Spécialité : Agronomie (Agroécologie pour des productions végétales durables : APOGEE)

Mémoire de fin d'études

Formation Ingénieur Institut Agro Dijon

Formation initiale

Evaluation de mélanges d'espèces avec légumineuses en agriculture biologique dans un dispositif multi-acteurs en Anjou

(Stage réalisé du 17 mars au 12 septembre 2025)

Léane LORION

Enseignante référente :

Anne-Lise GOUMON

Tuteurs de stage :

Justine LEMONNIER *(Union des CUMA Pays de Loire)*

Céline LE GARDIEN *(GABB Anjou)*

Laurent BEDOUSSAC *(ENSFEA-UMR AGIR)*

Structure d'accueil :

Union des CUMA Pays de Loire, 3 rue Carl Linné, 49000 Angers

Année scolaire 2024 - 2025

Nombre de pages : 46 Année de soutenance : 2025

Résumé

Les légumineuses présentent un fort intérêt agronomique et nutritionnel, mais leur culture reste marginale, notamment en raison de leur sensibilité aux stress biotiques et abiotiques. Cette étude, conduite dans le cadre du projet européen IntercropVALUES, vise à évaluer des mélanges d'espèces à base de légumineuses (lentille ou pois), co-conçus avec des agriculteurs biologiques. Un réseau de 12 parcelles a fait l'objet d'un suivi agronomique. La campagne a été marquée par une chaleur et une sécheresse précoces, affectant les cultures dès les phases de floraison et de reproduction, ce qui a eu un effet négatif sur les rendements. Les résultats montrent que, si certains mélanges ont permis d'atteindre les objectifs tels que produire des légumineuses, limiter la verse ou encore la concurrence adventice, les performances globales restent hétérogènes. Trois parcelles de lentille/cameline n'ont pas pu être récoltées, en raison d'une faible hauteur des plantes et d'une mauvaise implantation de la cameline. Aucune corrélation significative n'a été observée entre la biomasse et le rendement des espèces, ni entre la biomasse du mélange et celle des adventices. Aucune corrélation n'a pu être mise en avant entre la biomasse de l'espèce associée et la verse. Ces résultats suggèrent l'existence de relations complexes, dépendantes du contexte pédoclimatique, des densités et des interactions interspécifiques. Par ailleurs, les stratégies post-récolte (congélation, asphyxie) ont montré une efficacité similaire contre les bruches sans différence significative avec les lots non traités, alors même que ces traitements sont considérés comme indispensables pour garantir la qualité sanitaire des grains. La poursuite de l'étude semble nécessaire afin d'acquérir plus de données, dégager des tendances robustes et perfectionner les itinéraires techniques.

Mots-clés : Mélange d'espèces – légumineuses – itinéraire technique – agriculture biologique – objectifs

Abstract

Legumes are of great agronomic and nutritional interest, but their cultivation remains marginal, mainly due to their sensitivity to biotic and abiotic stresses. This study, conducted as part of the European IntercropVALUES project, aims to evaluate legume-based species mixtures (lentils or peas), co-designed with organic farmers. A network of 12 plots was monitored agronomically. The season was marked by early heat and drought, affecting crops during the flowering and reproduction phases, which had a negative effect on yields. The results show that, while some mixtures achieved objectives such as producing legumes, limiting lodging, and reducing weed competition, overall performance remains mixed. Three lentil/camelina plots could not be harvested due to the short height of the plants and poor establishment of the camelina. No significant correlation was observed between biomass and species yield, nor between the biomass of the mixture and that of weeds. No correlation could be established between the biomass of the associated species and lodging. These results suggest the existence of complex relationships, dependent on soil and climate conditions, densities, and interspecific interactions. Furthermore, post-harvest strategies (freezing, asphyxiation) showed similar effectiveness against weevils with no significant difference compared to untreated batches, even though these treatments are considered as essential to guarantee the sanitary quality of the grains. Further study seems necessary in order to acquire more data, identify robust trends, and refine crop management.

Keywords: *Species mixture – legumes – technical itinerary – organic farming – objectives*

Remerciements

Avant toute chose, je souhaiterais remercier toutes les personnes sans qui ce stage et ce rapport n'auraient pas pu exister.

Je souhaite tout d'abord remercier mes trois encadrants de stage : Justine Lemonnier, Céline Le Gardien et Laurent Bedoussac. Merci pour votre bienveillance, votre patience surtout, le temps que vous m'avez consacré, vos conseils avisés et votre rigueur. Ce stage m'a permis de progresser, alors même que le chemin n'a pas toujours été simple. Je mesure la chance que j'ai eue d'avoir un accompagnement comme le vôtre, tout en bénéficiant d'une autonomie qui s'est révélée très formatrice.

Je souhaite remercier les trois structures qui m'ont accueillie et permis de réaliser ce stage de fin d'études. Merci à tous les collègues de l'Union des CUMA pour votre intégration, votre bienveillance, votre soutien et votre bonne humeur. Je ne garde qu'un bon souvenir de tous les moments partagés avec vous. Merci également à Margot pour tous ses conseils. Je remercie les collègues du GABB Anjou, pour leur accueil toujours bienveillant.

J'aimerais également adresser un mot à l'ensemble des producteurs du groupe avec qui j'ai beaucoup appris et sans qui ce stage n'aurait pu voir le jour. Merci à eux pour leur disponibilité, pour la transmission de leurs valeurs et de leur savoir qui m'a été précieux.

Un remerciement tout particulier à ma tutrice de l'Institut Agro Dijon, Anne-Lise Goumon, pour son accompagnement dans la bienveillance, la bonne humeur mais aussi pour ses conseils, ses encouragements et son soutien inconditionnel du début à la fin. Je n'aurais pas pu souhaiter mieux pour ce stage de fin d'études. J'adresse mes sincères remerciements à l'Institut Agro Dijon ainsi qu'à tous les camarades rencontrés au cours de ces cinq belles années de formation, dont je garderai un souvenir impérissable.

Enfin, je tiens à remercier ma famille et mes amis, qui m'ont soutenue, particulièrement ces dernières semaines. Sans leur présence et leurs encouragements, ce stage et ces années d'études n'auraient pas été les mêmes.

Table des matières

Résumé
Abstract
Remerciements
Table des matières
Liste des abréviations, sigles et acronymes
Liste des figures
Liste des tableaux
Introduction..... 1
1. Etat de l'art et contexte de l'étude..... 2
1.1. L'agriculture biologique, un levier pour une agriculture plus durable..... 2
1.2. Les légumineuses et les mélanges comme outils de diversification des systèmes de culture..... 2
1.2.1. Les légumineuses : des espèces clés de la diversification..... 3
1.2.1.1. Des surfaces de production encore marginales..... 3
1.2.1.2. Des avantages nutritionnels et agronomiques..... 3
1.2.1.3. Des cultures encore confrontées à des freins..... 3
1.2.1.4. Itinéraires techniques des lentilles et des pois protéagineux..... 6
1.2.2. Les mélanges d'espèces : un pas vers une agriculture diversifiée..... 6
1.2.2.1. Définition et typologies des mélanges d'espèces..... 6
1.2.2.2. Conception des mélanges d'espèces..... 6
1.2.2.3. Processus écologiques impliqués dans les mélanges d'espèces..... 6
1.2.2.4. Un système présentant de nombreux avantages..... 7
1.2.2.5. Des limites et contraintes à considérer..... 9
1.2.2.6. Performance économique..... 10
1.2.2.7. Evaluation des mélanges d'espèces..... 11
1.3. Contexte du stage, problématique et hypothèses..... 11
1.3.1. Projet IntercropVALUES..... 11
1.3.2. CICS10..... 11
1.3.3. Objectifs du stage, question de recherche et hypothèses..... 12
2. Matériels et Méthodes..... 13
2.1. Sites d'études et ITK..... 13
2.2. Variables et indicateurs du diagnostic agronomique..... 13
2.2.1. PMG et pourcentage de germination des semences..... 13
2.2.2. Densités semée, potentielle et levée..... 13
2.2.3. Croissance aérienne des espèces : hauteur et verse..... 14
2.2.4. Production des espèces : biomasse et rendement..... 14
2.2.5. Rendement sortie de moissonneuse-batteuse..... 15
2.2.6. Taux de grains bruchés des légumineuses..... 15
2.2.7. Pertes à la récolte..... 15
2.2.8. Rendement théorique et rendement commercialisable..... 16
2.3. Analyse des données..... 16
3. Résultats et discussion..... 16
3.1. Conditions climatiques 2025..... 16
3.2. Itinéraires techniques et objectifs des producteurs..... 17
3.3. Implantation et densités des espèces..... 17

3.4. Dynamique de hauteur et verse....18
3.4.1. Dynamique de hauteur....18
3.4.2. Verse des mélanges....19
3.5. Biomasse et rendement....20
3.5.1. Biomasse parcellaire....20
3.5.1.1. Composition de la biomasse parcellaire....20
3.5.1.2. Relation entre la biomasse d'adventices et celle des cultures....21
3.5.2. Masse sèche....21
3.5.2.1. Masse sèche totale des espèces du mélange....21
3.5.2.2. Relation entre biomasse des espèces cultivées et verse....22
3.5.3. Rendement et indice de récolte....22
3.5.3.1. Rendement botillons et relation entre les espèces....22
3.5.3.2. Relation entre les rendements des espèces associées....23
3.5.3.3. Indice de récolte....23
3.5.3.4. Rendement moissonneuse et perte à la récolte....24
3.5.3.5. Comparaison des rendements bottillons et moissonneuse....24
3.5.4. Taux de grains bruchés....25
3.5.5. PMG, rendement commercialisable et théorique....26
3.5.5.1. PMG des grains sains et bruchés....26
3.5.5.2. Rendement commercialisable et théorique....26
3.6. Diagnostic agronomique par ITK....27
3.6.1. lentille/cameline....27
3.6.1.1. AM_Lv/C....27
3.6.1.2. FB_Lv/C....28
3.6.1.3. TL_Lv/C_2....29
3.6.2. Lentille/orge (VT_Lv/O_1 et 2)....30
3.6.3. Pois/céréale....31
3.6.3.1. AM_P/O....31
3.6.3.2. FB_P/O....32
Conclusion et perspectives....33
Références bibliographiques....34
Annexes....42
Annexe I : Tests de germination....42
Annexe II : Plans d'échantillonnage des densités levées....43
Annexe III : Stades de développement lors des mesures de hauteur....44
Annexe IV : Chaîne de tri et de stockage des légumineuses....45
Annexe V : Itinéraires techniques des parcelles de PA....46

Liste des abréviations, sigles et acronymes

AB : Agriculture Biologique
AMAP : Association pour le Maintien de l'Agriculture Paysanne
C : Cameline
CICS : Co-Innovation Case Studies (Études de cas de co-innovation)
CUMA : Coopérative d'Utilisation de Matériel Agricole
D_Levée : Densité levée
D_Pot : Densité potentielle
D_Semée : Densité semée
E : Petit épeautre
GABB Anjou : Groupement d'Agricultrices et Agriculteurs Biologiques et Biodynamiques en Anjou
GES : Gaz à Effets de Serre
H_{Mat} : Hauteur à maturité
H_{Max} : Hauteur maximale
ID_A_Melange_Numéro_Espèce : Identifiant de l'agriculteur (ID_A), du mélange d'espèces concerné (Mélange), du numéro de parcelle (Numéro) et de l'espèce concernée (Espèce)
INRAe : Institut National de la Recherche Agronomique et de l'Environnement
IR : Indice de récolte
ITK : Itinéraire technique
L_Tige : Longueur de la tige
Lv : Lentille verte
Lc : Lentille corail
MS : Masse sèche
O : Orge
OGM : Organisme Génétiquement Modifié
OMS : Organisation Mondiale de la Santé
P : Pois
PMG : Poids de mille grains
Rdt : Rendement
Rdt_Com : Rendement commercialisable
Rdt_Th : Rendement théorique
SAU : Surface Agricole Utile
UCPDL : Union des CUMA des Pays de la Loire
%Germ : Pourcentage de germination
%GB : Pourcentage de grains bruchés
%Verse : Pourcentage de verse

Liste des figures

Figure 1 : Schéma du système racinaire “pivotant” du pois (Pisum sativum) comparé au type “fasciculé” du maïs (Zea mays) et les types de racines associées (Grondin et al., 2023)..... **3**

Figure 2 : Photo d’une bruche (Bruchus signaticornis). Source : Riquet et al., 2021..... **3**

Figure 3 : Stades de développement principaux de la lentille selon les schémas Terres Inovia et correspondance photos (Lorion, 2025) : (a) germination/levée, (b) développement des feuilles, (c) élongation de la tige principale, (d) apparition de l’inflorescence, (e) floraison, (f) développement du fruit (gousses) et (g) maturation des gousses et des graines (Le Bihan, 2022b)..... **4**

Figure 4 : Stades de développement principaux du pois selon les schémas Terres Inovia et correspondance photos (Lorion, 2025) : (a) germination hypogée/levée, (b) stade foliaire (développement feuilles), (c) apparition des boutons floraux (inflorescence), (d) début floraison, (e) fin floraison, (f) stade limite d’avortement et début remplissage des grains et (g) remplissage et maturité (Biarnès, 2019b)..... **4**

Figure 5 : Photo d’un pick-up à l’avant d’une moissonneuse-batteuse (Guillemot, 2020)..... **5**

Figure 6 : Différentes formes de cultures associées d’après Bedoussac et al. (2022)..... **6**

Figure 7 : Modèle de la trame d’entretien..... **12**

Figure 8 : Carte de localisation des exploitations agricoles du CICS10..... **13**

Figure 9 : Protocole de mesure du PMG et du pourcentage de germination des semences..... **13**

Figure 10 : Protocole de mesure de la densité levée des espèces..... **14**

Figure 11 : Protocole de mesure de la hauteur, longueur des plantes et prélèvements de biomasse aérienne sur les parcelles..... **14**

Figure 12 : Protocole de traitement des biomasses aériennes prélevées dans les parcelles, à l’INRAe de Toulouse pour déterminer la masse sèche et le nombre de grains de chaque espèce du mélange (schéma réalisé par L. Bedoussac)..... **15**

Figure 13 : Protocole de détermination des pourcentages de grains bruchés sur les pois et les lentilles issus des biomasses aériennes prélevées et des échantillons de récolte (fait à l’INRAe de Toulouse)..... **16**

Figure 14 : Pourcentages de germination des semences de lentilles vertes (Lv), lentilles corail (Lc), cameline (C), pois (P), orge (O) et petit épeautre (P) utilisées par les producteurs. Les barres d’erreur correspondent à +/- l’écart-type du taux de germination..... **17**

Figure 15 : Densité levée en fonction de la densité potentielle (densité semée corrigée du taux de germination) pour les mélanges d’espèces avec de la lentille (a) et les mélanges d’espèces avec du pois (b). Les barres verticales correspondent à +/- l’écart-type de la densité levée..... **17**

Figure 16 : Densité semée (graines/m²), potentielle (plantes/m²) et levée (plantes/m²) des différentes espèces avec lentille (a) et avec pois (b). Les barres verticales correspondent à +/- l’écart-type de la densité levée..... **18**

Figure 17 : Hauteur (cm) et écart-type de chaque espèce en fonction de la date calendaire pour les mélanges avec lentilles (a) et avec pois (b)..... **18**

Figure 18 : Pourcentage de verse selon 2 modes de calcul (verse 1 = (HMax - HMat)/HMax ; verse 2 = (L_TigeMat - HMat)/L_TigeMat) des espèces pour : (a) les mélanges avec lentilles, et (b) les mélanges avec pois (Résultats du test de Wilcoxon sur l’écart des moyennes de verse : p-value > 0,05 aucune différence significative)..... **19**

Figure 19 : Masse sèche totale parcellaire avec la fraction d’adventices, de légumineuse et de non légumineuse (t/ha) : (a) les mélanges composés de lentilles, et (b) les mélanges composés de pois..... **20**

Figure 20 : MSLégumineuse+Non légumineuse en fonction de la MSAdventice pour les mélanges à base de lentille (a) et de pois (b). Les barres d’erreur correspondent à l’écart type des moyennes en X (horizontal) et en Y (vertical). La droite grise représente la régression linéaire et la droite grise à la régression linéaire..... **21**

Figure 21 : MSLégumineuse en fonction de la MSNon légumineuse pour les mélanges à base de lentille (a) et de pois (b). Les barres verticales correspondent à +/- l’écart-type des MS et la droite grise à la régression linéaire..... **21**

Figure 22 : %de verse (L_TigeMat - Hmat)/L_TigeMat) des espèces en fonction de la MS pour les mélanges avec lentilles (a), et pois (b). Résultats du test de Pearson : (a) cor = -0,5 et p-value = 0,17 et (b) cor = 0,29 et p-value = 0,81 : non significatif). Les barres horizontales correspondent à +/- l’écart-type de MSNon légumineuse **22**

Figure 23 : RdtLégumineuse en fonction du RdtNon légumineuse pour les mélanges à base de lentille (a) et de pois (b). Résultats du test de Pearson : (a) cor = 0,14 et p-value = 0,75 et (b) cor = -0,86 et p-value= 0,34. Les barres verticales et horizontales correspondent à +/- l’écart-type des MS et la droite grise à la régression linéaire..... **22**

Figure 24 : RdtLégumineuse en fonction de MSNon légumineuse pour les mélanges à base de lentille (a) et de pois (b). (Résultats du test de Pearson : (a) cor = 0,14 et p-value = 0,75 ; (b) cor = -0,86 et p-value= 0,34). Les barres horizontales et verticales correspondent à +/- l’écart-type de MS et la droite grise à la régression linéaire..... **23**

Figure 25 : Indice de récolte (IR) des espèces légumineuses et non légumineuses des mélanges avec lentille (a) et pois (b). Les barres verticales indiquent +/- l'écart-type de l'IR..... **23**
Figure 26 : Rendement en légumineuses, non légumineuses, masse d'impuretés de la moisson et pertes à la récolte en lentille (+% perte en fonction de la modalité) avec (a) les mélanges composés de lentilles et (b) de pois.....**24**
Figure 27 : RdtBotillon vs RdtMoisson pour les mélanges (t/ha) avec (a) les mélanges composés de lentilles et (b) de pois.....**24**
Figure 28 : Taux de grains bruchés pour des botillons et à la moisson pour la modalité air libe de la lentille (a) et du pois (b). Les barres verticales correspondent à +/- l'écart-type du taux de grains bruchés..... **25**
Figure 29 : Taux de grains bruchés à la moisson en fonction de la modalité air libre, asphyxie et congélation de la lentille (a) et du pois (b). Les barres verticales correspondent à +/- l'écart-type du taux de grains bruchés..... **25**
Figure 30 : PMG moyen, bruché, et sain à la moisson de la lentille (a) et du pois (b). Les barres verticales correspondent à +/- l'écart-type du PMG.....**26**
Figure 31 : Rendement commercialisable et théorique (en t/ha) des botillons et à la moisson des espèces des mélanges**26**
Figure 32 : ITK du mélange Lentille/Cameline chez l'agriculteur AM..... **27**
Figure 33 : ITK du mélange Lentille/Cameline chez l'agriculteur FB.....**28**
Figure 34 : ITK des mélanges Lentille/Cameline chez l'agriculteur TL.....**29**
Figure 35 : ITK du mélange Lentille/Orge chez l'agriculteur VT.....**30**
Figure 36 : ITK du mélange Pois/Orge chez l'agriculteur AM..... **31**
Figure 37 : ITK du mélange Pois cassé/Orge chez l'agriculteur FB..... **32**

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques de semis du pois de printemps et d'hiver) en AB et conventionnel (Cocoual et Dupont, 2022 ; Terres Inovia, 2025a ; Marguerie, 2017 ; Biarnès, 2025). * NP : non précisé..... **5**
Tableau 2 : Récapitulatif des mélanges d'espèces, caractéristiques des parcelles et objectifs des agriculteurs.....**11**

Introduction

Après la Seconde Guerre mondiale, l'intensification de l'agriculture a entraîné une simplification des systèmes de culture avec davantage de céréales, en grande partie grâce à l'utilisation de produits phytopharmaceutiques et aux avancées génétiques (Crews et Peoples, 2004 ; Devienne, 2018). Cette intensification est remise en question pour ses conséquences sur la biodiversité, l'érosion et la pollution des sols, l'utilisation et les pollutions des eaux ou encore l'usage d'énergies fossiles (Malézieux *et al.*, 2009 ; Bedoussac *et al.,* 2015 ; IAASTD, 2009). Pourtant, l'agriculture permet aussi de nombreux bénéfices tels que le stockage de carbone, notamment via les pratiques et la photosynthèse des plantes et arbres cultivés (Zhang *et al.*, 2024). Elle contribue aussi à la fourniture de services écosystémiques favorables à l'entretien des paysages, au maintien de la biodiversité ou encore à la protection des sols contre l'érosion (Power, 2010 ; FAO, 2022). Plus largement, elle demeure avant tout essentielle pour répondre aux besoins alimentaires des populations.

L'intensification de l'agriculture a largement contribué à la diminution des famines mais ne permet pas nécessairement la souveraineté alimentaire des pays ni l'assurance de régimes de qualité (Ickowitz *et al.*, 2019 ; IAASTD, 2009). La part accrue de produits carnés, représentant 65 % des apports protéiques en France (Regnier et Ladet, 2021), et notamment de viande rouge, contribue à augmenter la prévalence de maladies cardio-vasculaires, de certains cancers ou encore de diabète de type 2 (OMS, 2023). En parallèle, à l'échelle mondiale, l'élevage représente 55 % des émissions de GES agricole, et affecte 30 % la biodiversité au travers de la déforestation liée à cette activité. Bien que certains systèmes d'élevage aient des effets positifs, le remplacement partiel de protéines carnées par des protéines végétales, telles que les légumineuses, est fortement recommandée tant pour des raisons sanitaires que climatiques (OMS, 2023 ; Regnier et Ladet, 2021).

La culture de légumineuses représente ainsi un levier important de la transition agroécologique. Elle a des avantages à la fois sur la qualité des régimes alimentaires, la durabilité des systèmes agricoles ou encore la réduction des émissions de GES liées à la fabrication des engrais azotés de synthèse (Voisin *et al.,* 2013). Toutefois, la production de Fabacées (légumineuses) fait face à de nombreux freins socio-techniques qui limitent leur développement (Voisin *et al.,* 2013 ; Joya et Hamon, 2021). Parmi ceux-ci, les principaux évoqués sont : une instabilité des rendements causées par une sensibilité aux stress biotiques et abiotiques (Voisin *et al*., 2013), une sélection variétale récente et donc limitée (Voisin *et al*., 2013) ou encore un manque de structuration de la filière, en développement cependant (Joya et Hamon, 2021). La culture en mélange d'espèces est évoquée comme un levier pour répondre aux freins agronomiques liés à la culture de légumineuses (Voisin *et al*., 2013).

