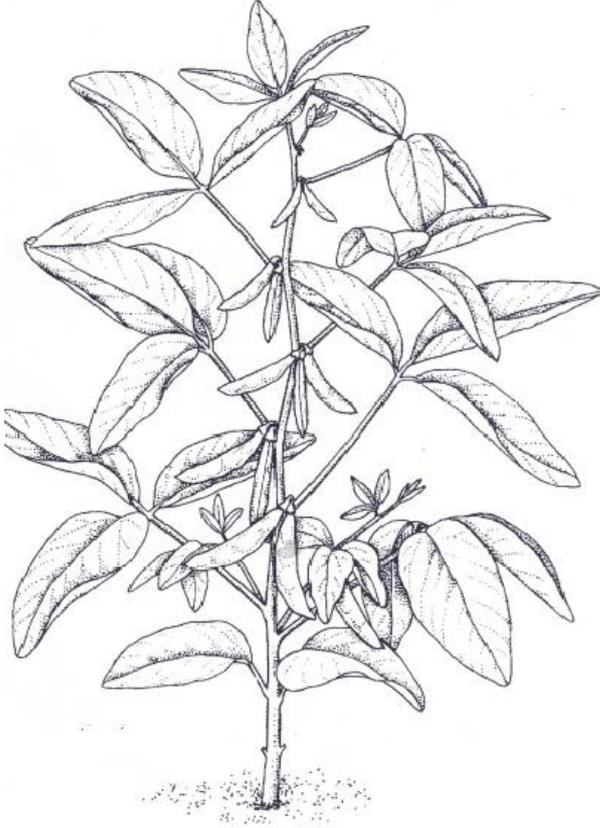


Figure 2: Schéma d'une plante de soja avec développement des fruits et graines (Munger et al.1997).

Le soja est une plante thermophile et sensible à la photopériode. C'est une plante de jours courts pour laquelle la floraison est déterminée par la durée du jour (Hadley *et al.*, 1984; Caffaro *et al.*, 1988). La photopériode en post fleuraison régule le développement du soja aussi bien du point de vue végétatif que sur les caractéristiques directement liées au rendement (Kantolic et Slafer, 2001; Han *et al.*, 2006).

Les températures de base de germination et d'émergence sont de 4 °C tandis que les températures optimales et maximales sont respectivement de 30 et 40°C (Lamichhane *et al.*, 2020). Néanmoins, Shoving *et al.* (2019) relève que la température optimale dépend de la variété de soja utilisée et varie entre 22 et 32°C.

1.1.2.1 La graine

Glycine max est la graine cultivée la plus riche en protéine. Elle contient 40% de protéine, 21% d'huile, 34% d'hydrate de carbone et 5% de cendres (Medic, Atkinson et Hurburgh, 2014). Toutefois, la composition de la graine varie selon les cultivars (Medic, Atkinson et Hurburgh, 2014). Cette composition est également influencée par les facteurs abiotiques. La température de croissance est positivement corrélée avec la concentration en huile, mais ne semble pas impacter la concentration en protéines (Medic, Atkinson et Hurburgh, 2014).

La graine de soja possède des molécules allergisantes ainsi que des facteurs antinutritionnels. Les lectines et les inhibiteurs de la trypsine sont des facteurs antinutritionnels engendrant une diminution de la digestion et de l'absorption des aliments. (Medic, Atkinson et Hurburgh, 2014; Heuzé et Tran, 2016). Ces molécules posent notamment problème chez les monogastriques, mais n'impactent pas les ruminants grâce à la dégradabilité de celles-ci dans le rumen (Heuzé et Tran, 2016).

Cependant, ces facteurs antinutritionnels sont thermosensibles. Un traitement thermique permet donc de diminuer leurs concentrations en les dénaturant (Medic, Atkinson et Hurburgh, 2014; Heuzé et Tran, 2016).

1.1.2.2 Système racinaire et formation des nodules

La racine du soja est de type pivotant, sur laquelle se développe le système racinaire latéral. Des nodosités se développent sur ce système racinaire (Agence canadienne d'inspection des aliments, 1996). Les nodosités sont formées par la symbiose de la bactérie du genre *Bradyrhizobium* et du développement des cellules corticales de la plante. La formation de ces nodosités (Figure 3) se déroule en plusieurs étapes (Raven, 2014) :

- ➔ La bactérie *Bradyrhizobium* se fixe à l'extrémité d'un poil absorbant de la plante hôte que cette bactérie repère grâce à la production de flavonoïdes et de bêtaïnes émis par les poils. (Raven, 2014; Taiz *et al.*, 2015).
- ➔ Une fois la bactérie fixée, le poil absorbant se développe et se courbe enveloppant ainsi les bactéries (Raven, 2014).
- ➔ L'invagination des parois cellulaires des poils au niveau de la pénétration forme une structure tubulaire appelée filament d'infection. Ce filament permet l'infection de la base des poils absorbants et ensuite des cellules corticales (Raven, 2014).

- ➔ Les cellules corticales qui ont été stimulées à se diviser forment un primordium de nodule. Celui-ci, une fois le filament d'infection arrivé au primordium, libère les *Bradyrhizobium* dans des enveloppes provenant de la membrane plasmique des cellules hôtes. L'ensemble des *Bradyrhizobium* contenu dans ces enveloppes sont appelés bactéroïdes (Raven, 2014).
- ➔ La multiplication des bactéroïdes dans la membrane des cellules du primordium forme un nodule mature. L'ensemble de la membrane et des bactéroïdes est une unité fixatrice d'azote fonctionnelle et est appelé un symbiosome. (Raven, 2014).

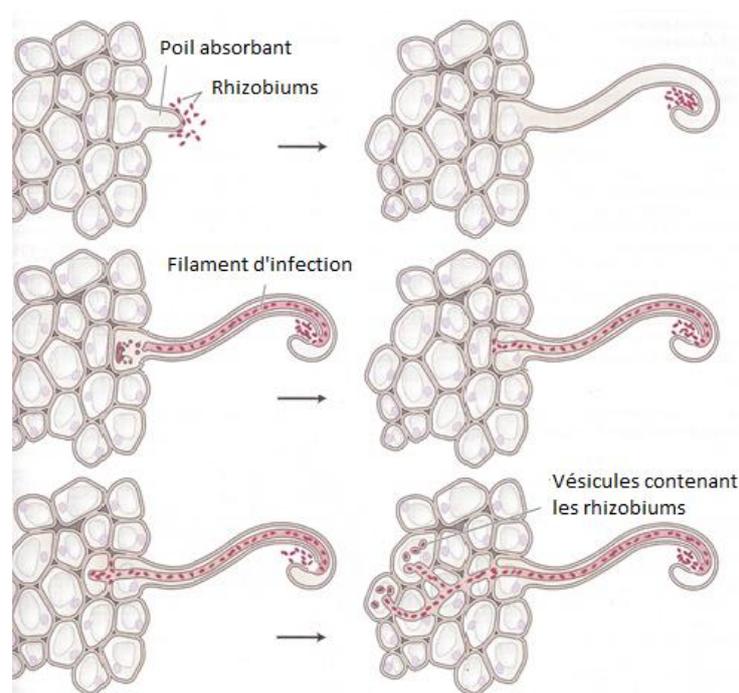


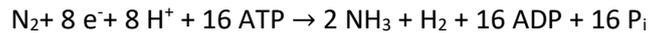
Figure 3: Principe de formation des nodules (Taiz et al).

La régulation de la nodulation par la plante permet d'éviter une production excessive de nodules qui se traduirait par une surconsommation de sucre par l'ensemble des nodules présents sur la plante. Cette régulation dépend d'un ensemble d'hormones. Les hormones comme l'auxine, les cytokinines, les gibbérellines et les brassinostéroïdes favorisent la nodulation. A contrario l'acide abscissique, l'éthylène, l'acide jasmonique et l'acide salicylique l'inhibent (Raven, 2014).

1.1.3 Activité fixatrice des nodosités

Le soja possède des nodules déterminés. Ces derniers ne possèdent donc pas un méristème permanent contrairement aux nodules indéterminés (présents dans le pois par exemple). Ils sont de forme sphérique et sans gradient développemental. Ils commencent par une division des cellules externes du cortex, tandis que pour des nodules indéterminés, la division cellulaire commence par les cellules internes du cortex (Raven, 2014).

La fixation de l'azote atmosphérique, N_2 en NH_3 , est réalisée dans les nodules grâce au complexe de l'enzyme nitrogénase des bactéroïdes qui catalyse la réaction. Cette opération est très coûteuse en Adénosine triphosphate (ATP) (Raven, 2014; Taiz et al., 2015) comme le montre l'équation qui suit (Taiz et al., 2015):



L'oxygène est un inhibiteur de la nitrogénase, mais il doit toutefois être présent pour permettre la respiration cellulaire nécessaire à la production d'ATP fortement utilisée par la nitrogénase. C'est pourquoi la concentration en oxygène doit être fortement régulée au sein du nodule (Raven, 2014; Taiz *et al.*, 2015). C'est la leghémoglobine, protéine responsable de la couleur rougeâtre des nodules, qui assure ce rôle grâce à son groupement hème qui possède une grande affinité pour l'O₂ (Taiz *et al.*, 2015) jouant ainsi le rôle de tampon (Raven, 2014).

Une fois le NH₃ produit, celui-ci est converti sous forme organique. Concernant le soja, l'azote organique est exporté des nodosités dans la racine, puis transporté par le xylème dans toute la plante sous forme d'uréides (dérivé de l'urée)(Taiz *et al.*, 2015).

1.2 Défi de la culture du soja en Belgique

Dans un contexte de changement climatique et à l'aide de la sélection variétale, il devient envisageable de cultiver *Glycine max.* Merr. à des latitudes élevées (Olesen *et al.*, 2011; Kurasch, Hahn, Leiser, Starck, *et al.*, 2017). Toutefois, cultiver à des latitudes entre 43 et 52 degrés nord expose la plante à des gammes de températures et à des variations de la photopériode plus larges (Schoving *et al.*, 2020).

En Belgique, étant donné le climat actuel, seules les variétés précoces de groupe MG000 sont cultivées (Annexe 3) (Kurasch, Hahn, Leiser, Starck, *et al.*, 2017; Pannecoucq, Goormachtigh, Heungens, *et al.*, 2018). On utilise des variétés semi-déterminées ou indéterminées (Annexe 4), car elles permettent d'avoir un plus grand rendement grâce à une floraison plus précoce et un maintien du développement végétatif une fois la floraison commencée (Aper, De Clercq et Baert, 2016).

Dans nos régions, le soja doit être semé vers le 1^{er} mai pour éviter les risques de dégâts causés par le gel (Aper, De Clercq et Baert, 2016). La période de récolte idéale se situe, quant à elle, entre la fin de septembre et le début du mois d'octobre. Plus tard, les conditions humides et la diminution du temps d'ensoleillement rendent l'assèchement et la maturation du grain délicat. De plus, l'humidité favorise le développement de moisissures diminuant de ce fait la qualité du grain (Aper, De Clercq et Baert, 2016).

La culture du soja est intéressante du point de vue environnemental. En effet, celle-ci ne demande que peu d'intrants. Grâce à la symbiose avec la bactérie *Bradyrhizobium*, aucun apport azoté n'est nécessaire (Gourrat, Chambert et Berard, 2020). Cette bactérie n'est cependant pas présente naturellement dans les sols belges et doit être inoculée pour permettre la fixation de l'azote atmosphérique et, de ce fait, améliorer le rendement ainsi que la teneur en protéines (Pannecoucq, Goormachtigh, Ceusters, *et al.*, 2018). De plus, la culture de soja n'est sensible qu'à peu de maladies et ravageurs (Annexe 5) (Gourrat, Chambert et Berard, 2020). Un certain nombre de ceux-ci ne sont pas encore présents en Europe du Nord (Hartman, West et Herman, 2011; Hypp : *encyclopédie en protection des plantes - Les maladies et ravageurs*, 2019; Gourrat, Chambert et Berard, 2020), mais il semble important de surveiller l'évolution de leurs aires de distributions.

La prédation des graines et des jeunes plantules par les oiseaux et les lièvres peut être un réel problème surtout en situation d'expérimentation et peut provoquer des pertes atteignant 100% si aucune mesure de protection n'est mise en place (Lamichhane *et al.*, 2020).

1.3 Le froment d'hiver

Le blé est la troisième céréale la plus cultivée dans le monde juste après le maïs et le riz avec une production mondiale de 734 millions de tonnes en 2018 et une production de l'Europe (des 28) de 138 millions de tonnes pour l'année 2018 (FAOSTAT, 2020). La production de blé en Europe est restée relativement stable ces 20 dernières années (FAOSTAT, 2020).

En Wallonie, le froment est la plante la plus cultivée. En 2015, cette culture représentait 18.4% de la SAU totale, soit 131 768 ha. *Triticum aestivum* L. est majoritairement destiné pour l'alimentation animale, l'amidonnerie et les biocarburants. Le blé tendre, destiné au secteur de la boulangerie, représente moins de 10% du blé produit en Belgique (Filagri,2020).

1.3.1 Classification

La classification taxonomique du blé tendre proposée par le service de conservation des ressources naturelles de l'USDA est basée sur la classification de Cronquist. (*Classification | USDA PLANTS*). Celle-ci se retrouve dans le Tableau 2.

Tableau 2: Classification de l'espèce *Triticum aestivum* L. de son nom vernaculaire blé tendre ou encore froment.

Classification	Cronquist
Règne	Plantae
sous-règne	Tracheobionta
Super division	Spermatophyta
Division	Magnoliophyta (Angiosperme)
Classe	Liliopsida (Monocotylédon)
sous classe	Commelinidae
ordre	Cyperales
Famille	Poaceae
genre	<i>Triticum</i> L.
espèces	<i>Triticum aestivum</i> L.

1.3.2 Caractérisation du froment

Le froment est une plante herbacée provenant du Croissant fertile (Annexe 6), principalement autogame, qui possède un système racinaire dit fasciculé (Annexe 7). La plante est composée d'un nombre variable de talles. L'inflorescence, portée par un pédoncule, est un épi (Figure 4) (Annexe 8).

Lors du développement végétatif, le blé réalise le tallage qui peut être défini comme « le système de ramification des graminées qui se développe dans une zone court-nouée, le plateau de tallage » (Cavelier *et al.*, 1990).

Le plateau de tallage est donc, quant à lui, la zone court-nouée située à 2cm de profondeur quelle que soit la profondeur du semis. Le froment produit des talles primaires qui peuvent elles-mêmes produire d'autres talles, dites talles secondaires. L'ensemble des talles n'a donc ni le même âge ni la même taille (Cavelier *et al.*, 1990).

1.3.2.2 Degré jour

La plante croit sous des températures variant de 0 à 35°C. Le degré jour est de base 0. Une accumulation de 60 degrés-jour est nécessaire pour permettre la germination de la plante (Rosillon *et al.*, 2020). Une fois la plante arrivée à l'épiaison, il faut environ une accumulation de 800 degrés-jour pour arriver à la maturité du blé (Cavelier *et al.*, 1990).

1.3.2.3 Développement du froment :

La période idéale pour emblaver *T. aestivum* L. en Belgique se situe entre mi- octobre et mi-novembre. Toutefois il est possible de réaliser un emblavement plus tardif (décembre-février), mais celui-ci entraîne en moyenne une diminution de rendement et de plus grands risques de difficulté d'emblavement (Blanchard *et al.*, 2019). La croissance du blé peut être divisée en plusieurs grands stades allant de la germination jusqu'à la sénescence de la plante (Annexe 11).

Le froment est une plante sensible à une multitude de maladies cryptogamiques et de ravageurs qui peuvent entraîner une diminution de rendement ou endommager la qualité sanitaire de la récolte (Annexe 9).

1.3.3 Fertilisation

Le froment est une plante exigeante en azote, il est donc rare que la minéralisation suffise aux besoins de la plante (environ 320kg N/ha). Les besoins en azote évoluent avec le développement de la plante. Ceux-ci sont faibles au début et deviennent plus importants à partir du redressement et intenses à l'approche du stade « dernière feuille ». En effet, presque 50% des prélèvements azotés sont réalisés à partir de ce stade. La fumure azotée est généralement appliquée en trois ou en deux fractions. Lors d'une fumure azotée en trois fois, celle-ci est réalisée aux stades « tallage », « redressement » et enfin « dernière feuille » tandis qu'en deux fractions, celles-ci sont apportées au « tallage-redressement » (appelé fraction intermédiaire) et au stade « dernière feuille ». Cette division permet une meilleure efficacité de l'utilisation de l'azote minéral (coefficient d'utilisation de 50%, 70% et 75% pour les stades tallage, redressement et dernière feuille respectivement.) ainsi qu'un apport en azote suffisant lors des phases clés du développement du blé. Une fertilisation en deux fractions est appliquée quand les précédents culturaux ont un reliquat élevé, quand le blé est semé précocement ou encore quand les restitutions de matières organiques sont élevées. La fumure de référence pour l'année 2020 est de 185kg N/ha répartie en 60-60-65 ou 90-95 selon le type de fractionnement (*Froment – Livre Blanc Céréales*, no date).

1.4 Association de culture froment-soja

1.4.1 Intercropping

L'intercropping est défini comme la croissance simultanée de deux ou plusieurs espèces dans le même champ pendant une période de temps significative, mais qui ne sont pas forcément plantées ni récoltées au même moment (Willey, 1979; Vandermeer *et al.*, 1998; Malézieux *et al.*, 2009; Bedoussac *et al.*, 2015).

Les avantages d'associer une légumineuse à une céréale sont multiples et d'autant plus marqués que le système est à faibles intrants. L'association se traduit par une amélioration de l'utilisation des ressources abiotiques et provoque la plupart du temps :

- un rendement supérieur à la moyenne des rendements des espèces cultivées en pur (Bedoussac *et al.*, 2015),
- une biomasse d'adventices plus faible qu'en culture de la *Fabaceae* (Hauggaard-Nielsen, Ambus et Jensen, 2001; Bedoussac *et al.*, 2015),
- une qualité du grain de la céréale supérieure grâce à une augmentation de sa teneur en protéine (Bedoussac *et al.*, 2015).

Il semble donc intéressant de mettre en place des systèmes d'intercropping légumineuse-céréale. Toutefois, le choix des espèces, des variétés, de la fertilisation, de la densité de semis, sont autant de facteurs agronomiques à prendre en compte et à optimiser pour arriver à une bonne performance agronomique (Bedoussac *et al.*, 2015).

L'intercropping le plus employé en Europe est l'association du froment d'hiver avec du pois d'hiver. L'association des deux espèces permet de diminuer la fertilisation azotée du froment tout en ayant un Land Equivalent Ratio (LER) supérieur à 1, le LER étant défini comme la surface relative de culture pure nécessaire pour obtenir le même rendement qu'en culture associée (FAO, 1985). De plus, elle permet d'augmenter la quantité de protéines dans le grain rendant des variétés considérées comme non panifiables en panifiables, apportant ainsi une plus-value à la récolte. Enfin, elle diminue les risques d'accidents culturaux comme la verse du pois (Bedoussac et Justes, 2010; Pierreux *et al.*, 2013, 2019; Bedoussac, Journet et Hinsinger, 2017).

1.4.2 Relay cropping

1.4.2.1 Généralités

Dans le cas d'une association de froment-soja, les dates de semi et de récolte ne sont pas identiques. Il s'agit donc d'un cas particulier d'intercropping appelé relay cropping. Le relay cropping peut être défini comme une méthode de cultures associées qui consiste à implanter une deuxième culture au sein d'une première avant que celle-ci ne soit récoltée (Tanveer *et al.*, 2017). La technique de relay cropping permet dans la plupart des cas une amélioration de l'utilisation des terres pour une année culturale. Ce dernier point se traduit par un LER plus grand que 1 (Tanveer *et al.*, 2017). Tout comme pour l'intercropping, le relay cropping permet :

- ➔ d'améliorer l'efficacité d'utilisation des différents nutriments, de l'eau et de la lumière (Tanveer *et al.*, 2017),
- ➔ de diminuer la quantité d'engrais azoté lors d'un relay cropping avec une légumineuse (Tanveer *et al.*, 2017),
- ➔ d'améliorer dans certains cas (dépendant des plantes associées) la pression des ravageurs par la présence d'un plus grand nombre d'auxiliaires de culture et par le camouflage physique ou chimique (production de molécules volatiles) de la plante (Tanveer *et al.*, 2017),
- ➔ de réduire la biomasse d'adventices (Amossé *et al.*, 2013; Tanveer *et al.*, 2017; Su *et al.*, 2018),
- ➔ d'améliorer la qualité des sols en diminuant l'érosion, en augmentant la teneur en matière organique des sols et en réduisant la lixiviation des éléments nutritifs (Tanveer *et al.*, 2017).

Le relay cropping présente donc des avantages et a déjà bien été développé comme par exemple pour l'association maïs-soja qui est actuellement l'un des relay cropping les plus répandus dans le monde (Monzon *et al.*, 2014; Raza *et al.*, 2019). Lorsque celui-ci est bien pratiqué avec une densité optimale et un agencement idéal permettant d'éviter un ombrage trop important, le relay cropping peut permettre d'obtenir des LER de 1.7 (Chen *et al.*, 2017; Raza *et al.*, 2019). Les systèmes racinaires des deux plantes ont des niches écologiques différentes permettant d'augmenter l'utilisation des ressources en réduisant la concurrence (Chen *et al.*, 2017). De plus, un transfert d'azote du soja au maïs a été démontré (Yong *et al.*, 2015). Le relay cropping maïs-soja permet donc de réduire la fertilisation azotée tout en gardant un bon rendement, mais permet aussi d'améliorer l'interception de la lumière et d'obtenir un meilleur contrôle des adventices, maladies et ravageurs (Iqbal *et al.*, 2019).

1.4.2.2 Relay cropping soja

En relay cropping, le soja est associé à plusieurs plantes différentes.

Aux États-Unis, plusieurs études mentionnent du double cropping, du relay cropping soja-cameline (*Camelina sativa* (L.) Crantz.) (Gesch, Archer et Berti, 2014; Berti *et al.*, 2017; Johnson *et al.*, 2017), et du relay cropping soja-froment (Crabtree, Prater et Mbolda, 1990; Wallace *et al.*, 1996; Jacques, Bacon et Parsch, 1997; Nelson, Massey et Burdick, 2011; Sandler, Nelson et Dudenhoefter, 2015).

Le double cropping est défini comme une forme de culture séquentielle dans laquelle deux plantes sont cultivées l'une à la suite de l'autre en l'espace d'un an sur une parcelle de terre (FAO, 1985), par ensemencement ou repiquage de l'une après la récolte de l'autre. Il est à noter que le soja-froment est largement plus cultivé en double cropping qu'en relay cropping aux États-Unis (Sandler, Nelson et Dudenhoefter, 2015).

En Chine, l'association de cultures est très répandue et représente une part significative des terres cultivées (Zhang et Li, 2003). Le relay cropping maïs-soja est très documenté et pratiqué comme expliqué précédemment (Su *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2015; Chen *et al.*, 2017; Fan *et al.*, 2018; Iqbal *et al.*, 2019). De plus, le soja est aussi cultivé avec de la canne à sucre (Wang *et al.*, 2020) ou encore avec du blé (Li, Sun, Zhang, Li, Rengel, *et al.*, 2001; Li, Sun, Zhang, Li, Yang, *et al.*, 2001; Zhang et Li, 2003). L'association soja-blé est largement pratiquée dans le nord de la Chine en cultures irriguées (Zhang, Li et Sun, 2001).

En Europe, il est difficile de trouver du relay cropping avec du soja. Toutefois, en France, des études ont débuté sur l'intercropping soja-tournesol (Debaeke *et al.*, 2017) et depuis quelques années, Arvalis réalise les premières expérimentations sur le relay cropping céréales d'hiver-soja (Brun et Deschamps,

2018, 2019b, 2019a) tandis que des agriculteurs réalisent de l'intercropping sarrasin-soja (Verret *et al.*, 2018).

1.4.2.3 Relay cropping froment-soja

Le relay cropping froment-soja a déjà été testé dans différents pays. Ainsi, des études réalisées en Chine et aux États-Unis présentent un LER entre 0.87 et 1.26 (Zhang, Li et Sun, 2001; Sandler, Nelson et Dudenhoefter, 2015) et montrent dans certains cas l'avantage de réaliser un relay cropping plutôt que des cultures séparées. En effet, il a été mis en évidence que malgré la compétition importante défavorable au soja pendant la phase de croissance commune, celui-ci peut avoir une croissance compensatrice une fois le blé récolté. Ainsi, le soja peut rattraper son retard de développement par rapport à une culture pure permettant l'obtention d'un rendement correct (Zhang et Li, 2003). Au Kansas, Duncan et Schapaugh (1997) ont démontré que le facteur limitant impactant le plus le relay cropping est l'eau.

Le relay cropping a un effet sur la physiologie du soja. Un soja en relay cropping est plus haut lors de la récolte du froment que celui en culture pure à cause d'une élongation des deux premiers entrenœuds et possède un nombre de nœuds plus faible (Duncan et Schapaugh, 1997). Le diamètre de la tige, la surface foliaire et la matière sèche aérienne sont réduits en intercropping (Wallace *et al.*, 1992). L'élongation des deux premiers entrenœuds et la diminution du diamètre de la tige favorisent les risques de verses (Wallace *et al.*, 1996).

2 Objectifs

Dans le contexte de changement climatique actuel, l'Union Européenne exprime une volonté de plus en plus présente de se tourner vers une agriculture plus résiliente et d'augmenter sa production en protéines végétales (Schreuder et De Visser, 2014). Le relay cropping froment-soja semble pouvoir faire partie des solutions à mettre en place pour relever ces défis.

Néanmoins, la majorité de la littérature concernant le relay cropping céréale-soja provient d'Asie et d'Amérique, où la technique est déjà appliquée dans certaines exploitations. Au contraire, peu d'études ont été réalisées en Europe, et la Belgique n'a pas pris part à ces recherches. Au regard des différences pédoclimatiques entre ces différentes régions, il n'est pas possible de transférer la totalité des connaissances accumulées sur le relay cropping céréales-soja.

Dans cette optique, un champ d'essai a été implanté pour la première fois sur les terres de la ferme expérimentale de Gembloux Agro-Bio Tech (Université de Liège) en Belgique, dans le but d'analyser le potentiel du relay cropping froment-soja dans des conditions pédoclimatiques de la région limoneuse belge.

Ce travail de fin d'études d'ordre exploratoire a donc pour but d'initier l'étude de cette technique culturale innovante en Belgique et plus spécifiquement en région limoneuse wallonne. Le suivi des deux cultures à partir du semis du soja a été réalisé, afin de mettre en lumière les pratiques agronomiques les plus optimales pour maximiser le potentiel du relay cropping.

Pour rencontrer cet objectif global, les choix suivants ont été posés :

- ➔ étudier la faisabilité de la culture du soja en Belgique
- ➔ étudier le potentiel de production du RC-froment d'hiver-soja
- ➔ déterminer l'influence de la disposition d'implantation des deux cultures en RC
- ➔ déterminer la densité de semis idéale du soja au sein du RC
- ➔ mettre en lumière les facteurs limitants du RC en Belgique
- ➔ étudier l'effet du RC sur la physiologie des plantes et sur les composantes du rendement.

3 Matériels et méthodes

3.1 L'essai expérimental

3.1.1 Localisation de l'essai

Le champ d'essai du relay cropping froment-soja est situé dans la région agricole limoneuse de Hesbaye en région wallonne, province de Namur, sur les terres de la ferme expérimentale de Gembloux Agro-Bio Tech (Université de Liège) (50°33'47.3"N,4°42'39,6"E). Le sol est de type Aba(b)1 (sol limoneux à drainage favorable avec un horizon B textural tacheté, phase à horizon A mince (horizon A inférieur à 40cm) (*WalOnMap | Géoportail de la Wallonie*, 2015)

3.1.2 Conditions climatiques et données météorologiques

La Belgique possède un climat tempéré, caractérisé par un été relativement frais et pluvieux et un hiver doux et pluvieux. Selon l'IRM et sur base de la période de référence 1981-2010, les précipitations annuelles moyennes à Gembloux s'élèvent à 834mm de pluie. La température moyenne est de 9.8°C et la moyenne du rayonnement solaire global annuel est de 1036 kWh/m²/an. Les répartitions mensuelles des précipitations et des températures moyennes sont visibles sur la Figure 5 (IRM, 2020b). Cependant, les anomalies climatiques ont été fréquentes cette dernière décennie (température moyenne annuelle plus élevée et déficit de précipitations annuelles)(IRM, 2020a).

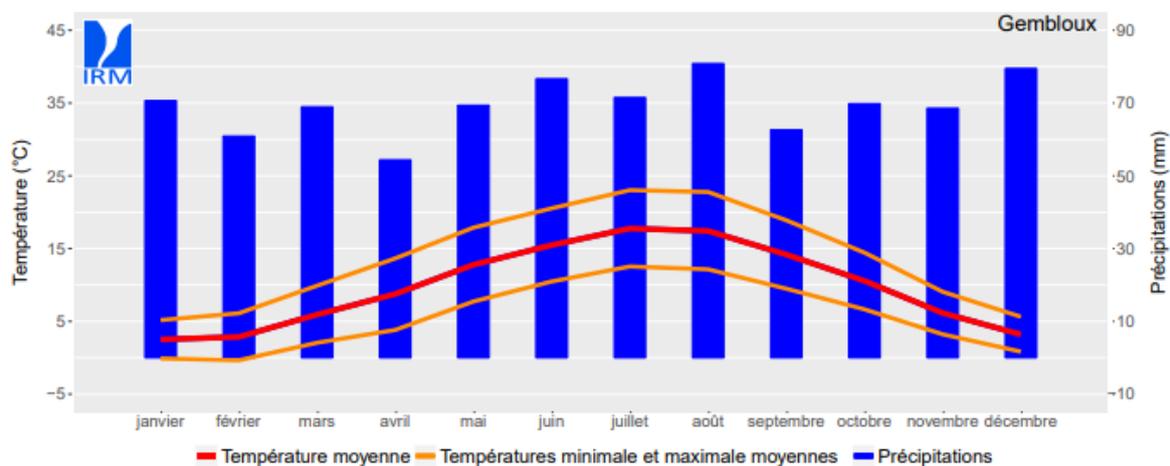


Figure 5: Graphique des précipitations moyennes et des températures minimales, maximales et moyennes à Gembloux en fonction du mois (IRM).

Les précipitations et les températures moyennes de cette année, prises sur la station météorologique de Loncée, sont disponibles en Annexe 10

3.1.3 Dispositif expérimental

L'intérêt de cet essai est d'étudier l'éventuelle mise en place de culture de soja ainsi que de l'associer en RC avec le froment. Plusieurs modalités sont testées sur des parcelles de faible surface (2m sur 8, soit 16m²). Les facteurs étudiés sont la densité de semis du soja et du froment ainsi que l'association froment-soja. L'ensemble des modalités des deux facteurs est repris dans le Tableau 3.

Au sein de l'association, deux dispositions d'implantations ont été testées : le relay cropping 3*3 et le relay cropping 2*2. Celles-ci sont présentées sur la Figure 6. Le relay cropping 3*3 (RC3*3) est une succession de trois lignes de froment et de soja avec en son centre seulement deux lignes de froment tandis que le relay cropping 2*2 (RC2*2) est une succession de deux lignes de froment et deux lignes de soja.

Tableau 3 : Modalités de l'essai relay cropping froment-soja.

Facteur1	Facteur 2		Modalités
	Densité froment	Densité soja	
Froment pur	400	0	1
Soja pur	0	75	2
Relay 3X3	230	35	3
	230	45	4
Relay 2x2	230	35	5
	230	45	6
	230	55	7

Chaque modalité a quatre répétitions dédiées à l'étude du rendement et quatre répétitions dédiées aux observations destructives récoltées à partir du semis du soja, sur les plants de froment et de soja.

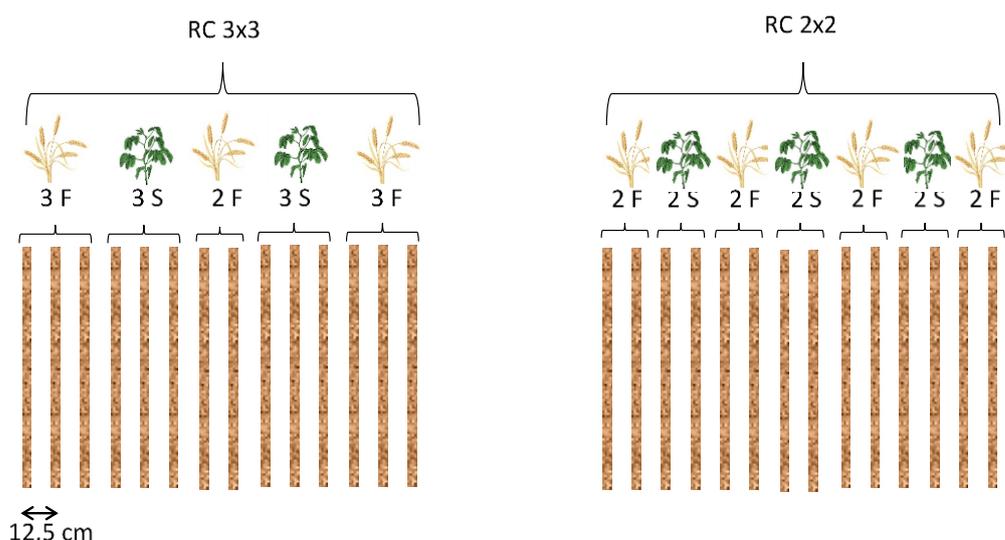


Figure 6: Schéma des deux dispositions d'implantations en relay cropping.

Les abréviations F, S et RC signifient respectivement froment d'hiver, soja, relay cropping.

Le RC3*3 est une succession de trois lignes de froment et de soja avec en son centre seulement deux lignes de froment. Le RC2*2 est une succession de deux lignes de froment et deux lignes de soja.

L'essai expérimental est repris sur la Figure 7. En jaune, une bande d'orge, implantée le même jour que le soja, sépare le soja pur du reste de l'expérimentation. En gris sont représentées les parcelles destinées aux observations destructives. Une bordure a été implantée tout autour de l'essai avec du blé barbu (variété Sacranento) sur la partie froment pur et la partie association. La bordure du soja a, quant à elle, été implantée en orge.