C'est dans ce contexte qu'est né le projet européen IntercropVALUES (2022-2026), financé à hauteur de 8 millions d'euros par l'Union européenne (HORIZON-CL6-2022-BIODIV-01). Il vise à « développer les cultures associées pour améliorer les chaînes de valeur agroalimentaires et la fourniture de services écosystémiques en Europe et dans les pays du Sud ». Ce projet s'appuie sur un collectif de 27 partenaires issus de 15 pays différents et mobilise des approches multi-acteurs au travers notamment de 13 cas d'étude. Ce stage se déroule dans le cadre du cas d'étude 10 et mobilise trois structures : l'Union des Coopératives d'Utilisation de Matériel Agricole des Pays de la Loire (UCPDL), le Groupement d'Agricultrices et agriculteurs Biologiques et Biodynamiques d'Anjou (GABB Anjou) et l'Institut National de la Recherche Agronomique et de l'Environnement (INRAe) de Toulouse. Ce cas d'étude vise à renforcer les connaissances sur les cultures associées, en particulier celles intégrant la lentille, tout en améliorant la chaîne de tri et de stockage, et en diversifiant les débouchés commerciaux pour les producteurs accompagnés dans le Maine-et-Loire. Dans ce contexte, l'objectif de ce stage est d'évaluer des mélanges d'espèces co-conçus avec des agriculteurs biologiques et ce mémoire sera constitué d'une première partie relative à l'état de l'art sur les mélanges d'espèces, les légumineuses et les processus écologiques impliqués. Puis, je présenterai les matériels et méthodes mobilisés, les résultats et leur discussion, avant de conclure.

1. Etat de l'art et contexte de l'étude

Pour comprendre le rôle des associations culturales en agriculture biologique, et plus particulièrement des mélanges d'espèces, cette partie partie présentera en premier les principes et les enjeux spécifiques de l'agriculture biologique. Ensuite sera abordé l'importance de la diversification culturale dans ce type de système. Dans un troisième temps, nous nous concentrerons sur les légumineuses, le rôle clé dans la diversification mais aussi les freins pour ces cultures. Enfin, nous présenterons les intérêts des mélanges d'espèces pour la culture de légumineuses ainsi que les limites et les conditions de réussite.

1.1. L'agriculture biologique, un levier pour une agriculture plus durable

En agriculture, de nombreux systèmes coexistent : agriculture conventionnelle, raisonnée, de conservation des sols, intégrée, paysanne ou encore biologique. Tous les agriculteurs du cas d'étude étant en agriculture biologique (AB), j'ai choisi de présenter plus en détail ce mode de production qui fait l'objet d'un cahier des charges particulier. L'AB se définit comme un mode de production avec une gestion durable des ressources visant à préserver les sols, l'air, l'eau et la biodiversité, tout en limitant les intrants, excluant les OGM et les produits chimiques de synthèse (Remongin, 2023). En France, les cultures biologiques représentaient en 2023, 10,4 % de la SAU (surface agricole utile), soit une légère baisse par rapport à 2022 (- 0,6 %), en raison d'une baisse de conversion les années précédentes (L'Agence bio, 2024). Plusieurs aspects peuvent expliquer ce frein.

Le premier enjeu en AB concerné est le maintien de la fertilité des sols dans un système dépourvu d'engrais minéraux de synthèse, et tout particulièrement, dans les systèmes sans élevage (Guet *et al.,* 2011). Le second concerne la maîtrise des bioagresseurs (Guet *et al.*, 2011 ; Boisclair et Estevez, 2006) regroupant les pathogènes, ravageurs et adventices pour lesquels les solutions alternatives aux produits phytopharmaceutiques de synthèse ne sont pas toujours efficaces et les dégâts sur les cultures peuvent être conséquents (Gaborit, 2024). En moyenne, l'écart de rendement entre les cultures biologiques et conventionnelles est de 19 % (Ponisio *et al.*, 2015).

Plus globalement, différents freins limitent le développement de l'AB. Le premier concerne l'inquiétude des producteurs quant à une baisse de productivité et les conséquences sur la rentabilité des exploitations (Latruffe *et al.*, 2013). Le prix plus élevé des produits biologiques compensent théoriquement cette perte (Houpert et Botrel, 2020) mais la baisse des achats des produits biologiques par les consommateurs (- 7,8 % en 2023) fragilise cet équilibre (Insee, 2023 ; Catteau, 2024 ; Lombardot, 2023). A cela s'ajoutent le coût élevé d'approvisionnement en matières premières certifiées, le manque de structuration des filières, notamment en aval, ainsi que des aides à la conversion jugées insuffisantes. Autant de facteurs qui dissuadent les agriculteurs d'entamer une démarche de certification AB (Lombardot, 2023). Ce manque de politiques publiques ambitieuses compromet l'atteinte de l'objectif européen de 25 % de surfaces agricoles utiles en AB d'ici 2030, fixé par le Pacte vert (Olivier, 2024).

1.2. Les légumineuses et les mélanges comme outils de diversification des systèmes de culture

La diversification des systèmes de culture est un levier majeur face aux enjeux agroécologiques (Thoyer *et al.*, 2014 ; Thomine, 2019), et pas seulement en AB. Cela peut prendre plusieurs formes : agroforesterie, plantes de service, rotations culturales, cultures associées (mélanges d'espèces) ou encore mélanges variétaux (Malézieux *et al.*, 2022). L'accroissement de la diversité cultivée est nécessaire pour accroître la durabilité des agrosystèmes (IAASTD, 2009) et par conséquent, pour la pérennité des systèmes alimentaires (Malézieux *et al.*, 2022). Dans cet objectif de diversification, les légumineuses, globalement délaissées au profit des céréales à fort rendement, doivent être réintroduites dans les systèmes agricoles et notamment dans les systèmes biologiques du fait de leur capacité à fixer l'azote atmosphérique. Face aux contraintes techniques liées à la culture des légumineuses, notamment en AB, les mélanges d'espèces se présentent comme une voie prometteuse.

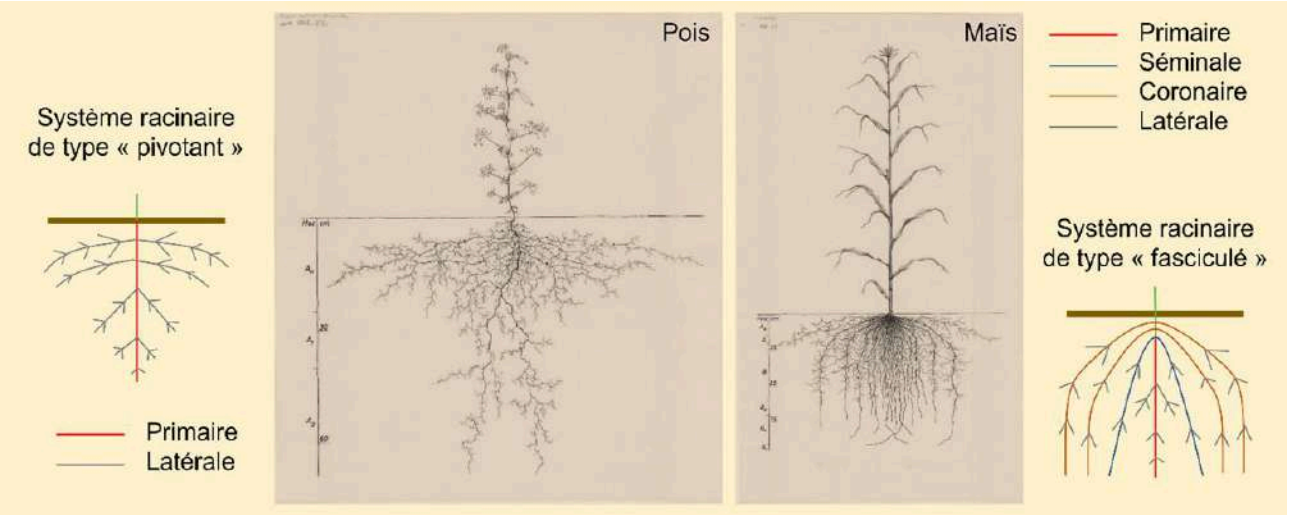


Figure 1 : Schéma du système racinaire "pivotant" du pois (Pisum sativum) comparé au type "fasciculé" du maïs (Zea mays) et les types de racines associées (Grondin et al., 2023).

Figure 2 : Photo d'une bruche (Bruchus signaticornis). Source : Riquet et al., 2021.

1.2.1. Les légumineuses : des espèces clés de la diversification

1.2.1.1. Des surfaces de production encore marginales

Les légumes secs (légumineuses destinées à l'alimentation humaine) représentaient en 2021 environ 2 % de la SAU française (pois, soja, fève, féverole, pois chiche, lentille et lupin ; Terres Univia, 2022b). Les cultures biologiques, représentaient 0,1 % (environ 30 000 ha) de la SAU en 2021 et tendent à diminuer (- 3000 ha entre 2021 et 2024 ; L'Agence bio, 2025). La part de la SAU en AB au sein de chacune de ces cultures est très dépendante de l'espèce. Par exemple, la lentille *(Lens culinaris Medik.)* représentait en France 0,1 % de la SAU (29 000 ha) en 2023, dont la moitié en AB (Terres Univia, 2025). Le pois était cultivé en 2023 sur 0,5 % de la SAU dont seulement 6 % en AB ou en conversion (Terres Univia, 2022a).

1.2.1.2. Des avantages nutritionnels et agronomiques

Les légumineuses sont encore peu consommées en France tant pour des raisons gustatives que socioculturelles (Melenderez Ruiz, 2020). Pourtant, elles sont nutritionnellement très intéressantes (Voisin *et al.*, 2013 ; Regnier et Ladet, 2021) pour leurs apports en protéines, fibres, glucides complexes, fer, acides aminés essentiels ou encore leur indice glycémique faible (Regnier et Ladet, 2021 ; Terres Univia, 2022b).

D'un point de vue agronomique, l'introduction de légumineuses dans la rotation est bénéfique dans les systèmes à faible disponibilité en azote, comme en AB, et/ou dans les systèmes dépourvus d'élevage. Cette famille de culture a la capacité de fixer l'azote atmosphérique (N_2) grâce à une symbiose avec les bactéries du sol, le rendant assimilable par les plantes sous forme d'ammoniac (Crews et Peoples, 2004 ; Voisin *et al.*, 2013 ; Schneider, 2023). La culture de légumineuse permet ainsi de limiter voire de s'affranchir de l'utilisation d'intrants azotés de synthèse (Voisin *et al.*, 2013) et permet ainsi indirectement de réduire les émissions de GES lors de la fabrication et de l'utilisation des engrais azotés. De plus, le système racinaire pivotant (Figure 1) de ces espèces est bénéfique pour l'amélioration de la structure du sol (Voisin *et al.*, 2013).

1.2.1.3. Des cultures encore confrontées à des freins

Bien qu'intéressantes, les légumineuses sont peu cultivées en raison d'un verrouillage socio-technique important (Voisin *et al*., 2013). En effet, elles présentent une forte sensibilité aux stress biotiques et abiotiques, ce qui engendre une grande variabilité des rendements et limite leur attractivité pour les producteurs, quel que soit le mode de production (Shrestha *et al.,* 2009 ; Idriss et *al.*, 2013). En agriculture biologique, cette contrainte est renforcée par l'absence de solutions de biocontrôle efficaces contre les bioagresseurs, ce qui complique leur conduite. De manière plus générale, le manque de variétés adaptées aux conditions pédoclimatiques et aux pressions sanitaires locales contribue également à cette instabilité de rendement (Joya et Hamon, 2021).

Dans le cas des cultures de pois et de lentilles étudiées dans ce projet, différents ravageurs peuvent survenir tout au long du cycle de développement de la culture : les thrips (*Thrips angusticeps*), le puceron vert du pois (*Acyrthosiphon pisum*) ou encore la tordeuse la larve de tordeuse (*Cydia nigricana*). Ces insectes peuvent entraîner l'avortement des fleurs, la réduction du nombre de gousses, la transmission de virus, voire la mort des plants (Riquet *et al.,* 2024). Toutefois, ce rapport se concentre uniquement sur la bruche (Figure 2) qui est un ravageur majeur pour lequel une espèce principale par culture a été identifiée (Le Bihan *et al.,* 2024) à savoir *Bruchus. signaticornis* pour la lentille et *Bruchus pisorum* pour le pois. Les pertes de rendement causées par ces coléoptères atteignent en moyenne 12 %, pouvant aller jusqu'à 80 % en cas de forte infestation (Riquet *et al.*, 2021 ; Le Bihan *et al.*, 2025). La femelle de ce coléoptère pond sur les gousses de légumineuses, et la larve se développe à l'intérieur d'une graine. A sa maturité, elle la perce pour en sortir et rejoins des zones propices à son hivernage telles que les bois (Dauguet, 2019 ; Biarnès *et al.*, 2024). Elles ne pondent qu'une génération par an et sont actives dès 20°C (Biarnès *et al.*, 2024). A ce jour, aucune solution de lutte efficace n'existe en AB. Des solutions de biocontrôle sont à l'essai sur différentes espèces de bruches (Dauguet, 2019) ainsi que des tests de sélection variétale (Laserna-Ruiz *et al.*, 2012 ; Vlachostergios *et al.*, 2018).

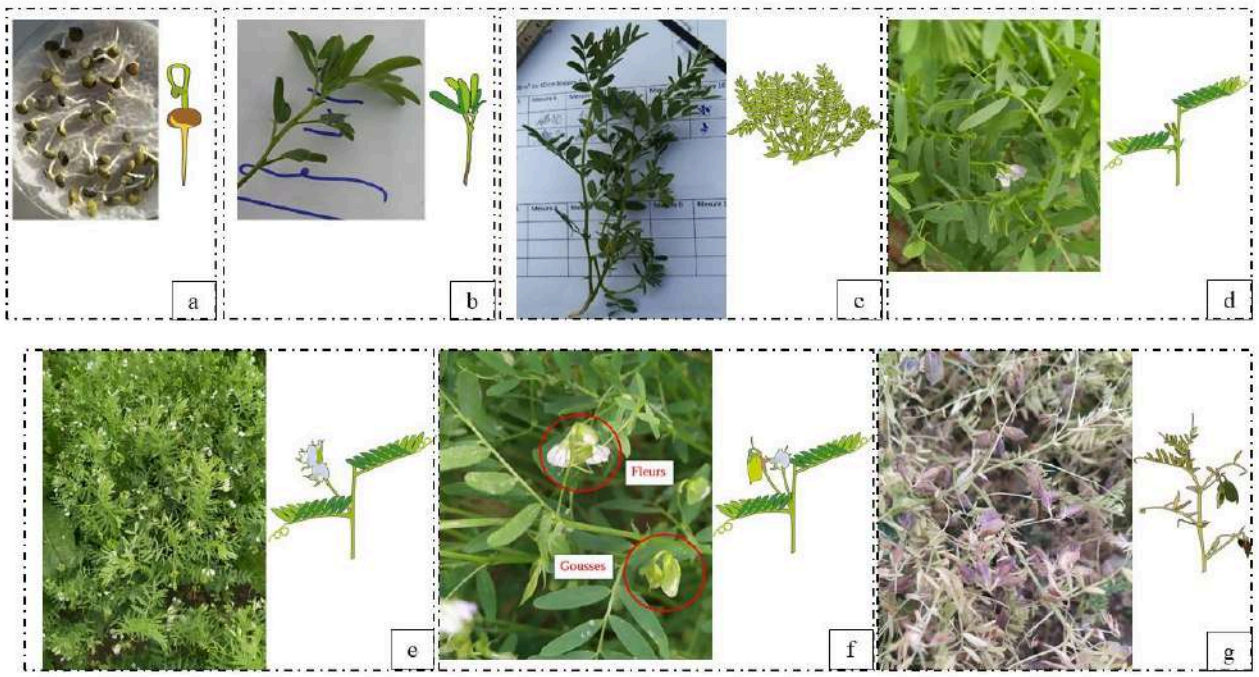


Figure 3 : Stades de développement principaux de la lentille selon les schémas Terres Inovia et correspondance photos (Lorion, 2025) : (a) germination/levée, (b) développement des feuilles, (c) élongation de la tige principale, (d) apparition de l'inflorescence, (e) floraison, (f) développement du fruit (gousses) et (g) maturation des gousses et des graines (Le Bihan, 2022b).

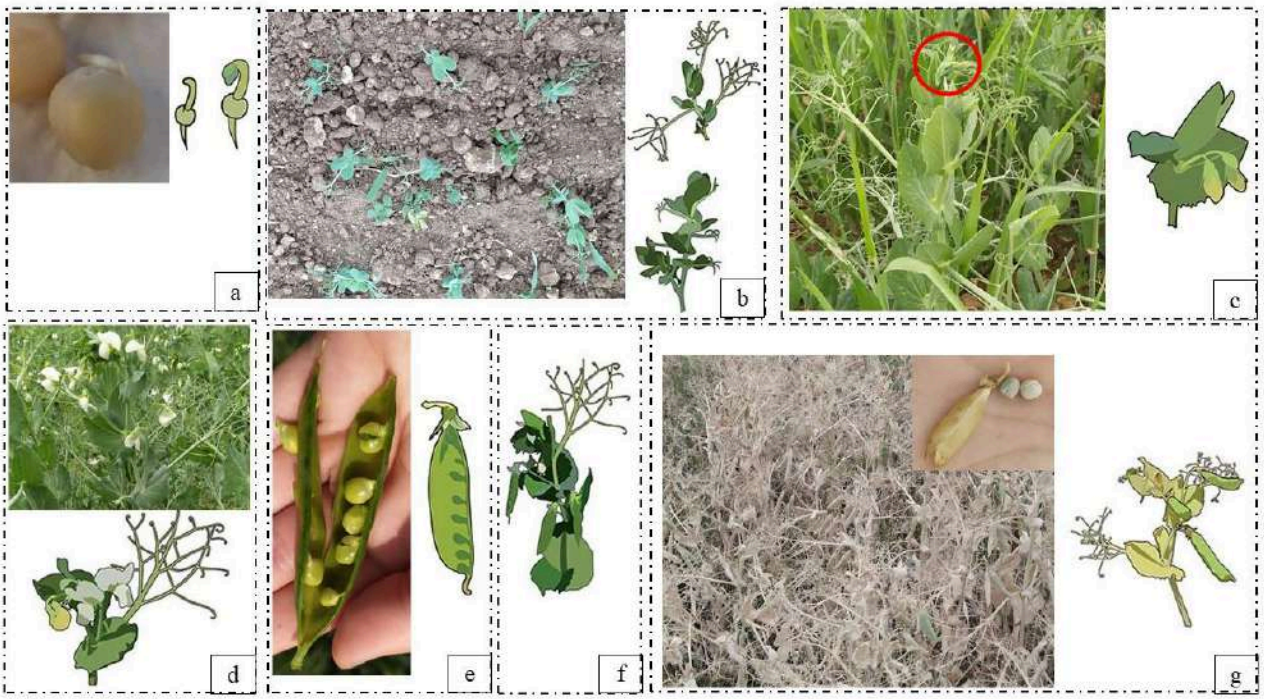


Figure 4 : Stades de développement principaux du pois selon les schémas Terres Inovia et correspondance photos (Lorion, 2025) : (a) germination hypogée/levée, (b) stade foliaire (développement feuilles), (c) apparition des boutons floraux (inflorescence), (d) début floraison, (e) fin floraison, (f) stade limite d'avortement et début remplissage des grains et (g) remplissage et maturité (Biarnès, 2019b).

La gestion des adventices, notamment en AB, constitue un enjeu pour la culture de légumineuses puisque la compétitivité vis-à-vis des adventices varie selon les espèces. Si la luzerne montre des avantages quant à leur régulation (Joya et Hamon, 2021), d'autres espèces telles que la lentille sont peu concurrentielles (Terres Inovia, 2023). Cette difficulté de gestion s'explique notamment par la morphologie des cultures. La lentille peut être fragilisée par le désherbage mécanique en raison de son allure chétive (Terres Inovia, 2023), tandis que les pois ne peuvent plus être désherbés mécaniquement une fois les vrilles formées (Terres Inovia, 2025a). A cela s'ajoute une sensibilité à la verse dans le cas de la lentille, pouvant provoquer un égrainage prématuré et rendre difficile la récolte (Sidahmed et Jaber, 2004 ; CAB Pays de la Loire, 2021 ; Bedoussac *et al.,* 2015). Ainsi, la gestion des itinéraires techniques (ITK) reste complexe pour les agriculteurs, en particulier dans un contexte de production biologique, où les marges de manœuvre sont plus limitées.

1.2.1.4. Itinéraires techniques des lentilles et des pois protéagineux

Dans la suite de ce mémoire, nous présenterons la physiologie et la conduite de la lentille et du pois protéagineux, les deux légumineuses présentes dans les itinéraires techniques suivis.

- **Cycle de développement**

La lentille est une plante annuelle autogame (autofécondation), à croissance indéterminée dont le cycle de développement est court, 120 à 150 jours. Cette plante au port dressé (20 à 50 cm) mais peu lignifiée, adopte une allure prostrée en fin de cycle après le remplissage des gousses contenant une à deux graines chacune (Baguet *et al.*, 2023 ; Sidahmed et Jaber, 2004). Les stades principaux de cette culture (Figure 3) sont la germination/levée, le développement des feuilles, l'élongation de la tige principale, l'apparition de l'inflorescence, la floraison, le développement du fruit, et enfin, la maturation des gousses et des graines (Le Bihan, 2022b). Le pois est une plante annuelle autogame dont le cycle dure entre 70 et 100 jours (Biowallonie, 2022). Aux extrémités des feuilles du pois se forment des vrilles, permettant de créer un couvert structuré. Les stades principaux du pois sont : la germination hypogée/levée, le stade foliaire, le développement des boutons floraux, le début de floraison, la fin de floraison, le stade limite d'avortement, le remplissage et la maturité des graines (Biarnès, 2019b ; Figure 4).

- **Caractéristiques de semis**

Les lentilles et les pois sont des cultures peu adaptées aux sols de limons battants, hydromorphe ou très séchant. Il faut également éviter les sols très caillouteux et acides (pH < 5) puisque cela est défavorable à la symbiose fixatrice d'azote (Terres Inovia, 2023 ; Terres Inovia, 2025). Ce sont également des cultures peu exigeantes en P et K (Terres Inovia, 2023 ; Terres Inovia, 2025a).

La lentille se sème de mars à mai selon les conditions climatiques, dans des sols ressuyés, réchauffés et bien drainés. Elle permet de valoriser des sols de type argilo-calcaire superficiels à moyen, volcaniques ou granitiques, à réserve utile faible ou moyenne (Terres Inovia, 2023). Elle est plutôt tolérante au froid, aux fortes températures et au déficit hydrique sauf aux stades de floraison et de remplissage des gousses (Baguet *et al.*, 2023 ; Shrestha *et al.*, 2009 ; Idriss *et al.*, 2013). En culture pure, la densité de semis recommandée de lentille est de 100 kg/ha, soit 400-440 graines/m², pour un objectif de 220 à 300 plantes levées/m² (CAB Pays de la Loire, 2021 ; GAB Ile-de-France et Chambre d'agriculture Ile-de-France, 2004 ; Terres Inovia, 2023). Elle doit être semée à 2-3 cm de profondeur et 12-25 cm d'inter-rang en fonction du type de désherbage mécanique envisagé (CAB Pays de la Loire, 2021 ; Baguet *et al.*, 2023).

Le pois, quant à lui, se sème de fin-décembre à mi-mars pour les types "printemps" et de mi-novembre à fin décembre pour les types "hiver". Il faut privilégier les sols profonds avec une réserve utile en eau de 150 mm pour le pois de printemps et de 70-80 mm pour le pois d'hiver. Le pois (Tableau 1), se sème en culture pure à 160 à 275 kg/ha soit 70 à 105 graines/m² (type "printemps") et de 120 à 253 kg/ha soit 60 à 115 graines/m² (type "hiver"). Il est recommandé de semer le pois à 3-5 cm de profondeur et 12-35 cm d'inter-rang (type "printemps") et 15-20 cm (type "hiver"). Un roulage est nécessaire après semis pour garantir un nivellement optimum.

*Tableau 1 : Caractéristiques de semis du pois de printemps et d'hiver) en AB et conventionnel (Cocoual et Dupont, 2022 ; Terres Inovia, 2025a ; Marguerie, 2017 ; Biarnès, 2025). * NP : non précisé*

Caractéristiques de semis	**Pois de printemps**				**Pois d'hiver**			
Mode d'agriculture (AB ou CV : conventionnel)	**AB**	**CV**			**AB**	**CV**		
Type de sols (L : limoneux, A : argileux, argilo-calcaire ou caillouteux, C : craie)	*NP**	L	A	C	*NP**	L	A	C
Semis en pur (kg/ha)	200-240 (10 % de plus qu'en CV)	160-210	205-235	240-275	10 % de plus qu'en CV	120-154	160-198	230-253
Semis en pur (graines/m²)	80-90	70-80	90	105		60-70	80-90	115
Densité visée (plantes/m²)	60	*NP**	*NP**	*NP**	60	30-35	50-55	
PMG (g)	250-320	230-290			*NP**	200-220		
Inter-rang (cm)	12-35	12-35			*NP**	15-20		
Profondeur de semis (cm)	3-4	3-4			*NP**	3-5		

Figure 5 : Photo d'un pick-up à l'avant d'une moissonneuse-batteuse (Guillemot, 2020)

Bon précédent pour les cultures exigeantes en azote telles que les céréales, le tournesol et le colza, la lentille et le pois ne sont pas recommandés après une légumineuse afin d'éviter un excédent d'azote (CAB Pays de la Loire, 2021 ; Terres Inovia, 2025a). Les racines pivotantes favorisent notamment l'implantation de la culture suivante et la structuration du sol (Terres Inovia, 2025a). Le délai de retour idéal de ces cultures est de 5 à 6 ans (CAB Pays de la Loire, 2021).

- **Désherbage mécanique**

Les interventions techniques de la culture de lentilles sont peu nombreuses en AB et sont principalement liées à du désherbage mécanique si les conditions le permettent. Entre le semis et la levée, et/ou dès le stade 3-4 feuilles, il est possible de passer la herse étrille, la houe rotative ou encore la bineuse (Terres Inovia, 2023). Il faut cependant veiller à ne pas désherber le pois lorsque les vrilles sont formées, au risque d'abîmer la culture. Il est également possible d'avoir recours au passage d'une écimeuse lorsque le désherbage n'a pas été possible ou n'a pas été assez efficace (CAB Pays de la Loire, 2021).

- **Récolte**

La récolte du pois et de la lentille s'effectue généralement entre fin juin et août lorsque les graines sont à maturité physiologique. Cela se caractérise par des gousses jaunes à marrons et des graines dures colorées en fonction de la variété (Baguet *et al.*, 2023). L'humidité optimale est de 15-16 % pour la lentille (Baguet *et al.*, 2023) et de 14 % pour le pois bien que la récolte puisse s'effectuer dès 16-17 % (Biarnès, 2019a).

Dans les deux cas, la récolte s'effectue avec une moissonneuse-batteuse classique, pouvant être accommodée avec des releveurs d'épi ou un pick-up (Figure 5) à la place de la barre de coupe, afin de faciliter la récolte en cas de verse ou de gousses basses (Terres Inovia, 2025a). La seconde méthode de récolte est la pré-fauche avec andainage. Elle permet de favoriser une maturité homogène (CAB Pays de la Loire, 2021 ; Baguet *et al.,* 2023) et d'anticiper la récolte de 8 à 10 jours. Elle doit cependant bénéficier de 4 à 5 jours secs pour le séchage des andains et d'une humidité des graines comprise entre 18 et 30 % (Lucas et Le Bihan, 2022). Cette méthode, bien que techniquement efficace, reste peu pratiquée en raison de son coût (40 à 100 €/ha) et des contraintes climatiques qu'elle impose (Lucas et Le Bihan, 2022).

Les rendements sont très variables. En lentille, ils oscillent en AB de 5 à 20 q/ha (en sortie de parcelle) en Pays de la Loire (CAB Pays de la Loire, 2021). En pois, les rendements en AB en France varient généralement de 15 à 30 q/ha, avec un potentiel de 30 à 40 q/ha en cas conditions climatiques optimales et avec une bonne gestion des adventices (ITAB, 2014).

- **Tri et le stockage des graines**

Pour être commercialisées en alimentation humaine, imposant moins de 1 % d'impuretés d'après les normes du CODEX STAN 171-1989, les graines de pois et de lentille doivent systématiquement être triées. Les étapes de tri varient selon l'état de la récolte et les équipements disponibles pour les producteurs. Une ventilation et/ou un séchage sont généralement réalisés en amont pour abaisser la température et l'humidité si nécessaire (Marguerie, 2017). Un premier tri grossier est souvent effectué directement en sortie de parcelle afin d'éliminer les impuretés légères ou volumineuses.

Ensuite, les graines doivent être conservées rapidement en vue de lutter contre les bruches, soit par congélation (15 à 20 jours), soit par asphyxie dans des big-bags NOX (au moins 1 mois). Ce dispositif fonctionne par injection de CO_2, après aspiration de l'air.

Toutes ces étapes post-récolte impliquent des investissements en matériel spécifiques, parfois lourds pour un producteur seul. Bien qu'une mutualisation soit envisageable (via des achats groupés ou des équipements partagés), cela suppose une organisation collective, qui peut être complexe à mettre en œuvre.

Figure 6 : Différentes formes de cultures associées d'après Bedoussac et al. (2022)

Les premières estimations présentées par Terres Inovia (2025b) établissent un rendement de 40-45 q/ha en pois d'hiver et 35-40 q/ha en pois de printemps pour la campagne 2024-2025 sans précision de tri ou non. Quant à la lentille, une fois triée, le rendement aux normes commerciales est en moyenne en France de 2 à 18 q/ha (Baguet *et al.*, 2023). Ainsi, les pertes entre le rendement au champ et le rendement commercialisable peuvent atteindre 60 à 100 % (Halila 1995 dans Wang *et al.*, 2013).

1.2.2. Les mélanges d'espèces : un pas vers une agriculture diversifiée

1.2.2.1. Définition et typologies des mélanges d'espèces

Les mélanges d'espèces sont définis comme la culture simultanée d'au moins deux espèces sur une même surface, pendant une partie significative de leur cycle de croissance (Willey, 1979). Cela signifie que les espèces peuvent être semées et récoltées au même moment (mélanges dits simultanés) ou non (semis en relai ou dans un couvert). Malgré une augmentation des surfaces en AB, passant de 5 000 ha en 2010 à 100 000 ha en 2021, les mélanges d'espèces restent minoritaires puisqu'ils ne représentent que 3,7 % de la SAU biologique. Les mélanges les plus répandus sont les céréales-légumineuses (Enjalbert *et al.*, 2024).

Pour caractériser les mélanges d'espèces, plusieurs typologies existent. Verret *et al.* (2018) ont proposé de classer les mélanges en fonction du nombre d'espèces, de leur nature (printemps ou hiver) et de leur mode d'implantation. Bedoussac *et al.* (2022) proposent quant à eux, une typologie (Figure 6) basée sur la nature des espèces mélangées (légumineuses ou non), leurs fonctions (rente vs. couvert) et la temporalité (semi simultané ou en relais). Les mélanges d'espèces peuvent intégrer des plantes de services, non récoltées, apportant des bénéfices notamment pour la substitution des engrais azotés (ex : colza/couvert de trèfle, vesce et fenugrec). Notre étude portera essentiellement sur des mélanges de deux espèces, incluant une légumineuse destinée à l'alimentation humaine.

1.2.2.2. Conception des mélanges d'espèces

La conception des mélanges est réfléchie en fonction des objectifs des agriculteurs et des conditions pédoclimatiques (Gayard *et al.*, 2018). Pour concevoir un mélange, plusieurs facteurs sont à considérer : (i) les espèces (Bedoussac *et al.*, 2015), (ii) les variétés, influençant entre autres le contrôle des bioagresseurs (Enjalbert *et al.*, 2024), (iii) le motif de semis, et (iv) les densités de semis (Bedoussac *et al.*, 2015).

Si l'objectif est de produire une légumineuse, alors celle-ci est semée à densité égale ou proche de celle semée en culture pure (Hedan *et al.*, 2021). La lentille sera par exemple semée à 100 kg/ha. Dans cet objectif, le rôle de la seconde espèce sera de favoriser la production de la légumineuse via notamment le rôle tuteur ou la compétition avec les adventices (Terres Inovia, 2023). Il est donc recommandé de semer cette autre espèce à moins de 20-25 % de la densité en culture pure (Baguet *et al.,* 2023). Les espèces à privilégier en mélange avec la lentille (CAB Pays de la Loire, 2021 ; Baguet *et al.*, 2023) sont la cameline (1 à 3 kg/ha), le colza de printemps, le blé ou l'orge de printemps (20 kg/ha), ou encore le lin et l'avoine (10-15 kg/ha). Tandis que les espèces à privilégier avec le pois sont l'orge, l'avoine, le blé ou le triticale à 20 kg/ha (Baguet *et al.,* 2023), en sélectionnant une variété dont la maturité coïncide avec celle du pois (Marguerie, 2017).

Si l'objectif est de produire la seconde espèce (ex : une céréale riche en protéines), alors la densité de semis sera plutôt de 70 % de la densité pure pour cette espèce et de 30 % de la densité de la culture pure pour la légumineuse. Dans le cas où un équilibre est recherché, dans un mélange alors le semis conseillé est de 55 % de la densité pure pour la non légumineuse et de 45 % de la densité en culture pure pour la légumineuse (Cabeza-Orcel *et al.*, 2024).

1.2.2.3. Processus écologiques impliqués dans les mélanges d'espèces

Les mélanges d'espèces impliquent des relations plantes-plantes faisant appels à différents processus écologiques (Enjalbert *et al.*, 2024) tels que la compétition, la compensation, la complémentarité de niche et la facilitation.

- **Compétition**

Désigne un processus durant lequel une espèce dégrade l'environnement de l'autre notamment par l'utilisation des ressources telles que l'eau, l'azote (Bedoussac *et al.*, 2022) ou la lumière (Vandermeer, 1989). Cette compétition peut être intra-spécifique, entre les individus d'une même espèce, ou inter-spécifique, entre les individus de différentes espèces. Dans le cas d'une association culturale, même si les espèces du mélange entrent en compétition pour les mêmes ressources, leur compétitivité globale vis-à-vis des adventices est renforcée en réduisant la disponibilité des ressources abiotiques pour ces dernières (Justes *et al.*, 2021).

- **Compensation**

Processus permettant à un système de rester productif même si une espèce ne se développe pas correctement grâce aux différences de tolérance aux conditions abiotiques et biotiques. Une autre espèce, non affectée par la contrainte du moment, peut assurer la production à sa place. Ce fonctionnement rend le système plus résilient, notamment face aux maladies et ravageurs que dans une monoculture (Justes *et al.*, 2021).

- **Complémentarité de niche**

La complémentarité de niche est un processus écologique qui permet à plusieurs espèces de coexister en exploitant les ressources de manière différenciée dans le temps ou dans l'espace (Bedoussac, 2018). Cela réduit la compétition interspécifique (Justes *et al*., 2014) et favorise la stabilité du système (Pocheville, 2010). Le concept de niche écologique fait référence au rôle, à la place d'une espèce et à la façon dont elle utilise les ressources au sein d'un écosystème. Cela désigne aussi la façon dont elle interagit avec les espèces de ce milieu (Pocheville, 2010). Par exemple, dans un mélange blé-pois, la capacité fixatrice de l'azote du pois va permettre au blé d'utiliser l'azote du sol sans entrer en concurrence avec les besoins du pois. De plus, la différence architecturale des racines leur permet de puiser l'azote dans des horizons différents (Justes *et al.*, 2009). Ce processus de complémentarité de niche a notamment été mis en avant afin d'expliquer la meilleure performance des peuplements plurispécifiques par rapport aux peuplements monospécifiques, que ce soit pour l'utilisation des ressources ou encore la production de biomasse (Justes *et al.,* 2014).

- **Coopération ou facilitation**

Processus durant lequel une espèce va augmenter la croissance ou la survie d'une autre espèce (Callaway, 1995 dans Justes *et al.*, 2014) via l'amélioration de l'environnement de cette seconde. Ce mécanisme est notamment favorable pour l'utilisation des ressources lumineuses, hydriques, nutritionnelles et peut se faire de façon directe ou indirecte. La facilitation est fortement liée à la présence de symbioses mycorhiziennes, permettant d'augmenter la disponibilité des ressources abiotiques pour elle-même mais aussi pour les autres espèces cultivées (Callaway, 2007). Le rôle tuteur d'une espèce associée dans un mélange (ex : orge) est, selon Justes *et al.* (2021) un processus qualifié de coopération puisqu'il permet la réduction de la verse de l'espèce associée.

1.2.2.4. Un système présentant de nombreux avantages

Pour faire face aux difficultés techniques de la culture de lentilles et de pois, elles peuvent être cultivées en mélange avec une ou plusieurs autres espèces. La présence de plusieurs espèces dans un même habitat, ici la parcelle agricole, permet une meilleure occupation dynamique du couvert, c'est-à-dire dans le temps et l'espace (Poggio, 2005). Ceci s'explique par des différences morphologiques et physiologiques entre les espèces. Ces différences concernent notamment le métabolisme, la croissance, le développement, ainsi que l'absorption des minéraux et des nutriments. Elles influencent les relations entre plantes, en particulier les phénomènes de compétition et de complémentarité pour l'accès aux ressources, mais aussi les effets sur le microclimat et la productivité globale des cultures.

- **Amélioration de la fertilité des sols**

L'association d'espèces permet un accès facilité aux différents horizons du sol et aux ressources limitant la compétition (Hauggaard-Nielsen et Jensen, 2005 dans Justes *et al.*, 2014). Les différentes racines permettent de créer de la porosité, favorable à l'infiltration de l'eau, à la structure et la fertilité des sols (Justes *et al.*, 2014). Ceci fait écho aux notions de complémentarité de niche et de facilitation. Concernant la fertilité des sols, l'azote est une ressource primordiale pour la croissance et le développement des cultures. Cet élément ne peut être fixé que grâce à la symbiose entre les racines de la légumineuse et les bactéries du sol. Il a été démontré que la présence de légumineuses dans les mélanges présente un intérêt dans les systèmes à faible disponibilité en azote, comme il est souvent le cas en AB (Bedoussac *et al.,* 2015 ; Justes *et al.,* 2014). Dans un mélange céréales/légumineuses, la compétitivité de la céréale pour l'azote va lui permettre de prélever la majorité de l'azote disponible. En réponse, la légumineuse va subvenir à ses besoins par un accroissement de l'activité de fixation évitant la compétition directe et favorisant une utilisation plus efficace des ressources (Justes *et al.*, 2014). Les mélanges contribuent ainsi à améliorer la fertilité physique, chimique et biologique du sol (Pelzer *et al.,* 2012 ; Bedoussac *et al.,* 2015).

- **Complémentarité aérienne**

La densité des espèces, la biomasse et le taux de recouvrement du mélange, jouent un rôle fondamental dans le cycle de l'eau, le maintien de la structure du sol (Hedan *et al.,* 2021 ; Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2003) ou encore la régulation et des bioagresseurs dont font partie les adventices. Les parties aériennes du couvert végétal permettent de limiter le ruissellement, l'évaporation, les phénomènes de battance et donc d'érosion (Hedan *et al.,* 2021 ; Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2003).

La compétition entre les espèces du mélange et les adventices est influencée par plusieurs facteurs tels que : (1) l'utilisation de l'azote minéral et atmosphérique (Bedoussac, 2018), (2) l'utilisation de la ressource lumineuse (Bedoussac, 2018) et (3) la couverture du sol qui limite l'accès des adventices à l'eau, aux nutriments et à l'espace (Anil *et al.,* 1998 ; Bedoussac, 2018). La densité et la hauteur du couvert végétal et plus largement, la couverture du sol vont conditionner l'accès des adventices à la lumière, ce qui va avoir des conséquences sur leur développement (Buhler, 2004). Les associations de céréales-légumineuses semblent être particulièrement efficaces pour contrôler les adventices grâce à la forte compétition asymétrique des céréales pour les ressources (lumière, eau, azote..). Plus généralement, ce contrôle des adventices est aussi grandement influencé par la proportion des espèces dans le mélange. D'après les études de Lebreton *et al.* (2023) et de Bedoussac *et al.* (2015), le niveau de salissement des mélanges dépend de la proportion de céréales dans le système (plus elle augmente plus le contrôle des adventices est élevé). Cependant, cela peut se traduire par une diminution du rendement des légumineuses en raison de la compétition interspécifique accrue notamment pour la lumière (Lebreton *et al.,* 2023). A noter que des mécanismes annexes peuvent également avoir une influence sur la présence d'adventices tels que l'allélopathie, qui correspond à la libération de composés chimiques par certaines espèces, inhibant la croissance des autres plantes (Hedan *et al.,* 2021).

Les mélanges d'espèces permettent plus globalement une diminution de la pression des bioagresseurs par différents processus (Tooker et Frank, 2012) comme l'effet barrière (Gaborit, 2024), la dilution, la répulsion et la désorientation (Hedan *et al.,* 2021). La présence d'une polyculture perturbe par exemple les arthropodes ravageurs (herbivores) qui ont plus de difficultés à trouver leur source de nourriture à se déplacer d'une plante à l'autre (Tooker et Frank, 2012). Cela induit une croissance ralentie de la population ravageur et limite les conséquences néfastes sur les cultures (Tooker et Frank, 2012). A cela s'ajoutent des conditions favorables aux auxiliaires en lien avec une diversité des habitats (Tooker et Frank, 2012 ; Hedan *et al.,* 2021). Ces effets sont particulièrement appréciables dans les systèmes biologiques où les méthodes de lutte sont limitées et parfois complexes à mettre en place.

- **Réduction de la verse**

D'après Anil *et al.* (1998), les mélanges d'espèces permettraient une réduction de la verse via des processus de facilitation. Dans le cas d'une association céréale/légumineuse, la céréale va jouer un rôle de tuteur pour la légumineuse, sujette à la verse (Bedoussac, 2018). Ceci est aussi vrai pour des mélanges avec d'autres espèces comme la cameline, qui, grâce à son port dressé pouvant atteindre 40 à plus de 100 cm, peut jouer le rôle de tuteur. L'étude de Viguier, 2018 a mis en avant un pourcentage de verse moyen de la lentille de 15 % dans un mélange avec blé de printemps, contre 40 % en culture pure. La lentille a été semé à 100 % de sa densité (100 kg/ha) et le blé à 17 % de sa densité en pure. Tandis que dans l'étude de Bedoussac *et al.*, 2022, le mélange de lentille-blé de printemps, qui a été semé à une densité de 90 % pour la lentille (90-100 kg/ha) et de 20-30 % pour le blé (30-60 kg/ha), n'a pas versé. Ce qui prouve qu'en fonction du contexte, le rôle tuteur de l'espèce associée permet de limiter la verse rapport à une culture pure.

- **Amélioration et stabilisation des rendements**

L'ensemble des avantages évoqués précédemment permet de réduire les pertes de rendement, fréquentes dans le cas de la culture de légumineuses. Différentes études (Pelzer *et al.* 2012 ; Bedoussac *et al.*, 2022) menées sur des mélanges céréales-légumineuses ont mis en avant que le rendement total des associations était le plus souvent supérieur ou égal au rendement des légumineuses pures et même à la moyenne des rendements des cultures pures. Dans le rapport du projet Remix, Bedoussac *et al.* (2022), ont montré que dans la plupart des cas, la moyenne des rendements est 27 % plus élevée en association qu'en cultures pures. Par ailleurs, les mélanges d'espèces permettent une stabilisation des rendements face aux aléas climatiques (Pelzer *et al.,* 2014 ; Jevtić *et al.*, 2023) et donc une meilleure résilience des cultures du fait que l'une des espèces peut être affectée sans que l'autre ne le soit nécessairement.

- **Amélioration de la qualité des grains**

Dans le cas d'un mélange où l'objectif est la production de céréales, la teneur en protéines des grains est un aspect important pour la commercialisation. Celle-ci peut être similaire à celles des cultures pures mais avec un rendement plus élevé en légumineuses (Bedoussac et Justes, 2010 ; Pelzer *et al.*, 2012 ; Bedoussac *et al.*, 2022) ou supérieure comme dans l'étude de Bedoussac *et al.* (2022), qui met en avant des taux protéiques de céréales de 11,1 % en mélanges avec des légumineuses contre 9,8 % en culture pure. L'étude de Viguier, 2018 a quant à elle mis en avant une augmentation d'un point de la teneur en protéines du blé associé à la lentille. De plus, l'étude de Métivier *et al.* (2014) a mis en avant que ce taux protéique de la céréale était dépendant de l'espèce associée. Dans cette étude dédiée aux fourrages, le maïs associé à la féverole avait des taux protéiques de 10,6 %, contre 7 % lorsqu'il était associé à un mélange pois-vesce ou au soja.

Cette qualité en protéines est dépendante des phénomènes de compétition et de compensation. D'une part, dans ces mélanges, la céréale est semée en moindre quantité et son rendement est diminué du fait de la compétition avec la légumineuse (Bedoussac *et al.*, 2022). D'autre part, la légumineuse utilise essentiellement l'azote de l'air laissant celui du sol à la céréale, ce qui, *in fine*, permet d'augmenter de 50% la disponibilité en azote par kg de grains de céréale par rapport à la culture pure et donc un accroissement de la teneur en protéines (Bedoussac *et al.*, 2022).