	1	2	3	4	5	6	7		8	9
800	801 1	802 1	803 4	804 4	805 6	806 6	807 7	o r g e	808 2	809 2
700	701 1	702 1	703 3	704 3	705 5	706 5	707 7		708 2	709 2
600	601 1	602 1	603 4	604 4	605 6	606 6	607 7		608 2	609 2
500	501 1	502 1	503 3	504 3	505 5	506 5	507 7		508 2	509 2
400	401 1	402 1	403 4	404 4	405 6	406 6	407 7		408 2	409 2
300	301 1	302 1	303 3	304 3	305 5	306 5	307 7		308 2	309 2
200	201 1	202 1	203 4	204 4	205 6	206 6	207 7		208 2	209 2
100	101 1	102 1	103 3	104 3	105 5	106 5	107 7		108 2	109 2

Figure 7: Plan expérimental du relay cropping froment-soja. Les numéros correspondent aux modalités reprises dans le tableau 3. Les parcelles en gris désignent les parcelles destinées aux observations destructives. La bande en jaune représente une bande d'orge qui sépare le soja en pur du reste de l'expérimentation.

3.1.4 Opérations culturales

L'ensemble des opérations culturales réalisées dans le cadre de cet essai est repris dans le Tableau 4.

Tableau 4: Opérations culturales réalisées sur l'essai de relay cropping froment-soja.

Date	Opérations culturales
5-déc.-2019	Semis du froment d'hiver (variété chevignon) sur l'ensemble des lignes des parcelles (sauf les parcelles de soja pur) après avoir préparé le sol (labour + rotative) Interligne 12.5cm PMG 45.36g Densité: 400 grains/m ²
23 au 24 mars-2020	Destruction du froment à la rasette au niveau des lignes destinées à être semées en soja
24-avr.-2020	Application tallage-redressement de 100 unités d'azote
1-avr.-2020	Désherbage des bordures
13-mai-2020	Arrachage des repousses de froment sur les lignes destinées à être semées au soja
15-mai-2020	Inoculation des semences de soja avec le produit RIZOLIQ® TOP contenant du <i>Bradyrhizobium sp</i> Semis du soja (variété abelina) dans le relay cropping en semis direct et semis du soja pur après avoir préparé le sol (labour + rotative) Interligne intercropping: 12.5cm Interligne soja pur: 25cm PMG: 162.22g Densité: cfr tableau 3
20-mai-2020	Mise en place des filets sur le soja pur
12-juil.-2020	Enlèvement des filets
22 juil au 11 août-2020	Désherbage manuel
30-juil.-2020	Récolte du froment
20-oct.-2020	Récolte du soja

3.2 Observations et paramètres mesurés

De nombreuses observations et mesures ont été réalisées sur les cultures de froment et de soja. Celles-ci ont débuté au semis du soja. Une vue globale de celles-ci ainsi que les dates de leurs réalisations sont présentées dans le Tableau 5. Pour visualiser la chronologie des opérations, une ligne du temps est représentée à la Figure 8 où apparaît également le stade des plantes au moment des opérations (dans les encadrés).

Tableau 5: Observations et mesures réalisées sur les cultures du froment et du soja. Celles-ci ont débuté au semis du soja.

Observations et paramètres mesurés	Froment d'hiver	Soja
Stade de développement à partir de l'échelle BBCH de manière hebdomadaire	du 15 mai au 31 juillet 2020	du 15 mai (<i>date du semis</i>) au 20 octobre 2020
Levée du soja comptage du nombre de plants	-----	le 13 juillet 2020 le 3 août 2020 le 24 août 2020
Relevé des adventices (sur parcelles destructives) Comptage et diversité de la flore Biomasse totale	le 30 juillet le 1 ^{er} septembre (<i>soja pur au stade 79</i>) le 1 ^{er} septembre	
Temps de désherbage manuel	entre le 22 juillet et le 11 août <i>pour 4 parcelles de chaque modalité</i>	
Maladies et ravageurs	observations des symptômes et dégâts lors de toutes les interventions	
Hauteur	le 29 juillet 2020 <i>à 4 endroits aléatoires par parcelle</i>	le 5 août 2020 <i>à 4 endroits aléatoires par parcelle</i>
Biomasse aérienne + calcul du LER	le 18 mai 2020 (<i>stade dernière feuille étalée</i>) le 8 juin (<i>stade floraison</i>) le 13 juillet (<i>stade maturation des grains</i>)	le 13 juillet 2020 (<i>culture pure au stage 65</i>) le 3 août 2020 le 24 août 2020
Longueur entre-nœud, diamètre de la tige, hauteur première gousse	-----	le 14 octobre 2020 <i>sur 10 plantes par parcelles destructives (10 plantes n'ayant subi aucune attaque)</i>
Les nodosités Comptage du nombre de nodosités + détermination de leur état d'activité	-----	le 13 juillet 2020 le 4 août 2020 le 24 août 2020 <i>4 échantillons par parcelle destructive</i>
Poids de mille grains	le 30 juillet 2020 <i>100 épis récoltés sur chaque parcelle destructive</i> <i>4 X 100 grains pesés par échantillon</i>	-----
Rendement en grains	le 30 juillet 2020	le 20 octobre 2020

Nombre d'étages de gousse, Nombre de gousses Nombre moyen de grains Observation du pourcentage de gousses éclatées	-----	le 14 octobre 2020 <i>prélèvement de 10 plantes par parcelle destructive.</i>
Teneur totale en protéine Poids à l'hectolitre Test de Zélény	<i>sur la récolte des grains</i>	<i>sur la récolte des grains en soja pur</i> ----- -----

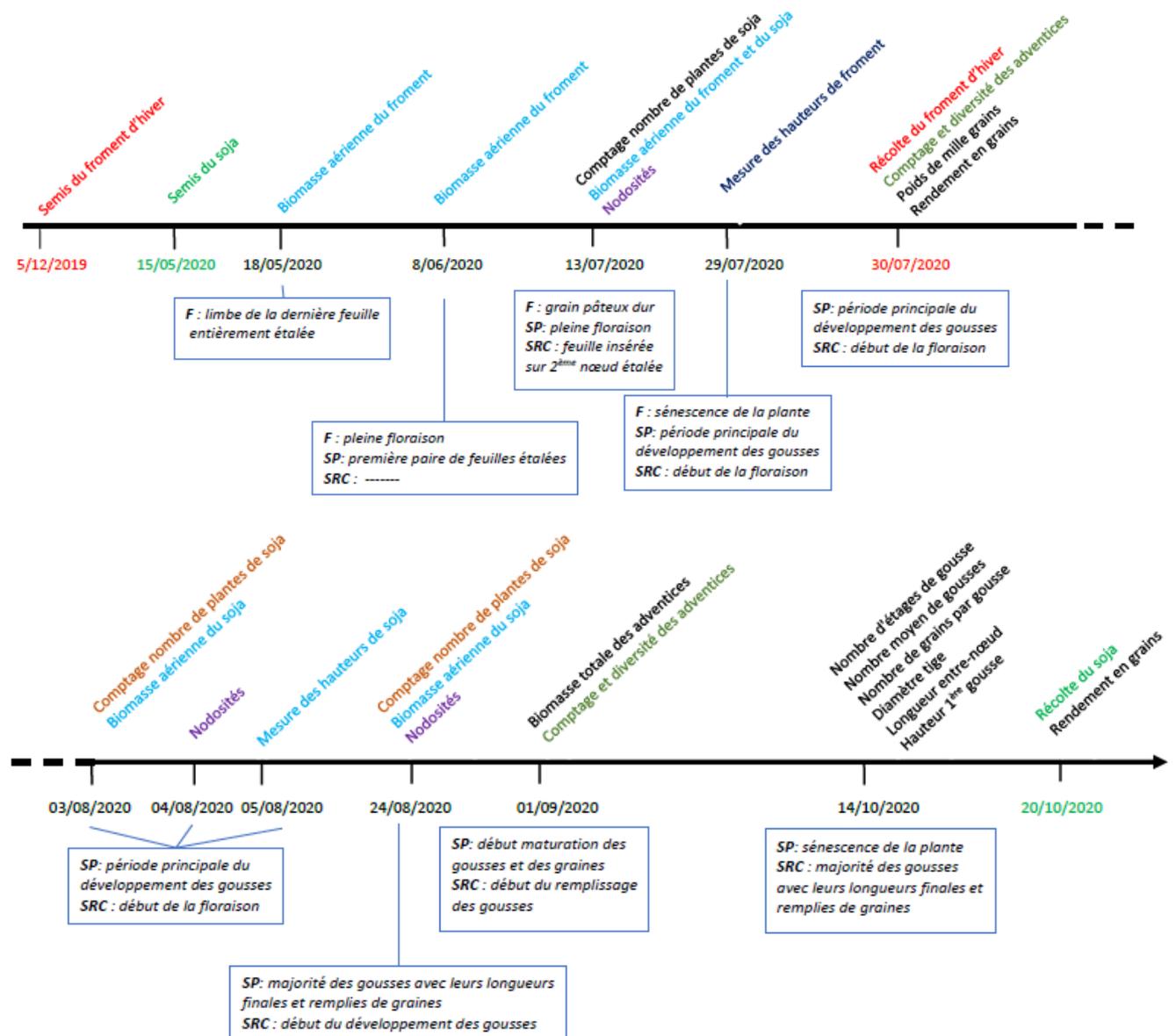


Figure 8: Ligne du temps présentant les dates des mesures et opérations réalisées. Les stades de développement des cultures à ces dates sont donnés dans les encadrés. Les abréviations SP, SRC et F signifient respectivement soja pur, soja en relay cropping et froment d'hiver.

3.2.1 Observations des stades de développement du froment et du soja

Un suivi de l'évolution des stades de développement du froment et du soja a été réalisé sur base de l'échelle BBCH des céréales et du soja (Annexe 11). Ces observations ont été menées hebdomadairement à partir de la date de semis du soja, sur 10 plantes du dispositif expérimental.

3.2.2 Levée du soja

Une estimation de la levée du soja dans les différentes parcelles a été réalisée. Pour ce faire, des comptages du nombre de plantes de soja ont été effectués sur 50cm de long et 3 lignes de large. Cependant, pour les essais en relay cropping 2*2, ceux-ci ont été réalisés uniquement sur 2 lignes de large. Les comptages ont eu lieu le 13 juillet, les 3 et 24 août, en même temps que les prélèvements des échantillons destinés aux mesures de la biomasse aérienne.

3.2.3 Relevé des adventices

Deux relevés des adventices ont été menés sur les parcelles destructives. Le premier juste avant la moisson du froment (le 30 juillet) et le second lorsque le soja en pur était au stade 79, c.-à-d. lorsque la majorité des gousses ont atteint leurs longueurs finales et qu'elles sont, pour la plupart, remplies de graines (le 1^{er} septembre).

Les comptages du nombre d'individus d' adventices par espèces ont été effectués pour chaque parcelle destructive, dans un quadrat de 50cm de long et sur la largeur totale de la parcelle (2m).

Lors du second relevé, un deuxième comptage ainsi qu'une mesure de la biomasse totale (toutes espèces d' adventices confondues) ont été réalisés.

Enfin le pourcentage de biomasse d' adventices a été calculé à partir du rapport suivant :

$$\frac{\text{Biomasse d' adventices}}{\text{Biomasse théorique du soja au 1er septembre} + \text{Biomasse d' adventices}}$$

3.2.4 Temps de désherbage

Pour pouvoir caractériser la charge de travail que représenterait le désherbage manuel des différentes modalités, le temps de désherbage de 4 parcelles par modalité a été mesuré entre le 22 juillet et le 11 août.

3.2.5 Maladies et ravageurs

Un suivi des maladies et des ravageurs n'a pas été réalisé de manière approfondie au sein des différentes parcelles. Seule une observation des symptômes et des dégâts lors des différentes interventions a été menée.

3.2.6 Hauteur

Des mesures des hauteurs du froment et du soja ont été réalisées de manière non destructive à l'aide d'un herbomètre. Toutefois, pour le soja en relay cropping, celles-ci ont été prises à l'aide d'un mètre rigide à cause de la hauteur de chaume trop élevée. Les mesures ont été menées à 4 endroits par parcelle de manière aléatoire.

La mesure de la hauteur du froment a été réalisée juste avant la récolte de celui-ci le 29 juillet alors que celle du soja a été menée le 5 août. Une seconde mesure de la hauteur du soja aurait dû être réalisée à maturité. Malheureusement, cette deuxième mesure n'a pas pu être effectuée, car l'apex des sojas en RC a été ingéré par des lièvres.

3.2.7 Biomasse aérienne

La biomasse aérienne du froment a été prélevée dans les parcelles destructives, à différents stades à partir du semis du soja (au stade dernière feuille étalée, le 18 mai ; à la floraison, le 8 juin ; et à la maturation des grains, le 13 juillet). L'échantillonnage a eu lieu sur 50 cm de long et sur trois lignes de large, excepté pour les modalités de relay cropping en 2*2 et 3*3 pour lesquelles seulement deux lignes ont été récoltées.

Une fois récoltés, pour mesurer la biomasse aérienne en matière sèche (MS), les échantillons ont été placés en étuve à 60°C pendant une semaine avant d'être pesés (le poids des échantillons étant devenu constant).

À partir du 8 juin, les épis ont été coupés et pesés séparément.

La biomasse aérienne du soja a été mesurée dès que le soja en culture pure a atteint le stade 65 « période principale de la floraison ». Les échantillons ont été récoltés à un intervalle d'environ trois semaines (13 juillet, 3 août, 24 août). Ils ont été prélevés sur les parcelles destructives, sur 50cm de long et sur trois lignes de large excepté pour les modalités de relay cropping 2*2 pour lesquelles le prélèvement a été réalisé sur deux lignes.

Lors des échantillons du 24 août, les gousses ont été séparées du reste de la biomasse végétative et pesées séparément.

Les différentes mesures ont été converties en m² pour les deux espèces.

Enfin, le LER (land equivalent ratio) a été calculé pour la biomasse aérienne totale selon la formule suivante (Bedoussac et Justes, 2011):

$$LER = LER_{soja} + LER_{froment} = \frac{Biomasse\ soja\ RC}{Biomasse\ soja\ pur} + \frac{Biomasse\ froment\ RC}{Biomasse\ froment\ pur}$$

3.2.8 Longueur entre-nœud, diamètre de la tige, hauteur première gousse

Le 14 octobre (stade 97 en culture pure et 79 en RC), la longueur entre le premier et le second nœud, le diamètre de la tige au premier nœud et la hauteur du premier étage de gousse ont été mesurés sur 10 plantes sur chaque parcelle destructive. Ces plantes ont été choisies dans la mesure du possible parmi celles qui n'avaient subi aucun dommage au cours de la saison culturale.

3.2.9 Nodosités

Le 13 juillet, le 4 et 24 août, des observations des nodosités ont été réalisées. Pour ce faire, quatre plantes de parcelles destructives ont été prélevées à l'aide d'une bêche, à proximité du prélèvement réalisé la même journée pour la biomasse aérienne. Les plants ont été trempés dans l'eau pendant une nuit avant d'être nettoyés au jet d'eau. Une fois les racines propres, les plantes ont été déposées dans un bac d'eau avec un fond noir (Annexe 12). Le nombre de nodosités par plante a alors été compté.

Les nodosités ont ensuite été coupées en deux afin de déterminer leur état d'activité et ainsi être séparées en trois catégories : « non actives », « actives » et « mortes ». Cette distinction a été basée sur l'observation de la couleur à l'intérieur de la nodosité, qui est directement liée à la présence de leghémoglobine, qui est elle-même directement corrélée à l'activité symbiotique. Ainsi quand les nodosités étaient de couleur blanche, rosée et noire, elles ont été considérées respectivement comme non-actives, actives et mortes.

3.2.10 Poids de mille grains

Le poids de mille grains (PMG) du froment a été mesuré. A cette fin, 100 épis ont été récoltés sur chaque parcelle destructive le 30 juillet. Une fois récoltés, les épis sont passés dans une batteuse. Quatre fois 100 grains ont été pesés par échantillon. Le poids a été extrapolé pour 1000 grains.

3.2.11 Rendement en grain du froment et du soja

Les rendements du froment et du soja ont été mesurés. Ensuite, le LER partiel du froment (LER_{froment}) a été calculé. Cependant, le soja en relay cropping a dû être déclassé à cause des dégâts dus aux lièvres trop importants et d'une présence trop faible de gousses. Le rendement en soja en associé a donc été considéré comme nul ainsi que le LER partiel du soja ($LER_{\text{soja}}=0$). Le LER total équivaut donc, dans ce cas, au LER_{froment} .

3.2.12 Nombre de gousses, de graines par gousse, nombre d'étages de gousse.

Le 14 octobre, 10 plantes exemptes de toutes attaques de ravageur ont été prélevées par parcelle. Le nombre d'étages de gousse, le nombre de gousses et le nombre moyen de grains par gousse ont été mesurés. Par ailleurs, une observation du pourcentage de gousses éclatées sur plant a été réalisée.

3.2.13 Taux de protéine, poids à l'hectolitre

Des échantillons ont été envoyés en laboratoire pour réaliser une analyse qualitative aussi bien sur des grains de froment que de soja. L'analyse qualitative consiste en une analyse de la teneur totale en protéine. De plus, la mesure du poids à l'hectolitre et le test de Zélény ont été réalisés pour le froment.

3.3 Traitements statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées sur le programme *R.studio* version 3.6 à l'aide des packages *car*, *agricolae*, *FactoMineR*, *lsmeans*, *multcomp*, *lmerTest*, *GGally* et *lmPerm*.

La disposition expérimentale n'est pas orthogonale, car les croisements des 2 facteurs ne sont pas présents à chaque fois. Par conséquent, un facteur « association.densité » a été créé en combinant les modalités d'association et de densité (correspondant aux numéros des modalités du Tableau 3). Celui-ci étant l'unique moyen de pouvoir comparer les cultures pures et la modalité 7 (RC*2_230-55) aux autres modalités.

Sur la majorité des paramètres étudiés, une ANOVA à un facteur fixe (association.densité) et un facteur aléatoire (facteur bloc) a été réalisée pour permettre une comparaison entre le relay cropping et les cultures pures.

Pour comparer les modalités d'implantation et de densité au sein du RC (modalités 3, 4, 5 et 6 du Tableau 3), des ANOVAs à deux facteurs fixes (association et densité) et un aléatoire (bloc) ont été effectuées sur ces mêmes paramètres.

La Figure 9 permet de visualiser les différents niveaux d'analyses statistiques réalisés.

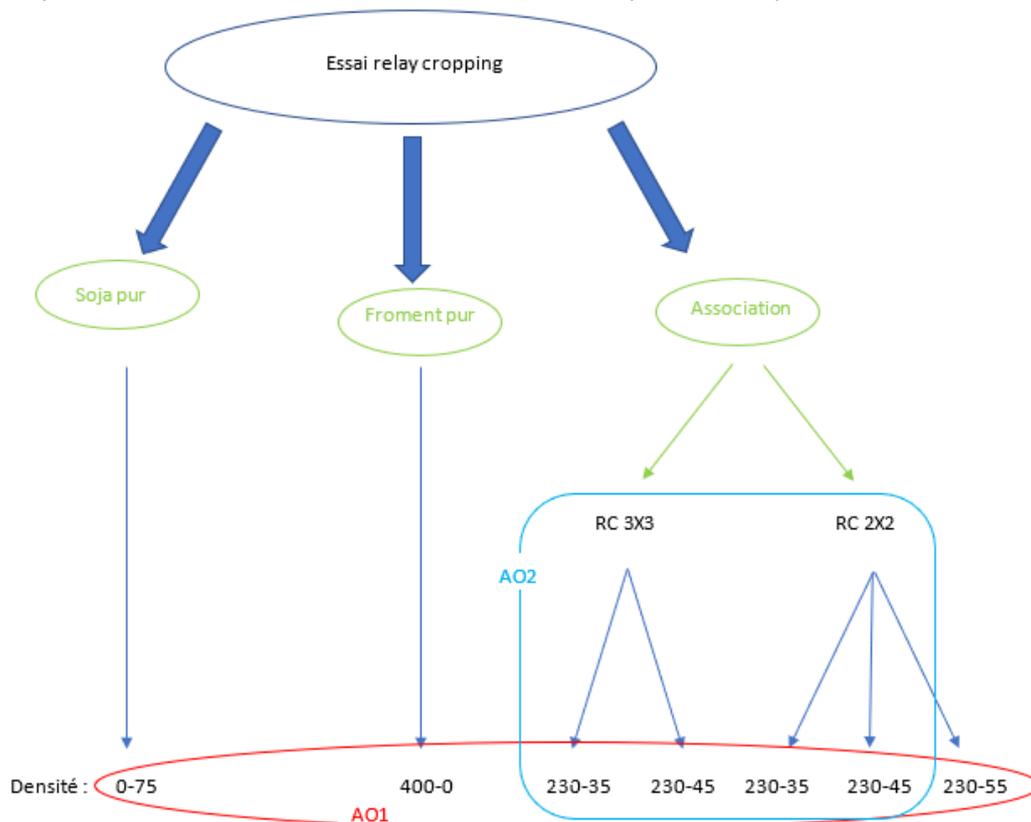


Figure 9: Schéma des différents niveaux de test statistique.
Les densités sont exprimées en grain/m².

Lors de la réalisation des ANOVAs, la normalité des résidus (test de Shapiro) et l'égalité des variances (test de Bartlett) ont été vérifiées. Si les conditions n'étaient pas respectées, une ANOVA par permutation a été réalisée. Lorsque des données qualifiées d'outliers ont été détectées, celles-ci ont été supprimées du jeu de données.

Lorsqu'une différence significative a été dévoilée par l'ANOVA pour l'un des facteurs, une

hiérarchisation des moyennes a été réalisée par le test de Newman et Keuls (SNK). Lorsque ce type de test n'était pas réalisable, un test pairé de Tukey a été effectué.

Concernant les mesures de biomasses, comme celles-ci ont été répétées au cours du temps, des régressions linéaires ont été construites et comparées.

A propos du nombre de nodosités, qui est une donnée de type « comptage », un modèle linéaire généralisé (glm) a été utilisé avec comme fonction de lien un log et une distribution de type poisson. Ensuite, un test chi carré de Wald (type II) a été réalisé sur le modèle.

Quant aux relevés d'adventices, une analyse en coordonnées principales (PCoA) a été réalisée au sein du facteur association pour chaque date d'observation. Pour rendre la distribution normale, le jeu de données a subi une transformation logarithmique.

Enfin, pour avoir une vision plus globale des interactions qui existent entre les paramètres, un tableau de corrélation entre les paramètres mesurés a été réalisé. De plus, une analyse en composantes principales (PCA) a permis d'identifier les différences présentes au sein du facteur association.

4 Résultats et discussions

L'ensemble des tableaux d'ANOVA ainsi que les tableaux reprenant les groupes formés par les tests post hoc sont repris en Annexe 16

4.1 Stade de développement du froment et du soja

Les stades de développement du froment et du soja sont repris dans le Tableau 6. Pour le froment, aucune différence de stade entre celui présent en relay cropping et celui cultivé en pur n'a été observée.

En ce qui concerne le soja, la somme des degrés jours pour le soja a été calculée depuis la levée (Schoving *et al.*, 2020). On peut apercevoir que le soja en relay cropping a levé un mois après le soja en culture pur. Ce retard se traduit par une différence de 200 degrés jours et n'a pas permis aux plantes de soja en RC d'arriver à maturité en fin de saison. En effet, la somme des degrés jours nécessaire à une plante d'espèce MG000 pour arriver à maturité est d'environ 1435°J en base 6 (Schori, Charles et Peter, 2003; Aper, De Clercq et Baert, 2016).

Tableau 6: Tableau de l'évolution des stades et de la somme des degrés jours calculée depuis la levée de manière hebdomadaire, pour le soja et le froment d'hiver.

date	Somme degrés jours		Stade BBCH	
	soja en pur	soja en RC	soja en pur	soja en RC
15-May	0	0	0	0
25-May	0	0	09	0
01-Jun	66	0	11	0
08-Jun	119	0	11	0
15-Jun	200	0	12	09
22-Jun	277	77	13	11
29-Jun	371	171	51	11
06-Jul	443	243	61	61
13-Jul	510	310	65	12
20-Jul	586	386	71	13
03-Aug	760	560	75	61
11-Aug	903	703	77	65
24-Aug	1103	903	79	71
01-Sep	1168	968	81	73
08-Sep	1230	1030		
15-Sep	1309	1109	85	75
22-Sep	1398	1198	89	77
29-Sep	1447	1247		
06-Oct	1498	1298		
13-Oct	1536	1336	97	79
20-Oct	1553	1353	97	79

date	Somme degrés jours	Stade BBCH
15-May	1211	39
25-May	1358	45
01-Jun	1449	51
08-Jun	1561	65
15-Jun	1672	71
22-Jun	1791	73
29-Jun	1927	78
06-Jul	2040	83
13-Jul	2150	87
20-Jul	2267	92

Soja (degrés jours en base 6)

Froment d'hiver (degrés jours en base 0)

4.2 Levée du soja

L'ANOVA réalisée sur la levée du soja a mis en évidence une différence très hautement significative (p -valeur <0.001) du facteur association.densité

Le test SNK a permis de mettre en évidence le fait que les modalités en 3*3 ont eu une moins bonne levée que les autres modalités. Toutefois, toutes les modalités ont une distribution étalée, montrant une levée qui n'a pas été homogène (Figure 10). Cette levée hétérogène a également été observée sur le terrain, comme illustré en Annexe 13.

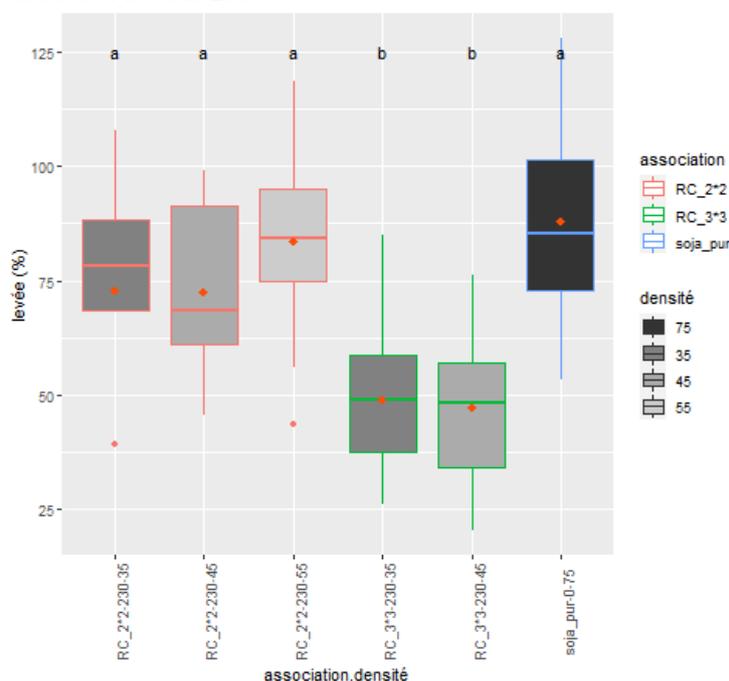


Figure 10: Pourcentage de levée du soja en fonction de la densité de semis et de l'association. Les lettres correspondent aux différents groupes créés par le test SNK. On peut observer une variabilité de levée du soja importante et une moyenne de levée plus faible en RC3*3.

Différentes hypothèses pourraient expliquer les problèmes de levées et leur hétérogénéité.

Premièrement, il se pourrait que les besoins importants en eau du soja lors de la germination (-0.75MPa - Lamichhane *et al.*, 2020) n'aient pas été rencontrés pleinement en culture en association. Cette hypothèse est soutenue par la différence de la durée de levée du soja en culture pure et en RC (Tableau 6). En effet, celles-ci sont de 10 et 30 jours pour respectivement le soja en culture pure et celui en RC. De plus, selon Lamichhane *et al.* (2020), la germination du soja est rapide si le besoin en eau est assouvi. Or en culture pure, un labour a été réalisé juste avant le semis, permettant ainsi de remonter l'humidité du sol et de créer un lit de semence humide propice à la germination. En association, le froment était en place au moment du semis du soja et avait déjà puisé l'eau disponible du sol, ce qui n'a pas permis au soja d'assouvir ses besoins pour la germination. En effet, le mois de mai fut anormalement sec cette année (précipitation de 9.7mm contre 69.7mm en moyenne). Le soja en association a donc dû attendre les précipitations du début du mois de juin pour pouvoir lever.

Deuxièmement, il est possible que la présence de mottes joue un rôle (Lamichhane *et al.*, 2020). En effet, en relay cropping le soja a été semé en semi-direct, la présence de mottes était donc plus importante qu'en culture pure.

Troisièmement, l'allongement de la période de germination rend la graine plus sensible aux attaques biotiques (Gourrat, Chambert et Berard, 2020). Sur les parcelles en RC, des observations d'attaques de ravageurs comme la mouche de semis ont été réalisées (Annexe 14). Enfin, des attaques de pigeon ont été observées aussi bien en soja pur (malgré le filet mis en place) qu'en RC (Annexe 14). Les attaques en RC3*3 semblent avoir été plus importantes qu'en RC2*2. En effet, l'espace entre les lignes de froment étant plus grand, il est plus facile pour les ramiers de remonter les lignes de soja en RC3*3 qu'en RC2*2. Ceci pourrait expliquer le plus faible pourcentage de levée en RC3*3. Ces attaques en association semblent être liées aux conditions d'expérimentation (zone de terre nue entre chaque parcelle servant de piste d'atterrissage) et pourraient ne pas poser autant de problèmes en grande culture. De plus, sans filet, les dégâts en culture pure auraient été sans doute égaux à 100% (Lamichhane *et al.*, 2020) comme ce fut le cas cette année sur la plateforme SYCI du CRA-W (communication personnelle, Morgan Abras), située non loin de l'expérimentation. Un autre facteur pouvant influencer une moins bonne levée en RC3*3 pourrait être lié à la présence de la rangée centrale de soja. En effet, sur le terrain, la levée des lignes du milieu en RC3*3 semblait plus mauvaise que les lignes en contact direct avec le froment. Les graines se trouvant relativement distantes du froment ont germé en raison d'une humidité plus présente qu'ailleurs au sein de la parcelle. Cependant, cette disponibilité en eau n'était pas suffisante pour permettre à la plante de terminer le processus de germination, ce qui a provoqué la mort des plantules de soja. Duncan et Schapaugh (1997) ont rapporté qu'en temps de sécheresse la mortalité à la levée peut être très importante en RC. Étant donné qu'aucune mesure du pourcentage de la levée par ligne n'a été réalisée, il est difficile de confirmer avec certitude cette hypothèse.

Enfin, vu l'hétérogénéité, il aurait été préférable de prendre des surfaces de mesures plus grandes pour avoir une meilleure robustesse des données et une moins grande variabilité. Une surface de mesure plus grande aurait de plus diminué les erreurs de mesures liées aux bords (pouvant expliquer dans la *Figure 10* des levées plus élevées que 100%, en plus de la précision du semoir) et qui auraient peut-être mis en évidence d'autres différences significatives de levées entre les modalités.

4.3 Maladies et ravageurs

Dans l'ensemble, peu de maladies ont été observées en froment et en soja.

Aucune maladie n'a réellement été observée en froment et aucun traitement n'a dû être réalisé.

Les plantes de soja présentaient peu de maladies. Des nécroses racinaires ont été observées de manière anecdotique en soja cultivé en RC (*Figure 11*). Ces nécroses pourraient être du rhizoctonia. Les conditions froides et humides en Belgique favorisent en effet le développement de ce pathogène, qui de plus est déjà présent dans nos rotations sur d'autres cultures comme la betterave et le maïs (Pannecouque, Goormachtigh, Heungens, *et al.*, 2018). L'essai ayant été installé après un précédent maïs, le risque du développement du rhizoctonia est renforcé. Toutefois, les conditions météorologiques sèches ont sans doute limité le développement de ce pathogène fongique.



Figure 11: Photo d'une racine de soja nécrosée.

Des nécroses blanchâtres entourées d'un halo brunâtre qui est lui-même entouré d'une zone de dépigmentation en mosaïque ont pu être observées de manière anecdotique sur quelques plantes (Figure 12). Cela n'a toutefois eu aucun effet sur le bon développement de la plante.



Figure 12: Photo d'une feuille de soja avec nécroses blanchâtres entourées d'un halo brunâtre lui-même entouré d'une zone de dépigmentation en mosaïque.

Des attaques de mouches de semis ont pu être observées sur soja (Annexe 14), ainsi que de fortes attaques de pigeon en soja pur (malgré la présence de filet) et des attaques modérées en RC3*3 et parfois en RC2*2 (Annexe 14). Les attaques de pigeons ramiers sur l'apex de la plantule lors de la levée ont parfois entraîné la mort de la plantule. Cependant, la plupart du temps, ces attaques ont eu comme conséquence de ralentir le bon développement des plantules et ont entraîné le débourrement des 2 bourgeons axillaires présents au niveau du nœud des cotylédons (Annexe 14). Une cotation des dégâts liés aux pigeons devait être réalisée par parcelle. Malheureusement, une fois les parcelles délimitées en soja pur et le filet retiré, il n'était plus possible, vu la grande taille du soja, de différencier le soja ayant subi une attaque de celui n'en ayant pas subi. Enfin, une semaine après la récolte du froment, les sojas présents dans le RC3*3 suivi par ceux en RC2*2 ont commencé à être mangés par des lièvres en ingérant l'apex et en défoliant les plantes. In fine les modalités en RC3*3 ont totalement été ravagées, ce qui les a déclassées.

4.4 Relevé des adventices

L'étude des adventices a montré plusieurs résultats développés ci-dessous. Le nombre total d'adventices (toutes espèces confondues) ne dépend pas de l'association et de la densité (p-valeur du test chi carré de wald >0.05). Seule la date de prélèvement influence de manière très hautement significative (p-valeur <0.001) la moyenne du nombre total d'adventices. Celui du 30 juillet est plus élevé (33.54 ± 15.95) que celui du 1^{er} septembre (24.25 ± 9.65) (Figure 13).

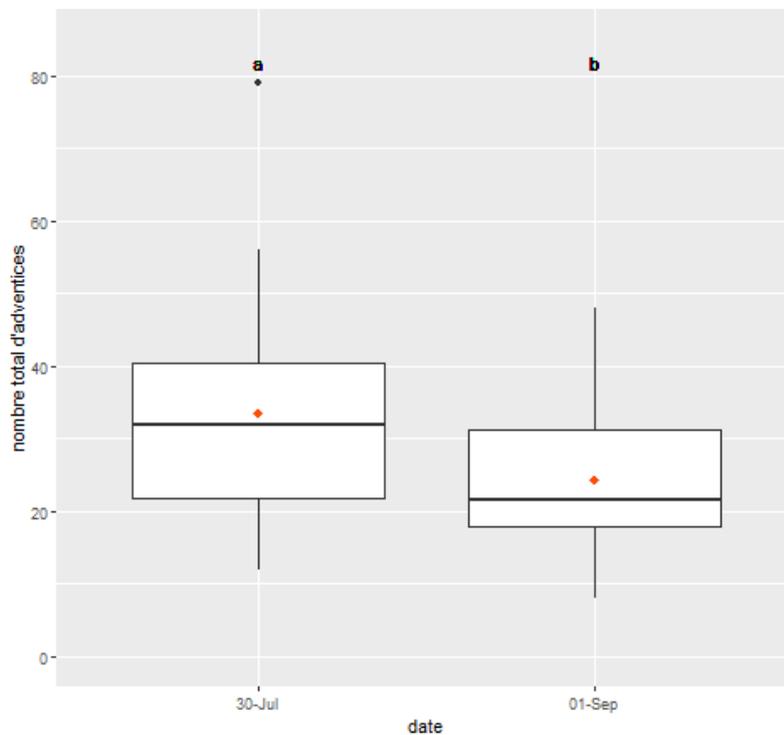


Figure 13: Nombre total d'adventices en fonction de la date de relevé.

Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test SNK.

La biomasse aérienne en MS d'adventices possède une moyenne très hautement significativement différente (p-valeur <0.001) pour le facteur association.densité. On constate grâce à l'analyse SNK que la biomasse d'adventices en culture pure de soja est plus élevée qu'en culture associée avec une moyenne de $159.06\pm 63.41g$, tandis que les 2 moyennes en RC sont comprises entre $38.99\pm 33.07g$ (RC2*2_230-45) et $85.32\pm 18.70g$ (RC3*3_230-45) (Figure 14.)

L'ANOVA à deux facteurs fixes (association et densité) réalisée sur le relay cropping a permis de mettre en évidence une différence significative (p-valeur <0.05) entre le RC2*2 et le RC3*3. La biomasse d'adventices est en moyenne plus importante pour le RC3*3 (moyenne : 73.88 ± 23.32) que pour le RC 2*2 (moyenne : 40.79 ± 22.71) (Figure 14).

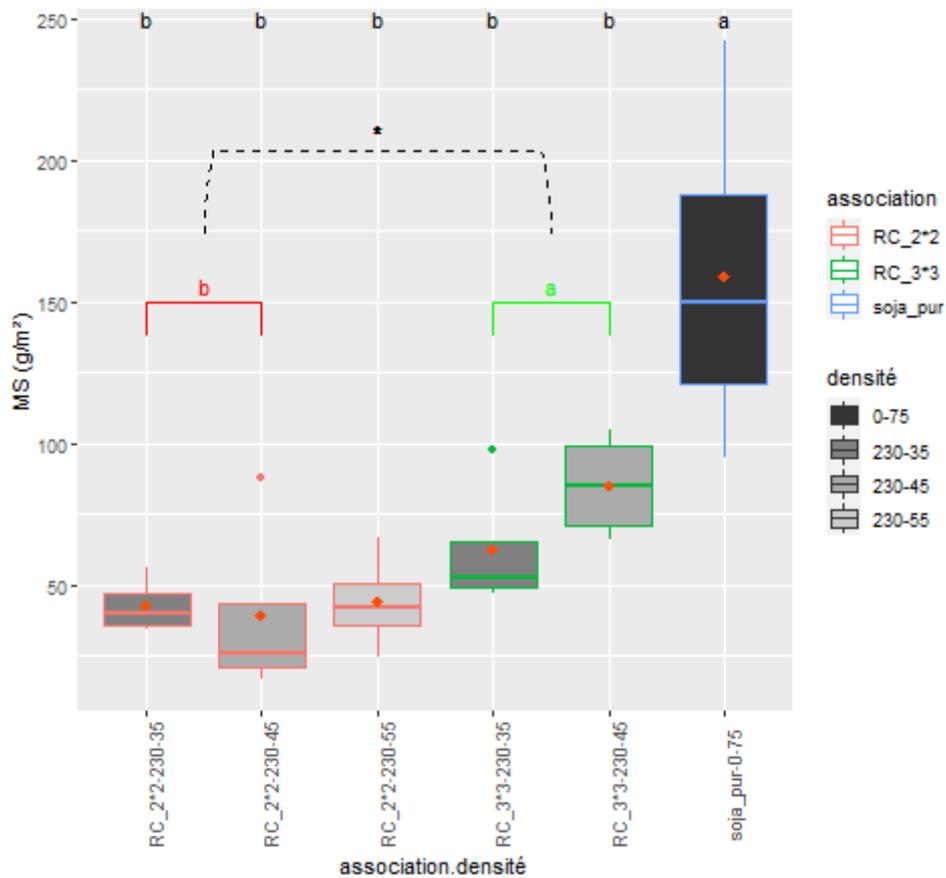


Figure 14: Biomasse aérienne d'adventices en fonction de la densité de semis et de l'association. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test SNK. La ligne supérieure correspond au test SNK réalisé sur le facteur association.densité. La ligne inférieure correspond au test SNK réalisée sur le facteur association entre le RC2*2 et le RC3*3. L'étoile représente le taux de signification du facteur association de l'ANOVA réalisé sur le relay cropping.

Le pourcentage de biomasse d'adventices par rapport à la biomasse totale (biomasse adventice + biomasse culture-paragraphe 3.2.3) montre des moyennes entre les modalités associations.densité très hautement significativement différentes (p -valeur < 0.001). L'analyse post hoc de type SNK divise les moyennes en 3 groupes qui correspondent aux 2 types d'association et à la culture pure (Figure 15). Les pourcentages de biomasse d'adventices sont, par ordre croissant, de 23.01 ± 7.01 , entre 45.63 ± 17.24 et 53.43 ± 10.14 et enfin entre 69.69 ± 4.68 et $73.23 \pm 6.05\%$ pour respectivement le soja pur, le RC2*2 et le RC3*3.

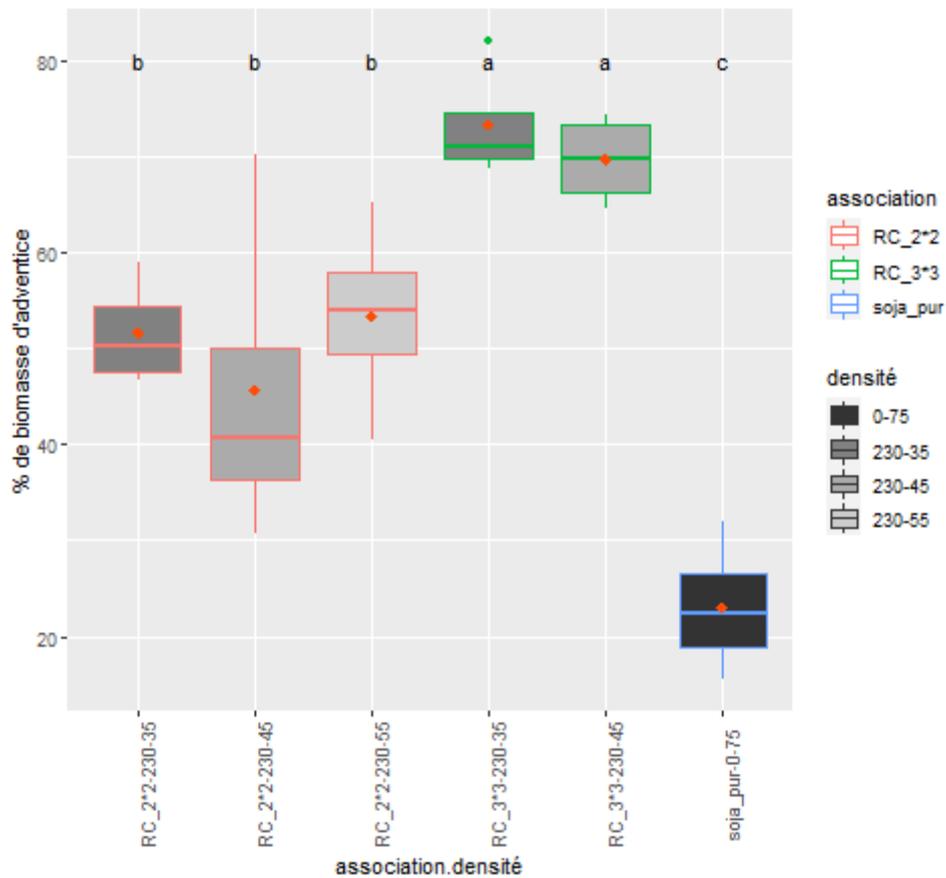


Figure 15: Pourcentage de la biomasse d'adventices par rapport à la biomasse totale en fonction de la densité de semis et de l'association. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test SNK.

Les PCoA réalisées aux deux dates de comptage des adventices (le 30 juillet et le 1^{er} septembre) ont permis de mettre en évidence des différences entre le soja pur et le soja en relay cropping (Figure 16 et Figure 17).

Le soja pur se caractérise pour la première date par un nombre plus important de chénopode blanc, de galinsoga, de colza, de petite cigue, de lamier, de moutarde, de laiteron rude et de capselle bourse à pasteur et pour la deuxième date, par une matière sèche d'adventices élevées et un nombre plus important de chénopode blanc, de colza et de galinsoga.

La culture en relay cropping montre quant à elle une disparité de points plus large sur la PCoA. Le RC se caractérise principalement par la présence de renouée des oiseaux et de matricaire camomille à la première date et de matricaire camomille, renouée des oiseaux, levée de froment pour la seconde date.

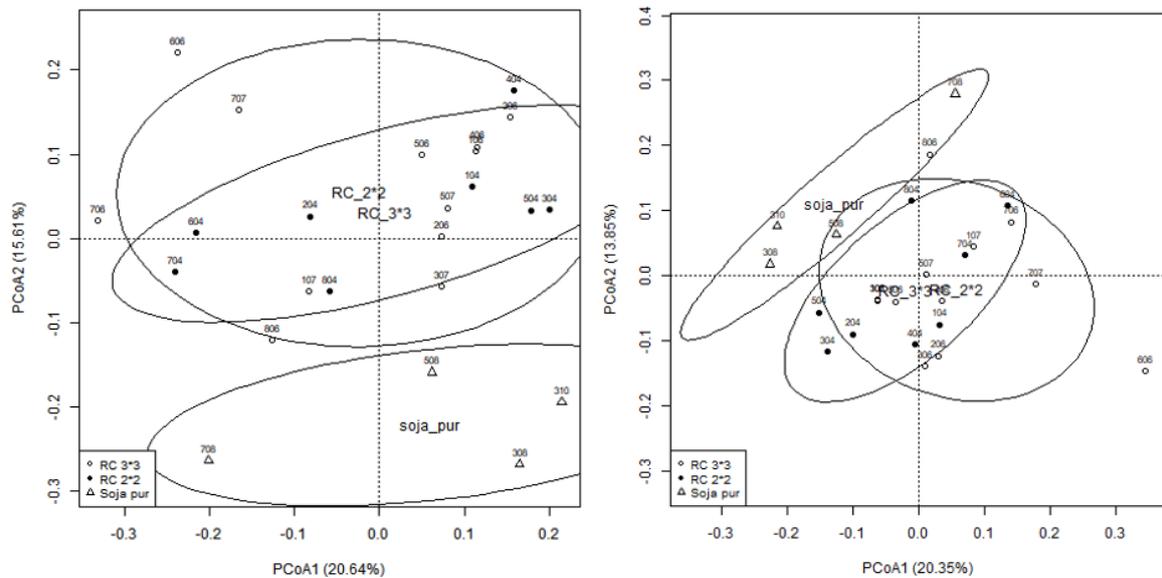


Figure 16: PCoA réalisée sur la flore d'adventices selon l'association. Le graphe de gauche correspond à la PCoA réalisée juste avant la récolte du froment et celui de droite correspond à la PCoA réalisée au 1er septembre. On observe que la flore d'adventices en culture pure n'a pas la même répartition qu'en RC.

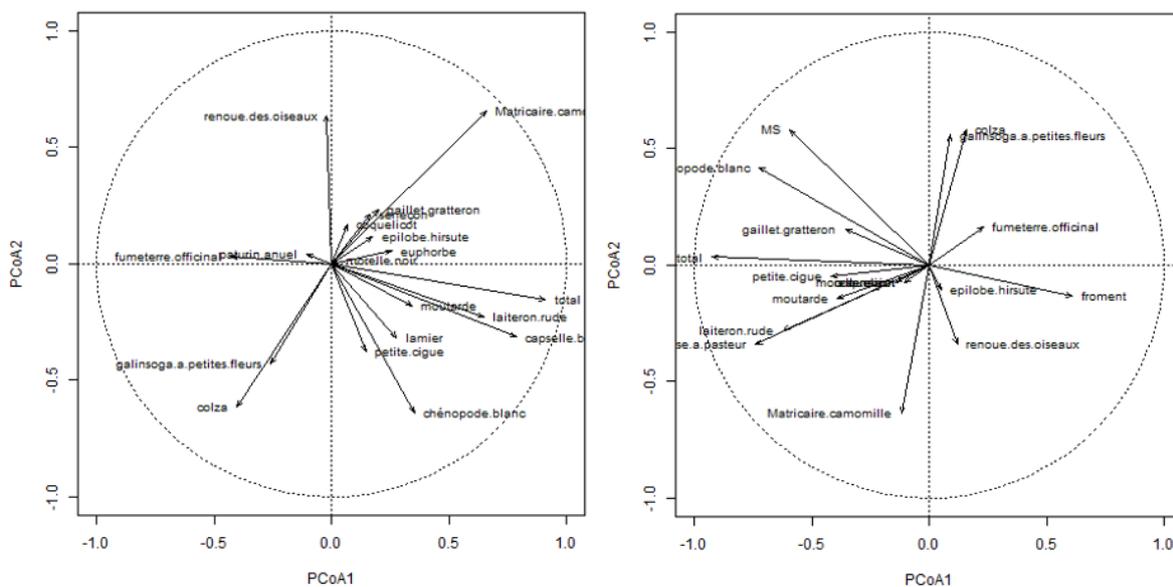


Figure 17: Représentation des différentes variables selon les 2 axes de la PCoA réalisée sur la flore d'adventice selon l'association. Le graphe de gauche correspond à la PCoA réalisée juste avant la récolte du froment et celui de droite à la PCoA réalisée au 1er septembre. Plus le vecteur est grand, mieux il est représenté par les 2 axes de la PCoA.

Le nombre total d'adventice ne semble pas être affecté par une association de culture, ni par la densité de semis du soja, ce qui va à l'encontre d'une étude réalisée en relay cropping soja-sarrasin (Biszczak, Różyło et Kraska, 2020). Par contre, le nombre d'adventices est influencé par le temps. Le nombre moyen d'adventices est moins élevé lors du deuxième prélèvement que lors du premier (Figure 13). Ceci montre qu'une partie des adventices sont mortes entre les deux dates d'essais.

Entre les deux prélèvements, le nombre de matricaires camomilles a chuté de manière plus importante, suivi par le laiteron rude (Annexe 16.2). Les matricaires camomilles sont caractéristiques des parcelles en relay cropping (Figure 17) en effet celles-ci sont fréquentes dans les cultures de froment (*Froment – Livre Blanc Céréales*, no date). La diminution drastique de leur nombre s'explique par une sénescence de celles-ci, suite à la fin de maturité.

Concernant les diminutions du nombre des autres adventices, celles-ci peuvent être expliquées par une compétition pour la ressource hydrique trop forte ainsi qu'une compétition pour la lumière dans les parcelles de soja pur. De plus, la moisson du froment dans les parcelles en relay cropping pourrait avoir tué une partie des adventices les plus développées. Seuls des chénopodes blancs, connus pour avoir une levée échelonnée dans le temps (Terre Inovia *et al.*, no date) ont continué à germer aussi bien dans les parcelles en soja pur qu'en relay cropping.

Excepté une levée de quelques plantes de froments (Figure 17), il semblerait que malgré le supplément de lumière plus important dans les parcelles de relay cropping après la moisson du froment, il n'y ait pas eu de ressaisissement plus important des parcelles en RC comparé aux parcelles en soja pur. Ceci a également été observé en RC maïs-soja (Su *et al.*, 2018). Cette absence de ressaisissement de parcelle en relay cropping est à confirmer sur plusieurs années en raison des conditions météorologiques désavantageuses à la levée d'adventices rencontrées lors de cette année 2020 (Annexe 10).

Malgré un nombre d'adventices par parcelle considéré comme identique entre les différentes modalités, la biomasse d'adventices est quant à elle différente (Figure 14). Le développement des adventices en soja pur semble en effet être plus important. Des résultats identiques ont été obtenus en RC maïs-soja (Su *et al.*, 2018). Selon cette étude, la diminution de biomasse d'adventices en RC s'explique par l'interception plus grande des rayons lumineux par la culture, diminuant ceux disponibles pour les adventices. Outre le manque de lumière, une compétition pour les autres ressources comme l'azote et l'eau a sans doute impacté la biomasse d'adventices, comme il a été rapporté en intercropping escourgeon-pois (Hauggaard-Nielsen, Ambus et Jensen, 2001; Corre-Hellou *et al.*, 2011). La compétition pour la ressource en eau en RC est sans doute la cause principale d'une biomasse plus faible dans cette expérimentation, vu les faibles précipitations durant cette année culturale (Annexe 10).

Au sein du relay cropping, la biomasse d'adventices semble être influencée par la configuration (3*3 et 2*2), ce qui n'était pas le cas entre les deux configurations en RC maïs soja de Su *et al.* (2018). La disposition en 2*2 semble entraîner une compétition pour la ressource lumineuse et hydrique plus importante qu'en 3*3 grâce à la proximité plus grande entre les blocs de lignes de froment. Mesurer le PAR et l'humidité du sol pourrait permettre de vérifier cette hypothèse.

La diminution de biomasse des adventices en RC est à relativiser puisque cette compétition pour la ressource hydrique et lumineuse a également été exercée sur les plantes de soja. Ainsi, la comparaison du pourcentage de biomasse d'adventices par rapport à la biomasse totale (soja théorique + adventices, voir paragraphe 3.2.3) met en lumière un rapport tout autre. En effet, la comparaison avec le soja pur montre que celui-ci a le pourcentage de biomasse d'adventices le plus faible (Figure 15), ce qui va à l'encontre de l'étude de Su *et al.* (2018).

La PcoA a mis en évidence une dissimilitude entre le soja cultivé en culture pure et celui cultivé en associé. En effet, la flore d'adventices, l'abondance et le développement de sa biomasse sont différents (Figure 16 Figure 17). Selon Su *et al.* (2018) la richesse en espèces est fortement corrélée à la quantité de lumière disponible pour celle-ci. Toutefois, dans cette étude, il semble plus probable que la différence provienne d'un travail du sol différent lors de l'implantation du soja. Si la différence de flore d'adventices se confirme, elle pourrait engendrer une gestion de la pression des adventices différentes.

4.5 Temps de désherbage

Concernant le temps de désherbage, aucune différence du temps de désherbage manuel n'a été observée par l'ANOVA à un facteur fixe (association.densité) et un facteur aléatoire (Bloc) (p -valeur >0.05). Par contre, l'ANOVA réalisée sur la partie relay cropping à deux facteurs fixes (association et densité) et un facteur aléatoire (bloc)

montre une différence hautement significative (p -valeur < 0.01) entre la modalité RC2*2 et RC3*3 avec respectivement 24 ± 7 et 17 ± 5 min (Figure 18).

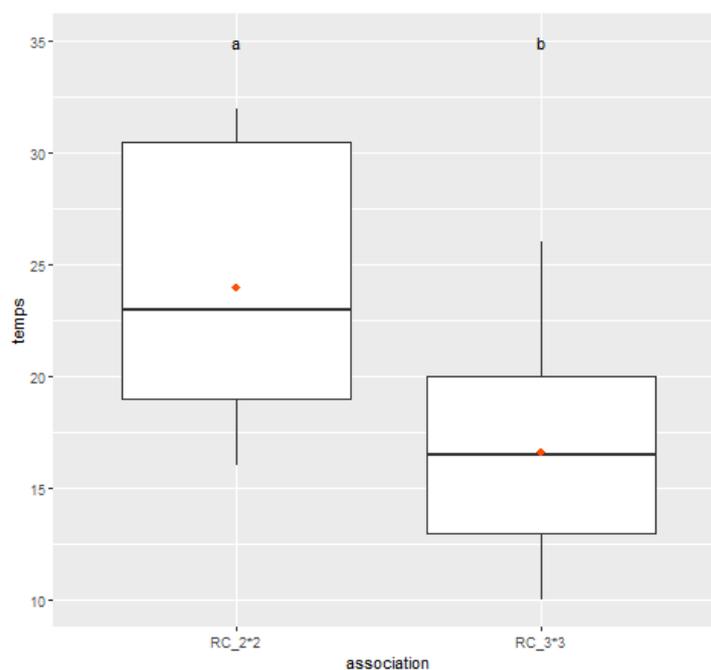


Figure 18: Temps de désherbage manuel en fonction de l'association, Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test SNK.

Le temps de désherbage plus important pour la modalité RC2*2 que RC3*3 peut s'expliquer par la disposition des lignes du soja. En effet, le désherbage s'effectue principalement au niveau des lignes de soja. En RC 3*3, comme il y a deux blocs de trois lignes de soja, le désherbage se réalise en deux passages tandis qu'en RC2*2, il y a trois blocs de deux lignes de soja, le désherbage s'effectue donc en trois passages. Le passage supplémentaire explique certainement que le désherbage met plus de temps en RC2*2.

Il faut bien insister sur le fait que les parcelles ont été désherbées manuellement, lors d'une transposition en grande culture, un désherbage manuel ne semble pas réalisable à cause du temps que cela prendrait et de la pénibilité du travail. Un désherbage mécanique à la herse étrille et à la bineuse est souvent réalisé en culture biologique de soja, car c'est une plante qui s'y prête bien (Gourrat, Chambert et Berard, 2020). Même si ces outils pourraient être utilisés dans le soja en culture pure, il semble difficile de les utiliser en relay cropping à cause d'un interligne trop étroit (12.5cm) et de la présence du froment. En effet, cela pourrait alors poser des problèmes de salissement de parcelle. Enfin, peu de produits phytopharmaceutiques sont autorisés en soja, et il est difficile de trouver des produits qui soient autorisés sur froment et soja simultanément.

4.6 Hauteur des plantes

L'égalité des variances et la normalité des résidus n'étant pas respectées pour la hauteur du froment, une ANOVA par permutation a été réalisée. L'ANOVA à un facteur fixe (association.densité) et un facteur aléatoire (bloc) réalisée sur **la hauteur du froment avant moisson** dévoile une différence très hautement significative du facteur association.densité (p-valeur<0.001) et une différence significative du facteur aléatoire (p-valeur<0.05).

Cependant, l'ANOVA réalisée sur **la hauteur du soja juste après moisson du froment** montre uniquement une différence très hautement significative du facteur association.densité (p-valeur<0.001).

La hiérarchisation de moyenne réalisée aussi bien sur la hauteur du froment que du soja montre une hauteur plus élevée pour les espèces cultivées en pur que pour celles en association, avec

- pour le froment, une hauteur qui s'élève à 63.3 ± 1.7 cm tandis que les modalités en associés sont situées entre 59.6 ± 2.0 cm (RC2*2_230-55) et 61.4 ± 2.0 cm (RC2*2_230-45) (Figure 19) et
- pour le soja, une hauteur qui s'élève à 50.8 ± 4.4 cm et en associés une hauteur comprise entre 20.7 ± 3.8 cm (RC3*3_230-35) et 23.1 ± 2.8 cm (RC2*2_230-35) (Figure 20).

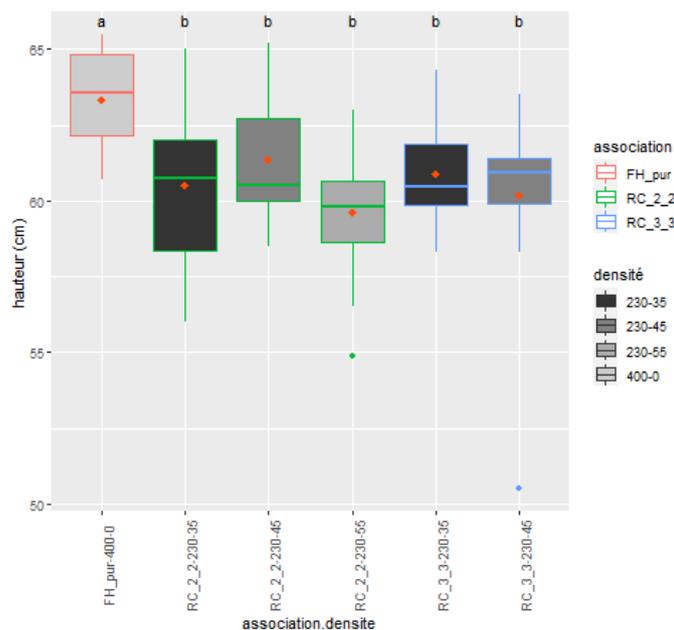


Figure 19: Hauteur du froment à maturité en fonction de la densité de semis et de l'association. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test SNK.

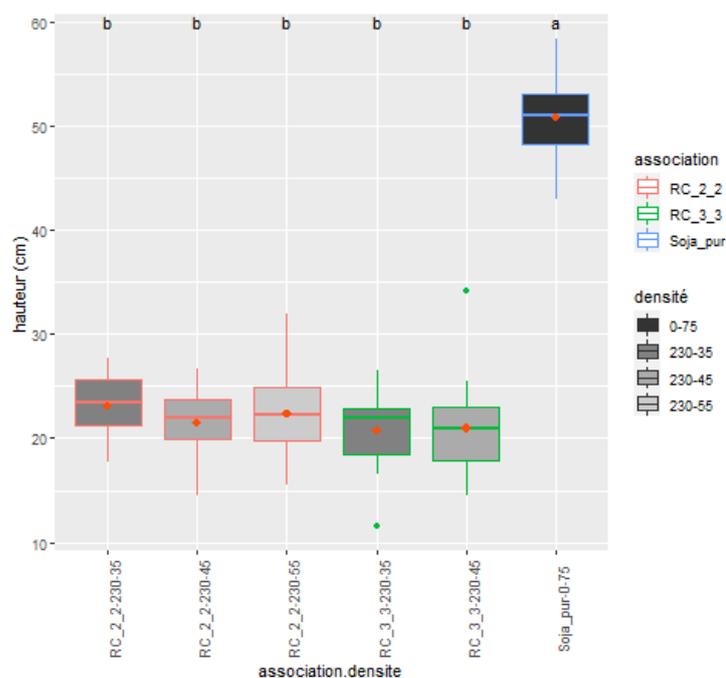


Figure 20: Hauteur du soja après moisson du froment en fonction de la densité de semis et de l'association. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test SNK.

L'association froment-soja a entraîné pour les deux espèces des plantes significativement plus petites qu'en culture pure.

Le froment étant l'espèce dominante dans l'association, sa hauteur légèrement plus petite peut s'expliquer par une concurrence entre plants plus faibles pour la ressource lumineuse. Les résultats obtenus au cours de cette étude sont proches de ceux de Wallace *et al.* (1996) puisque ces derniers obtenaient une hauteur de froment peu voire non impactée par le relay cropping selon les années.

Concernant la hauteur du soja, les résultats de cette étude s'écartent de ceux réalisés au Kansas (Duncan, Schapaugh et Shroyer, 1990) puisque cette étude montre en association une hauteur plus faible pour les plantes de soja lors de la récolte du froment. Cette différence pourrait s'expliquer par deux phénomènes.

Premièrement, la levée du soja en association fut plus tardive qu'en culture pure (voir paragraphe 4.2). Les plantes n'étaient donc pas aux mêmes stades en culture pure (stade 75) qu'en association (stade 61) alors que dans les travaux de Duncan *et al.* (1990) ils étaient identiques.

Deuxièmement, les plantes en cultures associées ont subi une compétition très importante pour les ressources, et principalement, pour celle en eau. En effet, les plantes de soja en association montraient régulièrement des signes de stress hydrique (flétrissement) qui ont pénalisé le bon développement de celles-ci (voir photo Annexe 15). L'ensemble des deux phénomènes a eu une telle conséquence que les plantes de soja en association sont deux fois plus petites qu'en culture pure (Figure 20).

Lors de la moisson du froment, la barre de coupe était à environ 32cm. Aucun dégât de soja n'a été observé lors de la moisson vu la taille plus faible des sojas (Annexe 15). En cas d'années moins sèches, on peut aisément supputer qu'il pourrait y avoir un problème de hauteur de soja qui surviendrait lors de la récolte du froment. En effet, en culture pure, le soja mesurait déjà en moyenne 50.8cm (Figure 20), ce qui est nettement supérieur à la hauteur de la barre de coupe. Un choix de variété de blé avec une longueur de chaume plus haute pourrait être une solution à envisager, mais celle-ci risque d'augmenter l'interception de la lumière entraînant une élongation plus importante des plantes de

soja et augmentant de ce fait le risque de verse aussi bien pour la culture de soja pure qu'en cultures associées.

4.7 Biomasse aérienne

Les régressions linéaires réalisées sur la biomasse totale du froment et du soja sont visibles sur les Figure 21 et Figure 22. Les R^2 ajustés sont compris entre 0.74 et 0.94 pour les biomasses aériennes du froment. Il est observable que pour le premier échantillon (stade dernière feuille), la biomasse entre les modalités peut être considérée comme identique. La différence lors de la prise du dernier échantillon (stade maturation des grains) est plus marquée (Figure 21). Toutefois, les intervalles de confiance des pentes des différentes modalités de la régression linéaire se chevauchent toutes entre elles, à l'exception de la modalité RC2*2_230-45 pour laquelle il n'y a pas de recouvrement avec le froment cultivé en pur (Tableau 7).

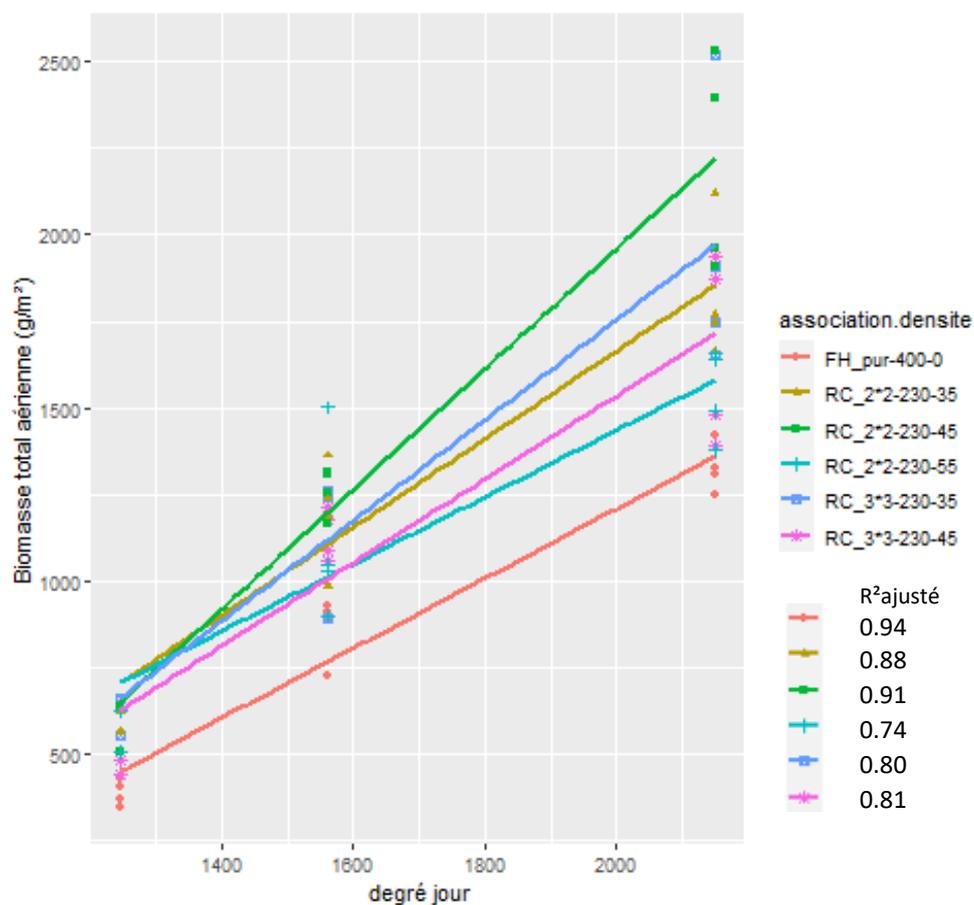


Figure 21: Régression linéaire de la biomasse totale du froment en fonction de la somme des degrés jours.

Tableau 7: Caractéristiques des régressions linéaires de la biomasse aérienne du froment en fonction de l'accumulations des degrés jours.

association.densite	ordonnée	penste	intervalle de confiance		R ² ajusté
FH_pur-400-0	-803.26	1.01	0.83	1.18	0.94
RC_3*3-230-45	-871.51	1.20	0.77	1.64	0.81
RC_3*3-230-35	-1143.17	1.45	0.90	1.99	0.80
RC_2*2-230-45	-1510.29	1.74	1.32	2.16	0.91
RC_2*2-230-35	-878.53	1.27	0.91	1.63	0.88
RC_2*2-230-55	-498.59	0.97	0.54	1.40	0.74

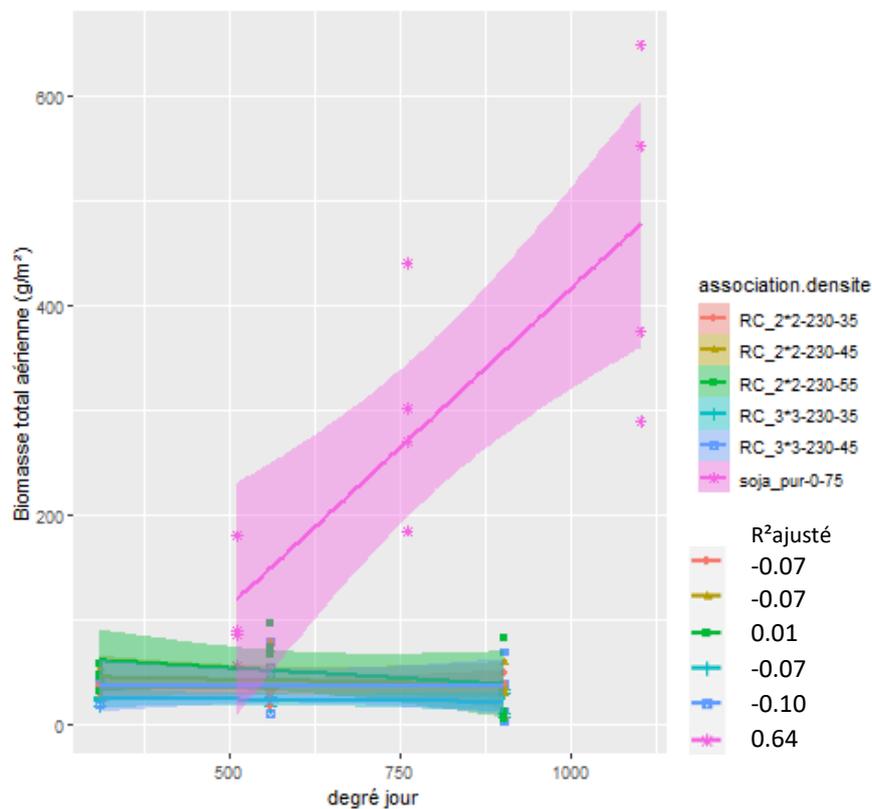


Figure 22: Régression linéaire de la biomasse totale du soja en fonction de la somme des degrés jours.