1.2.2.5. Des limites et contraintes à considérer

- **Choix des espèces, variétés et densité de semis**

Le choix des espèces et des variétés, mais aussi de la densité de semis pour les associations culturales, apparaît comme un frein à la conception des mélanges (Bedoussac *et al*., 2022). D'une part, la sélection génétique des espèces et variétés est majoritairement effectuée pour les cultures pures, ce qui n'est pas forcément adapté aux mélanges (Sampoux *et al.*, 2019 ; Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2003). Le manque de données sur les interactions génotypiques favorables entre espèces cultivées est un frein à l'optimisation de ces associations (Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2003).

La synthèse de Demie *et al.* (2022) a mis en avant que le comportement des génotypes était variable en fonction de sa culture (pure ou associée), ce qui a un impact sur la performance des variétés, et plus précisément sur le rendement des cultures. Ainsi, en plus de l'effet de l'année sur le rendement, comme c'est le cas en cultures pures, il y a un effet des interactions interspécifiques (Jevtić *et al.*, 2023).

Bien que les références techniques présentent des densités de semis types pour les mélanges d'espèces (ex. : CAB Pays de la Loire, 2021 ; Terres Inovia, 2023 ; Terres Inovia, 2025a ; Marguerie, 2017, etc.), il ne s'agit que de repères et leur mise en oeuvre nécessite souvent une adaptation fine aux contextes pédoclimatiques, aux espèces choisies et aux objectifs visés. Ces repères constituent donc des points de départ, et non des prescriptions précises, ce qui peut rendre l'élaboration des itinéraires techniques délicate pour les agriculteurs.

- **Maîtrise des bioagresseurs**

Bien qu'il ait été montré que les mélanges puissent augmenter la résilience des cultures face aux bioagresseurs (Jevtić *et al.*, 2023), certains mélanges peuvent n'avoir aucun effet voire même aggraver la pression des ravageurs. C'est le cas, par exemple, des mélanges céréales-légumineuses dans lesquels les pucerons des céréales peuvent être favorisés par la présence des légumineuses (Hedan *et al.*, 2021). Dans l'étude de Delobel (2008) sur des mélanges composés de légumineuses, il a été montré que ces derniers ne permettaient pas de réduire les problématiques liées aux ravageurs et notamment aux bruches.

Enfin, si les mélanges d'espèces peuvent contribuer, grâce à la compétition, à réduire la pression des adventices par rapport aux cultures pures de légumineuses (Bedoussac, 2018), cet effet n'est pas systématique. Cette maîtrise des adventices est surtout liée à la capacité d'implantation et de développement du couvert végétal cultivé. Il y a ainsi une dépendance du choix d'espèces et des densités, des conditions pédoclimatiques et de l'itinéraire technique mis en place.

- **Gestion de la récolte, du tri et du stockage**

La récolte, le tri et le stockage sont très importants puisqu'ils déterminent le rendement commercialisable. Sur ces étapes, plusieurs difficultés peuvent apparaître. Tout d'abord, la date de récolte peut être difficile à positionner dans le cas où la maturité des espèces serait asynchrone. Une pré-fauche peut être pratiquée mais le choix de cette technique reste difficile et coûteux (Lucas et Le Bihan, 2022). Cette récolte peut également être complexe d'un point de vue technique si le couvert végétal est versé (Bedoussac *et al.,* 2022 ; Tooker et Frank, 2012).

L'étape de tri requiert également un matériel adapté, un lieu de tri proche de l'exploitation ou encore du temps et des compétences s'il est réalisé par les producteurs (Bedoussac *et al.,* 2022). Cette étape permet de séparer les espèces récoltées, d'éliminer les impuretés présentes ou les grains non conformes. Lorsque les graines cultivées ont des tailles similaires, telles que l'avoine et la lentille, le tri peut s'avérer complexe (W-SoLent, 2023). Si l'agriculteur souhaite valoriser les deux espèces, cela implique de séparer les deux espèces récoltées, mais également d'effectuer un tri spécifique pour chacune d'elles, ce qui augmente les coûts. Enfin, cela nécessite des volumes de stockage supplémentaires pour accueillir le mélange avant tri ainsi que les lots et les fractions obtenus après les différentes étapes de tri.

1.2.2.6. Performance économique

Les mélanges d'espèces offrent des avantages économiques au travers de la double production et/ou de la stabilisation des rendements et/ou de la qualité des grains. Dans le cas d'un mélange céréale-légumineuse, la perte de rendement des céréales par rapport aux cultures pures peut être compensée par un taux protéique plus élevé des céréales et la valorisation de deux cultures. Cependant, cette performance économique est fortement dépendante des prix de vente des productions (Bedoussac, 2018) et pose la question de l'évaluation de la performance économique des mélanges à l'échelle*, a minima,* de parcelle et de l'itinéraire technique.

Tableau 2 : Récapitulatif des mélanges d'espèces, caractéristiques des parcelles et objectifs des agriculteurs

Agriculteur	Espèce (variété)	Densité semée (kg/ha)	Surface (ha)	Type de sol	pH	Précédent cultural n-1	Disponibilité en N	Objectifs de l'agriculteur
AM	**Lentille** (Anicia) **Cameline** (Zuzana)	100 (260 graines/m² visées) 2	1	Sablo ou limono-argilo calcaire (séchant, drainant, sol peu profond)	8	Tournesol	Faible	1. Double production lentille (10 q/ha) + cameline 2. Limiter la verse de la lentille (rôle tuteur cameline) 3. Limiter les adventices
	Pois (Galloway) **Orge** (Planet)	100 (80 graines/m² visées) 30 (75 graines/m² visées)	1		8,3	Avoine puis couvert (avoine, féverole, trèfle, radis)	Moyenne	1. Produire du pois (20 q/ha) 2. Limiter la verse (rôle tuteur orge : 5 q/ha) 3. Couverture du sol pour limiter les adventices
FB	**Lentille** (Anicia) **Cameline** (Zuzana)	140 (400 graines/m² visées) 0,8	4	Limono- sableux (parcelle drainée)	7	Tournesol	Faible	1. Produire des lentilles 2. Limiter la verse de la lentille (rôle tuteur cameline)
	Pois (Karioka) **Orge** (I*)	210 (90 graines/m² visées) 10 (30 graines/m² visées)	2,5	Limono- sableux (hydromorphe)	7	Blé puis couvert (seigle, féverole, phacélie, radis)	Moyenne	1. Produire du pois 2. Limiter la verse du pois et l'enherbement
PA	Pois (Paddle) **Petit épeautre** (Alkor)	108 53	3,8	Sablo-argileux (20 % argile, drainant)	7-8	Tournesol	Faible	1. Double production (priorité petit épeautre) et plus-value 2. Limiter la verse du pois 3. Limiter les maladies
	Lentille (Anicia) **Cameline** (Zuzana)	105 2	4 0,5	Sablo-argileux (tuf)	6-7		Faible	1. Limiter la verse de la lentille (rôle tuteur de la cameline) 2. Produire de la lentille
	Lentille (Itaca) **Cameline** (Zuzana)	83 2	1	Sableux (tendance hydromorphe)	6-7	Petit épeautre	Faible	
TL	**Lentille** (Anicia)/ **Cameline** (Zuzana)	100 1,8	1 1	Argilo-calcaire (beaucoup de pierres)	8,4	Blé/féverole puis couvert (radis chinois, trèfle alexandri, colza, phacélie, fenugrec, féverole, niger, vesce, seigle)	Faible	1. Produire de la lentille (10 q/ha) 2. Gestion des bruches *3. Tout est un objectif : limiter la verse, les adventices, ravageurs etc.*
VT	**Lentille** (Anicia) **Orge** (I*)	100 25	2,48 0,97	Limono- argileux (terres fortes)	/	Sarrasin	Faible	1. Produire de la lentille (10 q/ha minimum) en limitant la concurrence avec l'orge 2. Limiter la verse

I : Inconnu*

Le prix de vente des cultures conditionne cette performance économique. En AB, le prix moyen pondéré de la lentille est d'environ 1400 €/t (Smadja *et al.*, 2025) avec une baisse constatée de 266 €/t entre 2019 et 2023. Le prix moyen du pois AB en circuit long est d'environ 500 €/t (Smadja *et al.*, 2025). Cependant, ces prix de vente ne suffisent pas à déterminer la performance économique qui dépend des rendements et des coûts de production.

Les mélanges avec légumineuses permettent dans 80 % des cas, de dégager une marge brute supérieure à celle des cultures pures, uniquement si les mélanges sont bien triés (Bedoussac *et al.*, 2015). Dans le cas de l'étude de Viguier *et al.* (2018), étudiant les mélanges lentille-blé, la marge brute commercialisable moyenne des mélanges était de 949±404 €/ha contre 688±393 €/ha en lentille pure. Dans l'étude de Bedoussac *et al.* (2015), la marge brute des mélanges légumineuses-céréales était plus élevée qu'en culture pure avec 702 €/ha contre 577 €/ha. Cette étude de Bedoussac *et al.* (2015) a également permis de montrer une variabilité des marges brutes des mélanges de +/-335 €/ha, soit moins que les cultures pures de légumineuses (+/-493 €/ha), mais plus que par rapport aux cultures pures de céréales (246 €/ha). *In fine,* elle est légèrement supérieure à la moyenne des cultures pures (302 €/ha).

Comme pour les cultures pures de légumineuses, l'intérêt économique des mélanges avec légumineuses peut être indirect au travers de la fixation d'azote et de la restitution à la culture suivante. Par exemple, à la suite d'un pois, le blé semé par la suite aura un meilleur rendement et une meilleure teneur en protéine, comparé à un blé de paille, toutes choses égales par ailleurs (Terres Inovia, 2025a). La maîtrise des adventices peut également avoir un effet indirect en réduisant les charges matérielles et opérationnelles liées au désherbage.

1.2.2.7. Evaluation des mélanges d'espèces

L'évaluation des mélanges d'espèces peut-être agronomique, écologique ou économique. Dans le cadre de ce mémoire, la méthode utilisée s'inspire de l'évaluation des expérimentations systèmes, à savoir la capacité de différents systèmes de cultures ou itinéraires techniques à satisfaire des objectifs définis, en tenant compte des contraintes propres à chaque système. L'évaluation permet de juger avant ou après la mise en place de l'expérimentation et peut se faire au regard de différents aspects : (1) faisabilité technique, (2) résultats techniques et agronomiques, (3) diagnostic agronomique, (4) évaluation multicritères des performances. Notons que dans le cas présent nous n'avons pas conduit d'évaluation des itinéraires techniques avant leur mise en place.

La démarche d'expérimentation système peut se penser sur 6 étapes : (1) diagnostic et cadrage de l'expérimentation, (2) conceptions de systèmes de cultures candidats, (3) construction de l'expérimentation, (4) mise en oeuvre des systèmes de culture et de l'expérimentation, (5) évaluation et analyse, (6) valorisation. Dans le cas de ce rapport, seules les étapes 4 et 5 sont prises en compte avec une évaluation faite au travers d'un diagnostic agronomique en lien avec les objectifs visés par les producteurs pour chacun des mélanges.

1.3. Contexte du stage, problématique et hypothèses

1.3.1. Projet IntercropVALUES

L'étude présentée dans ce mémoire s'intègre dans le projet européen IntercropVALUES (2022-2026) qui vise à « développer les cultures associées pour améliorer les chaînes de valeur agroalimentaires et la fourniture de services écosystémiques en Europe et dans les pays du Sud ». Ce projet s'appuie sur une approche multi-acteurs (27 participants issus de 15 pays différents) et sur 13 cas d'étude, appelés CICS (Co-Innovation Case Studies) dont le CICS10 qui concerne mon stage et qui à fait l'objet d'un stage précédent en 2024 réalisé par Margot Petit.

1.3.2. CICS10

Le CICS10, coordonné par l'Union des CUMA des Pays de la Loire (UCPDL), l'INRAe et le GABB Anjou, trouve son origine en 2020 suite à l'initiative de l'UCPDL de questionner l'approvisionnement de la restauration collective angevine avec des productions locales, nécessitant plusieurs producteurs et la création d'un outil de transformation.

Modèle trame d'entretien

Informations générales :

- Date de l'entretien :
- Personne interviewée :
- Raison sociale de l'exploitation :
- Adresse :
- Associé(e)s :
- Année d'installation :

Système de production et débouchés :

- 100 % bio (ou sinon SAU bio) ? depuis quand ?
- OTEX :
- SAU totale de l'exploitation :
- Productions principales :
- Débouchés (avec le pourcentage s'ils l'ont. ex : 50% du CA en vente directe…) :
- Matériel (100% autonome, CUMA ou copropriété, presta?) + précisez type d'outils concernés/utilisés pour le projet cultures associées légumineuses pour le tri (marque et modèle) et moissonneuse batteuse (marque et modèle) :

Objectifs (à hiérarchiser) : à définir avec les producteurs

1. ex : produire de la lentille
2. …
3.

ITK prévisionnel **ITK réalisé**	**Espèce 1**	**Espèce 2**	**Remarques**
GENERALITES			
Coordonnées GPS parcelle			
Surface parcelle (ha)			
Type de sol			
pH moyen			
Précédents culturaux (n-1)			
Principales caractéristiques de la parcelle (cailloux, pente, profondeur, drainant, séchant, hydromorphe)			
Environnement de la parcelle (https://appli.itsap.asso.fr/app/01-beegis)			
Disponibilité en N (faible / moyenne / forte)			
PREPARATION			
Labour / TCS / Faux semis…(en précisant quand et si besoin quel matériel et quelle profondeur)			
SEMIS			
Variétés			
Densité en nombre de grains / m² (à défaut en kg/ha)			
Date de semis			
Nombre de passages (et type de semis : croisé, en ligne, à la volée ?)			
Semoir utilisé (modèle et profondeur semis)			
Inter-rang			
Préparation mélange (Oui/Non), si oui comment + si huile utilisée quel type et quantité			
Test de germination : Oui/Non et si oui quel résultat ?			
ADVENTICES			
Date d'intervention (culture) et outil			
Adventices principales			
Efficacité de désherbage : très bonne, bonne, assez faible, très faible			
FERTILISATION/AMENDEMENTS			
Date et stade de la culture			
Type d'apport (fumier, lisier, compost…)			
Quantité			
Matériel utilisé (épandeur à fumier, pendillard..)			

Figure 7 : Modèle de la trame d'entretien

Après plusieurs mois d'échanges, c'est la transformation de lentilles biologiques qui a été retenue et l'UCPDL s'est alors rapprochée du GABB Anjou pour faire le lien avec les producteurs. De leurs échanges, est ressorti le besoin de sécuriser la production de lentille (élargie aujourd'hui à d'autres légumineuses) via la culture en mélange. En est ressorti le besoin de s'équiper avec un trieur optique en CUMA afin de compléter les chaînes de tri existantes, ainsi qu'un besoin d'engagement de la part de la restauration collective. Ce projet a été retenu dans le cadre du projet IntercropVALUES comme l'un des 13 cas d'études, afin de renforcer les connaissances sur les cultures associées tout en améliorant la chaîne de tri et de stockage, et en diversifiant les débouchés commerciaux pour les producteurs. Cela consiste *a minima* de concevoir des mélanges d'espèces adaptés aux conditions pédoclimatiques et aux objectifs de chaque agriculteur, en impliquant ces derniers dans le processus de conception. Dans le CICS10, des ateliers collectifs permettent le partage des connaissances mais la conception reste individualisée. Actuellement, le CICS10 implique 7 agriculteurs biologiques qui sont adhérents dans des CUMA, membres d'un groupe de producteurs de légumes secs et tous situés à proximité d'Angers.

1.3.3. Objectifs du stage, question de recherche et hypothèses

L'objectif du stage est d'évaluer les mélanges d'espèces avec légumineuses en agriculture biologique dans le réseau d'essais. La conception des différents itinéraires techniques a été réalisée en amont du stage par Laurent Bedoussac (ENSFEA-INRAe UMR AGIR) et Céline Le Gardien (GABB Anjou) avec les producteurs concernés. Ainsi, ce stage se situe dans la phase de suivi des mélanges mis en place et de l'évaluation de ceux-ci. L'évaluation des mélanges d'espèces sera faite au travers d'un diagnostic agronomique en fonction des objectifs des agriculteurs au moyen de divers indicateurs. A noter qu'il a été décidé de ne pas mettre en place de culture pure pour "comparer" la performance des mélanges et ce, en cohérence avec l'approche système exposée précédemment. Ce diagnostic sera également un moyen d'identifier des facteurs ayant influencé la performance des mélanges.

D'après la bibliographie, les échanges avec les producteurs et les porteurs de projet, quelques grands objectifs des mélanges d'espèces ont été identifiés avec en premier lieu la production de légumes secs de qualité (répondant aux critères de commercialisation en alimentation humaine) avec des rendements jugés acceptables, pour garantir une rentabilité économique des mélanges. Cela nécessite donc entre autres de : (1) limiter la verse des légumineuses, (2) limiter la flore adventice, (3) maîtriser les stratégies de récolte, stockage et tri et (4) limiter la présence de bruches.

Ces différents éléments conduisent à formuler la problématique suivante pour ce stage « **Dans quelles mesures les mélanges d'espèces conduits en agriculture biologique en Anjou permettent-ils d'atteindre les objectifs agronomiques visés ?** » et à définir différentes hypothèses (Hx):

- H1 : la biomasse et le rendement d'une espèce en mélange sont négativement corrélés à la biomasse et au rendement de l'autre espèce par effet de compétition
- H2 : la biomasse et le rendement total du mélange sont négativement corrélés à la biomasse d'adventices par effet de compétition
- H3 : l'espèce associée joue le rôle de tuteur pour la légumineuse ce qui permet de limiter la verse et cet effet de tuteur est positivement corrélé à la biomasse de l'espèce associée
- H4 : la pré-fauche suivie d'un traitement des lots par congélation ou asphyxie permet de limiter le taux de grains bruchés et donc les pertes de rendement
- H5 : la congélation ou l'asphyxie permettent de réduire avec une efficacité comparable le taux de grains bruchés et donc les pertes de rendements

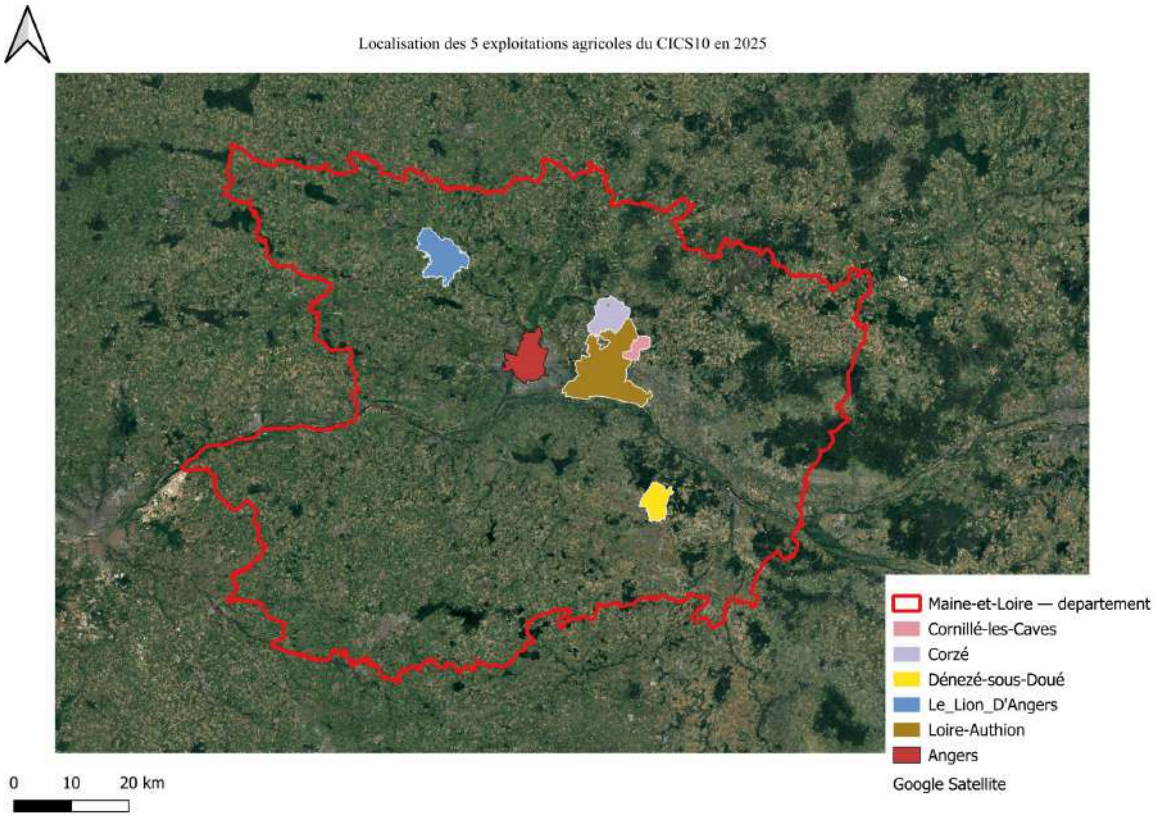


Figure 8 : Carte de localisation des exploitations agricoles du CICS10

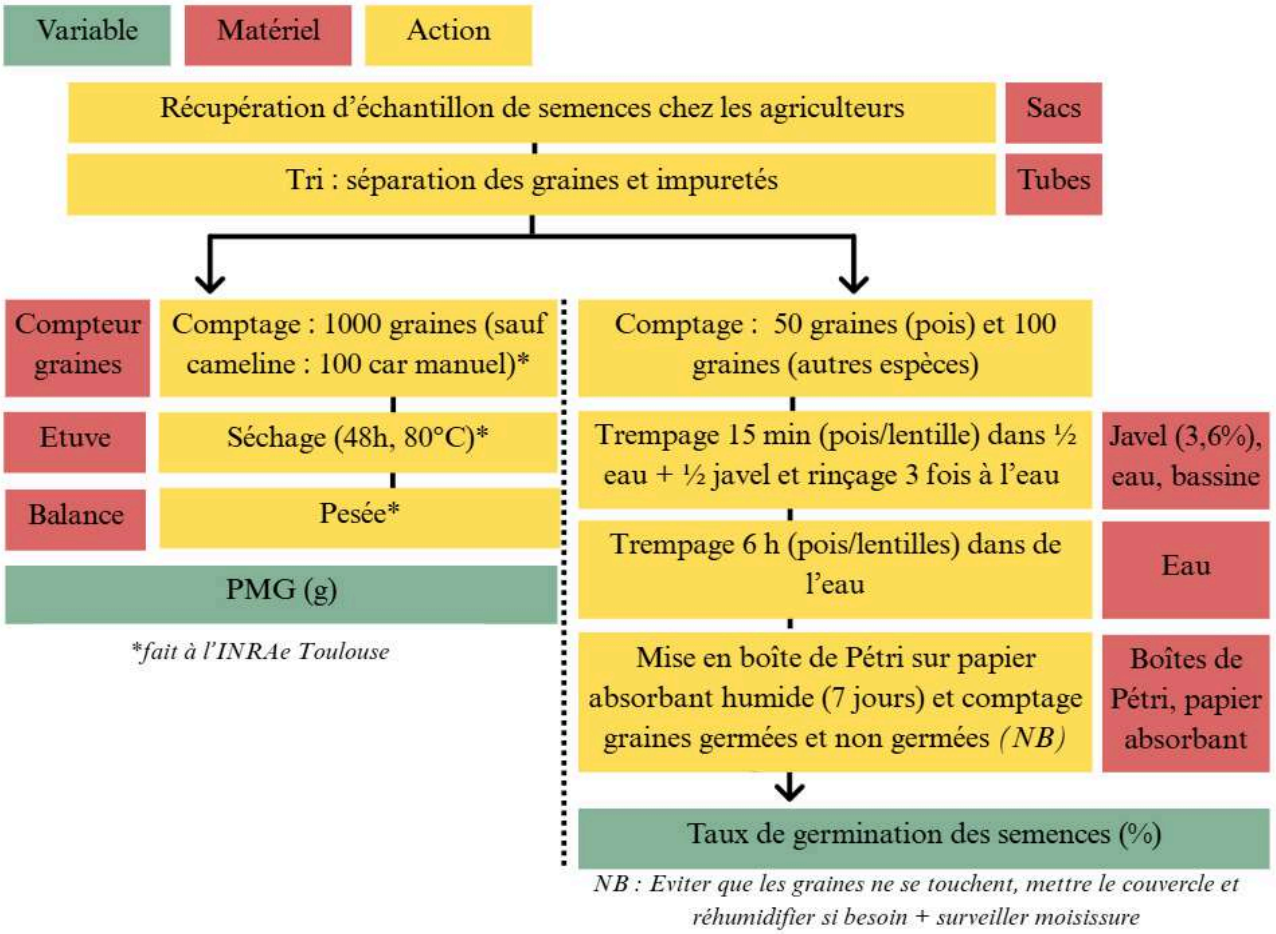


Figure 9 : Protocole de mesure du PMG et du pourcentage de germination des semences

2. Matériels et Méthodes

2.1. Sites d'études et ITK

En 2025, 5 agriculteurs biologiques (AM, FB, PA, TL, VT) du CICS10 ont mis en place des associations d'espèces. Au total, 17 parcelles, de 0,5 à 4 ha ont été cultivées en mélange avec 2 à 3 espèces associées. Dans le cas de cette étude, 12 parcelles ont fait l'objet d'un suivi (Tableau 2), à savoir : 6 de lentille verte/cameline (Lv/C), 1 de lentille corail/cameline (Lc/C), 2 de lentille verte/orge (Lv/O), 2 de pois/orge (P/O) et 1 de pois/petit épeautre (P/E).

Des entretiens semi-directifs d'une à deux heures ont été réalisés avec chaque agriculteur à l'aide d'une trame (Figure 7). Le but de ces entretiens était de collecter des informations sur les ITK mis en place et les objectifs visés. Principalement, il s'agissait de faire un point sur la situation de l'exploitation : SAU, année d'installation et de conversion en AB (si connu), productions principales, débouchés et matériel spécifique à disposition. La seconde partie de l'entretien a permis de collecter les informations relatives aux objectifs du mélange mis en place et aux caractéristiques de la parcelle : localisation des parcelles (Figure 8), surface, type de sol, pH, précédent cultural, caractéristiques de la parcelle et de son environnement ainsi que la disponibilité en azote estimée (faible, moyenne ou élevée). Ensuite, nous avons abordés les étapes techniques relatives au travail du sol (technique et profondeur si labour, matériel, date), au semis (variétés, densités, date, matériel, type de semis et test de germination), au désherbage mécanique (date, matériel) et à la fertilisation le cas échéant (date, type d'apport et quantité). Ce document a été complété au fur et à mesure de la campagne par des échanges téléphoniques ou sur le terrain. Ces informations ont permis de reconstituer les (ITK) mis en place, ce qui donnera à voir les différences de pratiques et de les mettre en lien avec les résultats observés. A noter que les ITK mis en place sont parfois différents des prévisionnels co-conçus avec Laurent Bedoussac et Céline Le Gardien en février 2025. Cela en raison des conditions climatiques météorologiques au moment des semis, de contraintes relatives à l'approvisionnement en semences ou encore de la crainte d'un manque de débouché commercial.

2.2. Variables et indicateurs du diagnostic agronomique

2.2.1. PMG et pourcentage de germination des semences

Un échantillon des semences utilisées par les agriculteurs a été mis à l'étuve 48h à 80°C puis pesées pour déterminer le PMG à 0 % d'humidité ($PMG_{Semence_0\%}$) sur 300 à 1000 graines pour la lentille, 262 à 310 graines pour le pois, 300 graines pour la cameline, 393 à 508 graines pour l'orge et 302 graines pour le petit épeautre.

Le pourcentage de germination des semences (%Germ) a été déterminé sur 3 répétitions de 50 graines pour les pois et de 100 graines pour les autres espèces (Figure 9). Les graines de légumineuses ont été rincées 15 min à l'eau de javel à 1,8% afin de limiter le développement de pathogènes puis rincées 3 fois à l'eau et mises à tremper 6 h dans l'eau. A noter que de nombreux essais ont été réalisés au préalable pour aboutir à ce protocole (Annexe I). Les graines ont été placées individuellement dans des boîtes de Pétri sur un papier absorbant humidifié et maintenu humide pendant les 7 jours de l'expérimentation. Les boîtes de pétri ont été fermées avec leur couvercle et placées sur le rebord d'une fenêtre. Dès lors, elles ont été soumises aux conditions lumineuses naturelles et à une température proche de 20°C sans régulation par climatisation ou chauffage. Une observation quotidienne a été réalisée pour suivre l'avancée de la germination et retirer les graines moisies afin de limiter les contaminations. Les graines germées (apparition d'un radicule de plus de 1 mm) ont été comptées chaque jour et retirées de la boîte.

2.2.2. Densités semée, potentielle et levée

La densité du peuplement est une variable essentielle pour comprendre le fonctionnement et la performance des mélanges qui dépend entre autres de la densité semée et du taux de germination des semences.

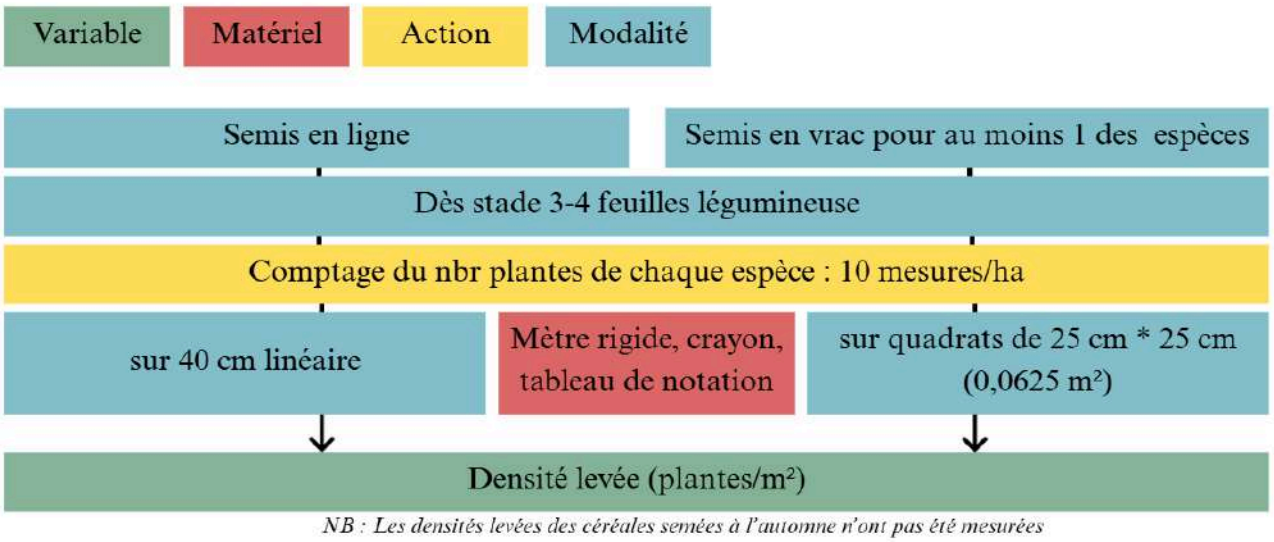


Figure 10 : Protocole de mesure de la densité levée des espèces

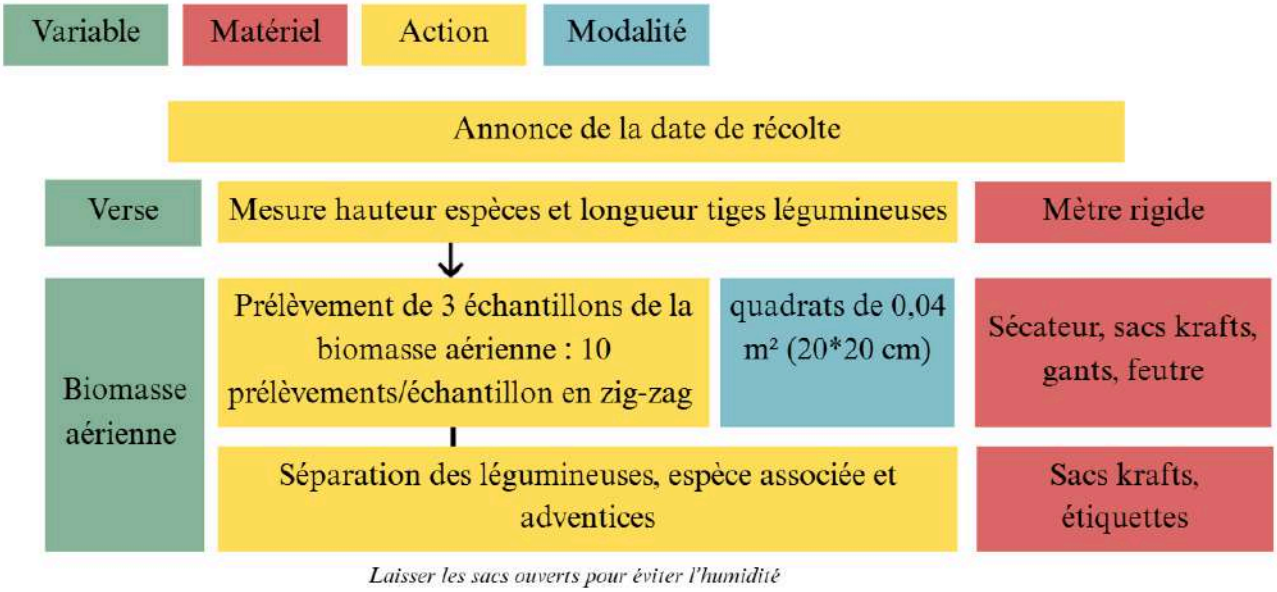


Figure 11 : Protocole de mesure de la hauteur, longueur des plantes et prélèvements de biomasse aérienne sur les parcelles

La densité semée, indiquée par les agriculteurs en kg/ha ($D_Semée_{kg/ha}$), a été traduite en grains/m² ($D_Semée_{grain/m²}$) à partir du $PMG_{Semence_12\%}$:

$$D_Semée_{grain/m²} = D_Semée_{kg/ha} / PMG_{Semence_12\%} * 100 \quad \text{EQ1}$$

Ne connaissant pas l'humidité des semences au semis, une valeur moyenne de 12 % a été utilisée pour recalculer le $PMG_{Semence_0\%}$ et ainsi éviter une sous-estimation de la densité semée :

$$PMG_{Semence_12\%} = PMG_{Semence_0\%} / (1 - 12\ \%) \quad \text{EQ2}$$

Notons qu'en absence de semence pour un agriculteur donné, nous avons utilisé le $PMG_{Semence_12\%}$ moyen et le %Germ moyen des semences de la même espèce utilisées par les autres agriculteurs.

La densité potentielle ($D_Pot_{plante/m²}$), exprimée en plantes/m², a été calculée comme le produit entre la densité semée ($D_Semée_{grain/m²}$) et le %Germ :

$$D_Pot_{plante/m²} = D_Semée_{grain/m²} * \%Germ \quad \text{EQ3}$$

La densité levée ($D_Levee_{plante/m²}$) a été mesurée (Figure 10) autour du stade 3-4 feuilles de la légumineuse à raison de 10 mesures/ha soit sur 40 cm linéaire pour les semis en ligne soit sur des quadrats de 25 cm * 25 cm lorsqu'au moins une des deux espèces a été semée à la volée selon un plan d'échantillonnage en zig-zag (Annexe II).

2.2.3. Croissance aérienne des espèces : hauteur et verse

Le pourcentage de verse des légumineuses (%Verse) a été calculé soit : (1) à partir de la hauteur maximale et à maturité (H_{Max} et H_{Mat}) selon l'EQ4 ($\%Verse_{Haut}$), soit (2) à partir de la hauteur et de la longueur des tiges à maturité (L_Tige_{Mat}) selon l'EQ5 ($\%Verse_{Tige}$) de Viguier (2018).

$$\%Verse_{Haut} = (H_{Max} - H_{Mat}) / H_{Max} \quad \text{EQ4}$$

$$\%Verse_{Tige} = (L_Tige_{Mat} - H_{Mat}) / L_Tige_{Mat} \quad \text{EQ5}$$

La hauteur a été mesurée (Figure 11) à différents stades de développement de la légumineuse (3–4 feuilles, 5–6 feuilles, 7–8 feuilles, élongation de la tige principale, apparition de l'inflorescence, floraison, développement du fruit, remplissage des gousses, début de maturité, maturité physiologique et maturité à la récolte) à raison de 10 à 20 plantes par parcelle à chaque stade. A noter que les mesures n'ont pas pu être faites à tous les stades sur toutes les parcelles (voir détail en Annexe III). La hauteur a été mesurée avec un mètre rigide placé le long de la tige principale et jusqu'au sommet des pousses sans étirer la plante alors que pour L_Tige la plante a été étirée.

2.2.4. Production des espèces : biomasse et rendement

La biomasse aérienne de chaque parcelle a été prélevée juste avant la récolte à raison de 3 répétitions constituées de 10 prélèvements de 20 cm*20 cm réalisées selon un échantillonnage en zig-zag pour une bonne représentativité de la parcelle (Figure 11). Les espèces et adventices de chaque échantillon ont été séparées et conservées à température ambiante dans des sacs kraft non fermés pendant 18 à 37 jours. Les échantillons ont ensuite été traités selon le protocole décrit dans la Figure 12 dans laquelle est précisé la marque et le réglage des machines utilisées.

- Les adventices ont été mises 48 h à 80°C puis pesées pour déterminer la matière sèche ($MS_{Adventice}$).
- Les légumineuses ont été mises 24h à 80°C puis les grains ont été séparés des pailles à l'aide d'une batteuse fixe pour la lentille et manuellement pour le pois. Les grains ont ensuite été passés à la colonne à air puis les échantillons remis 24h à l'étuve à 80°C.
- La cameline a été placée 48h à 80°C avant de séparer manuellement les graines qui ont ensuite été passées au tamis (1.7 * 20 mm oval puis 2.5 mm rond) puis à la colonne à air.
- L'orge et le petit épeautre ont été mis 24h à l'étuve à 80°C puis les épis ont été coupés à leur base puis battus à la batteuse fixe et frottés à la main pour casser les barbes. Les grains ont été passés à la colonne à air puis remis, tout comme les pailles, 24h à l'étuve à 80°C.

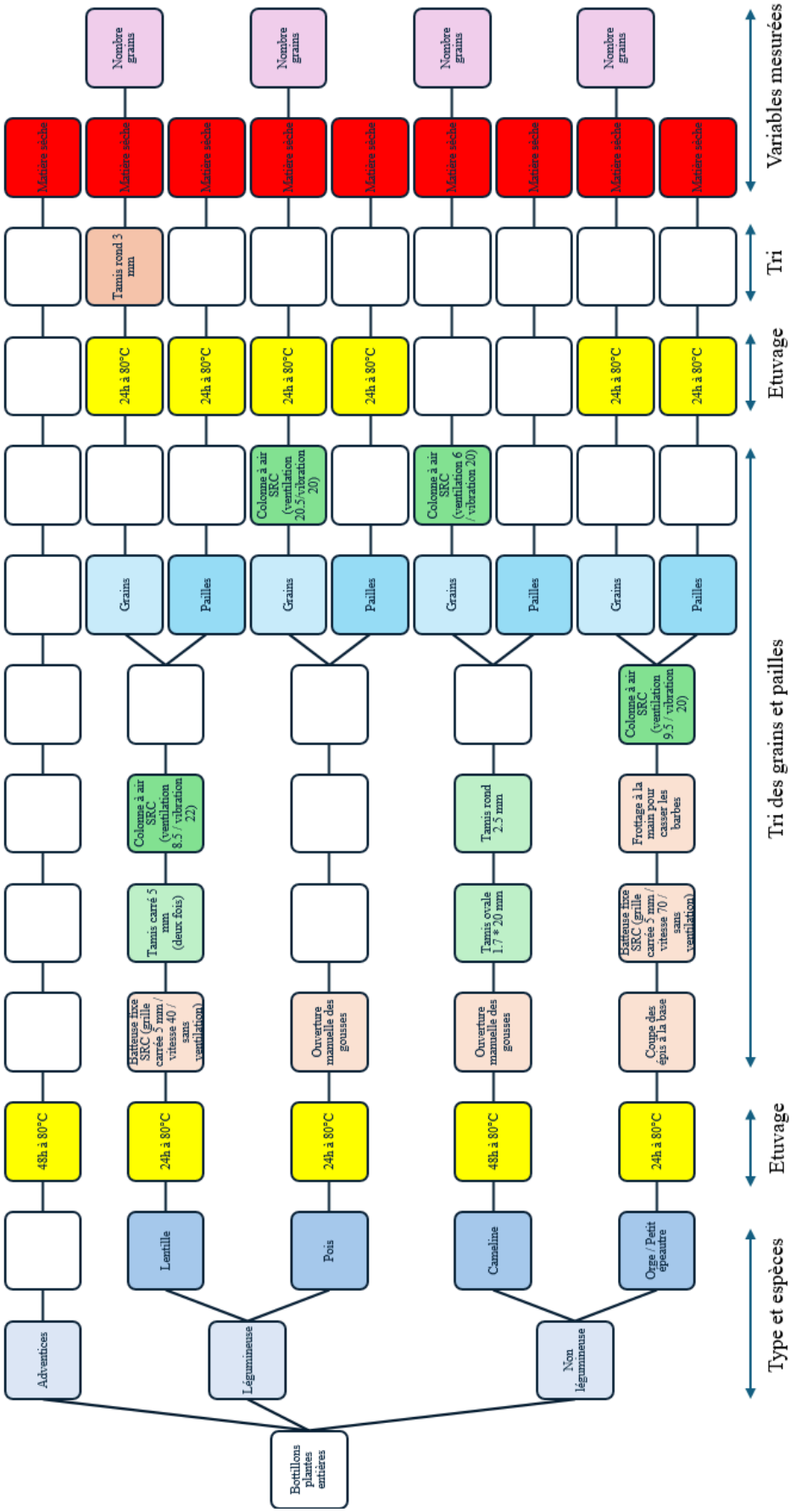


Figure 12 : Protocole de traitement des biomasses aériennes prélevées dans les parcelles, à l'INRAe de Toulouse pour déterminer la masse sèche et le nombre de grains de chaque espèce du mélange (schéma réalisé par L. Bedoussac)

Tous les échantillons de grains et de pailles de chaque espèce ont été pesés après 48h à l'étuve à 80°C puis le nombre de grains à été mesuré au compteur à graines, sauf pour la cameline pour laquelle nous avons utilisé une reconnaissance optique (OPTOmachines). Enfin le PMG a été calculé ($PMG_{Botillon}$). Les grains séparés pour chaque espèce ont permis de déterminer le rendement net des botillons ($Rdt_Net_{Botillon}$) en t/ha, et le taux de grains bruchés ($\%GB_{Botillon}$) sans impuretés mais avec les grains cassés et bruchés.

2.2.5. Rendement sortie de moissonneuse-batteuse

Des échantillons de grains ont été collectés à la récolte en sortie de moissonneuse-batteuse, à raison de 3 prélèvements, qui ont ensuite été réunis pour constituer un échantillon unique par parcelle. Selon les agriculteurs, ces prélèvements ont été faits soit lors de la vidange de la trémie, soit dans la benne, soit après un premier tri. Ces prélèvements ont été effectués par prise de poignées de grains, réunies dans un même sac plastique. Ils ont ensuite servi à déterminer : (1) la composition du mélange en sortie de moissonneuse ou de tri (échantillon de 0,05 à 2,6 kg), (2) le PMG des grains récoltés ($PMG_{Moisson}$) ainsi que (3) le taux de grains bruchés ($\%GB_{Moisson}$).

Les agriculteurs ont fourni des données concernant la masse totale récoltée avant ou après tri ($Rdt_Brut_{Moisson}$), masse comprenant des impuretés et grains (cassés, bruchés et entiers). Sur la base des échantillons collectés nous avons ainsi calculé le rendement net ($Rdt_Net_{Moisson}$) constitué uniquement de la masse des grains (entiers, cassés, bruchés, …).

2.2.6. Taux de grains bruchés des légumineuses

Le taux de grains bruchés des légumineuses (%GB) a été estimé (Figure 13) à la fois sur les échantillons en sortie de moissonneuse-batteuse ($\%GB_{Moisson}$) et sur les botillons ($\%GB_{Botillon}$). Dans le cas des échantillons prélevés en sortie de moissonneuse-batteuse, un sous-échantillon a été laissé à l'air libre, un autre à été congelé à -18°C pendant 10 à 31 jours et un autre à été mis sous vide (Reber 9340N) pendant 10 à 25 jours. Pour chaque modalité (congélation, asphyxie, air libre), 3 lots de 100 graines ont été extraits et les grains bruchés ont été déterminés par écrasement. A noter que dans le cas de la lentille les grains ont été au préalable écrasés à la main sur un tamis rond de 2 mm. Le nombre de grains non bruchés à été déterminé au compteur à graines puis les fractions de grains bruchés et non bruchés ont été pesées afin de calculer le PMG des grains bruchés (PMG_Bruche), non bruchés (PMG_Non_Bruche) et *in fine* le %GB selon l'équation suivante :

$$\%GB = Nb_Grains_Bruche / Nb_Grains_Total * 100 \quad \text{EQ6}$$

Notons que pour les échantillons moissonneuse, le PMG non bruché ($PMG_Non_Bruche_{Moisson}$) correspond à la moyenne des PMG des trois modalités (congélation, asphyxie et air libre).

2.2.7. Pertes à la récolte

Des pertes de rendement peuvent avoir lieu au moment de la récolte que nous avons cherché à quantifier sur deux parcelles de lentille verte/cameline cultivées côte à côte chez TL et récoltées de façon différente : (1) 0,7 ha récoltée en coupe directe et (2) 1,8 ha récoltée après une pré-fauche.