L'ANOVA à un facteur fixe (association.densité) et un facteur aléatoire (bloc) réalisé au stade "maturation des grains" montre une différence très hautement significative entre les modalités (p -valeur < 0.001). Le test SNK a créé trois groupes (a, b et c) avec certaines modalités se retrouvant à cheval sur deux groupes. La moyenne la plus faible concerne le froment pur avec une biomasse de $1325.85 \pm 72.66 \text{ g/m}^2$ tandis que la moyenne la plus élevée concerne la modalité RC2*2_230-45 avec une moyenne de $2088.21 \pm 266.53 \text{ g/m}^2$.

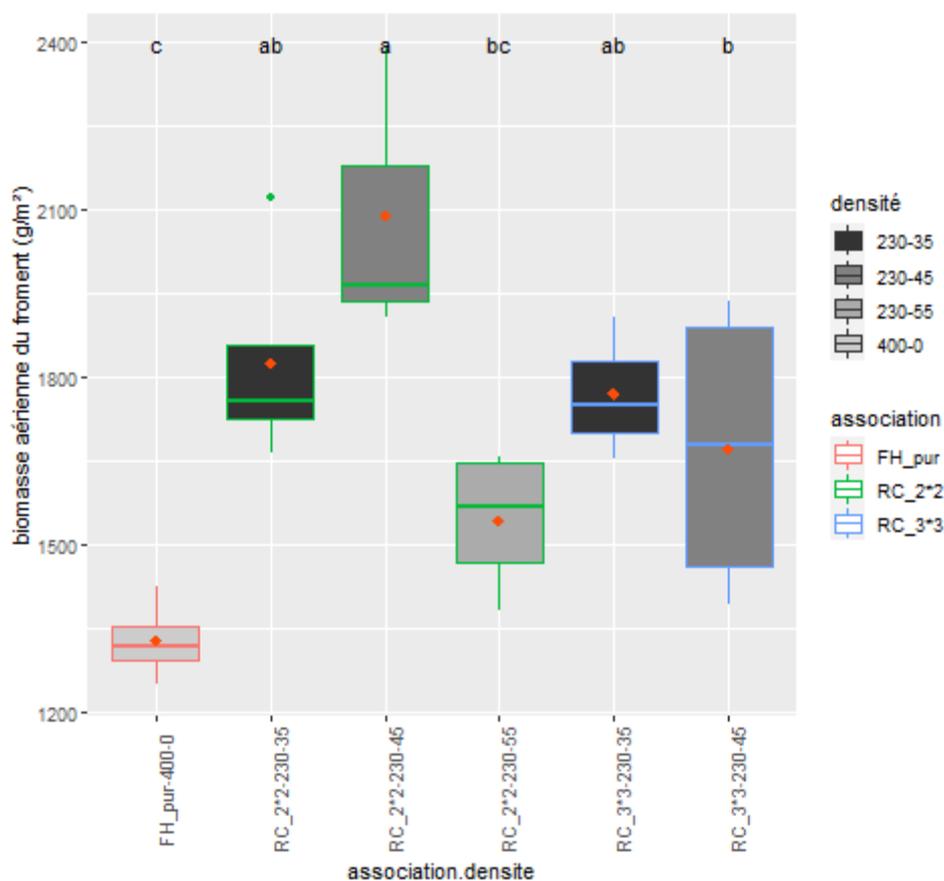


Figure 23: Biomasse aérienne du froment au stade maturation des grains en fonction de l'association et de la densité de semis. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test SNK.

Les R^2 ajustés des biomasses du soja sont extrêmement faibles (même parfois négatifs) pour les modalités en RC tandis que le R^2 ajusté est acceptable pour le soja pur (R^2 ajusté= 0.64). Les régressions en RC ne sont donc pas représentatives. Toutefois, elles permettent de mettre en lumière que la pente est considérée comme nulle. Il n'y a donc pas eu d'accroissement de biomasse entre les différents prélèvements de soja en RC (Tableau 8). Comme observé sur la Figure 22, le comportement du soja cultivé en pur est extrêmement différent de celui en RC avec un accroissement de biomasse beaucoup plus important.

Tableau 8 : Caractéristiques des régressions linéaires de la biomasse aérienne du soja en fonction de l'accumulation des degrés jours

association.densite	ordonnée	pente	intervalle de confiance		R^2 ajusté
RC_3*3-230-45	37.05	0.00	-0.07	0.07	-0.10
RC_3*3-230-35	26.58	-0.01	-0.03	0.02	-0.07
RC_2*2-230-45	48.78	-0.01	-0.07	0.04	-0.07
RC_2*2-230-35	31.76	0.01	-0.03	0.04	-0.07
RC_2*2-230-55	72.95	-0.04	-0.12	0.04	0.01
soja_pur-0-75	-189.53	0.61	0.31	0.90	0.64

La biomasse aérienne du froment pur semble plus faible que celle du froment en RC (calculé uniquement sur la surface des lignes de froment). Ceci peut s'expliquer par une compétition intra espèce plus grande en froment pur. Cette différence semble faible puisque l'intervalle de confiance de la pente du froment pur chevauche celui des autres modalités (Tableau 8). Si le froment avait été directement semé uniquement sur les lignes qui lui étaient destinées (Tableau 4), il est postulable que la différence de biomasse aurait pu être plus marquée grâce à une compétition diminuée dès la levée. En effet, il a été reporté que les froments en bordure avaient tendance à taller plus (Porter et Khalilian, 1995).

Il semble difficile d'interpréter les différents groupes créés par le test post hoc lors du dernier relevé de biomasse (stade maturation des grains). En effet, si l'on regarde la Figure 23, il est difficile de tirer des conclusions vu les différences de réponses. Toutefois, on peut voir que le RC2*2_230-55 a une biomasse qui est la plus proche du froment en pur. Ceci pourrait s'expliquer par une concurrence accrue avec le soja, vu la densité de semis de celui-ci.

L'absence de développement de biomasse du soja en RC peut s'expliquer par une concurrence trop importante avec le froment pour les éléments nutritifs, mais également, et principalement pour la ressource en eau (Duncan et Schapaugh, 1997; Sandler, Nelson et Dudenhoefter, 2015). Le soja en RC a eu du mal à s'implanter, ce qui a empêché son développement même une fois le froment récolté (Duncan et Schapaugh, 1993). La structure du sol a pu également influencer la mauvaise implantation du soja. En effet, lors des prises d'échantillons pour le comptage des nodosités, il était très difficile d'enfoncer une bêche en raison de la dureté du sol, suite à la sécheresse. Une zone indurée à environ 10cm était présente, empêchant ainsi le bon développement racinaire du soja. Pour un certain nombre de plantes, la racine pivot n'a pas pu percer la zone indurée et a développé un système racinaire horizontal comme illustré sur la photographie reprise en Annexe 15. Ce problème de structure de sol a accentué le stress hydrique sur les plantes en empêchant celles-ci d'aller chercher de l'eau et des éléments nutritifs en profondeur. Un passage avec un outil à dent avant semis semble une solution pour casser la zone indurée et permettre un bon développement racinaire du soja en RC. Le soja en pur avait une structure de sol idéale grâce à un travail du sol effectué juste avant le semis, ce qui a permis au soja de bien se développer et d'aller chercher l'eau en profondeur, le rendant moins sensible aux déficits de précipitations présents cette année pendant la saison culturale. L'absence de compétition avec le froment a permis son bon développement (outre la prédation par les pigeons à la levée).

La différence de biomasse entre le soja pur et en association est conséquente. Lors du dernier prélèvement (réalisé le 24 août) le soja en pur avait une biomasse de $466.38 \pm 163.53 \text{g/m}^2$ contre seulement une biomasse de $38.58 \pm 7.93 \text{g/m}^2$ pour la moyenne la plus élevée en RC (modalité RC2*2_230-35). Cette différence de biomasse est plus forte que dans d'autres études en RC maïs-soja pour lesquelles la différence de biomasse se situait entre 56 et 19% en fonction des caractéristiques d'agencement du RC (Chen *et al.*, 2017; Su *et al.*, 2018).

4.8 LER de la biomasse aérienne

Comme le montre la Figure 24: LER de la biomasse en fonction de l'association et de la densité. Les barres représentent l'écart-type supérieur., les LER des biomasses aériennes sont toutes en moyenne inférieures à 1.

L'ANOVA à un facteur fixe (association.densité) réalisé sur la valeur du LER montre que celui-ci est significativement différent ($p\text{-valeur} < 0.05$).

Le test post hoc classe le LER en deux groupes et un intermédiaire, avec pour le plus grand LER, la modalité RC2*2_230-45 (LER=0.98±0.14) et le plus faible LER, la modalité RC2*2_230-55 (LER=0.69±0.03). Comme visible sur la Figure 24: LER de la biomasse en fonction de l'association et de la densité. Les barres représentent l'écart-type supérieur., le LER_{total} est constitué très majoritairement par le LER_{froment}. En effet, les LER_{froment} sont à chaque fois supérieurs à 0.5, prouvant un développement de biomasse plus important qu'en culture pure du froment. Par contre, le LER_{soja} en pur a une valeur très faible prouvant que le développement de biomasse est largement moindre qu'en culture pure. Le LER_{total} de la modalité RC2*2_230-55 est le plus faible et s'explique par le rendement de biomasse en froment lui-même plus faible. Ce faible rendement pourrait être expliqué par une concurrence plus forte avec le soja, car la densité de semis est très élevée pour ce dernier.

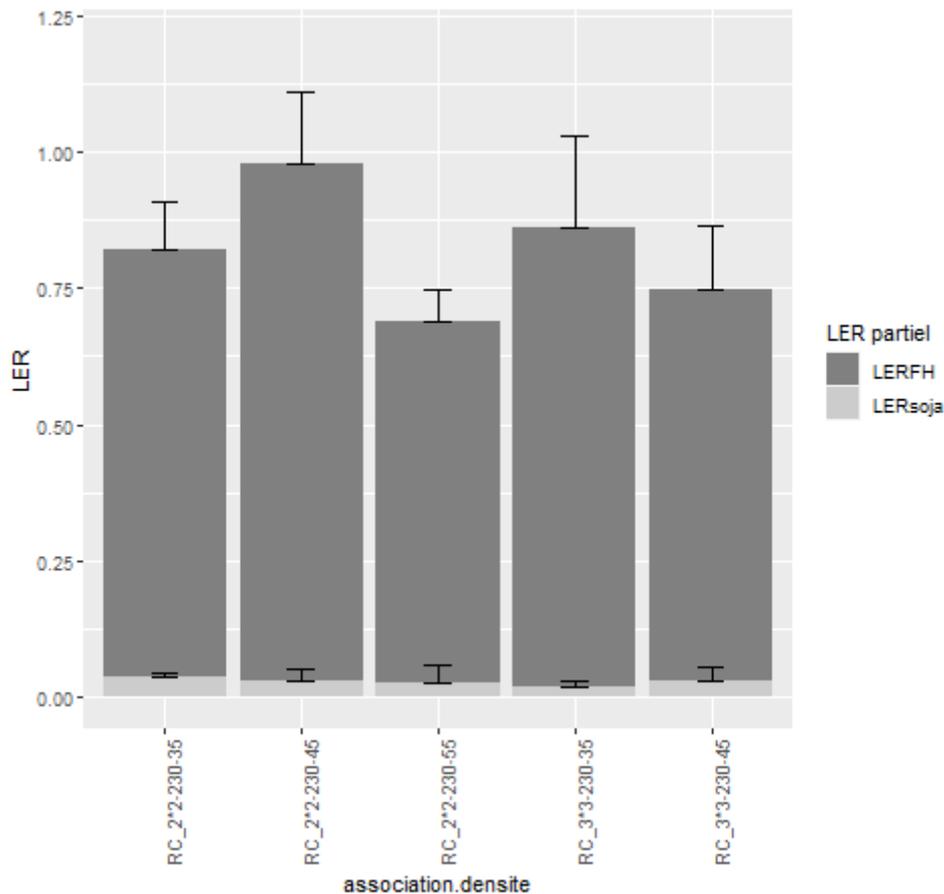


Figure 24: LER de la biomasse en fonction de l'association et de la densité. Les barres représentent l'écart-type supérieur.

Les LERs de l'étude de Su *et al.* (2018) en RC maïs-soja, se situent entre 1.48 et 1.78 alors que dans cette présente étude, le LER de la biomasse aérienne est toujours inférieur à 1. Toutefois, comme dans beaucoup d'études, l'expérimentation de Su *et al.* (2018) a été réalisée sous irrigation, retirant le principal facteur limitant le développement de biomasse.

La valeur du LER inférieure à 1 signifie qu'il n'est pas intéressant d'associer le froment et le soja pour la production de biomasse cette année culturale-ci. En supposant une année plus pluvieuse, il est possible d'espérer d'obtenir un LER supérieur à 1, en raison de la grande valeur du LER partiel du froment. Toutefois, un meilleur développement du soja signifie une concurrence accrue sur le froment, il est donc difficile de présager, sans de nouveaux essais, le LER de la biomasse pour des années sans déficit hydrique.

4.9 Longueur entre-nœud, diamètre de la tige, hauteur première gousse

La normalité des résidus ainsi que l'égalité des variances n'étant pas respectées pour les paramètres longueur entre-nœud, diamètre de la tige et hauteur de la première gousse, des ANOVAs par permutation ont été réalisées.

Le « diamètre de la tige » et « hauteur de la première gousse » ont toutes deux des moyennes qui sont très hautement significativement différentes pour le facteur association.densité (p-valeur<0.001).

La longueur de l'entre-nœud est très hautement significative selon le facteur association.densité (p-valeur<0.001) et significativement différent pour le facteur bloc (p-valeur<0.05).

La culture pure possède en moyenne une longueur entre nœuds plus faible ($4\pm 0.9\text{cm}$) qu'en RC. Au sein du RC, toutes les modalités ont une moyenne équivalente (comprise entre 4.7 ± 0.8 (RC2*2_230-45) et $5.2\pm 0.7\text{cm}$ (RC3*3_230-45)) excepté pour la modalité RC3*3_230-35 qui possède en moyenne une longueur supérieure entre le premier nœud et le second nœud ($5.6\pm 0.9\text{cm}$ -Figure 25)

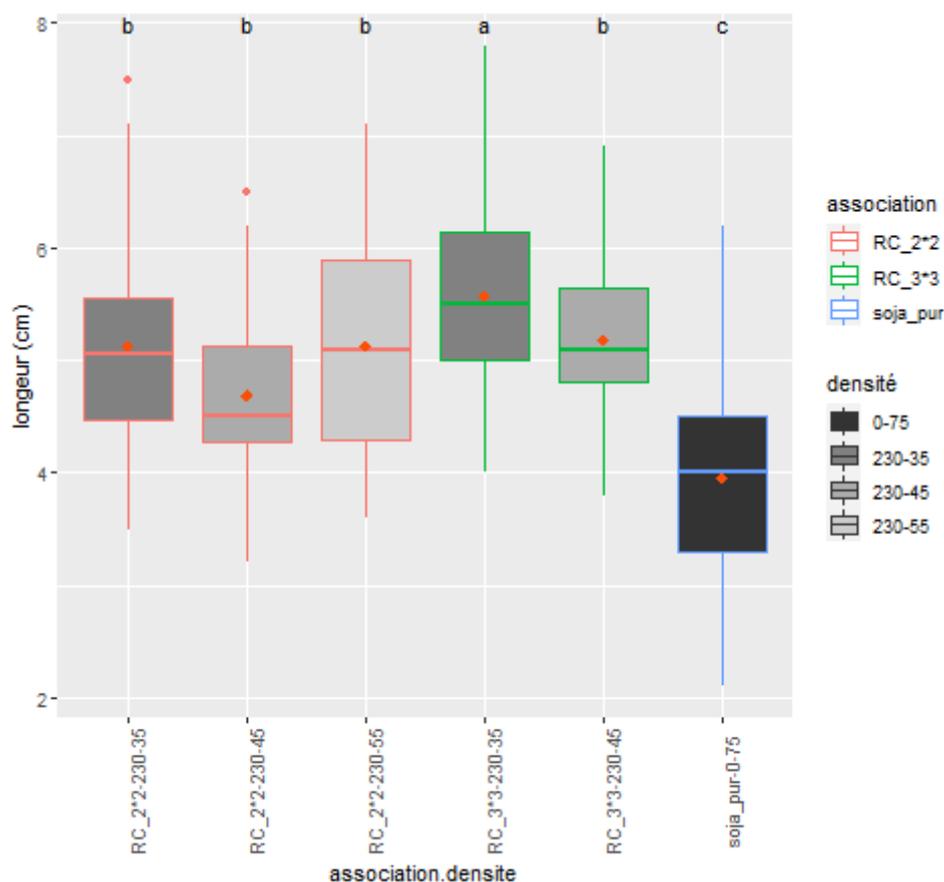


Figure 25: Longueur du premier entre-nœud en fonction de l'association et de la densité de semis. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test SNK.

Le diamètre de la tige au premier nœud est en moyenne significativement le plus faible pour les modalités en RC3*3 et RC2*2 ($0.2\pm 0.04\text{cm}$), excepté pour le RC avec la densité de semis du soja de 55 qui a un diamètre de tige légèrement supérieur (0.3 ± 0.05).

En culture de soja pur, le diamètre de la tige au premier nœud est le plus grand avec en moyenne un diamètre de 0.5 ± 0.09 cm. (Figure 26)

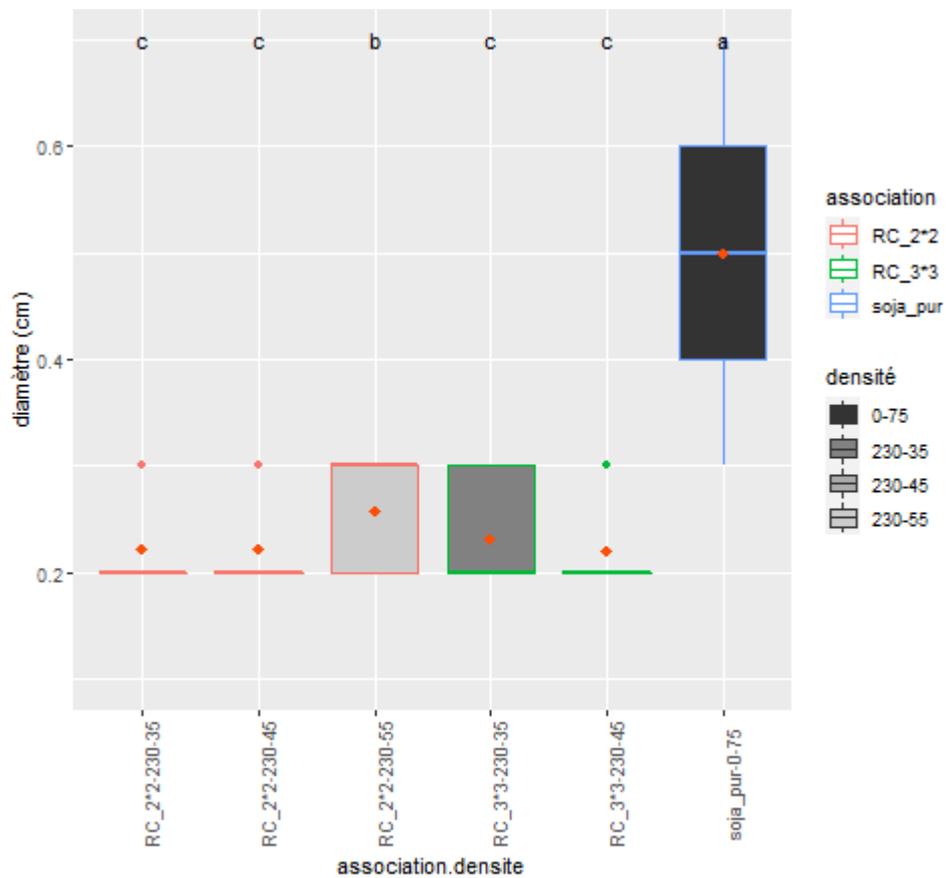


Figure 26: Diamètre de la tige au premier nœud en fonction de l'association et de la densité de semis. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test SNK.

Concernant la hauteur de la première gousse, celle-ci est plus faible en culture pure (moyenne de 9.4 ± 3.4 cm) qu'en relay cropping, où selon les modalités la moyenne est comprise entre 14.4 ± 5.3 (RC3*3_230-35) et 15.4 ± 3 cm (RC3*3_230-45 - Figure 27).

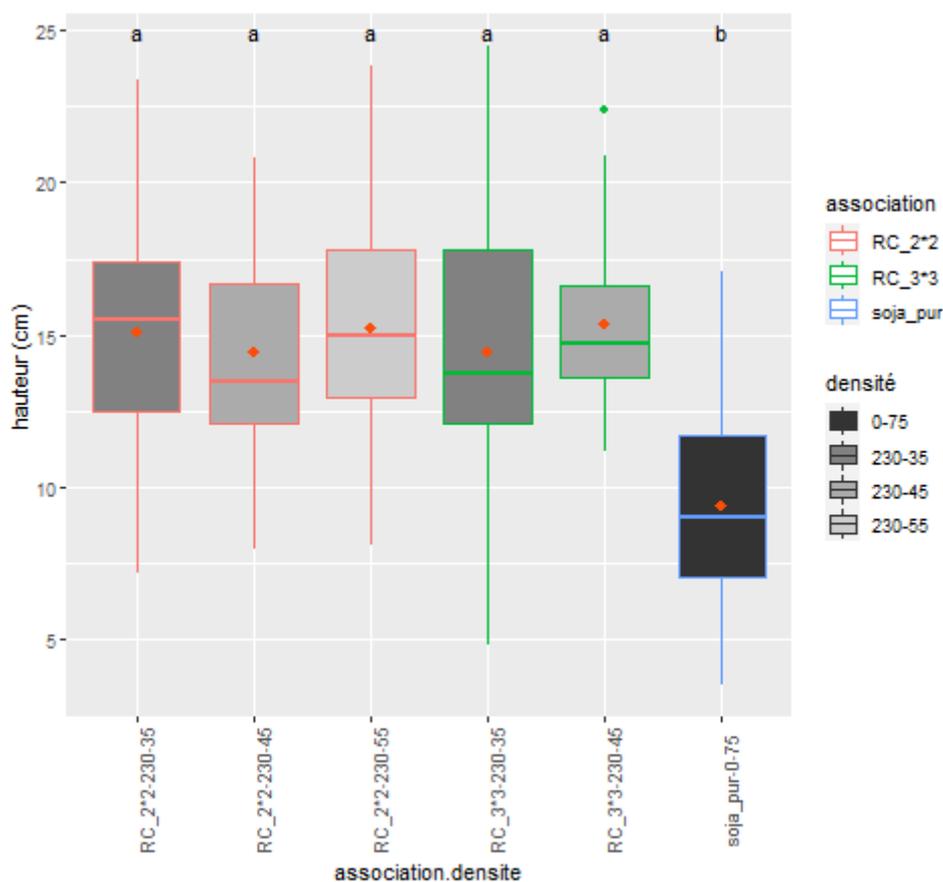


Figure 27: Hauteur de la première gousse de soja en fonction de l'association et de la densité de semis. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test SNK.

Les résultats obtenus vont dans le même sens que ceux obtenus dans les études précédentes aux États-Unis (Duncan, Schapaugh et Shroyer, 1990; Wallace *et al.*, 1992, 1996), ainsi que sur le RC maïs-soja en Asie (Gong *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2015).

La dominance du froment pendant le jeune stade du soja entraîne une élongation plus importante des premiers entre-nœuds ainsi qu'une diminution du diamètre de la tige à cause de l'ombrage créé par le froment (Duncan, Schapaugh et Shroyer, 1990; Wallace *et al.*, 1992).

Comme rapporté en relay cropping maïs-soja par Liu *et al.* (2015) et Fan *et al.* (2018), l'élongation du soja s'explique par un rapport entre l'infrarouge proche et l'infrarouge lointain qui change et qui entraîne in fine l'élongation des entre-nœuds et une inhibition de l'augmentation du diamètre de la tige. La hauteur plus importante du premier étage de gousse en RC s'explique par l'élongation des premiers entre-nœuds, mais pourrait également être due à un avortement du premier étage de fleur. En effet, vu le stress hydrique présent pendant toute la saison culturale du soja, le soja en association a eu des avortements de fleurs pouvant augmenter la hauteur du premier étage de gousse.

Une répétition de l'expérience en condition météorologique différente pourrait affirmer que la hauteur du premier étage de gousse est plus élevée grâce à l'élongation des premiers entre-nœuds.

Etant donné le manque de développement du soja en RC, l'élongation des 2 premiers entre-nœuds et la diminution du diamètre de la tige n'ont pas favorisé la verse. Il serait intéressant d'étudier cela en condition météorologique moins exceptionnelle, afin d'observer si le risque de verse est augmenté comme le relate Wallace *et al.* (1996). Toutefois, avoir une élongation des entre-nœuds plus élevée pourrait s'avérer être un avantage lors de la moisson du soja. En effet, comme rapporté par Terres Inovia, le premier étage de gousses a tendance à être proche du sol. Lors de la moisson, ce premier

étage peut être mal récolté par la moissonneuse (Gourrat, Chambert et Berard, 2020). Une hauteur plus élevée en permettrait donc une meilleure récolte.

Cette hypothèse est également à vérifier en condition météorologique plus habituelle, car cette année aucune récolte n'a été possible.

Enfin, il est à noter que le diamètre de la tige en RC2*2 à la densité de semis du soja 55 ainsi que la longueur du premier entre-nœud en RC3*3 à la densité de semis du soja de 35 ont des moyennes significativement différentes que les autres modalités en RC. Ces observations sont difficilement explicables. Néanmoins, il faut rappeler que lors de la prise des échantillons, des attaques de lièvres avaient ravagé la majorité des plantes de l'essai. Il est peut-être possible que, pour ces 2 modalités, le choix des plantes saines ne soit pas réellement représentatif de la population. De plus, si l'on regarde la distribution de ceux-ci dans les Figure 26 et Figure 25, les différences avec les autres modalités en relay cropping ne semblent pas flagrantes, la présence de valeurs élevées pourrait donc expliquer ce basculement dans une autre catégorie.

4.10 Nodosité

Le glm réalisé sur le nombre total de nodosités montre une dynamique du nombre de nodosités différentes selon la modalité (Figure 28). Dès les premières mesures, un nombre plus élevé de nodosités est présent sur les plantes de soja cultivées en pur (une vingtaine de nodosités) qu'en RC. Lors des différents autres prélèvements, le nombre de nodosités en culture pure augmente tandis qu'en RC celui-ci reste beaucoup plus stable.

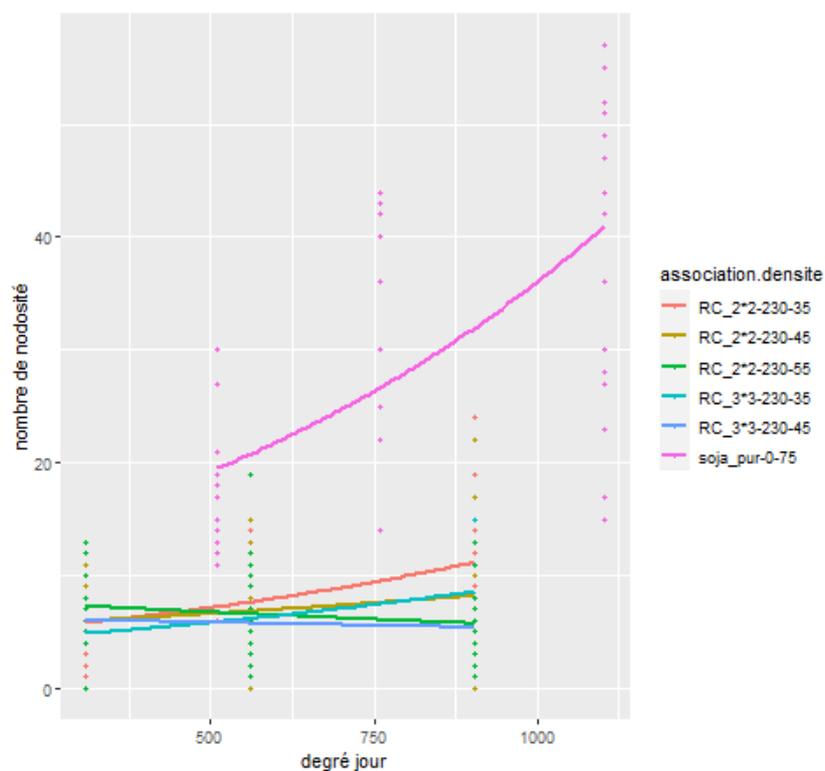


Figure 28: glm du nombre de nodosités en fonction de la somme des degrés jours, de l'association et de la densité.

Le nombre de nodosité au 24 août en fonction de l'association.densité et du bloc montre une différence très hautement significative selon l'association.densité (p-valeur du test chi carré de wald<0.001)

Le contraste de Tukey met en évidence quatre groupes (Figure 29) : la moyenne en soja pur est de 38 ± 14 nodosités tandis qu'en association, celle-ci est comprise entre 5 ± 4 et 11 ± 6 .

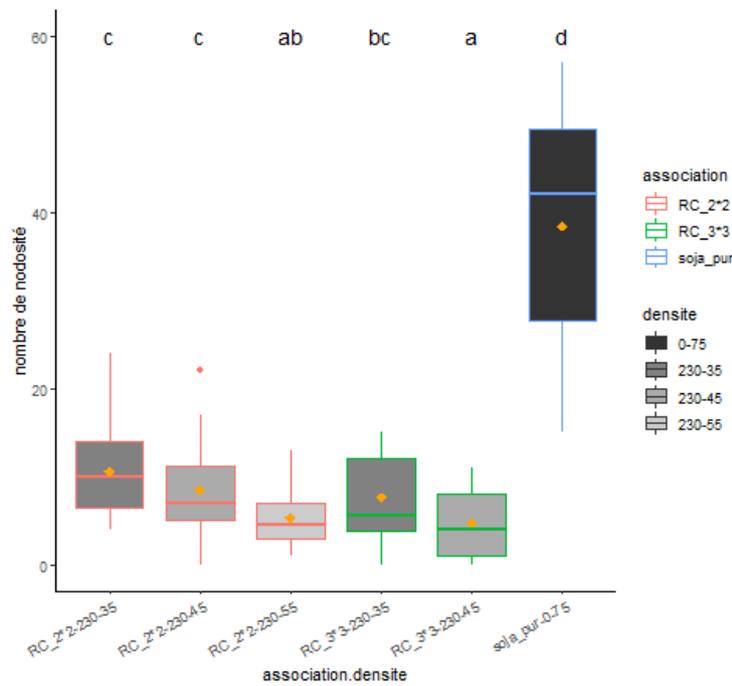


Figure 29: Nombre de nodosités totales par plante le 24 août en fonction de l'association et de la densité de semis. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon les contrastes de Tukey.

L'analyse statistique réalisée au 24 août au sein du RC en fonction de l'association et de la densité a une différence très hautement significative pour le facteur association (p -valeur du test chi carré de wald <0.001) et hautement significative pour le facteur densité (p -valeur du test chi carré de wald <0.01).

Par contre, le test post hoc n'a mis en lumière qu'une différence de groupe pour le facteur association, avec un nombre de nodules en moyenne plus élevé pour le RC2*2 (10 ± 6) que le RC3*3 (6 ± 5) (Figure 30).

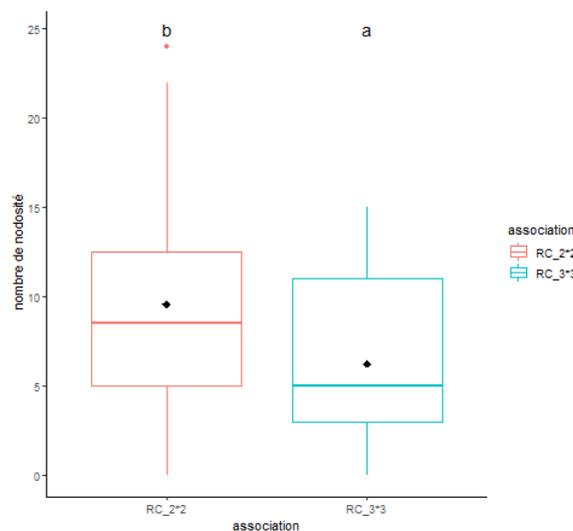


Figure 30: Nombre de nodosités par plante en fonction du type de relay cropping. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon les contrastes de Tukey.

L'évolution du nombre et de l'activité des nodules selon la modalité association.densité est représentée sur la Figure 31. Le 13 juillet, beaucoup de nodules étaient en cours de formation et étaient peu actifs. Le RC était au stade principal de développement des feuilles tandis que le soja pur était au stade d'apparition de l'inflorescence. On peut voir que le pic d'activité des nodules se trouve au 4 août, quand le soja en RC est en pleine floraison tandis que le soja en pur est au début du remplissage des gousses. Le 24 août, une grande partie des nodules est déjà en fin d'activité. Le soja pur est alors au stade où la majorité des gousses ont atteint leur longueur finale et la plupart sont remplies de graines, tandis qu'en RC, la *Fabaceae* est au début du remplissage des gousses.