Pour évaluer les pertes à la récolte, des pots ont été enterrés dans chacune des parcelles avant la récolte et récupérés après celle-ci afin de comptabiliser le nombre de graines tombées au sol (Nb_Grain_{Pots}) à raison de : (1) 10 pots répartis en 10 zones sur la parcelle en coupe directe soit une surface équivalente ($Surface_{pots}$) de 0,023 m² et (2) 13 pots répartis en 8 zones sur la parcelle pré-fauchée soit une surface équivalente ($Surface_{Pots}$) de 0,019 m². Les pertes à la récolte ($Rdt_Perdu_{Moisson}$) ont été calculées de la façon suivante :

$$Rdt_Perdu_{Moisson} = (Nb_Grain_{Pots} * PMG_{Moissons} / 1000) / Surface_{Pots} / 100 \quad \text{EQ7}$$

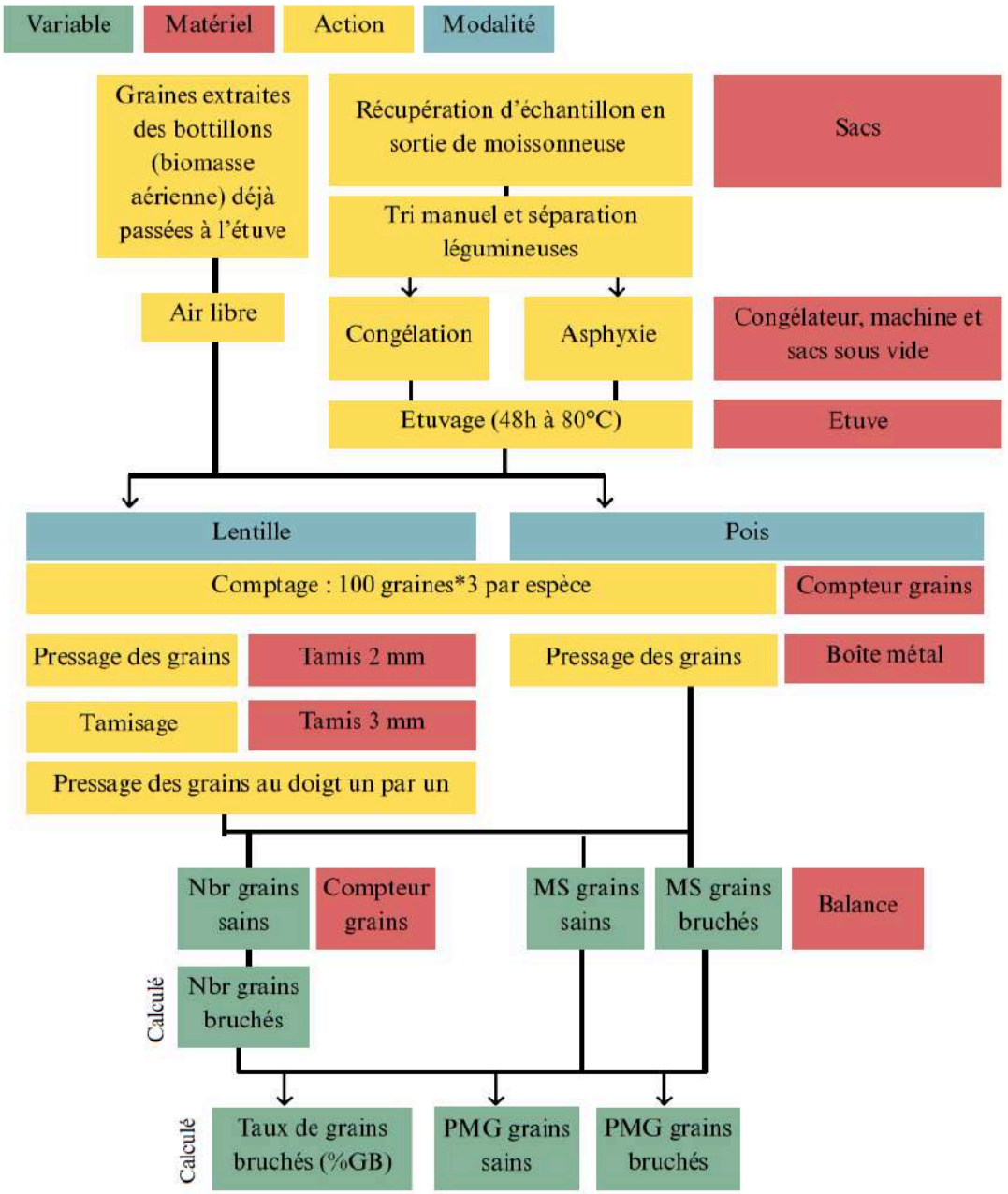


Figure 13 : Protocole de détermination des pourcentages de grains bruchés sur les pois et les lentilles issus des biomasses aériennes prélevées et des échantillons de récolte (fait à l'INRAe de Toulouse)

2.2.8. Rendement théorique et rendement commercialisable

Connaissant le rendement net des botillons ($Rdt_Net_{Botillon}$) et le taux de grains bruchés des botillons ($\%GB_{Botillon}$) on en déduit le rendement théorique ($Rdt\text{-}Th_{Botillon}$) qui correspond au rendement en absence de dégâts de bruches. Nous en déduisons également le rendement commercialisable ($Rdt_Com_{Botillon}$) qui correspond au rendement net sans les grains bruchés, en considérant la masse de grains cassés et ratatinés négligeable :

$$Rdt\text{-}Th_{Botillon} = Rdt_Net_{Botillon} / PMG_{Botillon} * PMG_Non_Bruche_{Botillon} \quad EQ8$$

$$Rdt_Com_{Botillon} = (Rdt_Net_{Botillon} / PMG_{Botillon}) * (1 - \%GB_{Botillon}) * PMG_Non_Bruche_{Botillon} \quad EQ9$$

Nous avons fait de même sur la base du rendement en sortie de moissonneuse-batteuse ou de tri ($Rdt_Net_{Moisson}$) afin de calculer le rendement théorique ($Rdt_Th_{Moisson}$) en absence de dégâts de bruches et de pertes à la récolte. Le rendement commercialisable ($Rdt_Com_{Moisson}$) a été calculé en excluant les grains bruchés et considérant la masse de grains cassés et ratatinés négligeable :

$$Rdt_Th_{Moisson} = (Rdt_Net_{Moisson} + Rdt_Perdu_{Moisson}) / PMG_{Moisson} * PMG_Non_Bruche_{Moisson} \quad EQ10$$

$$Rdt_Com_{Moisson} = (Rdt_Net_{Moisson} / PMG_{Moisson}) * (1 - \%GB_{Moisson}) * PMG_Non_Bruche_{Moisson} \quad EQ11$$

2.3. Analyse des données

Les données ont été traitées à l'aide de RStudio (2024.04.04+748) et des packages ggplot2, dplyr, tidyr, showtext, sysfonts, ggpmisc et gridExtra. Les cartes ont été réalisées sur le logiciel QGIS (3.42.1). Le test de Shapiro-Wilk a été utilisé pour tester la normalité des données avec un niveau de significativité de 0,05. Dès lors que les données suivent la loi normale, des tests statistiques paramétriques ont été réalisés et des tests non paramétriques dans le cas contraire. Pour l'analyse des corrélations, des régressions linéaires simples et des tests de corrélations de Spearman (non paramétrique) ou de Pearson (paramétrique) ont été réalisés. Pour comparer les groupes différents tests ont été utilisés en fonction des conditions : Kruskal-Wallis (non paramétrique) ou Wilcoxon-Mann-Whitney (non paramétrique), comparaison par paires de Wilcoxon (test post hoc non paramétrique).

3. Résultats et discussion

Pour cette analyse des résultats et leur discussion, les mélanges composés de pois et de lentilles ont été séparés en deux groupes. Dans cette partie nous présenterons dans un premier temps, les données du suivi agronomique, en donnant à voir les tendances pour l'ensemble des parcelles et nous tenterons de répondre aux hypothèses. Puis dans un second temps, nous présenterons le diagnostic agronomique individuel par ITK afin de voir si les mélanges mis en place ont permis de répondre aux objectifs et dans quelle mesure.

3.1. Conditions climatiques 2025

Les données climatiques issues de la station de Beaucouzé (près d'Angers) ont été comparées avec les normales saisonnières de la période 1990-2020. Cette saison a été caractérisée par un début d'année pluvieux, notamment en janvier avec 154,4 mm (+84,6 mm*), suivi d'un mois de février proche des normales avec 52,8 mm (-2,4 mm*) et un léger déficit en mars (-24,5 mm*). Du fait de ces conditions, les parcelles ont eu du mal à se ressuyer conduisant à un retardement des semis. A partir d'avril, les températures ont dépassées les normales saisonnières avec +0,7°C* à +3,8°C* et un déficit hydrique persistant a été observé jusqu'en juillet avec des écarts mensuels compris entre -17 et -42,5 mm* (Météo France, 2025). Ces conditions ont conduit à une sécheresse précoce et des stress sur les cultures notamment aux stades de reproduction. A noter que deux agriculteurs du groupe ont irrigué leurs parcelles et ce, à deux reprises.

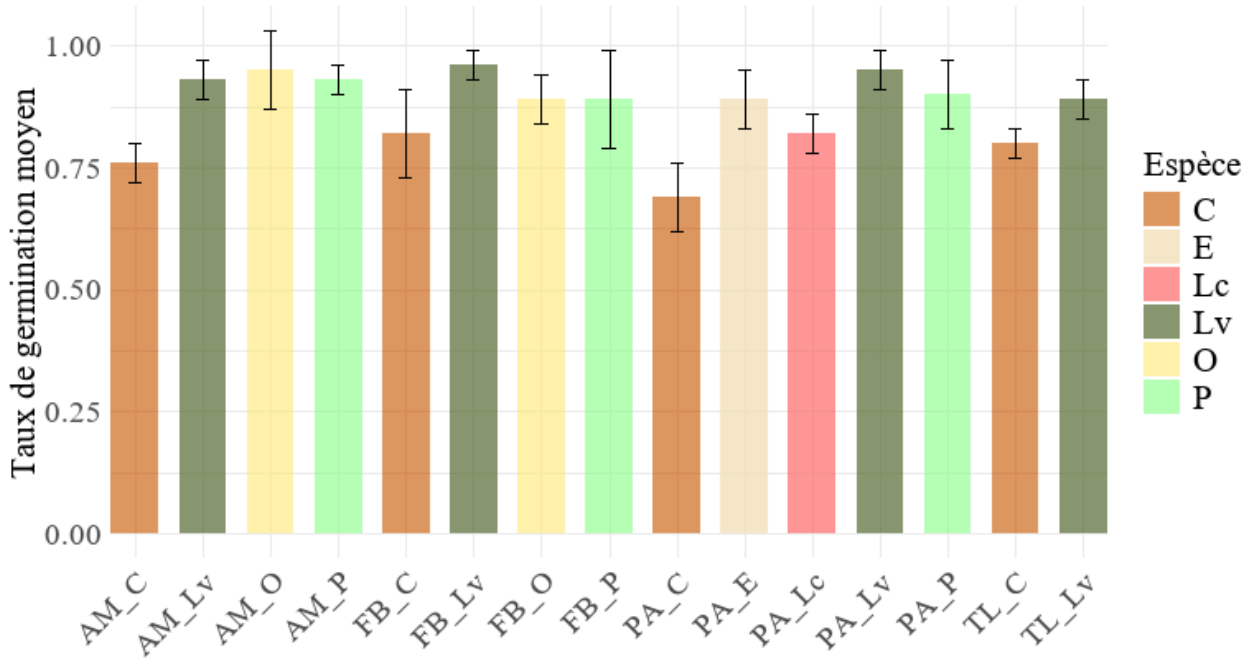


Figure 14 : Pourcentages de germination des semences de lentilles vertes (Lv), lentilles corail (Lc), cameline (C), pois (P), orge (O) et petit épeautre (P) utilisées par les producteurs. Les barres d'erreur correspondent à +/- l'écart-type du taux de germination.

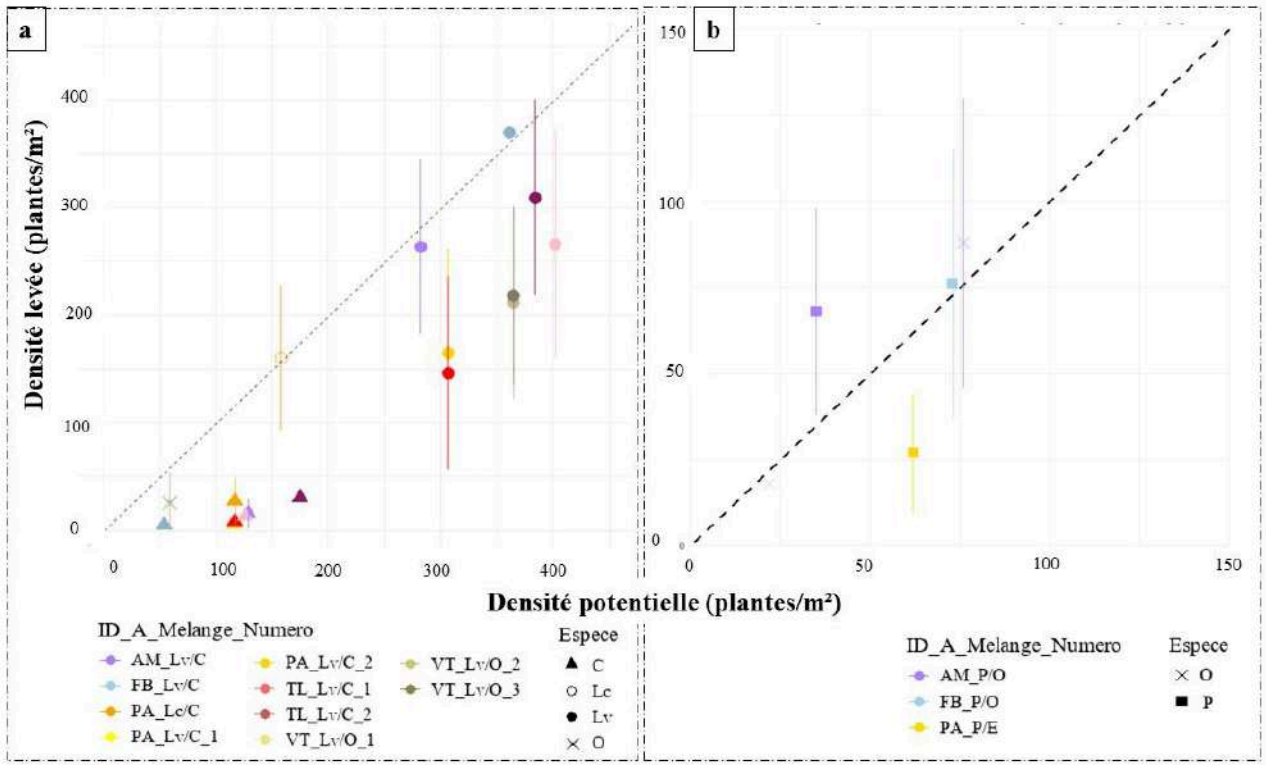


Figure 15 : Densité levée en fonction de la densité potentielle (densité semée corrigée du taux de germination) pour les mélanges d'espèces avec de la lentille (a) et les mélanges d'espèces avec du pois (b). Les barres verticales correspondent à +/- l'écart-type de la densité levée

3.2. Itinéraires techniques et objectifs des producteurs

Les producteurs sont tous des polyculteurs ou polyculteurs-éleveurs en AB qui commercialisent en circuits courts (AMAP, magasins de producteurs, restauration collective, etc.) et avec au moins un atelier de transformation (huile, farine et/ou pain). Ces éléments expliquent en partie le choix des espèces associées visant une double récolte valorisable en vente directe avec ou sans transformation avec comme priorité de produire des légumineuses. A cela s'ajoutent des objectifs inhérents à l'AB tels que la couverture du sol en lien avec la gestion des adventices (Tableau 1).

A l'exception de la parcelle de pois/petit épeautre semée en novembre, les semis ont été réalisés entre le 4 mars et le 15 avril 2025. Les densités semées varient selon les espèces et les choix techniques des agriculteurs : 100–210 kg/ha pour le pois, 100–140 kg/ha pour la lentille, 0,8–2,5 kg/ha pour la cameline, 10–30 kg/ha pour l'orge et 55 kg/ha pour le petit épeautre. Le matériel utilisé diffère également entre agriculteurs expliquant, comme nous le verrons par la suite, des implantations plus ou moins réussies. Il en est de même des techniques de désherbage mécanique, de récolte (directe ou après pré-fauche), de tri et de stockage selon la qualité des productions et les débouchés visés (Annexe IV). Notons que ces éléments relatifs à la qualité des récoltes après tri ne seront pas étudiés dans ce rapport car ces données n'étaient pas totalement disponibles lors de la rédaction de celui-ci.

3.3. Implantation et densités des espèces

L'évaluation de l'implantation du mélange passe par l'analyse des densités levées par rapport aux densités semées et potentielles. La Figure 14 permet de visualiser la variabilité intra-espèces chez les différents agriculteurs. Les taux de germination de la lentille corail sont en moyenne de 82 % et pour la lentille verte de 89 % à 96 %. Les taux supérieurs à 90 % indiquent une bonne qualité germinative des semences fermières en lien avec le seuil de 90% requis pour les semences certifiées de lentille (Augagneur *et al.*, 2021). Pour les pois, qui sont des semences certifiées, le taux varie de 89 % à 93 % soit supérieur au seuil requis de 80 % (FNAMS, 2025). Les céréales ont quant à elles des taux de germination similaires, variant de 89 à 95 %. Ces taux sont cohérents avec le minimum recommandés (85 %) pour les semences fermières céréalières (Arvalis, 2024). Les taux de germination de la cameline sont plus variables et plus faibles (69 à 82 %), alors qu'il s'agit de semences certifiées dont le seuil est 85 %.

Pour l'ensemble des parcelles (Figure 15a), les densités potentielles de lentilles varient de 150 à 402 plantes/m² tandis qu'elles varient de 35 à 73 plantes/m² pour les pois (Figure 15b). Les densités potentielles des espèces associées varient de 54 à 175 plantes/m² pour la cameline (Figure 15a) et 22 à 135 plantes/m² pour les céréales (Figure 15). Les densités levées des lentilles en mélange (Figure 15a) sont quant à elles comprises entre 146 et 370 plantes/m². Hormis les parcelles de PA, les mélanges atteignent les recommandations de 220-250 plantes/m² (Terres Inovia, 2023). A noter que ces références techniques concernent des cultures pures de lentille, qu'elles soient biologiques ou conventionnelles. Nous considérons que les mêmes densités doivent être visées dans le cas d'une culture associée dont l'objectif est de maximiser la production de lentille. La compétition entre les cultures du mélange implique que la culture principale doit être semée, *a minima*, à sa densité optimale, afin d'exprimer pleinement son potentiel. Les densités levées du pois en mélange (Figure 15b) sont comprises entre 27 et 76 plantes/m², ce qui est cohérent, sauf pour PA, avec les recommandations pour les cultures pures biologiques, à savoir 60 plantes/m² (Marguerie, 2017). La densité levée de la cameline est de 6 à 30 plantes/m² (Figure 15a). En pur, pour un semis à 5 kg/ha, il est recommandé de viser 200 plantes/m² d'après Terres Inovia (2024). Ceci suppose que si l'objectif du mélange est également de produire de la cameline, pour un semis de 0,8 à 2,5 kg/ha dans le mélange, il faut viser 32 à 100 plantes/m² de cameline. Or, ces résultats n'ont pas été atteint sur les parcelles (Figures 16a). Les densités levées de l'orge varient de 27 à 88 plantes/m² (Figure 15b et 16b), ce qui ne permet pas d'atteindre les recommandations, qui sont de 90 % de céréales levées (FAO, 2003). A noter que la densité levée du petit épeautre, n'a pas pu être mesurée en raison de son stade de développement avancé (tallage).

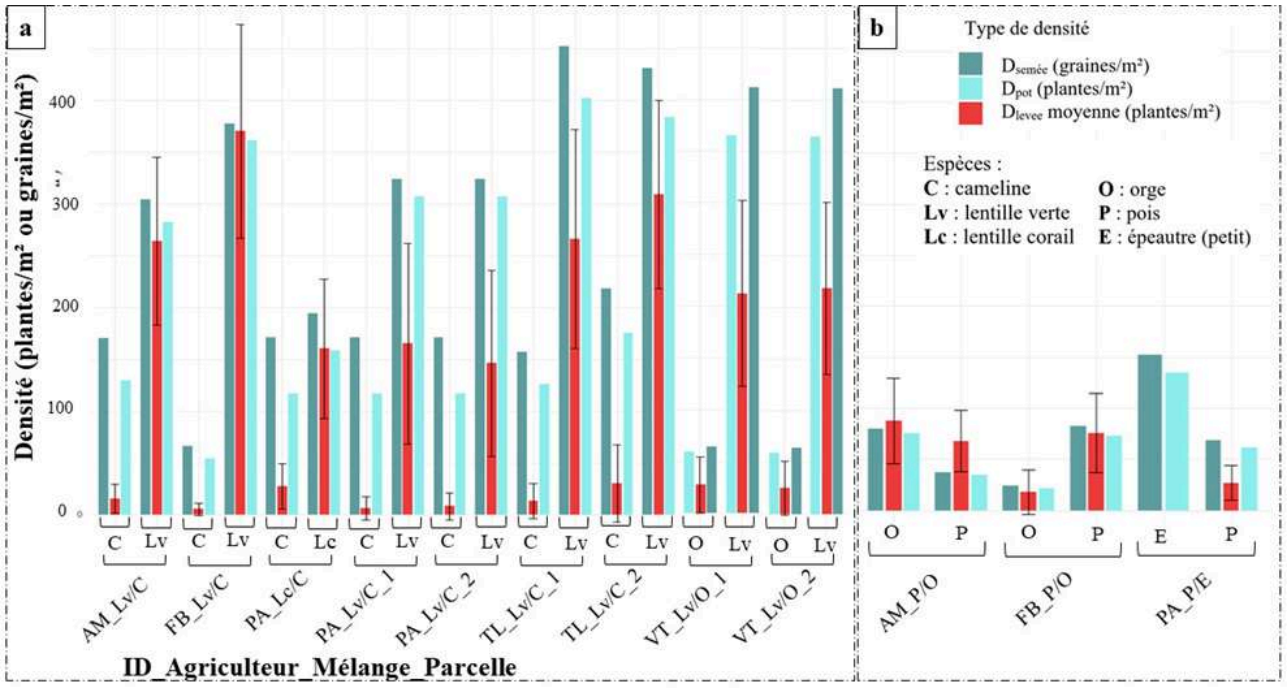


Figure 16 : Densité semée (graines/m²), potentielle (plantes/m²) et levée (plantes/m²) des différentes espèces avec lentille (a) et avec pois (b). Les barres verticales correspondent à +/- l'écart-type de la densité levée

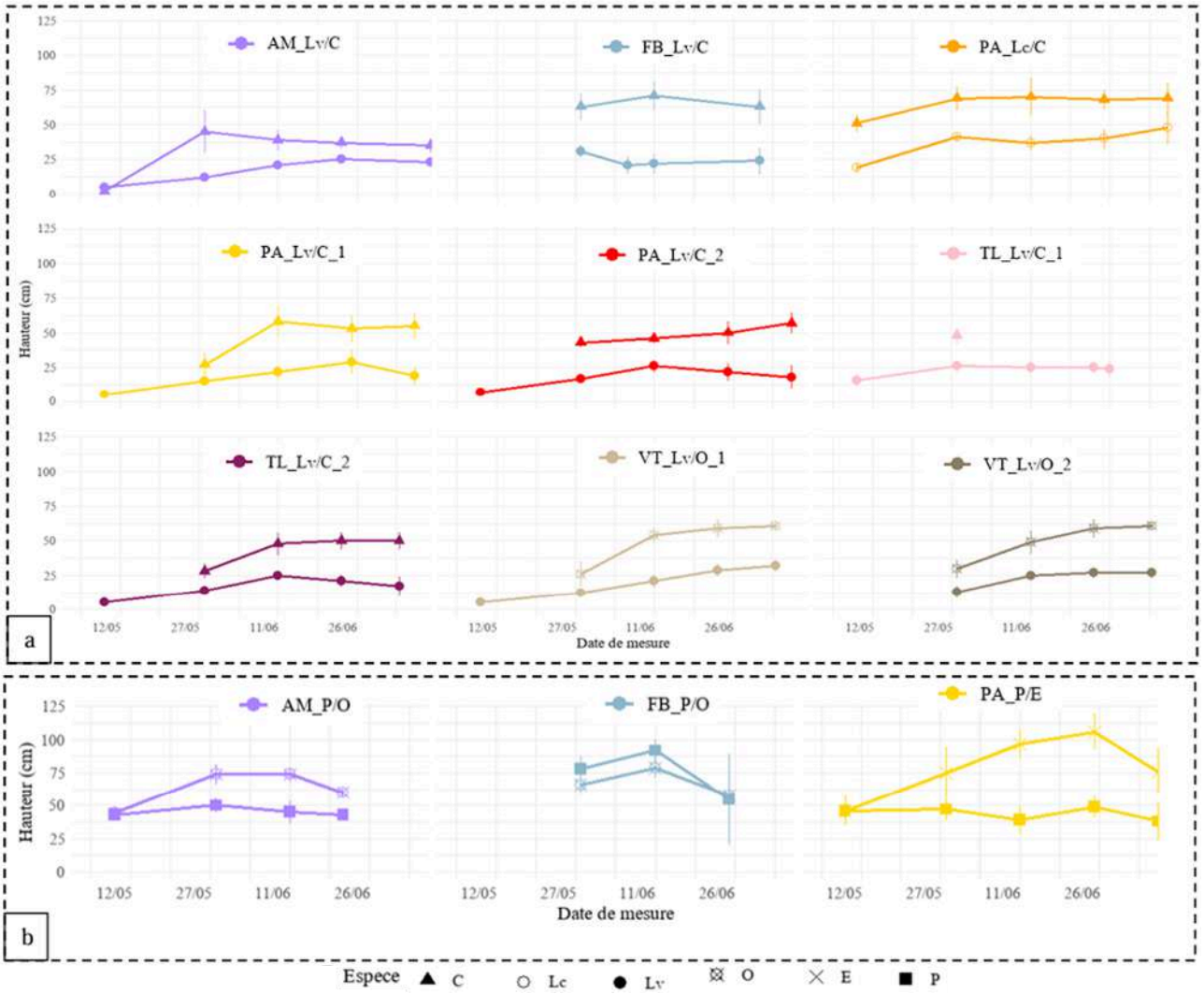


Figure 17 : Hauteur (cm) et écart-type de chaque espèce en fonction de la date calendaire pour les mélanges avec lentilles (a) et avec pois (b)

La densité levée est logiquement inférieure ou égale à la densité potentielle (Figure 15 et 16), avec une forte variabilité entre les parcelles et entre espèces. Cependant, plusieurs espèces (AM_P/O, FB_Lv, FB_P et PA_Lc) présentent des anomalies avec des densités potentielles supérieures à la densité levée, ce qui est impossible. Cela suggère soit une surestimation du peuplement lors des comptages au champ, soit une sous-estimation du pourcentage de germination, soit plus raisonnablement une sous-estimation par l'agriculteur de la densité semée (en kg/ha). A l'exception des espèces présentant des densités incohérentes, les pertes à la levée, calculées entre la densité potentielle et levée, sont comprises entre 6 et 52 % pour les lentilles (n=5), 56 % pour les pois (n=1), 18 et 57 % pour les céréales (n=3), et 77 et 92 % (n=7) pour la cameline. Les pertes supérieures à 50 % permettent de se questionner quant à l'implantation de l'espèce. Le stade levée des lentilles et pois est considéré atteint lorsque 80 % des graines ont levé (Le Bihan, 2022a ; Biarnès, 2019b), ce qui suggère que des pertes proches de 20 % sont tolérables. En revanche, des pertes supérieures à 50 % doivent alerter et traduisent une mauvaise implantation.

Les pertes à la levée pour la lentille sont faibles à élevées et reflètent sa sensibilité aux conditions d'implantation telles que la température du sol, le ressuyage ou la topographie (Riquet et Le Bihan, 2020b). Le pois, pourtant considéré moins sensible, présente également des pertes importantes sur une parcelle du fait de conditions défavorables. Pour les céréales, les pertes sont tolérables à élevée en comparaison des pertes moyennes de 15 % généralement observées (Arvalis, 2024). Enfin, les pertes à la levée de la cameline sont très élevées du fait d'une forte sensibilité à l'implantation et d'une faculté germinative variable. Ces difficultés ont également été observées dans le projet W-SoLent (2023). Se pose ainsi la question de la pertinence d'utiliser cette espèce en tant que plante compagne à la lentille au vu de la difficulté à l'implanter correctement, et ce, malgré l'intérêt de certains producteurs du groupe pour cette culture valorisée sous forme d'huile.

Nos résultats soulèvent des incohérences en lien avec des erreurs de mesure ou des imprécisions des densités potentielles. En effet, ces dernières reposent sur des densités de semis transmises par les agriculteurs, qui sont parfois imprécises. Il pourrait également être pertinent d'effectuer une seconde série de mesures au-delà du stade 3-4 feuilles ou après un désherbage mécanique. Ceci permettrait de détecter d'éventuelles pertes en lien avec la concurrence entre les espèces, une possible attaque de bioagresseurs ou encore un éventuel effet du désherbage mécanique s'il est pratiqué. Ainsi, l'implantation du mélange détermine pour partie sa réussite. La capacité de germination et de levée sont des paramètres cruciaux, influençant directement les composantes de rendement (Meynard et David, 1992). D'autres paramètres influencent la levée tels que les conditions pédoclimatiques ou le PMG. Ce dernier doit être estimé le plus précisément possible dès lors que les agriculteurs calculent la densité de semis en kg/ha et utilisent de la semence fermière, dont le PMG n'est pas quantifié. Enfin, il est essentiel de garder à l'esprit que les objectifs de densités doivent être considérés comme une ligne directrice et non comme une valeur absolue. En effet, ils permettent d'optimiser les composantes de rendement qui sont bien connus en culture pure mais pas nécessairement dans le cas des cultures associées, du fait des équilibres entre les espèces.

3.4. Dynamique de hauteur et verse

3.4.1. Dynamique de hauteur

La hauteur des espèces a été mesurée à partir du mois de mai (Figure 17). Les légumineuses (lentille et pois) sont systématiquement plus petites que les plantes de l'espèce associée (cameline, orge et épeautre), propres à chaque espèce. La hauteur maximale de la lentille est comprise entre 25 et 48 cm, et tend à diminuer à l'approche de la maturité (17 à 32 cm). La lentille corail atteint une hauteur élevée de 48 cm au maximum de sa croissance contre 32 cm à maturité. Il n'est pour autant pas possible de conclure à un effet d'une différence variétale ou de la compétition de la plante compagne, en l'absence de cultures pures servant de référence, mais aussi en l'absence de la culture des deux variétés, dans le même contexte. Ces hauteurs sont cohérentes avec la moyenne généralement observées (Le Bihan, 2022a) bien que certaines parcelles présentent des hauteurs à la récolte faibles (< 25 cm) ayant parfois engendré une impossibilité de récolte.

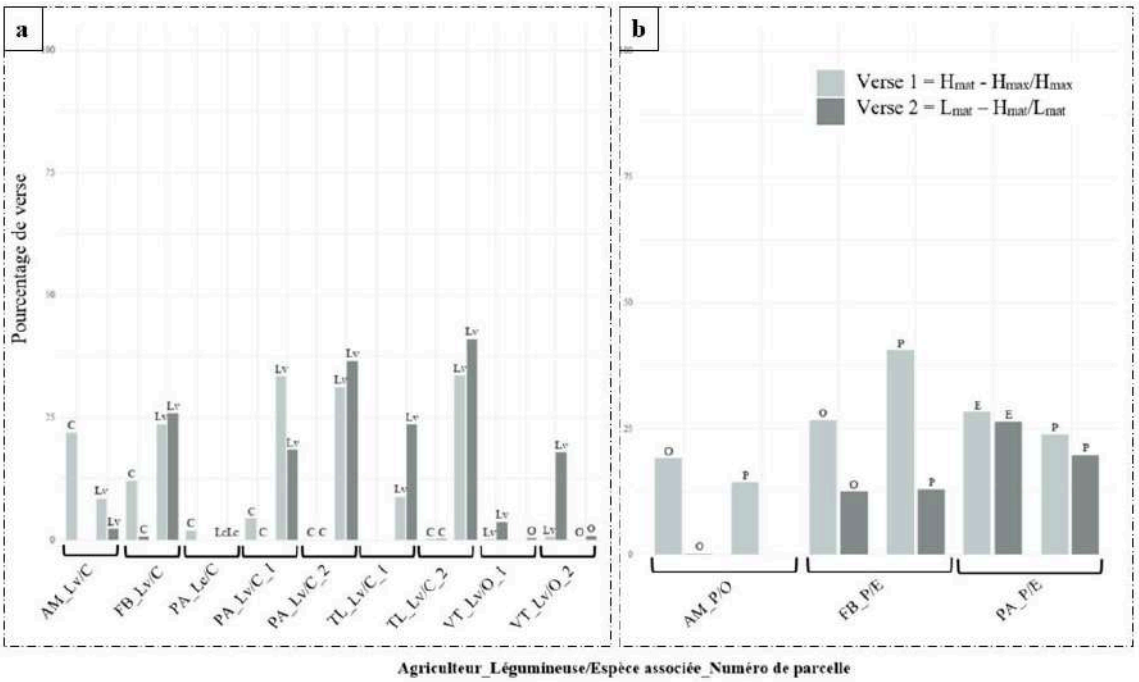


Figure 18 : Pourcentage de verse selon 2 modes de calcul (verse 1 = (H_{Max} - H_{Mat})/H_{Max} ; verse 2 = (L_Tige_{Mat} - H_{Mat})/L_Tige_{Mat}) des espèces pour : (a) les mélanges avec lentilles, et (b) les mélanges avec pois (Résultats du test de Wilcoxon sur l'écart des moyennes de verse : p-value > 0,05 aucune différence significative)

La hauteur maximale des pois (Figure 17b) est comprise entre 49 et 92 cm, et tend également à diminuer à maturité (38 à 55 cm). Ces hauteurs sont, aux dires des agriculteurs, inférieures à celles observées les années précédentes, généralement en lien avec un déficit hydrique probable. Quant aux espèces associées à la lentille (Figure 17a) et au pois (Figure 17b), leur hauteur maximale varie de 45 à 71 cm pour la cameline, de 61 cm à 79 cm pour l'orge et 106 cm pour le petit épeautre. A maturité, les hauteurs moyennes sont respectivement de 58 à 60 cm pour l'orge et de 76 cm pour le petit épeautre. Ces hauteurs sont supérieures à celles de la légumineuse en association pour l'ensemble des mélanges, ce qui est cohérent avec l'objectif recherché qui est l'effet tuteur.

Les hauteurs des espèces associées sont supérieures à celles des légumineuses, ce qui peut être vu comme un élément clé pour remplir le rôle de tuteur. Cette différence est due avant tout à la physiologie des espèces mais dépend aussi pour partie de la réponse des espèces à la compétition pour la lumière (Vandermeer, 1989). A noter qu'il aurait été intéressant d'avoir une mesure de la dynamique de hauteur dès la levée pour capturer les différences entre parcelles et entre mélanges en lien avec des compétitions différentes pour la lumière.

Un semis tardif peut conduire à limiter la hauteur de la lentille en lien avec un moindre développement végétatif (Fichet *et al.,* 2022). Par extrapolation, la présence d'une espèce très compétitive va contribuer à limiter le développement végétatif de la légumineuse et par conséquent sa hauteur et sa verse. Dès lors, dans une association d'espèces il est essentiel de rechercher un compromis entre le rôle tuteur et la compétition pour les ressources pour que le bénéfice d'une moindre verse ne se fasse pas au détriment d'une moindre production. A noter également que les conditions climatiques de la campagne ont engendré un stress hydrique sur les cultures et notamment sur les légumineuses dès de la phase d'élongation de la tige principale (Idriss *et al.*, 2013) ce qui a conduit à limiter son développement et donc sa hauteur et de fait le risque de verse. Pour autant, la hauteur de la lentille dans certaines parcelles était trop faible pour que celle-ci puisse être récoltée et ce, indépendamment de la verse.

3.4.2. Verse des mélanges

Les deux indicateurs de verse ($\%Verse_{Haut}$ et $\%Verse_{Tige}$) ont été appliqués à l'ensemble des espèces des mélanges. L'objectif est d'évaluer quelle méthode semble la plus pertinente à partir de leur mise en application sur nos données. Le $\%Verse_{Haut}$ moyenne des mélanges à base de lentille, toutes espèces confondues, est de 11 % contre 10 % pour le $\%Verse_{Tige}$, ce qui suggère une très légère différence. Tandis que le $\%Verse_{Haut}$ moyenne des cultures associées à base de pois, toutes espèces confondues, est de 23 % contre 12 % pour le $\%Verse_{Tige}$, ce qui suggère ici une différence plus nette.

Le $\%Verse_{Haut}$ des lentilles (Figure 18a) varie de 0 à 33 % et de 0 à 41 % pour la méthode $\%Verse_{Tige}$, ce qui suggère une différence relativement faible. Le $\%Verse_{Haut}$ du pois (Figure 18b), varie quant à lui de 13 à 24 % contre 28 % à 45% selon la méthode $\%Verse_{Tige}$, ce qui suggère une différence plus importante. Ces résultats témoignent d'une sensibilité de la culture à la verse (Sidahmed et Jaber, 2004 ; CAB Pays de la Loire, 2021) qui est très variable d'un contexte à l'autre.

Le $\%Verse_{Haut}$ de l'orge (Figure 18) varie de 0 à 27 % et de 0,17 à 12 % selon la méthode $\%Verse_{Tige}$, ce qui suggère ici une différence importante entre les deux méthodes. La verse de l'orge semble ici témoigner de l'affaissement de l'épi lors de sa maturation plutôt que d'un affaissement complet de la plante au sol. La verse du petit épeautre varie en revanche très peu avec 28 % selon $\%Verse_{Haut}$ et 26 % selon $\%Verse_{Tige}$. Enfin la verse de la cameline varie en moyenne de 0 à 22 % selon $\%Verse_{Haut}$ et de 0 à 0,6 % selon $\%Verse_{Tige}$. Dès lors que la plante associée verse, cela peut influencer la verse de la légumineuse par un effet mécanique direct. Par exemple, dans le cas de PA_P/E (Figure 18b), la verse du pois (22 % en moyenne pour les deux méthodes) est globalement similaire à celle du petit épeautre (27 % en moyenne pour les deux méthodes) suggérant une imbrication intime des deux espèces qui forment dès lors, un couvert homogène. A l'inverse, dans la parcelle FB_P/O la verse du pois est supérieure à celle de l'orge (réciproquement 27 % vs 19 % en moyenne pour les deux méthodes) ce qui suggère une moindre imbrication des deux espèces et une verse s'exprimant principalement sur le pois.

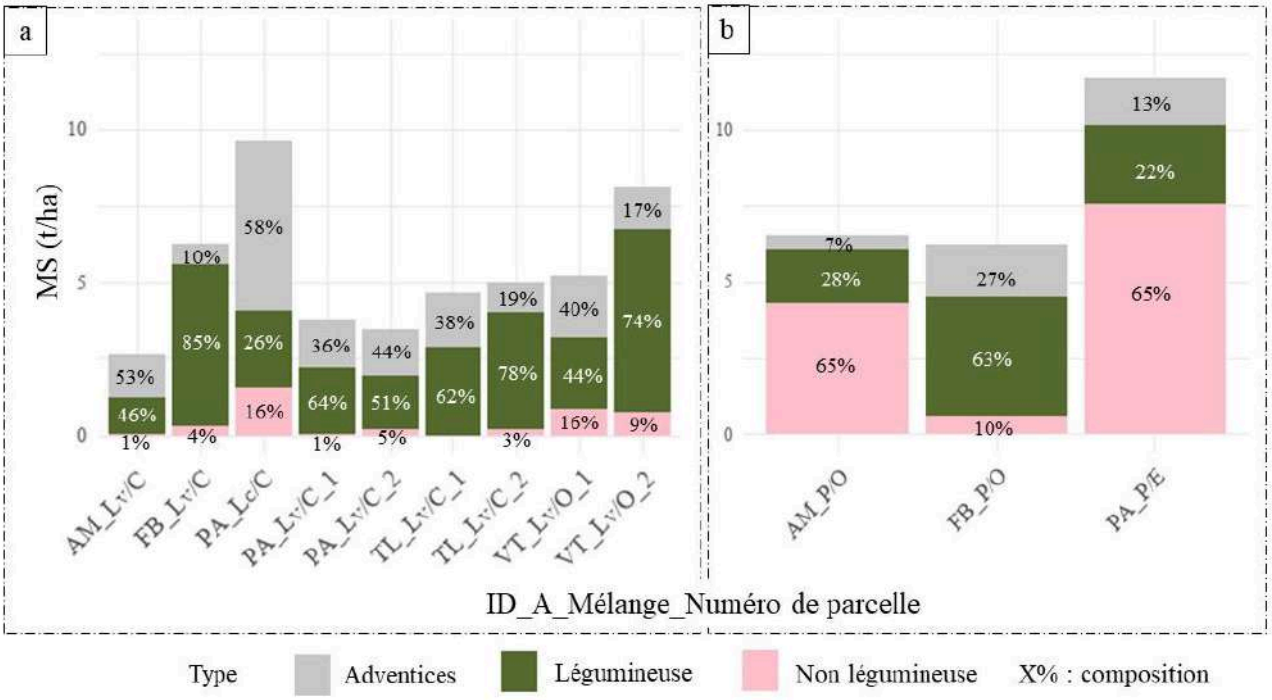


Figure 19 : Masse sèche totale parcellaire avec la fraction d'adventices, de légumineuse et de non légumineuse (t/ha) : (a) les mélanges composés de lentilles, et (b) les mélanges composés de pois

In fine, le test statistique des rangs de Wilcoxon ne révèle aucune différence significative entre les deux méthodes (p-value > 0,05). Pour autant, la seconde méthode ($\%Verse_{Tige}$) a pour avantage de ne pas nécessiter de mesure dynamique de la hauteur avec le risque de ne pas mesurer la hauteur maximale du couvert. Quelle que soit la méthode d'évaluation utilisée, seule la variété corail du mélange PA_Lc/C n'a pas présenté de verse. Cependant, comme pour les cas précédents, il est difficile de distinguer si cette absence de verse est due à l'effet variétal (comparée à la lentille verte) ou à l'effet tuteur exercé par la caméline. Une densité plus élevée de celle-ci ne semble pas nécessairement traduire un meilleur effet tuteur au regard des résultats de verse obtenus.

L'utilisation de la méthode reposant sur des mesures à hauteur maximale et à hauteur à maturité, suppose que la hauteur maximale a correctement été observée. Cependant, en pratique, il existe un risque de ne pas capter ce stade précis. Ceci engendre une incertitude et peut conduire à une sous-estimation de la verse. Ainsi, une égalité entre la hauteur maximale mesurée et la hauteur à maturité ne garantit pas nécessairement l'absence de verse. Elle peut également résulter d'une observation trop tardive, après le début du phénomène. Pour limiter ce biais, il peut être avantageux d'effectuer le calcul de la verse en se basant sur les mesures de la longueur de tige et de la hauteur à maturité. Cette méthode sera retenue pour les diagnostics.

La hauteur des espèces a un lien étroit avec la verse. Dans l'ensemble, la verse est nulle à modérée, ce qui suppose un bon rôle tuteur de l'espèce associée à la légumineuse (Carr *et al.*, 1995). Cet indice traduit en partie la facilité de récolte par la suite (Viguier, 2018), notamment de la lentille qui est une plante chétive. Cependant, même si l'effet tuteur peut limiter la verse, il ne garantit pas toujours une hauteur suffisante pour la récolte. En effet, si la lentille reste trop basse malgré l'association, la récolte mécanique peut devenir difficile. En culture associée, la structure du couvert végétal peut ainsi fortement varier d'un contexte à l'autre. Il pourrait donc être intéressant d'identifier un seuil minimal de hauteur en dessous duquel la récolte de la lentille devient compromise. Cela permettrait d'adapter le choix des espèces ou les pratiques culturales en amont, afin d'assurer une hauteur de récolte suffisante et limiter les pertes.

3.5. Biomasse et rendement

Cette partie vise à évaluer la productivité des mélanges au travers de l'analyse de la biomasse des espèces, de leurs rendements et en tenant compte de la biomasse des adventices.

3.5.1. Biomasse parcellaire

3.5.1.1. Composition de la biomasse parcellaire

La masse sèche totale du couvert (adventices + légumineuse + non légumineuse) est en moyenne de 2,6 à 9,6 t/ha pour les mélanges à base de lentille (Figure 19a) et de 6,2 à 11,7t/ha pour les mélanges à base de pois (Figure 19b). Pour les mélanges à base de lentille, la masse sèche totale du couvert est composée en moyenne (Figure 19a) de 10 à 58 % d'adventices, 26 à 85 % de lentille et 1 à 16 % de non légumineuse (espèce associée). Ceci témoigne d'une composition en légumineuse plus importante que l'espèce associée, ce qui est cohérent avec la volonté de produire en priorité de la légumineuse. En revanche, l'enherbement de certaines parcelles, telles que AM_Lv/C (53 %) et PA_Lc/C (58 %), pourrait avoir des conséquences directes sur la production du mélange cultivé en raison d'une compétition avec le mélange cultivé pour les ressources.