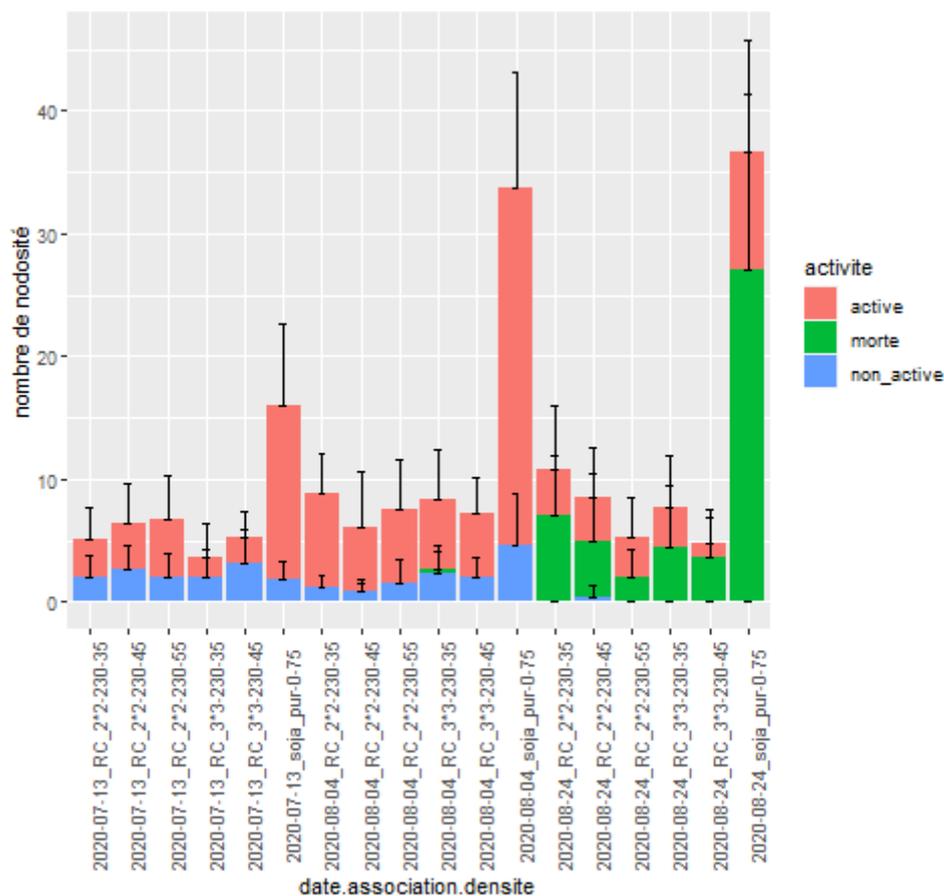


Figure 31: Nombre de nodosités en fonction de la date, de l'association, de la densité et selon l'activité des nodules. Les barres représentent la valeur plus l'écart-type.

Le nombre de nodosités plus élevé pour le soja pur peut s'expliquer par la meilleure implantation des plantes de soja. Les plantes étant plus vigoureuses, elles peuvent supporter un nombre de nodules plus élevé. En effet, le nombre et la taille des nodules sont régulés pour ne pas avoir un coût métabolique trop élevé (Nutman, 1952; Caetano-Anollés et Gresshoff, 1991; Oka-Kira et Kawaguchi, 2006). Le soja en relay cropping ayant subi un stress hydrique important, les plantes n'étaient pas en capacité de supporter un nombre important de nodules.

De plus, même si ce paramètre n'a pas été mesuré, nous avons constaté des nodosités largement plus grosses en culture pure qu'en associé. La fixation de l'azote atmosphérique devait être plus importante en culture pure. Peser le poids des nodules serait intéressant à réaliser pour confirmer cette observation.

Une autre explication du nombre de nodosités plus faible pourrait être la dose de 100 unités d'azote qui a été appliquée le 24 avril sur les parcelles de froment. En effet, il est connu qu'une concentration

élevée en azote dans le sol inhibe l'infection et le développement des nodosités (Dazzo et Brill, 1978; IMSANDE, 1986; YONG *et al.*, 2018).

Concernant les différences entre le nombre de nodules des différentes modalités du RC, il semble y avoir en moyenne plus de nodosités en RC2*2 qu'en RC3*3. Celles-ci pourraient s'expliquer par une plus grande proximité du soja avec le froment, augmentant la compétition pour l'azote et favorisant donc la formation des nodules. De plus, sur la Figure 29, on peut observer qu'il semblerait avoir une corrélation négative de la densité de semis du soja avec le nombre de nodosités par plante en RC. Cette différence a été détectée par le test de chi carré, mais aucun groupe n'avait pu être mis en évidence par le test des contrastes de Tukey réalisé sur le facteur densité. La diminution du nombre de nodules par plante lorsque la densité de soja augmente peut s'expliquer par une compétition pour les ressources plus importantes et donc une capacité à former des nodules plus faibles. Effectivement, la biomasse par m² est considérée comme identique entre les différentes densités de semis au sein du RC ce qui montre une biomasse par plante plus faible.

Les observations de cette présente étude (Figure 31) coïncident avec celles de l'étude de YONG *et al.* (2018), qui relève que le nombre et la masse des nodosités augmentent jusqu'au remplissage des gousses (77), tandis que l'activité fixatrice du nodule a son pic d'activité à la pleine floraison (65). Etant donné la date du pic d'activité de la fixation d'azote, il est très peu probable qu'il y ait eu un transfert d'azote des nodules vers le froment, comme il a été observé en relay cropping maïs-soja (Yong *et al.*, 2015). Un semis plus précoce pourrait peut-être permettre une activité des nodules plus hâtive, et une meilleure implantation du soja aurait sans doute permis un nombre plus important de nodules et donc une activité fixatrice augmentée.

4.11 Poids de mille grains

Le poids de mille grains a une masse différente selon les modalités (p-valeur<0.001). Le froment pur (moyenne de 48.0±1.8g) et la modalité RC_2*2-230-35 (moyenne ±48.5±1.5g) ont des moyennes plus faibles que le reste des modalités en RC (moyenne comprise entre 50.3±1.6g et 51.0±1.6g- Figure 32).

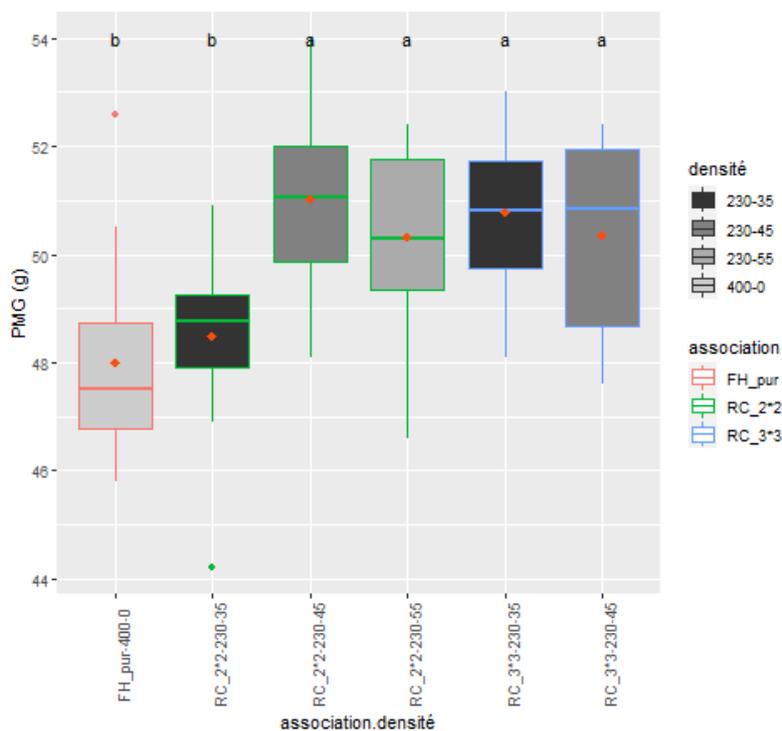


Figure 32: Poids de mille grains du froment d'hiver en fonction de l'association et de la densité. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test SNK.

Les modalités en association (excepté pour la modalité RC2*2_230-35) ont des grains en moyenne plus lourds qu'en froment pur. Cette observation pourrait compenser la densité de semis plus faible du blé comme l'avait déjà proposé Wallace *et al.* (1996), suite à des observations semblables. Le meilleur remplissage des grains pourrait s'expliquer par une compétition intraspécifique dans le RC plus faible pour les nutriments. De plus, la fertilisation azotée fut la même en culture pure qu'en association. Or, la densité de semis du froment sur l'ensemble de la parcelle était plus petite. La quantité d'azote disponible pour le froment en association était donc supérieure par plante en RC qu'en culture pure.

4.12 Rendement en grain du froment et du soja

L'ANOVA à un facteur fixe (association.densité) et un facteur aléatoire a montré une différence très hautement significative (p -valeur <0.001) pour le facteur fixe. Le test SNK a mis en évidence un rendement moyen plus élevé pour le froment cultivé en pur (8428.5 ± 960.18 kg). En RC, 2 groupes différents ainsi qu'une modalité intermédiaire apparaissent avec des moyennes de rendement de 6052.27 ± 469.57 kg et 7146.59 ± 504.06 kg.

L'ANOVA à deux facteurs fixes (association et densité) et un facteur aléatoire (bloc) réalisé uniquement sur les modalités en RC a, quant à elle, permis de mettre en évidence une différence hautement significative (p -valeur <0.01) pour le facteur association. Le test SNK montre que le rendement en blé est plus élevé en RC2*2 qu'en RC3*3 avec respectivement une moyenne de 7044.68 ± 484.51 kg et 6439.55 ± 556.14 kg. Dans d'autres études en RC froment-soja, la diminution de rendement en froment créé par l'association est comprise entre 15 et 34% (Moomaw et Powell, 1990; Jacques, Bacon et Parsch, 1997), ce qui est aussi le cas dans cette expérimentation.

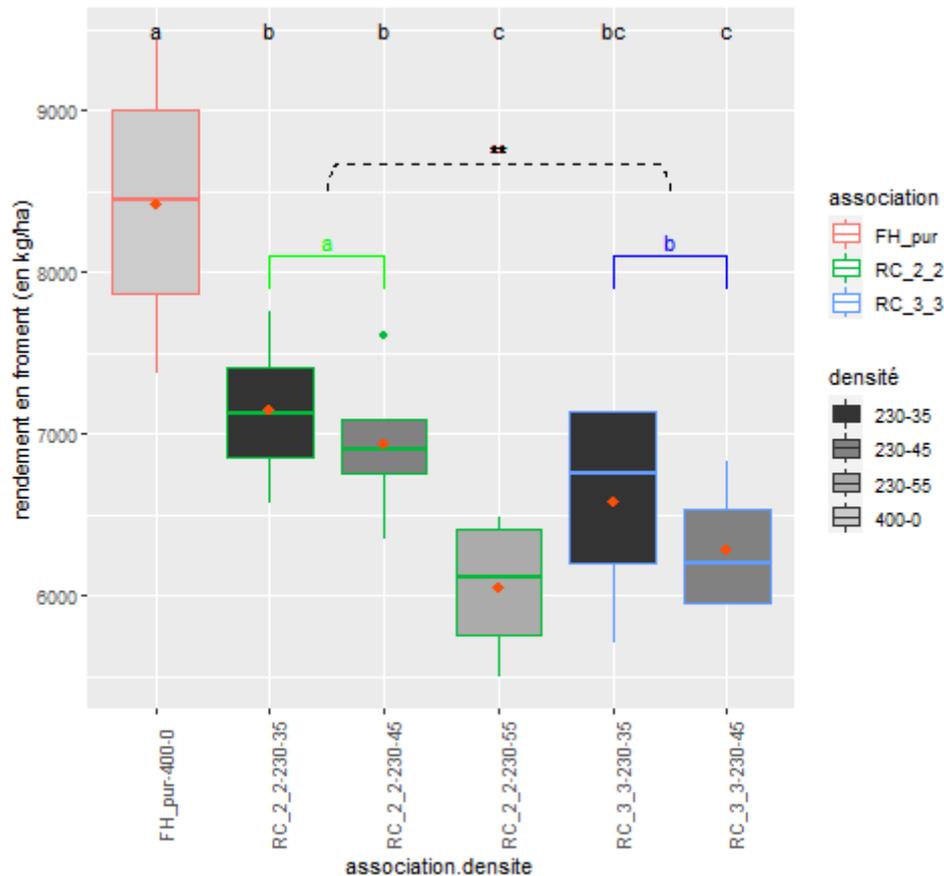


Figure 33: Rendement en froment à 15% d'humidité (en kg/ha) en fonction de l'association et de la densité de semis. Les étoiles signifient que les moyennes des deux groupes sont hautement significativement différentes. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test SNK. Les lettres du haut correspondent aux groupes formés par le test SNK réalisé sur le facteur association.densité. Les lettres en vert et en bleu correspondent au test SNK réalisé sur le facteur association (RC2*2 et RC3*3 uniquement pour les densités 230-35 et 230-45).

Le rendement en soja en RC étant considéré comme nul, aucune statistique n'a été faite. Néanmoins, pour information, le rendement en culture pure a été mesuré. Celui-ci a une moyenne de 757 ± 262 kg/ha. Le rendement est assez faible par rapport au rendement de soja dans nos latitudes (Pannecouque, Goormachtigh, Heungens, *et al.*, 2018). Ce rendement bas s'explique par les attaques de pigeons sur les parcelles malgré la présence de filet. De plus, à cause de ces attaques, la maturité des plantes n'était pas identique. Un certain nombre de gousses ont éclaté fin septembre sur les plantes déjà mures diminuant de ce fait le rendement. L'éclatement des gousses a été mesuré avant la récolte et a été estimé à 6.5%. Enfin cette année extrêmement sèche a sans doute impacté le rendement. En effet, le soja est une plante qui a besoin d'eau. D'ailleurs, en France, dans les régions où les précipitations sont insuffisantes, cette culture est irriguée (Gourrat, Chambert et Berard, 2020).

4.13 LER rendement

Aucune ANOVA n'a été réalisée sur le LER puisqu'il s'agit d'une division de chaque modalité du RC par le rendement en froment. Le comportement est donc le même que pour le rendement en froment (cf 4.12). Toutefois, il est intéressant d'observer que le LER est inférieur à un, ce qui signifie qu'il est plus intéressant de cultiver ces plantes séparément qu'ensemble dans ces conditions. La valeur plus faible que 1 du LER est clairement plombée par l'absence de récolte du soja. En effet, le LER partiel du

froment est quant à lui largement supérieur à 0.5 (moyenne comprise entre 0.72 ± 0.06 et 0.85 ± 0.06) montrant que celui-ci a pour sa superficie semée un rendement plus élevé qu'en culture pure. Cela s'explique par une compétition plus faible pour les ressources, comme déjà évoqué précédemment. Comme relevé dans plusieurs études, le LER en RC est plus petit que 1 en cas de sécheresse. L'association peut aller jusqu'à stopper le développement des plantes de soja (Duncan et Schapaugh, 1997; Sandler, Nelson et Dudenhoefter, 2015). Il n'y a pas eu de croissance de soja comme l'avait reporté Zhang et Li (2003).

4.14 Nombre de gousses, de graines par gousse, nombre d'étages de gousse.

Les paramètres étudiés ne respectaient pas les conditions d'application (normalité des résidus, égalité des variances). Les ANOVAs réalisées sont donc des ANOVAs par permutation. Les ANOVAs à un facteur fixe (association.densité) et un facteur aléatoire (bloc) pour les paramètres nombre d'étages de gousse, nombre total de gousses par plante et le nombre moyen de grains par gousse sont très hautement significatif pour le facteur association.densité (p -valeur <0.001). Le facteur bloc pour le nombre d'étages de gousse et le nombre total de gousses par plante est respectivement significatif et hautement significatif (p -valeur <0.05 et p -valeur <0.01). Les tests post hoc réalisés sur le facteur fixe association.densité montre la même tendance pour les 3 paramètres. Le soja pur n'a pas les mêmes moyennes que le soja en RC comme illustré sur les Figure 34, Figure 35 et Figure 36.

Aucune différence sur les composantes du rendement au sein des modalités en RC n'est visible. La mauvaise implantation du soja à cause de la concurrence causée par le froment a largement impacté les composantes du rendement en soja.

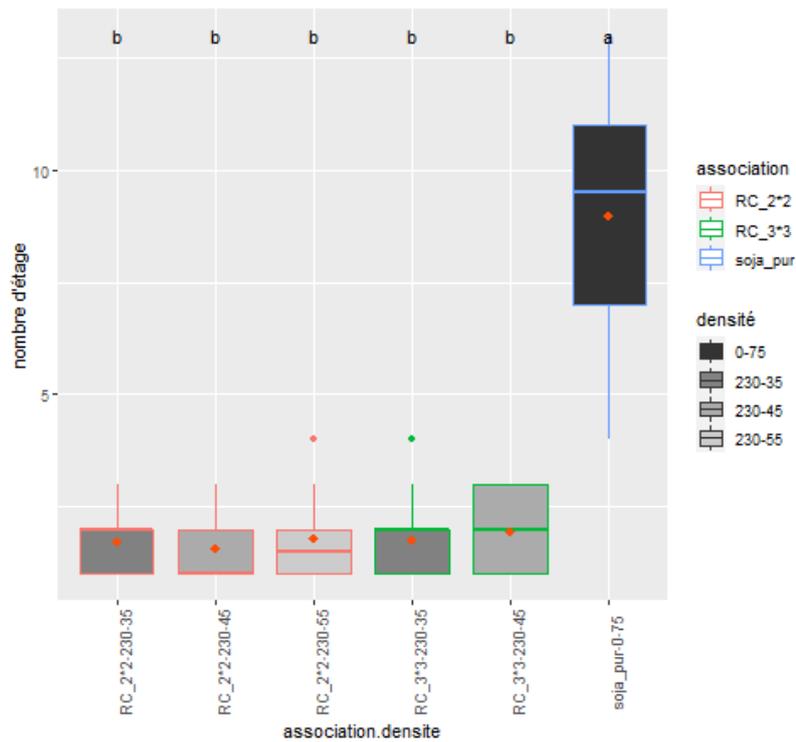


Figure 34: Nombre d'étages de gousse de soja en fonction de l'association et de la densité de semis. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon les contrastes de Tukey.

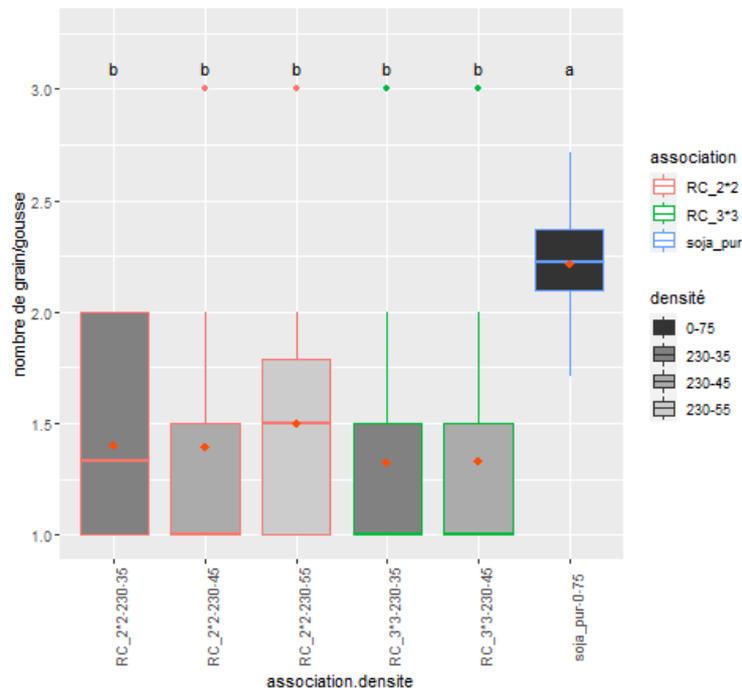


Figure 35: Nombre moyen de grains par gousse en fonction de l'association et de la densité de semis. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon les contrastes de Tukey.

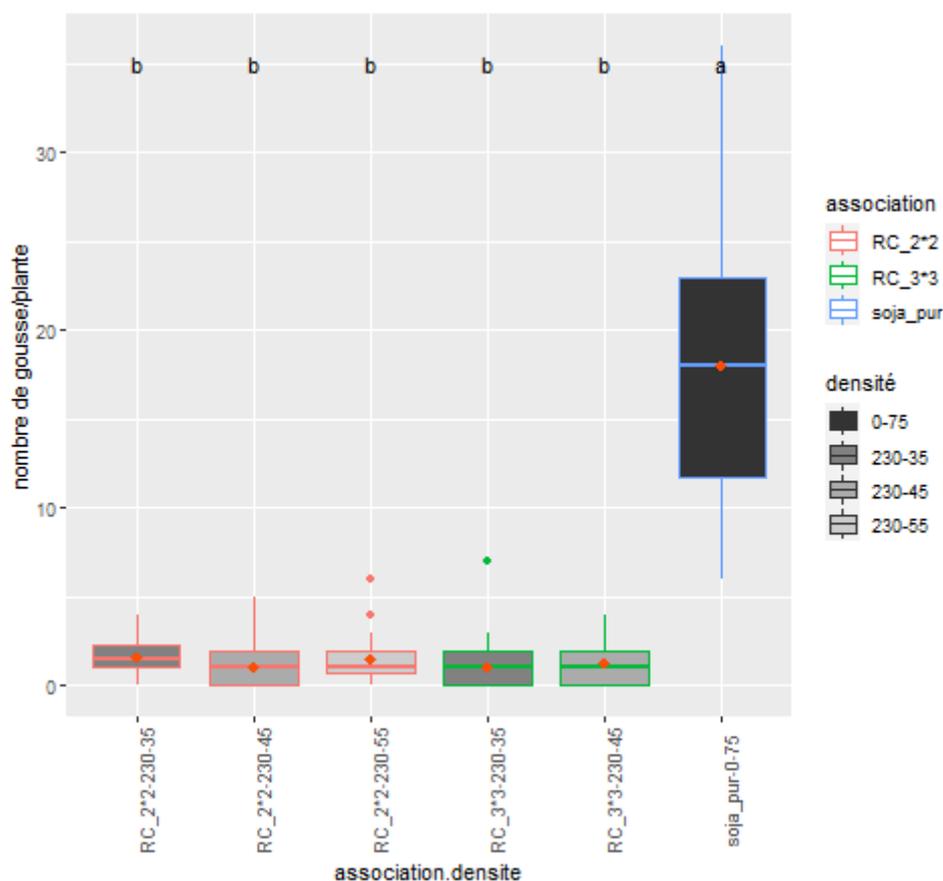


Figure 36: Nombre de gousses de soja par plante en fonction de l'association et de la densité de semis. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon les contrastes de Tukey.

4.15 Taux de protéine

L'ANOVA à un facteur fixe (association.densité) et un facteur aléatoire (bloc) du taux d'humidité montre une différence hautement significative (p -valeur < 0.01) du facteur fixe. Le test post hoc de type SNK montre une moyenne en protéine plus faible pour le froment pur que pour celui cultivé en association (9.8 ± 0.2 % et une teneur comprise entre 10.2 ± 0.2 % et 10.4 ± 0.2 %). La teneur en protéine plus élevée en RC qu'en culture pure (Figure 37) ne semble pas être due à un transfert d'azote provenant des nodosités (cf. paragraphe 4.10), mais peut s'expliquer par le phénomène de dilution. En effet, la fertilisation azotée du froment en RC et en culture pure fut la même (100u N au tallage redressement). Par contre, la densité de semis sur la parcelle totale n'étant pas la même (230 en RC et 400 en pur), la biodisponibilité de l'azote était donc plus importante en RC qu'en pur.

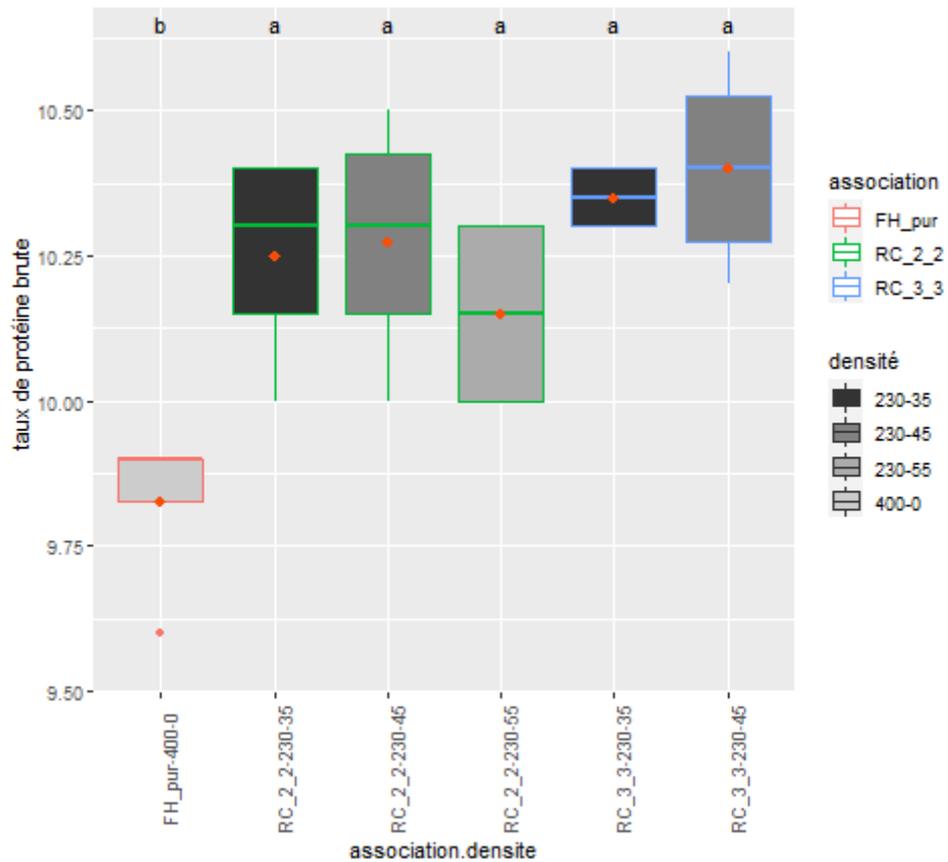


Figure 37: Taux de protéine en fonction de l'association et de la densité de semis. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test SNK.

4.16 Analyse globale, corrélation et PCA

Les corrélations entre les principaux paramètres mesurés sur le froment et sur le soja sont présentes dans la Figure 38 et la Figure 39. Les variables corrélées entre elles par association sont disponibles en Annexe 16.14.

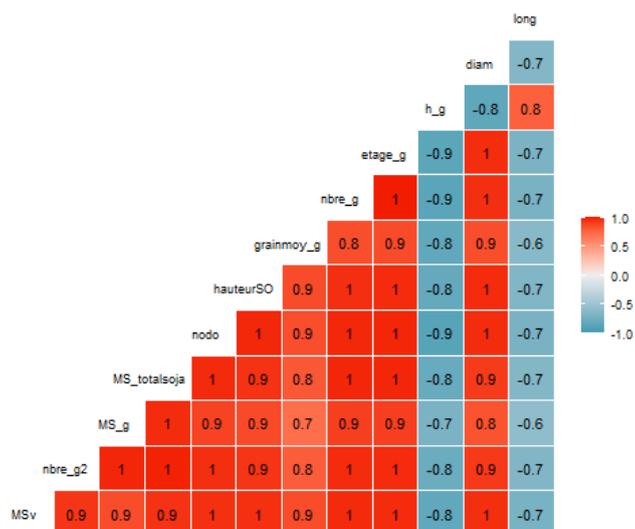


Figure 38: Corrélation entre les paramètres mesurés sur soja (les abréviations sont les suivantes : MSv=biomasse végétative, nbre_g2=nombre de gousse (comptage lors de la prise de biomasse), MS_totalsoja=biomasse aérienne, nodo=nombre de nodosité, hauteurSO=hauteur soja le 30 juillet, grainmoy_g=nombre moyen de grain par gousse, nbre_g=nombre de gousses par plante, etage_gousse=nombre d'étage de gousse, h_g = hauteur de la première gousse, diam= diamètre de la tige au premier nœud, long= longueur du premier entre-nœud).

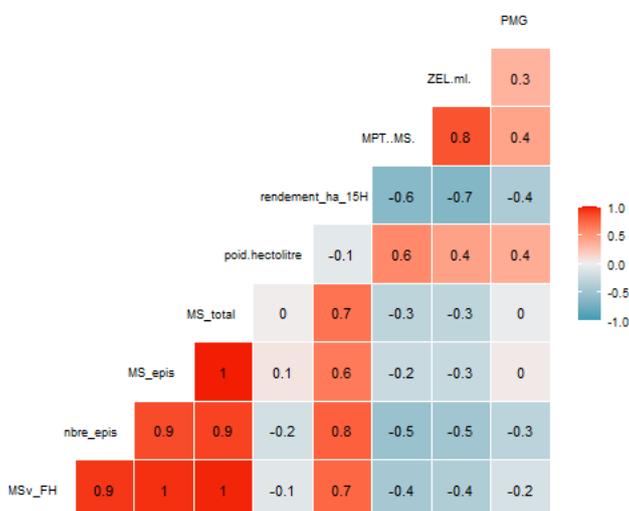


Figure 39: Corrélation entre les paramètres mesurés sur froment (les abréviations sont les suivantes : MSv_FH = biomasse végétative, nbre_epis = nombre d'épis, MS_epis =biomasse des épis, MStotal=biomasse aérienne, rendement_ha_15H=rendement en froment à l'ha (15% d'humidité) MPT..MS=taux de protéine, ZEL.ml=indice de Zélény, PMG=poids de mille grains).

Dans la matrice de corrélation, on peut apercevoir que le rendement est corrélé positivement avec les composantes du rendement (nombres d'épis par m², MS des épis/m²,...). Le rendement étant déterminé par l'ensemble des composantes du rendement, il est normal d'y apercevoir une corrélation positive. Le PMG, par contre, n'est pas ou légèrement corrélé avec les autres composantes du rendement et le rendement lui-même. Ce qui détermine le remplissage des grains est la remobilisation

des réserves accumulées avant la floraison ainsi que la photosynthèse en post floraison. La taille des grains n'est pas le facteur prédominant pour le rendement, mais plutôt le nombre de grains/m². En effet, un nombre de grains plus élevé, mais avec un PMG plus faible, peut davantage augmenter le rendement qu'un nombre plus faible de grain/m², mais avec un PMG plus élevé. C'est pourquoi le PMG peut ne pas être corrélé avec les autres composantes du rendement.

Le rendement et les facteurs du rendement sont négativement corrélés avec la teneur en protéine et l'indice de Zélény. Comme déjà évoqué dans la partie rendement et protéine, ceci s'explique par le phénomène de dilution. Plus le rendement est élevé plus la protéine est diluée.

L'indice de Zélény est fortement corrélé à la teneur en protéine. Il caractérise la force boulangère de la farine : plus la teneur en protéine est élevée, plus la pâte va avoir tendance à monter.

Les corrélations en soja montrent que la hauteur de gousse et la longueur du premier entre-nœud sont corrélées positivement. En effet, plus la longueur du premier entre-nœud est importante, plus l'insertion du premier étage de gousses est élevée. Ces deux facteurs sont fortement corrélés négativement avec les composants de rendement. Il est dommage qu'il n'y ait pas de données de rendement pour corréler les composants du rendement avec le rendement mesuré. Toutefois comme l'ont montré d'autres études, on peut voir que le nombre d'étages de gousse est fortement corrélé aux nombres de gousses (Board, Kang et Harville, 1999). Le nombre de nodosités semble aussi impacter de manière positive la biomasse et les composants de rendement, une absence de nodosité ou un nombre de nodosités plus faible diminue le rendement et la biomasse aérienne (Catroux, Hartmann et Revellin, 2001; Albareda, Rodríguez-Navarro et Temprano, 2009; Thilakarathna et Raizada, 2017; Pannecouque, Goormachtigh, Ceusters, *et al.*, 2018).

La PCA réalisée sur les paramètres mesurés, jugés les plus pertinents, met bien en évidence ce qui a été démontré durant tout ce travail, c'est-à-dire un comportement complètement différent entre les plantes cultivées en pure (regroupé en 1 groupe pour l'analyse) et les cultures en relay cropping. Le comportement entre les 2 modalités du RC ne semble pas différent. Néanmoins, le stress hydrique intense pendant le développement du soja a sans doute caché des différences plus petites qui existent entre ces deux modalités. Les cultures pures se différencient par un rendement en froment plus élevé, un diamètre de tige de soja, un nombre de gousses, d'étages de gousse, un nombre moyen de graines, un nombre de nodosités et d'une matière sèche du soja plus élevés. Le RC se distingue, quant à lui, par une longueur entre-nœuds du soja plus importante, une hauteur de la première gousse plus élevée et par un taux de protéine ainsi qu'un test de Zélény plus élevés. Par conséquent, il est clair que le relay cropping a un réel impact sur le développement des plantes.

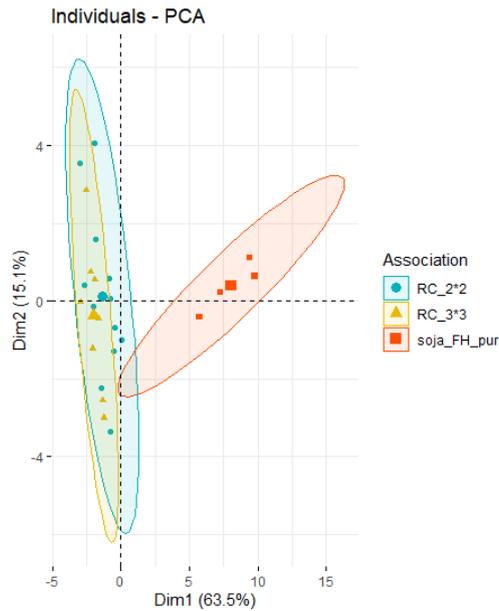


Figure 40: PCA des différentes variables pour les trois types d'associations

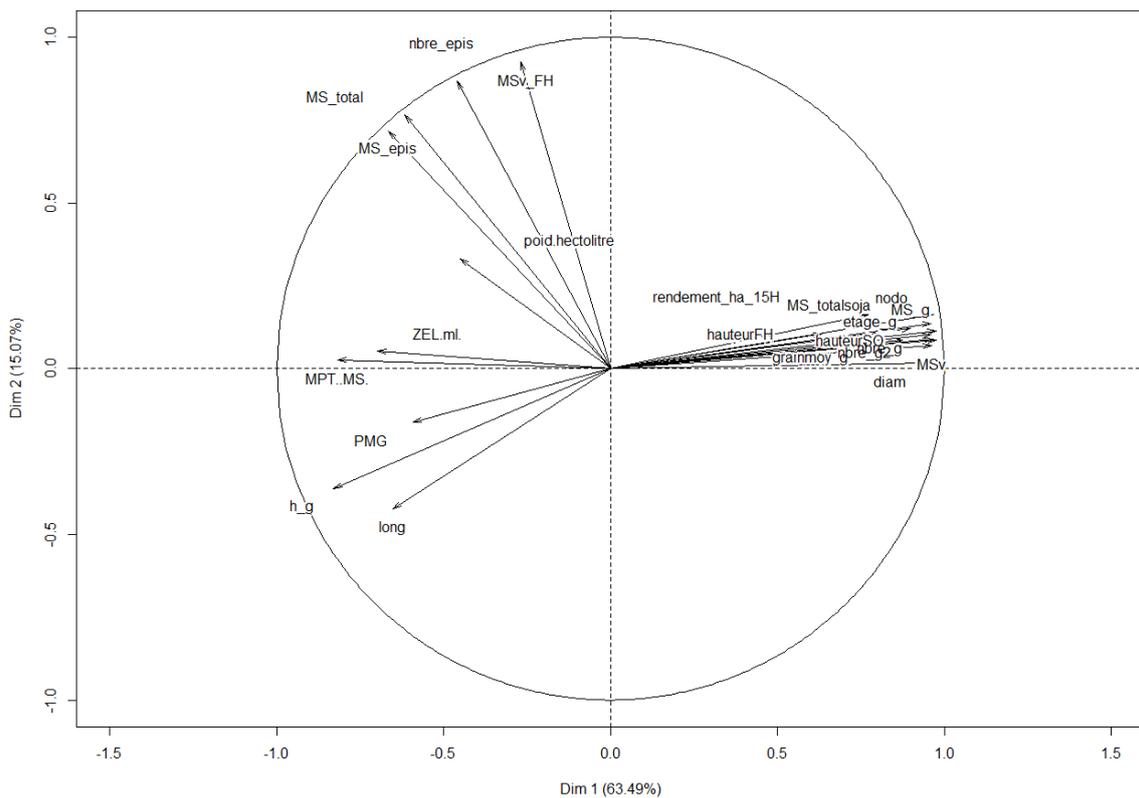


Figure 41: Représentation des différentes variables selon les 2 axes de la PCA. Plus le vecteur est grand, mieux il est représenté par les 2 axes de la PCA. Les abréviations sont les suivantes : MSv_FH = biomasse végétative du froment d'hiver, nbre_epis = nombre d'épis, Ms_epis = biomasse des épis, MStotal = biomasse aérienne, rendement-ha_15H = rendement en froment à l'hectare (15% d'humidité) MPT..MS = taux de protéine, ZEL.ml = indice de Zélény, PMG = poids de mille grains du froment, hauteurFH = hauteur froment, MSv = biomasse végétative du soja, nbre_g2 = nombre de gousses (comptage lors de la prise de biomasse), MS_totalsoja = biomasse aérienne, nodos = nombre de nodosités, hauteurSO = hauteur soja le 30 juillet, grainmoy_g = nombre moyen de grains par gousse, nbre_g = nombre de gousses par plante, etage_gousse = nombre d'étages de gousse, h_g = hauteur de la première gousse, diam = diamètre de la tige au premier nœud, long = longueur du premier entre-nœud.

5 Conclusion

L'essai de relay cropping froment d'hiver-soja réalisé durant l'année culturale 2019-2020 en région limoneuse wallonne a donné de nombreux résultats. Cependant ceux-ci ont été obtenus dans des conditions météorologiques très particulières, avec un printemps et un été extrêmement secs. Le manque d'eau a eu un impact considérable sur le bon développement du soja, surtout en relay cropping. La concurrence du froment sur le soja pendant la phase d'implantation a été trop forte, ce qui a retardé la levée et a entraîné un arrêt de croissance de la végétation du soja. De plus, aucune croissance compensatrice du soja après récolte du froment n'a été observée contrairement aux résultats de Zhang et Li (2003). La concurrence pour les éléments nutritifs, la ressource en eau ainsi que l'ombrage du froment sur le soja a engendré des plantes de soja avec moins de nodosités, des plantes plus basses avec un diamètre de tige plus faible, une longueur du premier entre-nœud plus importante, des nombres de gousses, d'étages de gousse, de grains par gousse plus petits qu'en culture pure. Ceci a conduit in fine à n'avoir aucune récolte de soja en relay cropping et a engendré un LER inférieur à un, ce qui a déjà été observé en cas de sécheresse par Sandler, Nelson et Dudenhoefter (2015).

Peu de différences entre les densités de semis du soja et les dispositions au sein du relay cropping ont été relevées. Les potentielles différences ont pu être masquées par la sécheresse. Toutefois il semblerait que la plus grande densité de semis en soja (55grains/m²) a tendance à diminuer le rendement en blé. D'autre part, le RC2*2 a un meilleur rendement en blé que le RC3*3 ainsi qu'un développement de biomasse d'adventices inférieur. Répéter cette expérimentation afin d'avoir d'autres conditions météorologiques pourrait être envisagé pour potentiellement mieux mettre en évidence les différences entre les modalités.

Ne pas emblaver le froment sur les lignes destinées au soja pourrait influencer positivement le rendement en froment en diminuant la compétition au jeune stade et pourrait augmenter la réserve utile en eau dans le sol. Il serait intéressant de voir l'impact que cela aurait sur la morphologie du froment (plus de tallage...) ainsi que sur la population d'adventices avant l'implantation du soja. En outre, passer un outil pour obtenir un travail du sol plus conséquent dans les lignes de semis du soja pourrait permettre un meilleur développement racinaire.

D'autre part, arriver à une maturité des grains de soja ainsi qu'une humidité idéale pour la récolte reste délicat. En effet, une arrière-saison pluvieuse pourrait la compromettre totalement. C'est pourquoi, comme le préconise Aper, De Clercq et Baert (2016), il pourrait être opportun de tester en Belgique des semis plus précoces, malgré le risque accentué de dégâts dû au gel.

Les dommages causés par les lièvres et les pigeons posent de réels problèmes en expérimentation. Néanmoins le relay cropping semble permettre de protéger des attaques de pigeon, il serait dès lors judicieux de réaliser de réelles mesures de dégât.

Il serait également intéressant de mieux exploiter les données récoltées concernant les composantes du rendement. En effet, le nombre de grains/m², le nombre d'épis/m² le ratio épis/biomasse végétative sont tous des paramètres qui auraient pu être analysés, mais qui, par manque de temps et de place, ne l'ont pas été. De plus peser les nodosités aurait permis de mieux quantifier l'impact du relay cropping sur le développement des nodules. En outre, par rapport à l'optique de l'Union européenne d'augmenter la production protéique en Europe, il serait intéressant de comparer la quantité de protéine à l'hectare en culture associée et en culture pure.

Pour finir, il semble évident qu'il n'est pas possible de tirer des conclusions sur une seule année culturale. Toutefois si les périodes de sécheresse deviennent de plus en plus fréquentes, il paraît difficile à concevoir que le relay cropping froment soja soit adapté en culture non irriguée. Il serait dès lors préférable de tester la technique de relay cropping avec une *Poaceae* qui se récolte plus tôt afin de retirer la dominance de la plante sur le soja plus rapidement et ainsi permettre au soja d'avoir une période de compétition inter spécifique plus courte. L'escourgeon pourrait être un candidat pour tester le relay cropping avec du soja.

Références bibliographiques

- Agence canadienne d'inspection des aliments (1996) *La biologie du Glycine max (L.) Merr. (soja)*. Ottawa. Available at: <https://www.inspection.gc.ca/varietes-vegetales/vegetaux-a-caracteres-nouveaux/demandeurs/directive-94-08/documents-sur-la-biologie/glycine-max-l-/fra/1330975306785/1330975382668> (Accessed: 15 August 2020).
- Ajayi-Oyetunde, O. O. et Bradley, C. A. (2018) 'Rhizoctonia solani : taxonomy, population biology and management of rhizoctonia seedling disease of soybean', *Plant Pathology*. Blackwell Publishing Ltd, 67(1), pp. 3–17. doi: 10.1111/ppa.12733.
- Albareda, M., Rodríguez-Navarro, D. N. et Temprano, F. J. (2009) 'Soybean inoculation: Dose, N fertilizer supplementation and rhizobia persistence in soil', *Field Crops Research*. Elsevier, 113(3), pp. 352–356. doi: 10.1016/j.fcr.2009.05.013.
- Amossé, C. et al. (2013) 'Relay-intercropped forage legumes help to control weeds in organic grain production', *European Journal of Agronomy*, 49, pp. 158–167. doi: 10.1016/j.eja.2013.04.002.
- Aper, J., De Clercq, H. et Baert, J. (2016) 'Agronomic characteristics of early-maturing soybean and implications for breeding in Belgium', *Plant Genetic Resources: Characterisation and Utilisation*. Cambridge University Press, 14(2), pp. 142–148. doi: 10.1017/S1479262115000180.
- Bedoussac, L. et al. (2015) 'Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review', *Agronomy for Sustainable Development*, 35(3), pp. 911–935. doi: 10.1007/s13593-014-0277-7.
- Bedoussac, L., Journet, E.-P. et Hinsinger, P. (2017) 'Des cultures associées pour une gestion économe de l'azote et du phosphore dans les agroécosystèmes Intercropping system View project', *Guide de La Fertilisation Raisonnée*, 2, pp. 541–545. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/322538309> (Accessed: 16 December 2020).
- Bedoussac, L. et Justes, E. (2010) 'The efficiency of a durum wheat-winter pea intercrop to improve yield and wheat grain protein concentration depends on N availability during early growth', *Plant and Soil*. Springer, 330(1), pp. 19–35. doi: 10.1007/s11104-009-0082-2.
- Bedoussac, L. et Justes, E. (2011) 'A comparison of commonly used indices for evaluating species interactions and intercrop efficiency: Application to durum wheat-winter pea intercrops', *Field Crops Research*. Elsevier, 124(1), pp. 25–36. doi: 10.1016/j.fcr.2011.05.025.
- Berti, M. et al. (2017) 'Integrating winter camelina into maize and soybean cropping systems', *Industrial Crops and Products*. Elsevier B.V., 107, pp. 595–601. doi: 10.1016/j.indcrop.2017.06.014.
- Bioagresseurs du sol - Sclerotinia sclerotiorum* (2015). Available at: <http://ephytia.inra.fr/fr/C/10606/Bioagresseurs-du-sol-Sclerotinia-sclerotiorum> (Accessed: 23 June 2020).
- Biszcak, W., Różyło, K. et Kraska, P. (2020) 'Yielding parameters, nutritional value of soybean seed and weed infestation in relay-strip intercropping system with buckwheat', *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*. Taylor and Francis Ltd., 70(8), pp. 640–647. doi: 10.1080/09064710.2020.1831586.
- Blanchard, R. et al. (2019) 'Résultats de l'essai « Date de semis » en froment d'hiver', in *Livre Blanc Céréales*. septembre, pp. 1–2. Available at: www.livre-blanc-cereales.be.

- Board, J. E., Kang, M. S. et Harville, B. G. (1999) 'Path Analyses of the Yield Formation Process for Late-Planted Soybean', *Agronomy Journal*. American Society of Agronomy, 91(1), pp. 128–135. doi: 10.2134/agronj1999.00021962009100010020x.
- Boine, B. *et al.* (2014) 'Quantitative methods for assessment of the impact of different crops on the inoculum density of *Rhizoctonia solani* AG2-2IIIB in soil', *European Journal of Plant Pathology*. Kluwer Academic Publishers, 140(4), pp. 745–756. doi: 10.1007/s10658-014-0506-6.
- Brun, D. et Deschamps, T. (2018) *relay-cropping épisode 1 : le semis de la céréale d'hiver*, Arvalis Institut du Végétal. Available at: <https://www.arvalis-infos.fr/relay-cropping-comment-adapter-le-semis-de-la-cereale--@/view-28616-arvarticle.html> (Accessed: 26 March 2020).
- Brun, D. et Deschamps, T. (2019a) *Relay-cropping épisode 2 : le semis de la culture d'été*, Arvalis institut du végétal. Available at: <https://www.arvalis-infos.fr/relay-cropping-comment-semer-la-culture-d-ete--@/view-29955-arvarticle.html> (Accessed: 26 March 2020).
- Brun, D. et Deschamps, T. (2019b) *Relay-cropping épisode 3 : la récolte de la céréale d'hiver*, Arvalis Institut du Végétal. Available at: <https://www.arvalis-infos.fr/relay-cropping-comment-recolter-la-culture-d-hiver--@/view-30465-arvarticle.html> (Accessed: 26 March 2020).
- Caetano-Anollés, G. et Gresshoff, P. M. (1991) 'Plant genetic control of nodulation', *Annual Review of Microbiology*. Annual Reviews Inc., pp. 345–382. doi: 10.1146/annurev.mi.45.100191.002021.
- Caffaro, S. V. *et al.* (1988) 'Photoperiod regulation of vegetative growth and meristem behavior toward flower initiation of an indeterminate soybean', *Botanical Gazette*, 149(3), pp. 311–316. doi: 10.1086/337720.
- Catroux, G., Hartmann, A. et Revellin, C. (2001) 'Trends in rhizobial inoculant production and use', in *Plant and Soil*. Springer, pp. 21–30. doi: 10.1023/A:1004777115628.
- Cavelier, M. *et al.* (1990) *le froment d'hiver conduite de sa culture*. Edited by P. A. de Gembloux.
- Caviness, C. E. (1966) 'Estimates of Natural Crosspollination in Jackson Soybeans in Arkansas 1', *Crop Science*. Wiley, 6(2), pp. 211–212. doi: 10.2135/cropsci1966.0011183x000600020034x.
- Chen, P. *et al.* (2017) 'Effects of reduced nitrogen inputs on crop yield and nitrogen use efficiency in a long-term maize-soybean relay strip intercropping system', *PLoS ONE*. Public Library of Science, 12(9). doi: 10.1371/journal.pone.0184503.
- Classification | USDA PLANTS* (no date). Available at: <https://plants.usda.gov/classification.html> (Accessed: 16 August 2020).
- Commission Européenne (2018) *Rapport de la commission au conseil et au parlement européen sur le développement des protéines végétales dans l'Union européenne*. Bruxelles.
- Commission Européenne (2020) *EU Feed Protein Balance Sheet _2018-2019*. Available at: https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/food-farming-fisheries/farming/documents/eu-uk-feed-protein-balance-sheet_2018-2019_en.pdf (Accessed: 16 December 2020).
- Corre-Hellou, G. *et al.* (2011) 'The competitive ability of pea-barley intercrops against weeds and the interactions with crop productivity and soil N availability', *Field Crops Research*. Elsevier, 122(3), pp. 264–272. doi: 10.1016/j.fcr.2011.04.004.
- Corre-Hellou, G. *et al.* (2013) 'Associations céréale-légumineuse multi-services', *Innovations Agronomiques*. INRA, 30, pp. 41–57.
- Crabtree, R. J., Prater, J. D. et Mbolda, P. (1990) 'Long-Term Wheat, Soybean, and Grain Sorghum Double-Cropping under Rainfed Conditions', *Agronomy Journal*. Wiley, 82(4), pp. 683–686. doi:

10.2134/agronj1990.00021962008200040007x.

Dazzo, F. B. et Brill, W. J. (1978) 'Regulation by Fixed Nitrogen of Host-Symbiont Recognition in the Rhizobium -Clover Symbiosis', *Plant Physiology*. American Society of Plant Biologists (ASPB), 62(1), pp. 18–21. doi: 10.1104/pp.62.1.18.

Debaeke, P. *et al.* (2017) 'Sunflower crop: Environmental-friendly and agroecological', *OCL - Oilseeds and fats, Crops and Lipids*. EDP Sciences, p. D304. doi: 10.1051/ocl/2017020.

Denanot, J.-P. (Commission de l'agriculture et du développement rural) (2018) *Stratégie européenne pour la promotion des cultures protéagineuses – Encourager la production de protéagineuses et de légumineuses dans le secteur agricole européen 2017/2116(INI)*. Bruxelles.

DonauSoja: Europe Soya Declaration (2020). Available at: <https://www.donausoja.org/en/about-us/the-association/europe-soya-declaration/> (Accessed: 14 May 2020).

Duchene, O., Vian, J. F. et Celette, F. (2017) 'Intercropping with legume for agroecological cropping systems: Complementarity and facilitation processes and the importance of soil microorganisms. A review', *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Elsevier B.V., pp. 148–161. doi: 10.1016/j.agee.2017.02.019.

Duncan, S. R. et Schapaugh, W. T. (1993) 'Row Orientation and Planting Pattern of Relay Intercropped Soybean and Wheat', *Journal of Production Agriculture*. American Society of Agronomy, 6(3), pp. 360–364. doi: 10.2134/jpa1993.0360.

Duncan, S. R. et Schapaugh, W. T. (1997) 'Relay-intercropped soybean in different water regimes, planting patterns, and winter wheat cultivars', *Journal of Production Agriculture*. American Society of Agronomy, 10(1), pp. 123–129. doi: 10.2134/jpa1997.0123.

Duncan, S. R., Schapaugh, W. T. et Shroyer, J. P. (1990) 'Relay Intercropping Soybeans into Wheat in Kansas', *Journal of Production Agriculture*. American Society of Agronomy, 3(4), pp. 576–581. doi: 10.2134/jpa1990.0576.

Fan, Y. *et al.* (2018) 'Effect of shading and light recovery on the growth, leaf structure, and photosynthetic performance of soybean in a maize-soybean relay-strip intercropping system', *PLoS ONE*. Public Library of Science, 13(5). doi: 10.1371/journal.pone.0198159.

FAO (1985) *Glossary, Guidelines: Land evaluation for irrigated agriculture - FAO soils bulletin 55*. Available at: <http://www.fao.org/3/x5648e/x5648e0m.htm> (Accessed: 11 January 2020).

FAO (2009) 'Comment nourrir le monde en 2050', pp. 1–29.

FAOSTAT (2020). Available at: <http://www.fao.org/faostat/fr/#data/QC> (Accessed: 12 May 2020).

Fehlenberg, V. *et al.* (2017) 'The role of soybean production as an underlying driver of deforestation in the South American Chaco', *Global Environmental Change*. Elsevier Ltd, 45, pp. 24–34. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2017.05.001.

Fehr, W. et Caviness, C. (1977) 'Stages of soybean development', *Special Report*, 87. Available at: <https://lib.dr.iastate.edu/specialreports/87> (Accessed: 25 June 2020).

Filagri (no date) *Les céréales - Filagri*. Available at: <https://filagri.be/grandes-cultures/les-cereales/> (Accessed: 21 July 2020).

Froment – Livre Blanc Céréales (no date). Available at: <http://www.livre-blanc-cereales.be> (Accessed: 25 July 2020).

Gendron-St-Marcelle, A.-F. (2013) *Le nématode à kyste du soja (heterodera glycines) : enjeux des changements climatiques sur sa distribution, sa reproduction et sur les probabilités de synchronisme*

avec le soja (*glycines max*) au Québec. Université de Sherbrooke. doi: <http://hdl.handle.net/11143/7214>.

Gesch, R. W., Archer, D. W. et Berti, M. T. (2014) 'Dual cropping winter camelina with soybean in the northern corn belt', *Agronomy Journal*. American Society of Agronomy, 106(5), pp. 1735–1745. doi: 10.2134/agronj14.0215.

Gong, W. Z. *et al.* (2015) 'Tolerance vs. avoidance: two strategies of soybean (*Glycine max*) seedlings in response to shade in intercropping', *Photosynthetica*, 53(2), pp. 259–268. doi: 10.1007/s11099-015-0103-8.

Gourrat, M., Chambert, C. et Berard, S. (2020) *Guide de culture Soja 2020*. Terres Innovia.

Guo, J. *et al.* (2010) 'A single origin and moderate bottleneck during domestication of soybean (*Glycine max*): Implications from microsatellites and nucleotide sequences', *Annals of Botany*, 106(3), pp. 505–514. doi: 10.1093/aob/mcq125.

Hadley, P. *et al.* (1984) 'Effects of Temperature and Photoperiod on Flowering in Soya bean [*Glycine max* (L.) Merrill]: a Quantitative Model', *Annals of Botany*. Oxford University Press (OUP), 53(5), pp. 669–681. doi: 10.1093/oxfordjournals.aob.a086732.

Han, T. *et al.* (2006) 'Postflowering photoperiod regulates vegetative growth and reproductive development of soybean', *Environmental and Experimental Botany*. Elsevier, 55(1–2), pp. 120–129. doi: 10.1016/j.envexpbot.2004.10.006.

Han, Y. *et al.* (2016) 'Domestication footprints anchor genomic regions of agronomic importance in soybeans', *New Phytologist*. Blackwell Publishing Ltd, 209(2), pp. 871–884. doi: 10.1111/nph.13626.

Hartman, G. L., West, E. D. et Herman, T. K. (2011) 'Crops that feed the World 2. Soybean-worldwide production, use, and constraints caused by pathogens and pests', *Food Security*. Springer, 3(1), pp. 5–17. doi: 10.1007/s12571-010-0108-x.

Hauggaard-Nielsen, H., Ambus, P. et Jensen, E. S. (2001) 'Interspecific competition, N use and interference with weeds in pea-barley intercropping', *Field Crops Research*. Elsevier, 70(2), pp. 101–109. doi: 10.1016/S0378-4290(01)00126-5.

Heuzé, V. et Tran, G. (2016) *Soybean (general) | Feedipedia, a programme by INRA, CIRAD, AFZ and FAO*. Available at: <https://www.feedipedia.org/node/753> (Accessed: 16 August 2020).

Hypp : encyclopédie en protection des plantes - Les maladies et ravageurs (2019) *ephyta*. Available at: <http://ephytia.inra.fr/fr/C/18054/Hypp-encyclopedie-en-protection-des-plantes-Les-maladies-et-ravageurs> (Accessed: 24 June 2020).

IMSANDE, J. (1986) 'Inhibition of Nodule Development in Soybean by Nitrate or Reduced Nitrogen', *Journal of Experimental Botany*. Oxford Academic, 37(3), pp. 348–355. doi: 10.1093/jxb/37.3.348.

INRA, CIRAD et AFZ (2020) *Tables de composition et de valeur nutritionnelle des aliments pour animaux INRA CIRAD AFZ*. Available at: <https://feedtables.com/fr> (Accessed: 16 August 2020).

Iqbal, N. *et al.* (2019) 'Plant Production Science Comparative analysis of maize-soybean strip intercropping systems: a review Comparative analysis of maize-soybean strip intercropping systems: a review', *Plant Production Science*, 22(2), pp. 131–142. doi: 10.1080/1343943X.2018.1541137.

IRM (2020a) *IRM*. Available at: <https://www.meteo.be/> (Accessed: 29 December 2020).

IRM (2020b) *Statistiques climatiques des communes belges Gembloux (INS 92142)*. Available at: www.meteo.be (Accessed: 26 July 2020).

Jacques, S., Bacon, R. K. et Parsch, L. D. (1997) 'Comparison of single cropping, relay cropping and

- double cropping of soybeans with wheat using cultivar blends', *Experimental Agriculture*. Cambridge University Press, 33(4), pp. 477–486. doi: 10.1017/S0014479797004043.
- Johnson, G. A. *et al.* (2017) 'Yield tradeoffs and nitrogen between pennycress, camelina, and soybean in relay- and double-crop systems', *Agronomy Journal*. American Society of Agronomy, 109(5), pp. 2128–2135. doi: 10.2134/agronj2017.02.0065.
- Kantolic, A. G. et Slafer, G. A. (2001) 'Photoperiod sensitivity after flowering and seed number determination in indeterminate soybean cultivars', *Field Crops Research*. Elsevier, 72(2), pp. 109–118. doi: 10.1016/S0378-4290(01)00168-X.
- Kurasch, A. K., Hahn, V., Leiser, W. L., Vollmann, J., *et al.* (2017) 'Identification of mega-environments in Europe and effect of allelic variation at maturity E loci on adaptation of European soybean', *Plant, Cell & Environment*. Blackwell Publishing Ltd, 40(5), pp. 765–778. doi: 10.1111/pce.12896.
- Kurasch, A. K., Hahn, V., Leiser, W. L., Starck, N., *et al.* (2017) 'Phenotypic Analysis of Major Agronomic Traits in 1008 RILs from a Diallel of Early European Soybean Varieties', *Crop Science*. Crop Science Society of America, 57(2), pp. 726–738. doi: 10.2135/cropsci2016.05.0318.
- Lamichhane, J. R. *et al.* (2019) 'Analysis of soybean germination, emergence, and prediction of a possible northward expansion of the crop under climate change', *bioRxiv*. Cold Spring Harbor Laboratory, p. 28. doi: 10.1101/632976.
- Lamichhane, J. R. *et al.* (2020) 'Analysis of soybean germination, emergence, and prediction of a possible northward establishment of the crop under climate change', *European Journal of Agronomy*. Elsevier B.V., 113, p. 125972. doi: 10.1016/j.eja.2019.125972.
- Li, L., Sun, J., Zhang, F., Li, X., Yang, S., *et al.* (2001) 'Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients', *Field Crops Research*. Elsevier, 71(2), pp. 123–137. doi: 10.1016/S0378-4290(01)00156-3.
- Li, L., Sun, J., Zhang, F., Li, X., Rengel, Z., *et al.* (2001) 'Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping II. Recovery or compensation of maize and soybean after wheat harvesting', *Field Crops Research*. Elsevier, 71(3), pp. 173–181. doi: 10.1016/S0378-4290(01)00157-5.
- Li, Y. *et al.* (2008) 'Genetic structure and diversity of cultivated soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) landraces in China', *Theoretical and Applied Genetics*, 117(6), pp. 857–871. doi: 10.1007/s00122-008-0825-0.
- Liu, W. *et al.* (2015) 'Evaluation of Soybean (*Glycine max*) Stem Vining in Maize-Soybean Relay Strip Intercropping System', *Plant Production Science*, 18(1), pp. 69–75. doi: 10.1626/ppls.18.69.
- Malézieux, E. *et al.* (2009) 'Mixing plant species in cropping systems: Concepts, tools and models. A review', *Agronomy for Sustainable Development*. Springer, pp. 43–62. doi: 10.1051/agro:2007057.
- McWilliams, D. A., Berglund, D. R. and Endres, G. J. (1999) *Soybean Growth and Management Quick Guide*.
- Medic, J., Atkinson, C. et Hurburgh, C. R. (2014) 'Current knowledge in soybean composition', *JAOCS, Journal of the American Oil Chemists' Society*. Springer Verlag, pp. 363–384. doi: 10.1007/s11746-013-2407-9.
- Melzer, M. S. *et al.* (2016) 'Characterization and pathogenicity of *Rhizoctonia* spp. from field crops in Canada', *Canadian Journal of Plant Pathology*. Taylor and Francis Inc., 38(3), pp. 367–374. doi: 10.1080/07060661.2016.1199596.
- Monzon, J. P. *et al.* (2014) 'Maize-soybean intensification alternatives for the Pampas', *Field Crops Research*. Elsevier, 162, pp. 48–59. doi: 10.1016/j.fcr.2014.03.012.

- Moomaw, R. S. et Powell, T. A. (1990) 'Multiple Cropping Systems in Small Grains in Northeast Nebraska', *Journal of Production Agriculture*. American Society of Agronomy, 3(4), pp. 569–576. doi: 10.2134/jpa1990.0569.
- Munger, P. et al. (1997) 'Phenological Growth Stages of the Soybean Plant (*Glycine max* L. MERR.): Codification and Description According to the BBCH Scale', *Journal of Agronomy and Crop Science*. Blackwell Publishing Ltd, 179(4), pp. 209–217. doi: 10.1111/j.1439-037X.1997.tb00519.x.
- Nelson, K. A., Massey, R. E. et Burdick, B. A. (2011) 'Harvest aid application timing affects wheat and relay intercropped soybean yield', *Agronomy Journal*, 103(3), pp. 851–855. doi: 10.2134/agronj2010.0384.
- Nutman, P. S. (1952) 'Studies on the physiology of nodule formation: III. Experiments on the excision of root-tips and nodules', *Annals of Botany*. Oxford University Press, 16(1), pp. 79–103. doi: 10.1093/oxfordjournals.aob.a083304.
- Oka-Kira, E. et Kawaguchi, M. (2006) 'Long-distance signaling to control root nodule number', *Current Opinion in Plant Biology*. Elsevier Current Trends, pp. 496–502. doi: 10.1016/j.pbi.2006.07.012.
- Olesen, J. E. et al. (2011) 'Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change', *European Journal of Agronomy*. Elsevier, pp. 96–112. doi: 10.1016/j.eja.2010.11.003.
- Pannecouque, J., Goormachtigh, S., Heungens, K., et al. (2018) 'Screening for soybean varieties suited to Belgian growing conditions based on maturity, yield components and resistance to *Sclerotinia sclerotiorum* and *Rhizoctonia solani* anastomosis group 2-IIIB', *Journal of Agricultural Science*. Cambridge University Press, 156(3), pp. 342–349. doi: 10.1017/S0021859618000333.
- Pannecouque, J., Goormachtigh, S., Ceusters, J., et al. (2018) 'Temperature as a key factor for successful inoculation of soybean with *Bradyrhizobium* spp. under cool growing conditions in Belgium', *Journal of Agricultural Science*. Cambridge University Press, 156(4), pp. 493–503. doi: 10.1017/S0021859618000515.
- Pierreux, J. et al. (2013) 'Perspectives offertes par la culture en association de froment et de pois protéagineux d'hiver', in *13ème journée d'étude des productions porcines et avicoles*. Namur, Belgium, pp. 25–32.
- Pierreux, J. et al. (2019) '9. La culture en association de froment et de pois protéagineux d'hiver: une possibilité de diversification attrayante et durable pour nos rotations', in *Livre Blanc Céréales*. Gembloux Agro Bio Tech, pp. 1–12.
- Porter, P. M. et Khalilian, A. (1995) 'Wheat Response to Row Spacing in Relay Intercropping Systems', *Agronomy Journal*. American Society of Agronomy, 87(5), pp. 999–1003. doi: 10.2134/agronj1995.00021962008700050038x.
- Raven, P. H. (2014) *Biologie végétale*. 3e édition. Edited by R. F. Evert, S. E. Eichhorn, and J. Bouharmont. Bruxelles: De Boeck.
- Raza, M. A. et al. (2019) 'Effect of planting patterns on yield, nutrient accumulation and distribution in maize and soybean under relay intercropping systems', *Scientific reports*. Springer Science and Business Media LLC, 9(1), pp. 4947–4947. doi: 10.1038/s41598-019-41364-1.
- Rosillon, D. et al. (2020) '11. Perspectives | Deux nouveaux outils d'aide à la décision en céréales en Wallonie', in *livre blanc cereales*, pp. 1–34.
- Roumet P et al. (2010) 'La sélection du soja en France : Quel état des lieux ?', *Innovations Agronomiques*, 11, pp. 175–186.
- Sandler, L., Nelson, K. A. et Dudenhoefter, C. (2015) 'Winter Wheat Row Spacing and Alternative Crop

Effects on Relay-Intercrop, Double-Crop, and Wheat Yields', *International Journal of Agroomy*, 2015, pp. 1–8. doi: 10.1155/2015/369243.

Schori, A., Charles, R. et Peter, D. (2003) 'Soja: sélection, agronomie et production en Suisse.', *Revue suisse d'agriculture*, 35(2), pp. 69–76. Available at: https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/de/home/themen/nutztiere/bienen/bienenprodukte/honig/honigqualitaet/_jcr_content/par/columncontrols_1833305568/items/0/column/externalcontent_1350153509.external.exturl.html/aHR0cHM6Ly9pcmEuYWdyb3Njb3BILmNoL2VuLVVVTl1BhZ2UvUH/VibGlrYXRpb24vSW5kZXgvMzM1NA==.html (Accessed: 8 September 2020).

Schoving, C. *et al.* (2019) 'Comprendre et prédire la phénologie du soja pour adapter la culture à de nouveaux environnements climatiques', *Innovations Agronomique*, 74, pp. 1–14. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/335926126>.

Schoving, C. *et al.* (2020) 'Combining Simple Phenotyping and Photothermal Algorithm for the Prediction of Soybean Phenology: Application to a Range of Common Cultivars Grown in Europe', *Frontiers in Plant Science*. Frontiers Media SA, 10, p. 1755. doi: 10.3389/fpls.2019.01755.

Schreuder, R. et De Visser, C. (2014) *EIP-AGRI Focus Group Protein Crops: final report Report EIP-AGRI Focus Group Protein Crops*.

Soltner, D. (1999) *Phytotechnie spéciale - Les grandes productions végétales - Céréales - Plantes Sarclées - Prairies*. 19e éd. Sainte-Gemmes-sur-Loire: Sciences et Techniques Agricoles (Sciences et techniques agricoles. Série Agronomie).

Su, B. *et al.* (2018) 'Suppression of weeds and increases in food production in higher crop diversity planting arrangements: A case study of relay intercropping', *Crop Science*. The Crop Science Society of America, Inc, 58(4), pp. 1729–1739. doi: 10.2135/cropsci2017.11.0670.

Su, B. Y. *et al.* (2014) 'Growth and photosynthetic responses of soybean seedlings to maize shading in relay intercropping system in Southwest China', *Photosynthetica*. Kluwer Academic Publishers, 52(3), pp. 332–340. doi: 10.1007/s11099-014-0036-7.

Taiz, L. *et al.* (2015) *Plant Physiology and Development, Sixth Edition*. 6th edn, *Sinauer Associates*. 6th edn. Edited by A. D. Sinauer.

Tanveer, M. *et al.* (2017) 'Relay cropping as a sustainable approach: problems and opportunities for sustainable crop production', *Environmental Science and Pollution Research*. Springer Verlag, 24(8), pp. 6973–6988. doi: 10.1007/s11356-017-8371-4.

Tavaud-Pirra, M. *et al.* (2009) 'Genetic diversity in a soybean collection', *Crop Science*, 49(3), pp. 895–902. doi: 10.2135/cropsci2008.05.0266.

Terre Inovia *et al.* (no date) *infloweb*. Available at: <http://www.infloweb.fr/> (Accessed: 1 January 2021).

Thilakarathna, M. S. et Raizada, M. N. (2017) 'A meta-analysis of the effectiveness of diverse rhizobia inoculants on soybean traits under field conditions', *Soil Biology and Biochemistry*. Elsevier Ltd, pp. 177–196. doi: 10.1016/j.soilbio.2016.11.022.

USDA (2020) *Oilseeds: World Markets and trade*.

Vandermeer, J. *et al.* (1998) 'Global change and multi-species agroecosystems: Concepts and issues', *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Elsevier, pp. 1–22. doi: 10.1016/S0167-8809(97)00150-3.

Verret, V. *et al.* (2018) 'Traque aux innovations d'agriculteurs pour la conception d'associations de cultures incluant des légumineuses', in *Rencontres Francophones sur les Légumineuses (RFL2)*. Toulouse: hal-02789520, pp. 1–19. Available at: <https://hal.inrae.fr/hal-02789520> (Accessed: 3 July 2020).

- Wallace, S. U. *et al.* (1992) 'Growth of Relay Intercropped Soybean', *Agronomy Journal*. Wiley, 84(6), pp. 968–973. doi: 10.2134/agronj1992.00021962008400060012x.
- Wallace, S. U. *et al.* (1996) 'Yield and yield components of relay-intercropped wheat and soybean', *Field Crops Research*. Elsevier, 46(1–3), pp. 161–168. doi: 10.1016/0378-4290(95)00009-7.
- WalOnMap | Géoportail de la Wallonie (2015). Available at: <https://geoportail.wallonie.be/walonmap#BBOX=173585.27791888907,174967.72860045708,138937.38150876306,139470.5179917027> (Accessed: 26 July 2020).
- Wang, X. *et al.* (2020) 'Sugarcane/soybean intercropping with reduced nitrogen input improves crop productivity and reduces carbon footprint in China', *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 719. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137517.
- Wen, Z. X. *et al.* (2009) 'Genetic diversity, geographic differentiation and evolutionary relationship among ecotypes of *Glycine max* and *G. soja* in China', *Chinese Science Bulletin*, 54(23), pp. 4393–4403. doi: 10.1007/s11434-009-0696-z.
- Willey, R. (1979) 'Intercropping-its importance and research needs: Part 1. Competition and yield advantages', *Field crop abstracts*. Farnham Royal: Commonwealth Agricultural Bureaux, 32, p. 1.
- WWF (2014) *Le boum du soja-L'essor du soja, impacts et solutions*.
- Yong, T. *et al.* (2015) 'Characteristics of Nitrogen Uptake, Use and Transfer in a Wheat-Maize-Soybean Relay Intercropping System', *Plant Production Science*, 18(3), pp. 388–397. doi: 10.1626/ppp.18.388.
- YONG, T. wen *et al.* (2018) 'Optimized nitrogen application methods to improve nitrogen use efficiency and nodule nitrogen fixation in a maize-soybean relay intercropping system', *Journal of Integrative Agriculture*. Chinese Academy of Agricultural Sciences, 17(3), pp. 664–676. doi: 10.1016/S2095-3119(17)61836-7.
- Zhang, F. et Li, L. (2003) 'Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient-use efficiency', *Plant and Soil*. Springer, 248(1–2), pp. 305–312. doi: 10.1023/A:1022352229863.
- Zhang, F. S., Li, L. et Sun, J. H. (2001) 'Contribution of above- and below-ground interactions to intercropping', in *Plant Nutrition*. Springer Netherlands, pp. 978–979. doi: 10.1007/0-306-47624-x_476.

6 Annexes

Annexe 1	: Situation mondiale du soja.....	75
	Pays producteur-exportateur-importateur.....	75
	Au niveau européen.....	76
	Impact de l'importation de soja.....	77
	Politique européenne impactant le soja.....	77
Annexe 2	: Histoire et origine du soja.....	79
Annexe 3	: Groupe de maturité.....	80
Annexe 4	: Variétés déterminées et indéterminées.....	81
Annexe 5	: Les maladies.....	82
Annexe 5.1	Rhizoctonia solani.....	82
Annexe 5.2	Sclerotinia sclerotiorum.....	82
Annexe 5.3	Peronospora manshurica.....	82
Annexe 5.4	Diaporthe phaseolorum.....	83
Annexe 5.5	Autres pathogènes.....	83
Annexe 5.6	Ravageurs du soja.....	83
	Delia patura.....	83
	Heterodera glycines.....	83
	Autres ravageurs.....	83
Annexe 6	: Origine du froment.....	84
Annexe 7	: Système racinaire du froment.....	85
Annexe 8	: Inflorescence du froment.....	86
Annexe 9	: Maladies et ravageurs du froment.....	87
Annexe 10	: Précipitations et température moyenne mensuelle à Lonzée.....	88
Annexe 11	: Table BBCH du soja et du froment.....	89
Annexe 12	: Galerie photo du mode opératoire du nettoyage des racines de soja.....	95
Annexe 13	: Galerie photo de l'hétérogénéité de la levée.....	97
Annexe 14	: Galerie photo dégâts de ravageur du soja.....	98
Annexe 15	: Galerie photo divers.....	100
Annexe 16	: Tableaux données brutes.....	102
Annexe 16.1	Levée du soja.....	102

Annexe 16.2	Relevé des adventices	102
Annexe 16.3	Temps de désherbage	103
Annexe 16.4	Hauteur des plantes	104
Annexe 16.5	Biomasse aérienne	105
Annexe 16.6	LER de la biomasse aérienne	106
Annexe 16.7	Longueur entre-nœud, diamètre de la tige, hauteur du premier étage de gousse 106	
Annexe 16.8	Nodosité	107
Annexe 16.9	Poids de mille grains.....	108
Annexe 16.10	Rendement en grain du froment et du soja	108
Annexe 16.11	LER du rendement	109
Annexe 16.12	Nombre de gousses, de graines par gousse, nombre d'étages de gousse.....	109
Annexe 16.13	Taux de protéine.....	110
Annexe 16.14	Tableaux de corrélations des paramètres mesurés sur froment et sur soja.....	112

Annexe 1 : Situation mondiale du soja

Pays producteur-exportateur-importateur

Le soja est non seulement la plante cultivée la plus riche en protéine (40%), mais également une des plantes les plus cultivées au monde avec une production mondiale d'environ 350 millions de tonnes pour l'année 2018 (FAOSTAT, 2020). La culture de soja a suivi une croissance continue depuis de nombreuses années (Figure 42) passant d'environ 150 millions de tonnes en 1998 à 350 millions de tonnes pour 2018 notamment grâce à l'augmentation de la superficie cultivée et à l'amélioration des rendements (FAOSTAT, 2020).

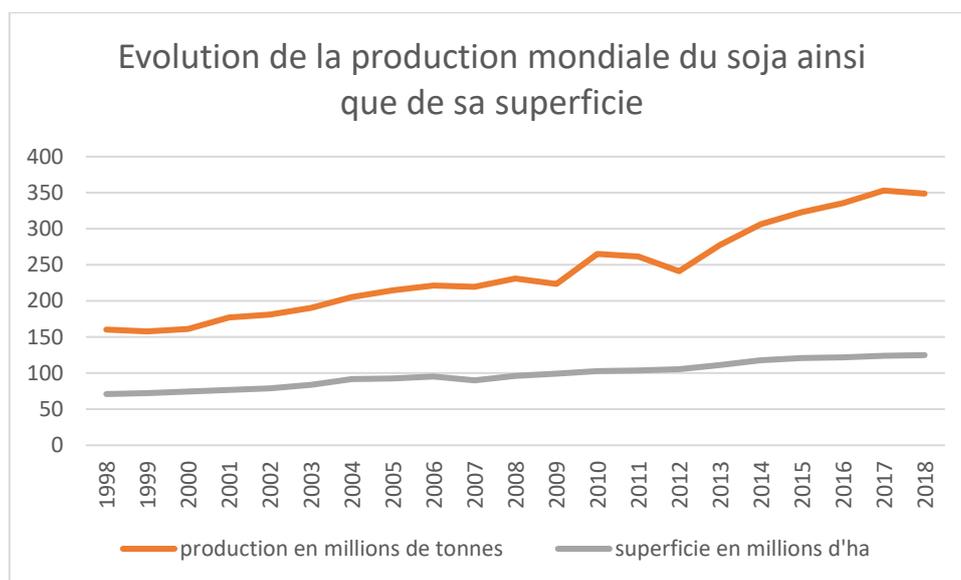


Figure 42: Évolution de la production mondiale du soja ainsi que de sa superficie (source des données: FAOSTAT, 2020)

La production de soja provient principalement des Amériques suivies de l'Asie (Figure 2). Les deux plus grands producteurs mondiaux sont les États-Unis et le Brésil avec une production assez proche (environ 120 millions de tonnes) suivis de l'Argentine (38 millions de tonnes). Ces deux pays sont aussi les plus grands exportateurs mondiaux avec une exportation respective de 68, 55 et 7 millions de tonnes. Sous forme de tourteaux, c'est toutefois l'Argentine qui est le plus grand exportateur suivi du Brésil et des États-Unis (FAOSTAT, 2020).

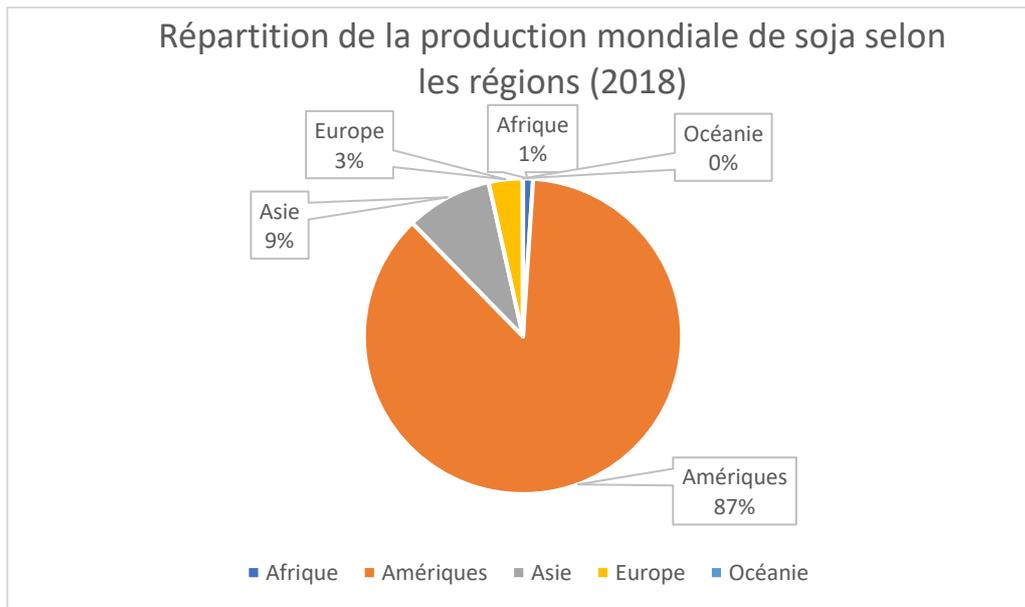


Figure 43: Répartition de la production mondiale de soja selon les régions (2018), (source des données: FAOSTAT, 2020).

Les importations de soja sont largement dominées par la Chine qui absorbe environ 95 millions de tonnes de soja pour l'année 2017 suivi de l'Union européenne avec 15 millions de tonnes et enfin du Mexique (4 millions de tonnes) (FAOSTAT, 2020). Sous forme de tourteaux, l'Europe est de loin la plus grande importatrice avec environ 18 millions de tonnes suivies de l'Asie du Sud-Est (17 millions de tonnes) et de la Chine 3.5 millions de tonnes (USDA, 2020). Il est également important de constater que la culture de soja est largement dominée par du soja OGM, qui représente 94% du commerce mondial (Commission Européenne, 2018).

Au niveau européen

L'Union européenne est un grand consommateur de protéines végétales dont la source principale provient du soja (14.3 millions de tonnes de protéines brutes pour une consommation totale de 27 millions de protéines brutes (année 2016-2017)). Nonante-trois pourcent en volume du soja importé est utilisé pour le marché des aliments pour animaux (Commission Européenne, 2018) et est délivré principalement sous forme de tourteaux de soja. Pour l'année 2018-2019, la consommation représentait 29.7 millions de tonnes de tourteaux de soja dont seulement 1.1 million de tonnes provenaient de soja produit au sein de l'Europe et dont 18 millions de tonnes étaient directement importées sous la forme de tourteaux (Commission Européenne, 2020).

L'importation de graines de soja par l'Union européenne est restée relativement stable depuis les années 2000 tournant autour de 15 millions de tonnes (FAOSTAT, 2020) (Importation de graines de soja par l'Union européenne (sources des données: FAOSTAT, 2020)Figure 44).

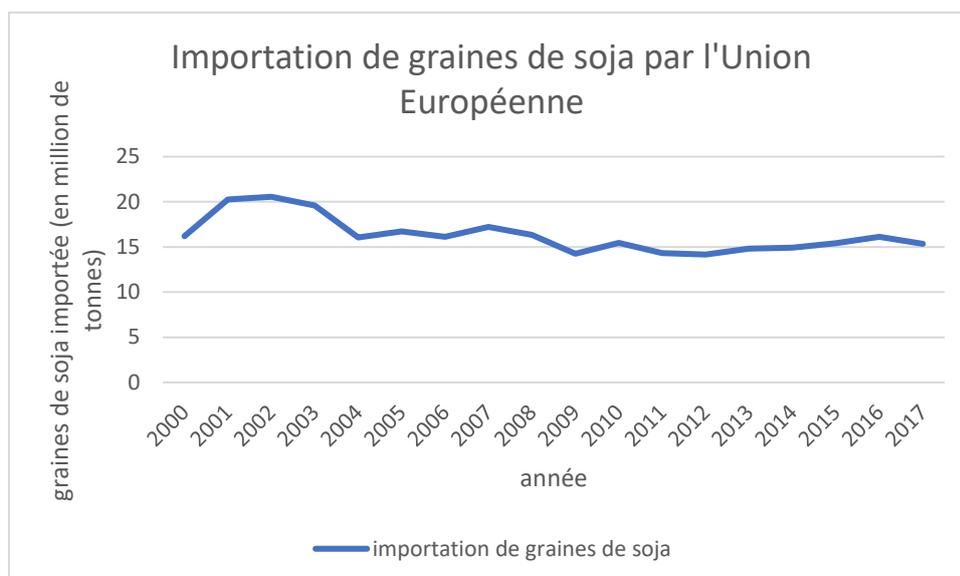


Figure 44: Importation de graines de soja par l'Union européenne (sources des données: FAOSTAT, 2020)

Impact de l'importation de soja

L'importation de soja et de tourteaux de soja en provenance de l'Amérique du Sud a un impact environnemental fort. En effet, dans ces régions, l'augmentation soutenue des superficies dédiées au soja provient d'une conversion de zones forestières, de prairies et de savanes. Ce changement d'allocation des terres est responsable d'émission de gaz à effet de serre ainsi que d'une perte importante de la biodiversité (WWF, 2014; Fehlenberg *et al.*, 2017).

Politique européenne impactant le soja.

La Commission européenne a adopté un rapport le 27/03/2018 concernant la stratégie européenne pour la promotion des cultures protéagineuses dont le soja fait partie (Denanot, 2018) en réponse à l'ensemble des problématiques citées ci-dessous :

- l'Union européenne dépend fortement de l'importation pour les produits riches en protéines (5% d'autosuffisance pour le soja (Commission Européenne, 2018),
- l'importation massive de soja par la Chine pourrait être une menace pour l'approvisionnement en soja de l'UE,
- le soja importé est issu de cultures génétiquement modifiées,
- la déforestation en Amérique est en partie causée par le développement de la culture du soja,
- la volonté de l'Europe est de moins dépendre des importations.

Depuis la réforme de la PAC en 2013, les superficies de soja en Europe ont vu une évolution soutenue (Commission Européenne, 2018). Avant 2013, la superficie cultivée de soja au sein de l'Union européenne était relativement stable (environ 500000 ha), avant de presque doubler en à peine 5 ans (Figure 4). La production de soja européenne est passée, quant à elle, de 1.2 million de tonnes à 2.8 millions de tonnes sur la même période. Le soja en Europe est principalement cultivé en Roumanie, en

France et en Italie (FAOSTAT, 2020). Toutefois, la production de protéagineux en Europe reste insuffisante avec seulement 3% des terres arables destinées aux *Fabaceae*. (Commission Européenne, 2018)

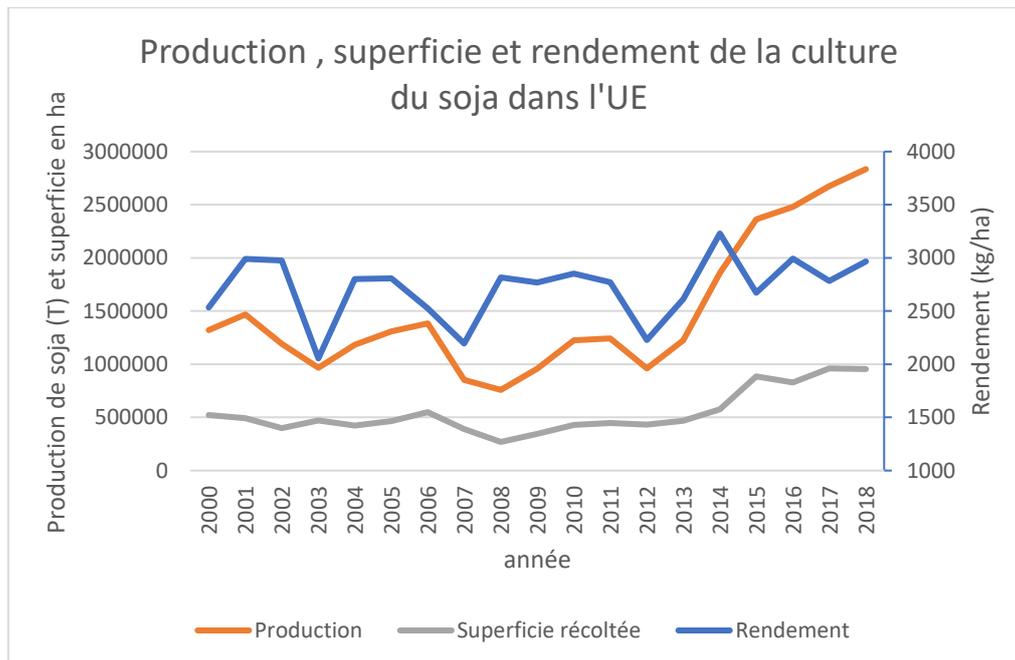


Figure 45: Production, superficie et rendement de la culture du soja dans l'UE (source des données: FAOSTAT, 2020)

L'augmentation des superficies de soja peut s'expliquer par plusieurs points :

- par une demande des consommateurs à avoir de la nourriture provenant d'animaux nourris sans OGM avec, de plus, l'apparition de labels qui permettent une rémunération plus élevée,
- par les mesures incitatives accordées par la PAC de 2013 et plus précisément par l'autorisation de faire passer les plantes fixatrices d'azote dans les SIE, par les programmes de développement rural avec les mesures agroenvironnementales et climatiques (MAEC), par le soutien couplé (autorisé pour les protéagineux par 16 pays membres en 2019),
- par la mise en place de politiques nationales,
- par la déclaration européenne sur le soja signée par 19 états membres en 2019 (*DonauSoja: Europe Soya Declaration*, 2020).
- Grâce aux projets de recherche concernant les légumineuses financés par l'Europe par le biais entre autres du plan « Horizon 2020 », PEI-AGRI et les programmes de développement rural (PDR) (Commission Européenne, 2018).

Annexe 2: Histoire et origine du soja

Glycine max. Merr. est une plante originaire d'Asie et fut domestiquée en Chine, à partir de la plante sauvage *G soja* Sieb. et Zucc. Toutefois, la zone géographique en Chine semble encore floue. Elle pourrait provenir du sud de la Chine (Wen *et al.*, 2009; Guo *et al.*, 2010) tandis que d'autres sources parlent d'une domestication provenant du centre de la Chine dans la vallée de Huang-Huai et du fleuve jaune (Li *et al.*, 2008; Han *et al.*, 2016).

Les premières traces écrites faisant notion d'une utilisation alimentaire du soja remontent au temps de la dynastie Shang (1700-1100av. J.-C.)(Roumet P *et al.*, 2010)

G. max comporte des caractéristiques différentes de *G. soja* qui s'explique par le syndrome de domestication, comme une taille des gousses et des graines plus grandes, une absence de déhiscence de la gousse lorsque la maturité est atteinte et un port dressé de la plante (*G. soja* à un port rampant) (Roumet P *et al.*, 2010).

L'arrivée du soja en Europe, en provenance de Chine, aurait été réalisée de manière successive au 18^{ème} siècle par des missionnaires (Tavaud-Pirra *et al.*, 2009).

Annexe 3: Groupe de maturité

Une classification de groupe de maturité du soja est utilisée pour classier les différents cultivars. La plus employée est la classification américaine (MG) allant de cultivar très précoce (MG000) voire même (MG0000) à des cultivars très tardifs (MGX). Dans les latitudes élevées comme en Belgique, seuls les cultivars très précoces (MG000) peuvent être cultivés (Kurasch, Hahn, Leiser, Vollmann, *et al.*, 2017; Pannecouque, Goormachtigh, Heungens, *et al.*, 2018). En Europe, Kurash et al ont identifié 6 mega-environnements (MEV) caractérisés par une même maturité tout en ayant des conditions de croissance similaires. La Belgique se situe dans le MEV1 avec la Hollande et le nord de l'Allemagne étant celui le plus au Nord (Kurasch, Hahn, Leiser, Vollmann, *et al.*, 2017).

Annexe 4 : Variétés déterminées et indéterminées

La croissance du soja dépend fortement de la variété de la plante, qui peut être déterminée ou indéterminée (Fehr et Caviness, 1977).

Les variétés déterminées ont une floraison synchronisée sur la plante. Celle-ci ne grandit que très peu après le début de la floraison et la taille de sa feuille terminale est identique à celle des feuilles du bas. Elle possède une grande inflorescence sur le bourgeon terminal de la tige principale.

A contrario, les variétés indéterminées ont une floraison qui n'est pas synchronisée. Celle-ci commence quand la plante a moins de la moitié de son poids final. Une fois la floraison entamée, la plante continue à produire des branches et devient plus grande que les variétés déterminées. Le haut de la plante possède des feuilles plus petites (Fehr et Caviness, 1977).

Il est à noter qu'il existe aussi des variétés semi-déterminées qui ont une croissance intermédiaire (Roumet P *et al.*, 2010). Les variétés semi-déterminées et déterminées ont tendance à avoir une meilleure résistance à la verse (Roumet P *et al.*, 2010).

Annexe 5: Les maladies

La culture de soja n'est sensible qu'à peu de maladies et ravageurs (Gourrat, Chambert et Berard, 2020). Il est rarement nécessaire d'avoir recours à un traitement grâce à leur faible présence et impact. L'effort est donc surtout porté sur le choix variétal (Soltner, 1999).

Néanmoins, les maladies et ravageurs principaux pouvant affecter le soja sont repris ci-dessous.

Annexe 5.1 Rhizoctonia solani

En condition d'étés froids et humides, comme en Belgique, le pathogène fongique *Rhizoctonia solani* Kühn peut se développer et causer de la pourriture des semences ainsi que celle des racines et de la tige du soja (Pannecouque, Goormachtigh, Heungens, *et al.*, 2018). Ce champignon est présent dans les champs de soja du Canada et Nord des États-Unis (Melzer *et al.*, 2016; Ajayi-Oyetunde et Bradley, 2018), mais possède une gamme d'hôtes très large avec des virulences différentes selon la souche du pathogène (Melzer *et al.*, 2016; Ajayi-Oyetunde et Bradley, 2018). Une des souches virulentes du soja (AG2-2IIIB) est déjà répandue en Europe du Nord et s'attaque aussi au maïs et à la betterave (Boine *et al.*, 2014; Pannecouque, Goormachtigh, Heungens, *et al.*, 2018).

Annexe 5.2 Sclerotinia sclerotiorum

Sclerotinia sclerotiorum (Lib.) engendre le flétrissement de parties de la plante, voire de la plante entière pouvant engendrer la mort de celle-ci. Elle peut provoquer des lésions au niveau de la tige pouvant empêcher le flux de sève impactant directement le développement de gousses et des graines. *Sclerotinia* produit un mycélium blanc sur les parties infectées et produit des sclérotés noirs pour passer la mauvaise saison, mais durant la bonne saison celle-ci se disperse sous forme d'ascospore dont la germination est favorable en condition humide (Hartman, West et Herman, 2011). *Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) a des hôtes assez larges. En effet, *Sclerotinia* s'attaque à d'autres plantes d'intérêt agronomique comme le pois, le colza, le haricot, la pomme de terre. De plus, les sclérotés ont une durée de vie très longue dans le sol allant jusqu'à 10 ans (Hartman, West et Herman, 2011; *Bioagresseurs du sol - Sclerotinia sclerotiorum*, 2015; Pannecouque, Goormachtigh, Heungens, *et al.*, 2018).

Annexe 5.3 Peronospora manshurica

Une autre maladie fréquemment rencontrée sur le soja est *Peronospora manshurica* ou mildiou, mais celui-ci n'a pas une réelle incidence sur le rendement de la culture (*Hypp : encyclopédie en protection des plantes - Les maladies et ravageurs*, 2019; Gourrat, Chambert et Berard, 2020).

Annexe 5.4 Diaporthe phaseolorum

Diaporthe phaseolorum var. *sojae*, est un ascomycète qui attaque la végétation et est reconnaissable par les pycnides noirs présents aux centres des taches décolorées sur la tige. Toutefois, grâce aux semences certifiées en Europe, ce pathogène est rarement présent (*Hypp : encyclopédie en protection des plantes - Les maladies et ravageurs*, 2019; Gourrat, Chambert et Berard, 2020).

Annexe 5.5 Autres pathogènes

Il existe d'autres pathogènes du soja qui sont toutefois exempt en Europe comme *Phoma glycinicola* (présent qu'en Afrique) et *Phakopsora pachyrhizi* (rouille du soja). Ce dernier pathogène peut engendrer de grandes pertes de rendement (Hartman, West et Herman, 2011).

Annexe 5.6 Ravageurs du soja

Delia patura

La mouche grise des semis (*Delia patura*) peut causer des dégâts lors de la levée de la culture. Les larves s'attaquent aux cotylédons, mais une fois le soja sorti, l'impact devient moindre (*Hypp : encyclopédie en protection des plantes - Les maladies et ravageurs*, 2019; Gourrat, Chambert et Berard, 2020).

Heterodera glycines

Le nématode à kyste (*Heterodera glycines*) est un endoparasite qui s'attaque aux racines du soja et détourne en partie le rôle des cellules pour produire les nutriments dont le nématode a besoin. Les symptômes sur le système racinaire vont d'une décoloration à une nécrose pouvant être sévère. Les symptômes secondaires sur la partie aérienne de la plante sont un rabougrissement et une chlorose foliaire (Hartman, West et Herman, 2011). Ce nématode est considéré comme le principal ravageur du soja et est surtout présent en Asie et aux USA (Hartman, West et Herman, 2011; Gendron-St-Marcelle, 2013; *Hypp : encyclopédie en protection des plantes - Les maladies et ravageurs*, 2019).

Autres ravageurs

Des insectes ravageurs comme la pyrale des haricots (*Etiella zinckenella*), la punaise verte (*Nezara viridula*), héliothis (*Helicoverpa armigera*) et le puceron du soja (*Aphis glycines*) sont des ravageurs importants, mais qui ne se retrouvent pas encore dans le nord de l'Europe (Hartman, West et Herman, 2011; *Hypp : encyclopédie en protection des plantes - Les maladies et ravageurs*, 2019; Gourrat, Chambert et Berard, 2020).

La prédation des graines et des jeunes plantules par les oiseaux et les lièvres peut être un réel problème et peut provoquer des pertes atteignant 100% si aucune mesure de protection n'est prise (Lamichhane *et al.*, 2020).

Annexe 6 : Origine du froment

L'origine du blé commence avec le début de l'agriculture il y a de cela dix à onze mille ans, dans le croissant fertile (Proche-Orient). Il en résulte une grande diversité de blés (au sens large du terme) comme : l'épeautre (*Triticum spelta*), le blé dur (*Triticum durum*), le blé tendre (*Triticum aestivum*)... Les blés se sont très vite répandus en Europe et seraient arrivés en Belgique vers 4500 av. J.-C. Le blé tendre est un blé hexaploïde ($2n=42$) de formule génomique AABBDD qui proviendrait à l'origine de 3 blés sauvages (Figure 46). C'est grâce à la grande flexibilité génétique et à la création d'un nombre très important de cultivars différents que le froment a pu être cultivé dans toutes les régions tempérées (Cavelier *et al.*, 1990).

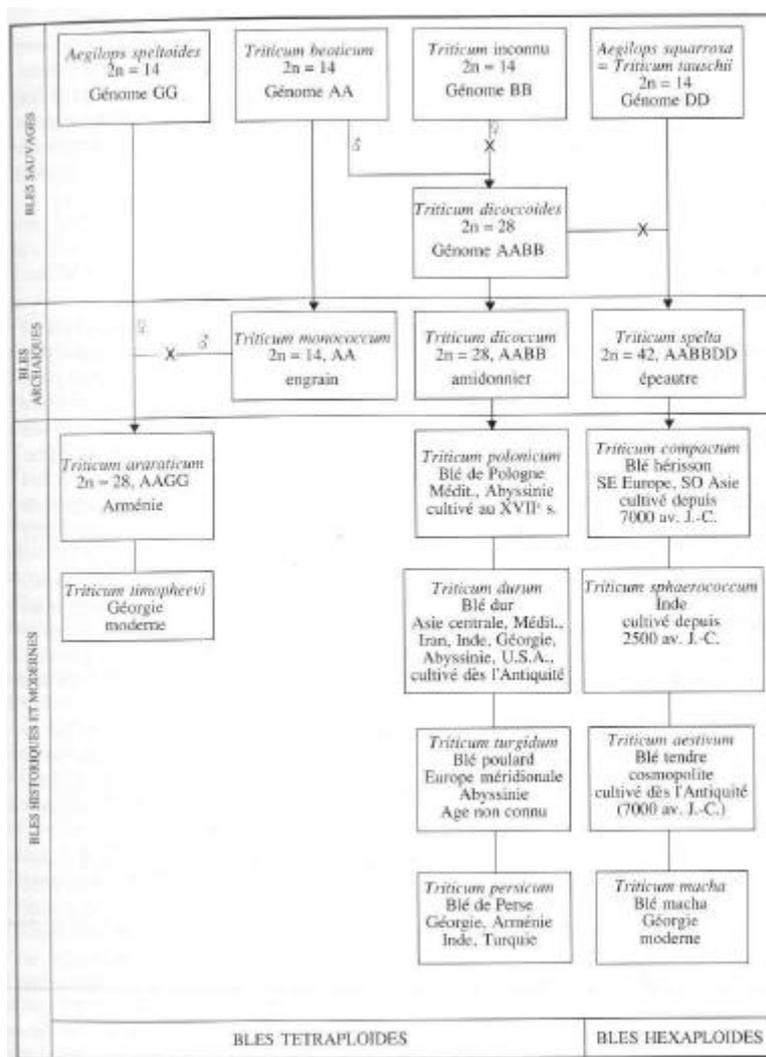


Figure 46: Généalogie des principales espèces de blés (Cavelier *et al.*, 1990)

Annexe 7 : Système racinaire du froment

Le système racinaire à la germination est composé de cinq racines séminales qui émergent en traversant le coléorhize. Ce système racinaire alimente la plantule jusqu'à son stade trois feuilles. Après cela, celui-ci est remplacé petit à petit par des racines secondaires naissant au niveau du plateau de tallage. Ces racines vont permettre à la plante de s'ancrer convenablement et de prospecter une zone beaucoup plus grande. Les racines de froment peuvent descendre jusqu'à deux mètres de profondeur (Cavelier *et al.*, 1990).

Annexe 8 : Inflorescence du froment

L'inflorescence du froment est un épi. Celui-ci est constitué d'un ensemble d'épillets (groupes de fleurs) inséré sur un axe : le rachis. Le rachis porte entre 15 et 25 épillets (Soltner, 1999). L'épillet est constitué de deux à cinq fleurs comprenant chacune d'elle trois étamines et un ovaire simple qui sont entourés par des bractées intérieures et extérieures appelées respectivement glumelles et glumes (Cavelier *et al.*, 1990). Pour pouvoir fleurir, le froment d'hiver doit subir une vernalisation. La graine en germination et la plantule doivent être exposées à des températures fraîches pour pouvoir entamer ultérieurement la montaison. Le besoin en froid suit une fonction de vernalisation allant de -3.5 à 16.5°C. L'optimum de la fonction se situe à 6.5°C. Il faut entre 10 et 60 jours (dépendant du cultivar) pour permettre de lever la contrainte de la vernalisation (Rosillon *et al.*, 2020). Outre la température, le froment dépend de la photopériode. Ainsi pour fleurir, il faut que la plante ait vernalisé puis que la température augmente et que la durée du jour aussi (éclairage journalier de 12 à 14h pendant la phase d'épiaison et de fleuraison). La sensibilité à ces facteurs abiotiques dépendent du cultivar et permet donc d'avoir des variétés hâtives à tardives (Cavelier *et al.*, 1990).

Annexe 9: Maladies et ravageurs du froment

Le froment est une plante sensible à une multitude de maladies cryptogamiques qui peuvent entraîner une diminution de rendement ou endommager la qualité sanitaire de la récolte. C'est pourquoi cette culture demande couramment une protection phytosanitaire. Les infections dépendent fortement des conditions agroclimatiques et doivent faire l'objet d'une observation régulière pour pouvoir agir au moment opportun. Les principales maladies en froment sont le piétin-échaudage au niveau des racines, le piétin-verse au niveau des tiges et des rouilles, de la septoriose, de l'oïdium, de la fusariose et de l'helminthosporiose au niveau des feuilles. Enfin, concernant les maladies sur épis, on retrouve la septoriose et la fusariose (*Froment – Livre Blanc Céréales*, no date).

Lors de la levée du froment, celui peut subir des attaques de ravageurs comme la mouche grise, la mouche du semis, le taupin, le tipule ou encore les oiseaux. Durant l'automne, les pucerons peuvent être des vecteurs de virose pour le blé.

De mai à juillet, le blé peut subir des attaques de cécidomyie si les conditions climatiques sont favorables ou encore subir des attaques de pucerons et de criocères (*Froment – Livre Blanc Céréales*, no date).

Annexe 10 : Précipitations et température moyenne mensuelle à Loncée

Température moyenne mensuelle (°C)			Précipitations totales mensuelles (mm)	
mois	Normales	2019-2020	Normales	2019-2020
Décembre	3.3	5.5	75.8	80
janvier	2.5	5.3	69.4	46.3
février	2.8	6.5	58.1	131.7
Mars	6.0	6.4	67.4	71.8
Avril	8.7	11.4	53.1	20.1
Mai	12.6	12.6	69.7	9.7
Juin	14.9	16.5	76.3	50.5
Juillet	17.3	17.0	71.4	44.5
Aout	17.1	20.6	82.0	44.4
Septembre	14.1	15.9	62.4	84.1
octobre	10.6	11.2	69.2	86.3
novembre	6.2	8.3	67.9	25.5
Total			822.7	694.9

Accumulation mensuelle des degrés jours (°C) du blé et du soja à partir de leur date de semis respectif.

mois	somme degrés jours blé (base 0)	somme degrés jours soja (base 6)
Décembre	162.9	
janvier	164.1	
février	189.9	
Mars	198.3	
Avril	342.8	
Mai	390.8	151.2
Juin	493.9	313.9
Juillet	502	340.5
Août		452.4
Septembre		296.5
Octobre		88.9
Total	2444.7	1554.5

Annexe 11 Table BBCH du soja et du froment

Soja Munger et al., 1997



Échelle BBCH des stades phénologiques du soja (*Glycine max* L. Merr.)

Code	Définition
------	------------

à 2 à 3

Stade principal 0: germination

00	000	semence sèche
01	001	début de l'imbibition de la graine
03	003	imbibition complète
05	005	la radicule sort de la graine
06	006	élongation de la radicule et apparition de poils absorbants
07	007	hypocotyle et cotylédons percent les téguments de la graine
08	008	hypocotyle atteint la surface du sol, la courbure de l'hypocotyle est visible, les cotylédons sont encore dans le sol
09	009	levée: hypocotyle et cotylédons percent la surface du sol («cracking stage»)

à 2 à 3

Stade principal 1: développement des feuilles (axe principal)

10	100	les cotylédons sont complètement étalés
11	101	la première paire de feuilles est étalée (feuilles simples insérées sur le premier nœud)
12	102	feuille trifoliolée, insérée sur le 2ème nœud, est étalée
13	103	feuille trifoliolée, insérée sur le 3ème nœud, est étalée
1 .	10 .	et ainsi de suite ...
19	109	feuille trifoliolée, insérée sur le 9ème nœud, est étalée; aucune pousse latérale n'est visible ¹
	110	feuille trifoliolée, insérée sur le 10ème nœud, est étalée ¹
	111	feuille trifoliolée, insérée sur le 11ème nœud, est étalée ¹
	112	feuille trifoliolée, insérée sur le 12ème nœud, est étalée ¹
	113	feuille trifoliolée, insérée sur le 13ème nœud, est étalée ¹
	11 .	et ainsi de suite ...
	119	feuille trifoliolée, insérée sur le 19ème nœud, est étalée ¹

Soja Munger et al., 1997

Échelle BBCH des stades phénologiques du soja

Code	Définition
------	------------

à 2 à 3

Stade principal 2: développement des pousses latérales

21	201	première pousse latérale de 1er ordre visible
22	202	deuxième pousse latérale de 1er ordre visible
23	203	troisième pousse latérale de 1er ordre visible
2.	20.	et ainsi de suite ...
29	209	9 ou davantage de pousses latérales de 1er ordre visibles (code à 2 chiffres); neuvième pousse latérale de 1er ordre visible (code à 3 chiffres)
	210	dixième pousse latérale de 1er ordre visible
	221	première pousse latérale de 2ème ordre visible
	22.	et ainsi de suite ...
	229	neuvième pousse latérale de 2ème ordre visible
	2n1	première pousse latérale de n-ième ordre visible
	2n9	neuvième pousse latérale de n-ième ordre visible

à 2 à 3

Stade principal 4: développement des parties végétatives de récolte

49	409	les parties végétatives de récolte ont atteint leur taille finale (la récolte du soja pour le fourrage est indiquée à ce stade)
----	-----	---

à 2 à 3

Stade principal 5: apparition de l'inflorescence (axe principal)

51	501	les premiers boutons floraux sont visibles
55	505	grossissement des premiers boutons floraux
59	509	les premiers pétales sont visibles, les fleurs sont toujours fermées

Soja Munger et al., 1997

Échelle BBCH des stades phénologiques du soja

Code	Définition
------	------------

à 2 à 3

Stade principal 6: floraison (axe principal)

60	600	les premières fleurs de la population sont ouvertes par ci par là
61	601	début de la floraison: environ 10% des fleurs sont ouvertes ³ début de la floraison ⁴
62	602	environ 20% des fleurs sont ouvertes ³
63	603	environ 30% des fleurs sont ouvertes ³
64	604	environ 40% des fleurs sont ouvertes ³
65	605	pleine floraison: environ 50% des fleurs sont ouvertes ³ période principale de floraison ⁴
66	606	environ 60% des fleurs sont ouvertes ³
67	607	la floraison s'achève ³
69	609	fin de la floraison: les premières gousses sont visibles (~ 5 mm) ³

à 2 à 3

Stade principal 7: développement des fruits et graines

70	700	la première gousse a atteint sa longueur finale (15–20 mm)
71	701	environ 10% des gousses ont atteint la longueur finale (15–20 mm) ³ début du développement des gousses ⁴
72	702	environ 20% des gousses ont atteint la longueur finale (15–20 mm) et elles commencent à se remplir de graines ³
73	703	environ 30% des gousses ont atteint la longueur finale (15–20 mm) et elles commencent à se remplir de graines ³ début du remplissage des gousses ⁴
74	704	environ 40% des gousses ont atteint la longueur finale (15–20 mm) et elles commencent à se remplir de graines ³
75	705	environ 50% des gousses ont atteint la longueur finale (15–20 mm) et elles continuent à se remplir de graines ³ période principale du développement des gousses ⁴
77	707	environ 70% des gousses ont atteint la longueur finale (15–20 mm) et le remplissage des gousses est avancé ³ avancement du remplissage des gousses ⁴
79	709	quasi toutes les gousses ont atteint la longueur finale (15–20 mm) et les graines remplissent la plus grande partie des gousses ³ la majorité des gousses ont atteint la longueur finale et la plupart est remplis de graines ^{3,4}

Soja Munger et al., 1997

Échelle BBCH des stades phénologiques du soja

Code	Définition
------	------------

à 2 à 3

Stade principal 8: maturation des fruits et graines

80	800	la première gousse est mûre, les graines ont atteint la couleur typique et elles sont sèches et dures
81	801	début de la maturation: environ 10% des gousses sont mûres, graines sèches et dures et à couleur typique ³
82	802	début de la maturation des gousses et graines ⁴
83	803	environ 20% des gousses sont mûres, graines sèches et dures et à couleur typique ³
84	804	environ 30% des gousses sont mûres, graines sèches et dures et à couleur typique ³
85	805	environ 40% des gousses sont mûres, graines sèches et dures et à couleur typique ³
86	806	maturation avancée: environ 50% des gousses sont mûres, graines sèches et dures et à couleur typique ³
87	807	période principale de la maturation des gousses et graines ⁴
88	808	environ 60% des gousses sont mûres, graines sèches et dures et à couleur typique ³
89	809	environ 70% des gousses sont mûres, graines sèches et dures et à couleur typique ³
		environ 80% des gousses sont mûres, graines sèches et dures et à couleur typique ³
		maturation complète: quasi toutes les gousses sont mûres, graines sèches et dures et à couleur typique (= maturité exigée pour la récolte) ³
		la plupart des gousses sont mûres, les graines ont atteint la couleur typique et elles sont sèches et dures ⁴

à 2 à 3

Stade principal 9: sénescence

91	901	environ 10% des feuilles sont décolorées ou tombées
92	902	environ 20% des feuilles sont décolorées ou tombées
93	903	environ 30% des feuilles sont décolorées ou tombées
94	904	environ 40% des feuilles sont décolorées ou tombées
95	905	environ 50% des feuilles sont décolorées ou tombées
96	906	environ 60% des feuilles sont décolorées ou tombées
97	907	les parties aériennes de la plante sont mortes
99	909	produit après récolte (graines)

³ Pour les variétés à période de floraison déterminée

⁴ Pour les variétés à période de floraison non déterminée

Stade principal 3: élongation de la tige principale

30 début montaison: pseudo-tiges et talles dressées, début d'élongation du premier entre-nœud, inflorescence au plus à 1 cm au-dessus du plateau de tallage.

31 le premier nœud est au plus à 1 cm au-dessus du plateau de tallage

32 le deuxième nœud est au plus à 2 cm au-dessus du premier nœud

33 le troisième nœud est au plus à 2 cm au-dessus du deuxième nœud

3 . et ainsi de suite ...

37 la dernière feuille est juste visible, elle est encore enroulée

sur elle-même

39 le limbe de la dernière feuille est entièrement étalé, la ligule est visible

Stade principal 4: gonflement de l'épi ou de la panicule, montaison

41 début gonflement: élongation de la gaine foliaire de la dernière feuille

43 la gaine foliaire de la dernière feuille est visiblement gonflée

45 gonflement maximal de la gaine foliaire de la dernière feuille

47 la gaine foliaire de la dernière feuille s'ouvre

49 les premières arêtes (barbes) sont visibles (pour les variétés aristées)

Stade principal 5: sortie de l'inflorescence ou épisaison

- 51 début de l'épisaison: l'extrémité de l'inflorescence est sortie de la gaine, l'épillet supérieur est visible
- 52 20% de l'inflorescence est sortie
- 53 30% de l'inflorescence est sortie
- 54 40% de l'inflorescence est sortie
- 55 mi-épisaison: 50% de l'inflorescence est sortie
- 56 60% de l'inflorescence est sortie
- 57 70% de l'inflorescence est sortie
- 58 80% de l'inflorescence est sortie
- 59 fin de l'épisaison: l'inflorescence est complètement sortie de la gaine

Stade principal 7: développement des graines

- 71 stade aqueux: les premières graines ont atteint la moitié de leur taille finale
- 73 début du stade laiteux
- 75 stade milaitéux: contenu de la graine laiteux, les graines ont atteint leur taille finale mais sont toujours vertes
- 77 fin du stade laiteux

Stade principal 8: maturation des graines

- 83 début du stade pâteux
- 85 stade pâteux mou: contenu de la graine tendre mais sec, une empreinte faite avec l'ongle est réversible
- 87 stade pâteux dur: contenu de la graine dur, une empreinte faite avec l'ongle est irréversible
- 89 maturation complète: le caryopse est dur et difficile à couper en deux avec l'ongle

Stade principal 9: sénescence

- 92 sur-maturité: le caryopse est très dur, ne peut pas être marqué à l'ongle
- 93 des graines se détachent
- 97 la plante meurt et s'affaisse
- 99 produit après récolte

Annexe 12 Galerie photo du mode opératoire du nettoyage des racines de soja

	<p>Prélèvement de plantes à l'aide d'une bêche</p>
	<p>Trempage des plantes dans des seaux d'eau pendant une nuit</p>



Nettoyage des racines à l'aide d'un tuyau d'arrosage



Comptage des nodosités dans un bac rempli d'eau avec fond noir



Annexe 13 Galerie photo de l'hétérogénéité de la levée



Annexe 14 Galerie photo dégâts de ravageur du soja.

Attaque de mouche de semis sur les cotylédons	Attaque par un ravageur du sol
	
Attaque de pigeons en soja pur sous filet et débourrement des bourgeons axillaires présents au niveau du nœud des cotylédons	Attaque de pigeons en RC 3*3
	

Repousse du soja après attaque de pigeons



Annexe 15 Galerie photo divers

Flétrissement du soja en RC



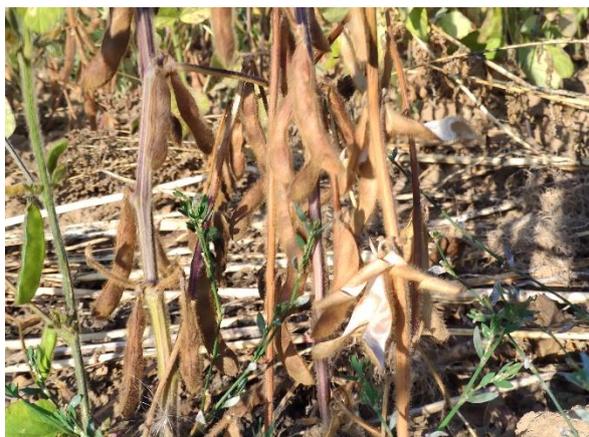
Moisson du froment dans le RC



Développement de la racine pivot latérale à cause du sol induré



Gousse ouverte sur pieds



Maturation décalée à cause des attaques de pigeons.



Annexe 16 Tableaux données brutes

Annexe 16.1 Levée du soja

Anova à 1 facteur fixe (association.densite)et un facteur aléatoire (bloc)du pourcentage de levée du soja

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
association.densite	5	17165	3433	9.103	1.66E-06	***
Bloc	1	418	418	1.109	0.296	
Residuals	65	23006	377			

Pourcentage de levée du soja

Facteur: association.densité	moyenne	std	Min	Max	Q25	médiane	Q75	groupe SNK
RC_2*2-230-35	72.93	22.50	39.18	107.76	68.57	78.37	88.16	a
RC_2*2-230-45	72.38	18.52	45.71	99.05	60.95	68.57	91.43	a
RC_2*2-230-55	83.64	21.34	43.64	118.44	74.81	84.16	95.06	a
RC_3*3-230-35	48.98	16.59	26.12	84.90	37.55	48.98	58.78	b
RC_3*3-230-45	47.41	16.26	20.32	76.19	34.29	48.25	57.14	b
soja_pur-0-75	87.92	21.57	53.33	128.00	72.89	85.33	101.33	a

Annexe 16.2 Relevé des adventices

ANOVA à 1 facteur fixe (association.densite) de la biomasse aérienne d'adventices

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
association.densite	5	42363	8473	7.887	0.000438	***
Residuals	18	19336	1074			

ANOVA à 2 facteurs fixes (association et densité) de la biomasse aérienne d'adventices

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
association	1	4378	4378	8.28	0.0139 *
densite	1	371	371	0.702	0.4184
association:densite	1	701	701	1.327	0.2718
Residuals	12	6345	529		

Test de chi carré à 1 facteur fixe (association.densite) et 1 facteur alatoire (date) réalisé sur le modèle linéaire mixte

	Chisq	Df	Pr(>Chisq)	
association.densite	7.122	5	0.2117	
date	21.5682	1	3.42E-06	***
association.densite:date	1.4959	5	0.9135	

ANOVA à 1 facteur fixe (association.densite) du pourcentage de biomasse d'adventices

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
association.densite	5	6573	1314.6	14.63	8.41E-06	***
Residuals	18	1618	89.9			

Statistiques descriptives du nombre d'adventices par espèce aux deux dates de comptage

Nom scientifique	Nom vernaculaire	30-Jul			01-Sep		
		moyenne	écart-type	médiane	moyenne	écart-type	médiane
<i>Matricaria recutita</i> L.	Matricaire camomille	10.88	8.79	8.00	1.50	1.50	1.00
<i>Chenopodium album</i> L.	chénopode blanc	9.21	5.78	8.50	10.92	6.12	10.00
<i>Polygonum aviculare</i> L.	renouée des oiseaux	2.38	2.16	2.00	3.38	2.98	3.00
<i>Brassica napus</i> L.	colza	0.58	0.88	0.00	0.50	0.78	0.00
<i>Sinapis</i> spp.	moutarde	0.71	1.68	0.00	0.67	1.31	0.00
<i>Sonchus asper</i> (L.) Hill	laiteron rude	5.50	5.02	4.00	3.42	2.76	2.50
<i>Fumaria officinalis</i> L.	fumeterre officinal	0.04	0.20	0.00	0.04	0.20	0.00
<i>Epilobium hirsutum</i> L.	epilobe hirsute	0.08	0.28	0.00	0.08	0.28	0.00
<i>Euphorbia</i> spp.	euphorbe	0.04	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Capsella bursa-pastoris</i> (L.) Medicus	capselle bourse-à-pasteur	3.33	5.16	2.00	2.96	4.27	1.00
<i>Solanum nigrum</i> L.	morelle noir	0.12	0.34	0.00	0.21	0.51	0.00
<i>Papaver</i> spp.	coquelicot	0.12	0.45	0.00	0.08	0.41	0.00
<i>Aethusa cynapium</i> L.	petite cigue	0.17	0.64	0.00	0.17	0.64	0.00
<i>Senecio</i> spp.	séneçon	0.12	0.34	0.00	0.04	0.20	0.00
<i>Galium aparine</i> L.	gaillet gratteron	0.08	0.41	0.00	0.04	0.20	0.00
<i>Lamium</i> spp.	lamier	0.04	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Poa annua</i> L.	paturin annuel	0.04	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Galinsoga parviflora</i> Cavanilles	galinsoga à petites fleurs	0.08	0.41	0.00	0.08	0.41	0.00
<i>Triticum aestivum</i> L.	froment	0.00	0.00	0.00	0.17	0.38	0.00

Biomasse aérienne d'adventices

Facteur: association.densité	moyenne	std	Min	Max	Q25	médiane	Q75	groupe SNK
RC_2*2-230-35	42,60	10,04	34,36	56,28	35,49	39,88	46,99	b
RC_2*2-230-45	38,99	33,07	16,53	88,05	21,26	25,69	43,42	b
RC_2*2-230-55	43,93	17,61	24,44	66,93	35,68	42,17	50,42	b
RC_3*3-230-35	62,44	23,88	47,14	97,96	49,26	52,33	65,50	b
RC_3*3-230-45	85,32	18,70	66,21	105,00	71,18	85,03	99,16	b
soja_pur-0-75	159,06	63,41	94,75	242,32	120,75	149,59	187,91	a
Facteur: association								
RC_2*2	40,79	22,71	16,53	88,05	27,12	35,11	46,99	b
RC_3*3	73,88	23,32	47,14	105,00	53,50	69,53	97,40	a

Nombre total d'adventice en fonction de la date de comptage

facteur: date	moyenne	std	Min	Max	Q25	médiane	Q75	groupe tukey
30-Jul	33.54	15.95	12	79	21.75	32	40.5	a
01-Sep	24.25	9.65	8	48	18	21.5	31.25	b

pourcentage de la biomasse d'adventices

Facteur: association.densité	moyenne	std	Min	Max	Q25	médiane	Q75	groupe SNK
RC_2*2-230-35	51.60	5.60	46.75	58.98	47.55	50.34	54.39	b
RC_2*2-230-45	45.63	17.24	30.76	70.30	36.22	40.73	50.13	b
RC_2*2-230-55	53.43	10.14	40.56	65.14	49.44	54.01	58.01	b
RC_3*3-230-35	73.23	6.05	68.83	82.11	69.76	70.99	74.47	a
RC_3*3-230-45	69.69	4.68	64.67	74.38	66.28	69.85	73.26	a
soja_pur-0-75	23.01	7.01	15.47	31.88	18.86	22.34	26.49	c

Annexe 16.3 Temps de désherbage

ANOVA à 2 facteurs fixes (association et densité) et 1 facteur aléatoire (bloc) du temps de désherbage

Error: Bloc					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Residuals	3	353.7	117.9		
Facteur					
association	1	217.56	217.56	10.935	0.00913 **
densité	1	0.06	0.06	0.003	0.95653
association: densité	1	5.06	5.06	0.254	0.62608
Residuals	9	179.06	19.9		

ANOVA à 1 facteur fixe (association.densité) et 1 facteur aléatoire (bloc) du temps de désherbage

Error: Bloc					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Residuals	3	348.5	116.2		
Facteur					
association.densité	5	240.2	48.04	2.175	0.112
Residuals	15	331.3	22.09		

Temps de désherbage manuel (min)

Facteur: association.densité	moyenne	std	Min	Max	Q25	médiane	Q75	groupe SNK
RC_2*2-230-35	24	7	16	32	19	23	28	a
RC_2*2-230-45	25	8	16	32	19	25	31	a
RC_2*2-230-55	20	6	10	24	19	22	23	a
RC_3*3-230-35	17	7	10	26	14	17	20	a
RC_3*3-230-45	16	5	10	20	13	17	20	a
soja_pur-0-75	18	3	14	20	17	19	20	a
Facteur: association								
RC_2*2	24	7	16	32	19	23	31	a
RC_3*3	17	5	10	26	13	17	20	b

Annexe 16.4 Hauteur des plantes

ANOVA par permutation à 1 facteur fixe (association.densité) et 1 facteur aléatoire (bloc) de la hauteur du froment

	Df	R Sum Sq	R Mean Sq	Iter	Pr(prob)	
association.densité	5	135.62	27.1247	5000	<2e-16	***
Bloc	3	37.54	12.5119	5000	0.0452	*
Residuals	87	423.74	4.8706			

ANOVA à 1 facteur fixe (association.densite) et 1 facteur aléatoire (bloc) de la hauteur du soja

Error: Bloc						
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
association.densite	1	0.01	0.01	0	0.988	
Residuals	2	83.9	41.95			
Facteur						
association.densite	5	11352	2270.3	158.8	<2e-16	***
Residuals	87	1244	14.3			

Hauteur du froment à maturité et du soja après moisson du froment (en cm)

Facteur: association.densité	moyenne		std		Min		Max		Q25		médiane		Q75		groupe SNK	
	FH	Soja	FH	Soja	FH	Soja	FH	Soja	FH	Soja	FH	Soja	FH	Soja	FH	Soja
FH_pur-400-0	63.3		1.7		60.7		65.5		62.2		63.6		64.9		a	
RC_2_2-230-35	60.5	23.1	2.8	2.9	56.0	17.7	65.0	27.7	58.4	21.3	60.8	23.5	62.0	25.6	b	b
RC_2_2-230-45	61.4	21.5	2.0	3.1	58.5	14.5	65.2	26.6	60.0	19.9	60.5	22.0	62.7	23.7	b	b
RC_2_2-230-55	59.6	22.4	2.0	3.9	54.9	15.5	63.0	31.9	58.6	19.7	59.8	22.3	60.7	24.9	b	b
RC_3_3-230-35	60.9	20.7	1.8	3.8	58.3	11.5	64.3	26.5	59.9	18.5	60.5	21.9	61.9	22.9	b	b
RC_3_3-230-45	60.2	21.0	3.0	4.7	50.5	14.5	63.5	34.2	59.9	17.9	61.0	21.0	61.4	23.0	b	b
Soja_pur-0-75		50.8		4.4	43.0		58.4		48.2		51.1		53.1		a	

Annexe 16.5 Biomasse aérienne

ANOVA à 1 facteur fixe (association.densite) et 1 facteur aléatoire (bloc) de la biomasse de froment au stade maturation des grains

Error: Bloc						
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
association.densite	1	114896	114896			
Facteur						
association.densite	5	1218718	243744	8.305	0.000623	***
Residuals	15	440216	29348			

ANOVA par permutation à 1 facteur fixe (association.densite) et 1 facteur aléatoire (bloc) de la biomasse aérienne du soja au 24 août

Df	R Sum Sq	R Mean Sq	Df	R Sum Sq	R Mean Sq	Iter	Pr(prob)
association.densite	5	635394	127079	5000	0,0008	***	
Bloc	3	13863	4621	270	0,4704		
Residuals	15	75120	5008				

Biomasse aérienne du froment au stade maturation des grains

Facteur: association.densité	moyenne	std	Min	Max	Q25	médiane	Q75	groupe SNK
FH_pur-400-0	1325.85	72.66	1247.47	1422.13	1290.95	1316.91	1351.81	c
RC_2*2-230-35	1825.10	201.85	1663.76	2120.08	1726.10	1758.28	1857.28	ab
RC_2*2-230-45	2088.21	266.53	1906.96	2394.24	1935.20	1963.44	2178.84	a
RC_2*2-230-55	1542.50	130.59	1380.32	1655.68	1465.10	1567.00	1644.40	bc
RC_3*3-230-35	1769.12	127.56	1652.64	1905.44	1700.96	1749.28	1827.36	ab
RC_3*3-230-45	1670.74	273.61	1391.68	1935.68	1459.66	1677.80	1888.88	b

Biomasse aérienne du soja au 24 août

Facteur: association.densité	moyenne	std	Min	Max	Q25	médiane	Q75	groupe SNK
RC_2*2-230-35	38.58	7.93	30.96	49.60	34.44	36.88	41.02	b
RC_2*2-230-45	32.93	21.19	7.56	59.20	24.33	32.48	41.08	b
RC_2*2-230-55	27.33	37.15	4.84	82.88	8.44	10.80	29.69	b
RC_3*3-230-35	20.15	12.64	7.47	32.75	10.31	20.19	30.03	b
RC_3*3-230-45	31.21	29.44	3.68	69.49	10.84	25.84	46.21	b
soja_pur-0-75	466.38	163.53	289.55	648.72	353.67	463.63	576.34	a

Annexe 16.6 LER de la biomasse aérienne

Anova à 1 facteur fixe (association.densité) du LER de la biomasse aérienne

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
association.densite	4	0.1946	0.04866	3.145	0.0459	*
Residuals	15	0.2321	0.01547			

LER de la biomasse aérienne totale

Facteur: association.densité	moyenne	std	Min	Max	Q25	médiane	Q75	groupe SNK
RC_2*2-230-35	0.82	0.09	0.75	0.95	0.78	0.79	0.84	ab
RC_2*2-230-45	0.98	0.14	0.83	1.12	0.88	0.98	1.08	a
RC_2*2-230-55	0.69	0.03	0.65	0.72	0.67	0.69	0.71	b
RC_3*3-230-35	0.86	0.17	0.74	1.12	0.76	0.80	0.90	ab
RC_3*3-230-45	0.75	0.14	0.60	0.87	0.64	0.76	0.87	ab

Annexe 16.7 Longueur entre-nœud, diamètre de la tige, hauteur du premier étage de gousse

ANOVA par permutation à 1 facteur fixe (association.densite) et 1 facteur aléatoire (bloc) du diamètre de la tige de soja au premier noeud

	Df	R Sum Sq	R Mean Sq	Iter	Pr(prob)	
association.densite	5	2.4376	0.48752	5000	<2e-16	***
Bloc	3	0.01144	0.00381	417	0.6043	
Residuals	225	0.70488	0.00313			

ANOVA par permutation à 1 facteur fixe (association.densite) et 1 facteur aléatoire (bloc) de la longueur entre le nœud 1 et le nœud 2

	Df	R Sum Sq	R Mean Sq	Iter	Pr(prob)	
association.densite	5	60.481	12.0961	5000	<2e-16	***
Bloc	3	7.764	2.5879	5000	0.019	*
Residuals	225	162.716	0.7232			

ANOVA par permutation à 1 facteur fixe (association.densite) et 1 facteur aléatoire (bloc) de la hauteur du premier étage de gousse.

	Df	R Sum Sq	R Mean Sq	Iter	Pr(prob)	
association.densite	5	957.58	191.516	5000	<2e-16	***
Bloc	3	24.4	8.132	400	0.5325	
Residuals	161	2420.01	15.031			

	Diamètre 1er noeud			Longeur entre-nœud			Hauteur 1ère gousse		
	moyenne	écart-type	groupe SNK	moyenne	écart-type	groupe SNK	moyenne	écart-type	groupe SNK
RC_2*2-230-35	0.2	0.04	c	5.1	0.9	b	15.1	3.8	a
RC_2*2-230-45	0.2	0.04	c	4.7	0.8	b	14.5	3.6	a
RC_2*2-230-55	0.3	0.05	b	5.1	0.9	b	15.2	4.2	a
RC_3*3-230-35	0.2	0.05	c	5.6	0.9	a	14.4	5.3	a
RC_3*3-230-45	0.2	0.04	c	5.2	0.7	b	15.4	3.0	a
soja_pur-0-75	0.5	0.09	a	4.0	0.9	c	9.4	3.4	b

ANOVA par permutation à 1 facteur fixe (association.densite) et 1 facteur aléatoire (bloc) du nombre d'étage de gousse.

	Df	R Sum Sq	R Mean Sq	Iter	Pr(prob)	
association.densite	5	1600.82	320.16	5000	<2e-16	***
Bloc	3	21.92	7.31	5000	0.017	*
Residuals	161	311.26	1.93			

Annexe 16.8 Nodosité

Test du chi carré du nombre de nodosités en fonction des facteur fixes association et densité et du facteur aléatoire bloc

	LR Chisq	Df	Pr(>Chisq)
association	14.8489	1	0.0001165 ***
densité	6.8853	1	0.0086906 **
Bloc	1.7262	3	0.6311346
association:densite	0.0086	1	0.9262005

Nombre de nodosités par plante en fonction de l'association.densité

Facteur: association.densité	moyenne	std	Min	Max	Q25	médiane	Q75	groupe Tukey
RC_2*2-230-35	11	6	4	24	7	10	14	c
RC_2*2-230-45	9	6	0	22	5	7	11	c
RC_2*2-230-55	5	3	1	13	3	4.5	7	ab
RC_3*3-230-35	8	5	0	15	4	5.5	12	bc
RC_3*3-230-45	5	4	0	11	1	4	8	ab
soja_pur-0-75	38	14	15	57	28	42	50	d
Facteur: association								
RC_2*2	10	6	0	24	5	9	13	b
RC_3*3	6	5	0	15	3	5	11	a

Annexe 16.9 Poids de mille grains

ANOVA à 1 facteur fixe (association.densité) et 1 facteur aléatoire (Bloc) du poids de mille grains du froment

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Erreur:Bloc					
Residuals	3	0.3723	0.1241		
Facteur					
association.densité	5	1.278	0.25564	11.08	2.82E-08 ***
Residuals	87	2.007	0.02307		

Poids de mille grains du froment (g)

Facteur: association.densité	moyenne	std	Min	Max	Q25	médiane	Q75	groupe SNK
FH_pur-400-0	48,0	1,8	45,8	52,6	46,8	47,5	48,7	b
RC_2*2-230-35	48,5	1,5	44,2	50,9	47,9	48,8	49,3	b
RC_2*2-230-45	51,0	1,6	48,1	54,0	49,9	51,1	52,0	a
RC_2*2-230-55	50,3	1,6	46,6	52,4	49,4	50,3	51,8	a
RC_3*3-230-35	50,8	1,4	48,1	53,0	49,8	50,8	51,7	a
RC_3*3-230-45	50,4	1,8	47,6	52,4	48,7	50,9	52,0	a

Annexe 16.10 Rendement en grain du froment et du soja

ANOVA à 1 facteur fixe et un facteur aléatoire (bloc) du rendement en froment

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Erreur:Bloc					
Residuals	3	5239989	1746663		
Facteur					
association.densité	5	14341696	2868339	30.02	2.65E-07 ***
Residuals	15	1433383	95559		

ANOVA à 2 facteurs fixes (association et densité) et un facteur aléatoire (bloc) du rendement en froment

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Erreur:Bloc						
Residuals	3	2937032	979011			
Facteur						
association	1	1464731	1464731	21.561	0.00121	**
densite	1	251145	251145	3.697	0.08667	.
association:densite	1	8744	8744	0.129	0.72805	
Residuals	9	611397	67933			

Rendement en froment à 15% d'humidité(kg/ha)

Facteur: association.densité	moyenne	std	Min	Max	Q25	médiane	Q75	groupe SNK
FH_pur-400-0	8428.50	906.18	7377.98	9441.53	7873.93	8447.25	9001.82	a
RC_2_2-230-35	7146.59	504.06	6576.33	7761.27	6859.41	7124.37	7411.55	b
RC_2_2-230-45	6942.77	515.74	6351.37	7610.02	6761.00	6904.84	7086.61	b
RC_2_2-230-55	6052.27	469.57	5491.62	6489.84	5754.18	6113.82	6411.91	c
RC_3_3-230-35	6588.21	694.16	5706.65	7145.15	6196.39	6750.52	7142.34	bc
RC_3_3-230-45	6290.88	425.30	5942.19	6825.46	5951.82	6197.94	6537.01	c
Facteur: association								
RC_2_2	7044.68	484.51	6351.37	7761.27	6817.24	6932.96	7373.73	a
RC_3_3	6439.55	556.14	5706.65	7145.15	5951.82	6400.24	6904.45	b

Rendement en soja de la culture pure à 15% d'humidité (kg/ha)

moyenne	std	Min	Max	Q25	médiane	Q75
757	262.4	440.9	1210	612.3	661.4	866.9

Annexe 16.11 LER du rendement

LER du rendement

Facteur: association.densité	moyenne	std	Min	Max	Q25	médiane	Q75
RC_2*2-230-35	0.85	0.06	0.78	0.92	0.81	0.85	0.88
RC_2*2-230-45	0.82	0.06	0.75	0.90	0.80	0.82	0.84
RC_2*2-230-55	0.72	0.06	0.65	0.77	0.68	0.73	0.76
RC_3*3-230-35	0.78	0.08	0.68	0.85	0.74	0.80	0.85
RC_3*3-230-45	0.75	0.05	0.71	0.81	0.71	0.74	0.78

Annexe 16.12 Nombre de gousses, de graines par gousse, nombre d'étages de gousse

ANOVA par permutation à 1 facteur fixe (association.densite) et 1 facteur aléatoire (bloc) du nombre total de gousses par plante

	Df	R Sum Sq	R Mean Sq	Iter	Pr(prob)	
association.densite	5	9248.6	1849.71	5000	<2e-16	***
Bloc	3	118.5	39.49	5000	0.0014	**
Residuals	225	2447.5	10.88			

ANOVA par permutation à 1 facteur fixe (association.densite) et 1 facteur aléatoire (bloc) du nombre moyen de grain par gousse

	Df	R Sum Sq	R Mean Sq	Iter	Pr(prob)	
association.densite	5	20.875	4.175	5000	<2e-16	***
Bloc	3	0.057	0.0191	72	0.9583	
Residuals	161	35.287	0.2192			

ANOVA par permutation à 1 facteur fixe (association.densite) et 1 facteur aléatoire (bloc) du nombre d'étage de gousse.

	Df	R Sum Sq	R Mean Sq	Iter	Pr(prob)	
association.densite	5	1600.82	320.16	5000	<2e-16	***
Bloc	3	21.92	7.31	5000	0.017	*
Residuals	161	311.26	1.93			

	Nombre d'étage			Nombre de gousses par plante			Nombre moyen de grains par gousse		
	moyenne	écart-type	groupe SNK	moyenne	écart-type	groupe SNK	moyenne	écart-type	groupe SNK
RC_2*2-230-35	1,73	0,80	b	1,63	1,15	b	1,40	0,43	b
RC_2*2-230-45	1,56	0,77	b	1,10	1,19	b	1,39	0,58	b
RC_2*2-230-55	1,80	0,96	b	1,53	1,36	b	1,50	0,55	b
RC_3*3-230-35	1,75	0,79	b	1,05	1,41	b	1,33	0,52	b
RC_3*3-230-45	1,95	0,84	b	1,29	1,27	b	1,33	0,52	b
soja_pur-0-75	8,98	2,51	a	18,00	7,61	a	2,22	0,21	a

Annexe 16.13 Taux de protéine

ANOVA à un facteur fixe (association.densite) et un facteur aléatoire (bloc) de la teneur en protéine

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Erreur:Bloc						
Residuals	3	0.1283	0.04278			
Facteur						
association.densite	5	0.8533	0.17067	6.454	0.00217	**
Residuals	15	0.3967	0.02644			

Teneur en protéine

Facteur: association.densité	moyenne	std	Min	Max	Q25	médiane	Q75	groupe SNK
FH_pur-400-0	9.8	0.2	9.6	9.9	9.8	9.9	9.9	b
RC_2_2-230-35	10.3	0.2	10.0	10.4	10.2	10.3	10.4	a
RC_2_2-230-45	10.3	0.2	10.0	10.5	10.2	10.3	10.4	a
RC_2_2-230-55	10.2	0.2	10.0	10.3	10.0	10.2	10.3	a
RC_3_3-230-35	10.4	0.1	10.3	10.4	10.3	10.4	10.4	a
RC_3_3-230-45	10.4	0.2	10.2	10.6	10.3	10.4	10.5	a

Annexe 16.14 Tableaux de corrélations des paramètres mesurés sur
froment et sur soja