Pour les mélanges à base de pois, la masse sèche totale du couvert est constituée en moyenne (Figure 19b) de 7 à 27 % d'adventices, 22 à 63 % de pois et de 10 à 65 % de non légumineuse. Nos résultats montrent que les mélanges ont produit plus de biomasse que les adventices, témoignant d'une compétitivité asymétrique. En revanche, il semble également s'observer une compétition asymétrique de la céréale sur la légumineuse pour les parcelles de pois de AM et de PA. En moyenne la biomasse des adventices ($MS_{Adventice}$) dans les mélanges à base de pois est inférieure (0,4 à 1,7 t/ha) à celle dans les mélanges à base de lentille (0,6 à 5,6 t/ha), sans qu'il soit possible de conclure si, ces différences sont le fait de la rotation, du désherbage mécanique ou de la compétitivité du couvert cultivé.

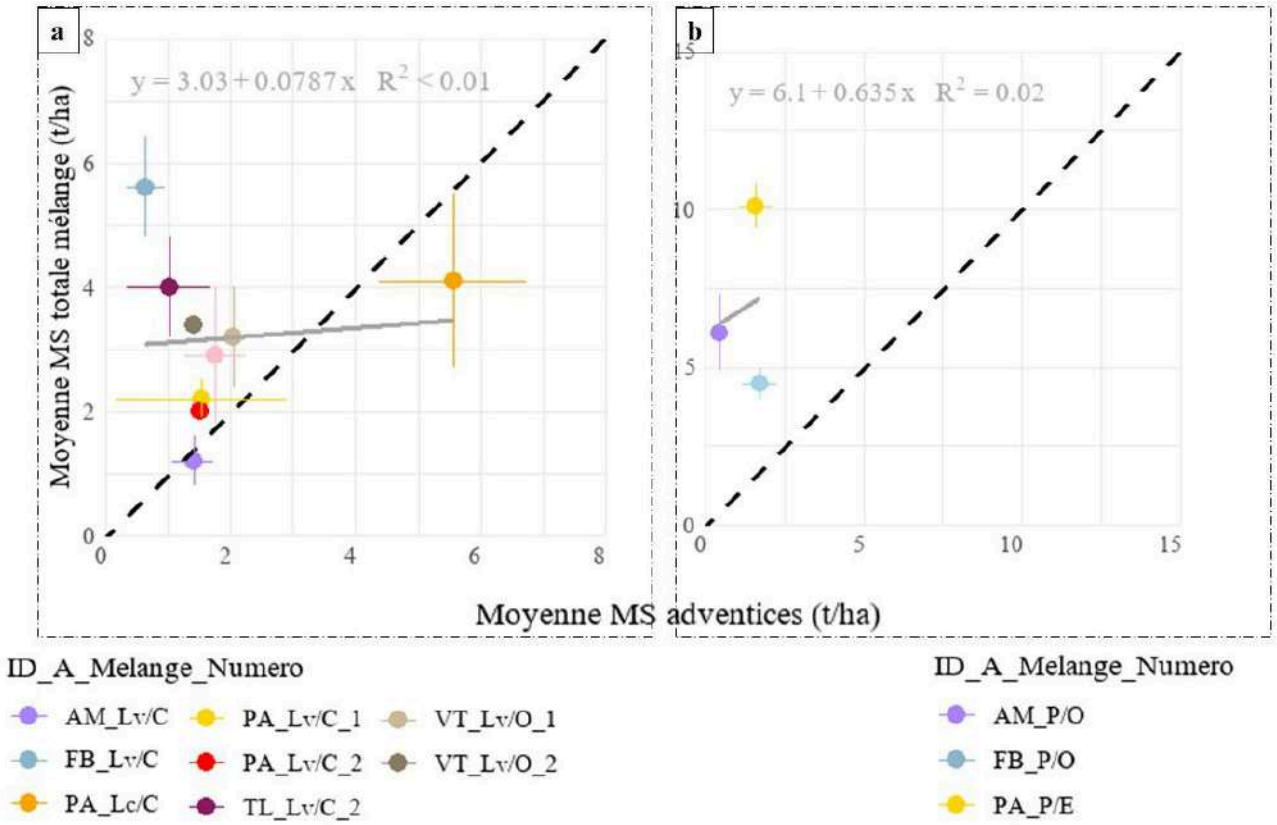


Figure 20 : $MS_{Légumineuse+Non\ légumineuse}$ en fonction de la $MS_{Adventice}$ pour les mélanges à base de lentille (a) et de pois (b). Les barres d'erreur correspondent à l'écart type des moyennes en X (horizontal) et en Y (vertical). La droite grise représente la régression linéaire et la droite grise à la régression linéaire

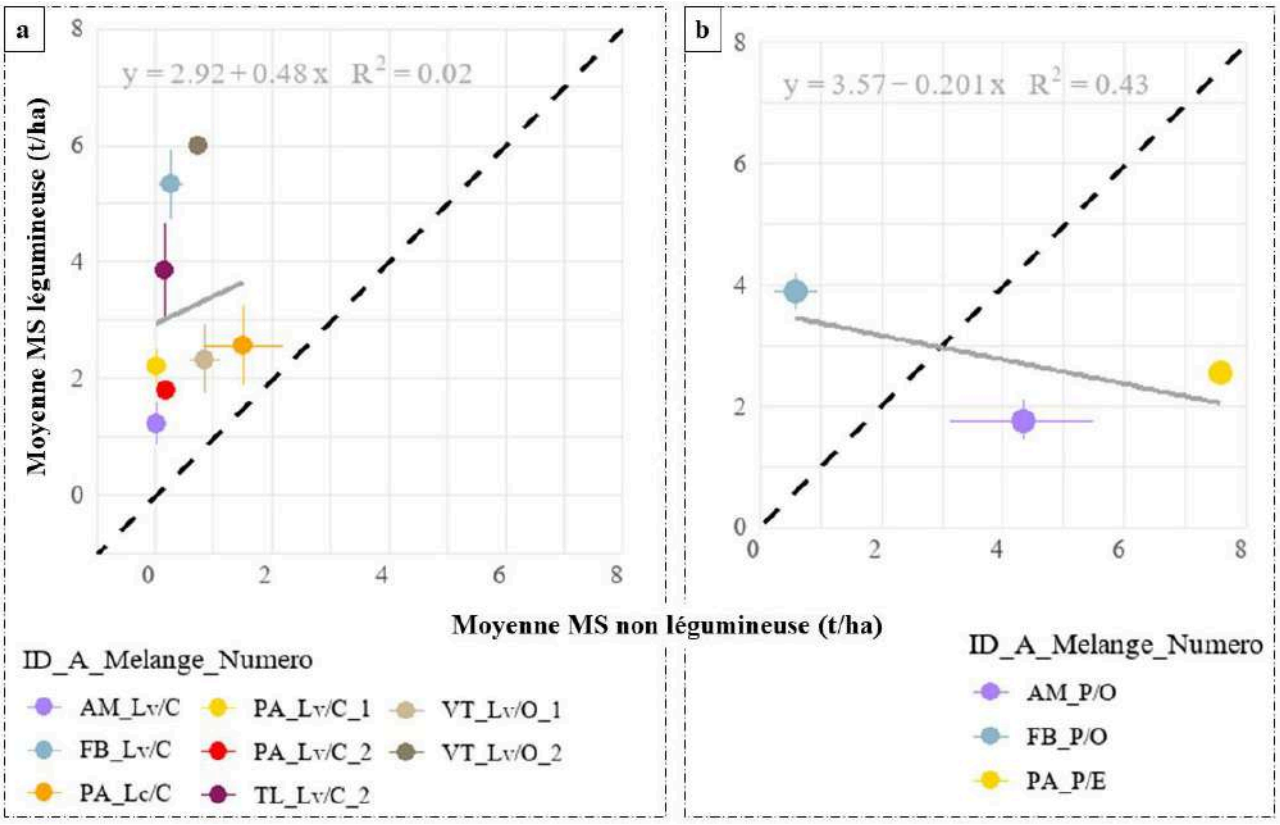


Figure 21 : $MS_{Légumineuse}$ en fonction de la $MS_{Non\ légumineuse}$ pour les mélanges à base de lentille (a) et de pois (b). Les barres verticales correspondent à +/- l'écart-type des MS et la droite grise à la régression linéaire.

3.5.1.2. Relation entre la biomasse d'adventices et celle des cultures

L'objectif est ici d'analyser si le développement des adventices à une influence sur le développement du mélange cultivé au travers de l'étude de la relation entre les biomasses. Qu'il s'agisse des mélanges à base de lentille (Figure 20a) ou à base de pois (Figure 20b), il n'y a pas de corrélation significative entre la biomasse du mélange cultivé et celle des adventices (p-value = 0,6 et 0,8 réciproquement). Cela signifie qu'il n'y a pas de relation linéaire entre la $MS_{Adventice}$ et la $MS_{Légumineuse+Non\ légumineuse}$, ce qui est cohérent avec les observations de Florence *et al.* (2019).

Bien qu'il n'existe pas de relation linéaire, cela n'implique pas une absence d'effet du mélange sur la régulation des adventices. Cette relation est ainsi modulée par différents facteurs contextuels tels que le type de sol, les pratiques culturales, les espèces ou encore les densités. Par ailleurs, le faible nombre de parcelles étudiées peut limiter la puissance statistique et la capacité à détecter une relation. L'étude W-SoLent (2023) a cependant démontré que les mélanges lentille/orge et lentille/avoine sont globalement plus compétitifs face aux adventices que les mélanges lentille/cameline, mais que cela n'est pas systématique et dépend notamment de la densité de l'espèce associée. Les études de Lebreton *et al* (2015) et Bedoussac *et al.* (2015), ont également mis en avant le rôle des mélanges céréales-légumineuses sur la régulation des adventices, en raison de la compétitivité accrue de la céréales. Cependant, il a également été montré que cette compétition est dépendante de la proportion de céréales qui ne doit pas être trop importante, au risque de nuire à la légumineuse (Bedoussac *et al.*, 2015 ; Lebreton *et al.*, 2023).

Par ailleurs, la gestion mécanique des adventices sur les parcelles ne semble pas toujours avoir été efficace, ce qui renforce la nécessité d'une couverture suffisante par le mélange. En effet, la compétition entre les espèces cultivées pour les ressources permet de réduire leur disponibilité pour les adventices, et ainsi, limiter leur développement (Justes *et al.,* 2021 ; Terres Inovia, 2023 ; Bedoussac, 2018 ; Anil *et al.*, 1998). Ces éléments indiquent que la mise en place de mélange d'espèces ne permet pas toujours une bonne régulation d'adventices puisqu'elle est la résultante d'intéractions complexes entre composition du mélange et gestion agronomique.

3.5.2. Masse sèche

3.5.2.1. Masse sèche totale des espèces du mélange

La matière sèche totale (grains + pailles) des lentilles est supérieure à celle de l'espèce associée avec en moyenne 3,01 t/ha contre 0,42 t/ha (soit en moyenne 63 % de lentille dans les mélanges). La relation ne montre pas de corrélation significative (p-value du test de Pearson = 0,73) entre ces deux variables (Figure 21a). Dans le cas des mélanges à base de pois (Figure 21b), la $MS_{Légumineuse}$ est supérieure à la $MS_{Non\ légumineuse}$ pour FB_P/O, et inférieure pour AM_P/O et PA_P/E. Comme pour la lentille, il n'y a pas de corrélation significative entre les $MS_{Légumineuse}$ et $MS_{Non\ légumineuse}$ (p-value du test de Pearson = 0,55).

La biomasse est un indicateur fortement corrélé au rendement (Whitehead *et al.,* 2000) qui aide à comprendre la performance des mélanges. D'après ces résultats, il n'est pas possible de valider l'hypothèse selon laquelle la biomasse de la légumineuse est négativement corrélée à celle de l'espèce associée et ce contrairement aux résultats de De Notaris *et al.* (2021). Il faut cependant noter que cette étude montre que la relation négative entre les biomasses des espèces du mélange s'exprime surtout dans des contextes où la biomasse totale du mélange est élevée ou dans des conditions non limitantes en azote ce qui n'est pas nécessairement le cas de tous les mélanges étudiés ici. Nos résultats peuvent aussi s'expliquer par le faible nombre de données disponibles et la variabilité des systèmes. En revanche, nos résultats semblent cohérents avec les observations de Bedoussac *et al.* (2015) suggérant une relation complexe entre les espèces du mélange et expliquant la difficulté à concevoir un mélange type notamment du point de vue des densités. Le fonctionnement des mélanges est influencé par des facteurs biotiques et abiotiques multiples, impliquant des processus de complémentarité et de compétition variables selon les espèces, les conditions pédoclimatiques et les pratiques agricoles qui sont difficilement prévisibles et rendent chaque cas unique ce qui explique la complexité de gestion des mélanges pour les agriculteurs.

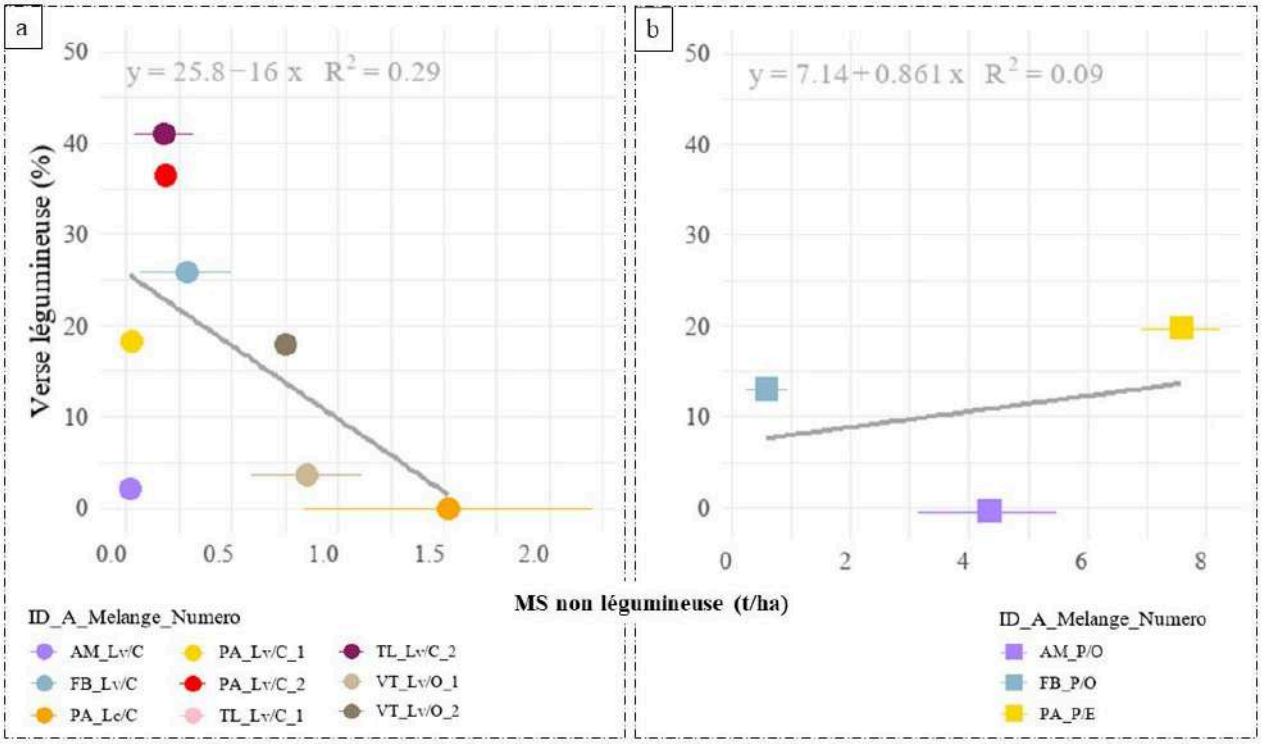


Figure 22 : %de verse (L_Tige_{Mat} - H_{mat})/L_Tige_{Mat}) des espèces en fonction de la MS pour les mélanges avec lentilles (a), et pois (b). Résultats du test de Pearson : (a) cor = -0,5 et p-value = 0,17 et (b) cor = 0,29 et p-value = 0,81 : non significatif). Les barres horizontales correspondent à +/- l'écart-type de $MS_{Non\ légumineuse}$.

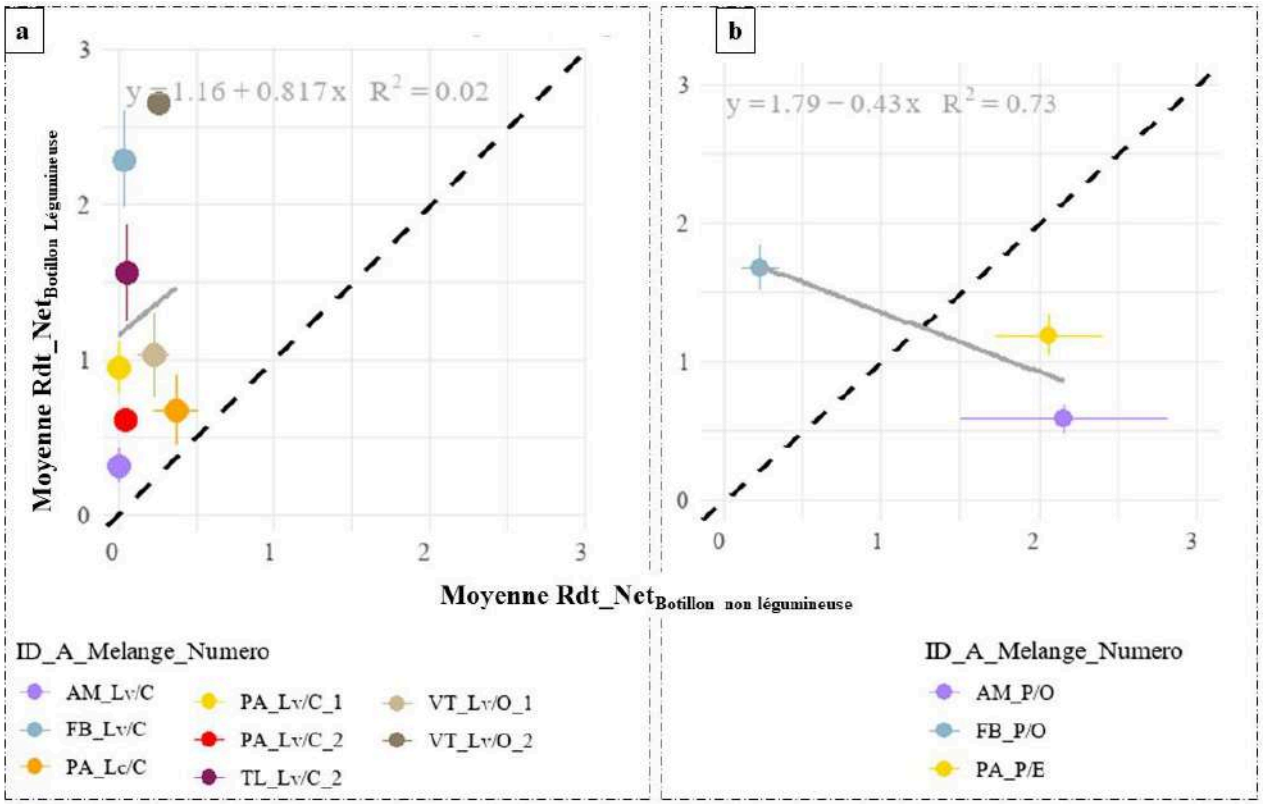


Figure 23 : $Rdt_{Légumineuse}$ en fonction du $Rdt_{Non\ légumineuse}$ pour les mélanges à base de lentille (a) et de pois (b). Résultats du test de Pearson : (a) cor = 0,14 et p-value = 0,75 et (b) cor = -0,86 et p-value= 0,34. Les barres verticales et horizontales correspondent à +/- l'écart-type des MS et la droite grise à la régression linéaire.

3.5.2.2. **Relation entre biomasse des espèces cultivées et verse**

L'objectif est ici d'analyser la relation entre le pourcentage de verse de la légumineuse et la biomasse de l'espèce associée. Pour la lentille, il existe une corrélation négative (cor = -0,5) mais non significative (p-value = 0,17) entre le pourcentage de verse calculé à partir de la hauteur et de la longueur de tige à maturité (Figure 22a). Pour le pois, il n'existe aucune corrélation significative entre le pourcentage de verse calculé à partir de la hauteur et de la longueur de tige à maturité, et la biomasse de l'espèce associée (verse 2 : cor = 0,29 et p-value = 0,81 ; Figure 22b).

Nos résultats ne montrent pas de corrélation significative entre la biomasse de l'espèce associée et la verse de la légumineuse. Cela signifie que la relation n'est pas linéaire mais ne signifie pas pour autant que l'espèce associée ne joue pas un rôle important. Nos résultats ne montrent pas toujours une verse inférieure lorsque la biomasse de l'espèce associée est élevée. Cela signifie que la verse n'est pas uniquement liée à la biomasse produite par l'espèce associée mais résulte d'un ensemble de facteurs en interaction. Ceci ne permet donc pas de valider l'hypothèse selon laquelle l'espèce associée joue le rôle de tuteur pour la légumineuse et que cet effet tuteur est positivement corrélé à la verse de la légumineuse. A nouveau, le faible jeu de données limite la robustesse de l'analyse. Ces résultats sont donc contraires aux études, qui s'accordent à dire que la présence d'une espèce associée à la légumineuse (lentille ou pois) permet de jouer un rôle tuteur et ainsi limiter la verse (Wang *et al.*, 2012 ; Podgórska-Lesiak et Sobkowicz, 2013 ; Pelzer *et al.*, 2014).

3.5.3. Rendement et indice de récolte

3.5.3.1. **Rendement botillons et relation entre les espèces**

Le rendement moyen des mélanges lentille/cameline varie de 0,31 à 2,33 t/ha et de 1,26 à 1,46 t/ha pour les mélanges lentille/orge. Le rendement moyen des mélanges pois/céréale varie de 1,90 à 3,25 t/ha. Le rendement moyen de la lentille ($Rdt_Net_{Botillon\ lentille}$; Figure 23a) varie de 0,31 à 2,66 t/ha. Ces différences de rendements s'expliquent par des conditions pédoclimatiques, des modes de gestion et des historiques de parcelles différents. Le rendement moyen du pois (Figure 23b) varie quant à lui de 0,58 à 1,67 t/ha et le rendement moyen des espèces associées (Figure 23) varie de 0,00 à 0,37 t/ha pour la cameline et de 0,23 à 2,16 t/ha pour les céréales.

Ces rendements ne sont pas vraiment comparables aux références techniques puisqu'ils ne correspondent pas au rendement réellement récolté mais au rendement potentiellement récoltable. Cette variable est cependant un indicateur de la performance des mélanges servant de base pour analyser les interactions entre espèces. Dans le cadre de notre étude, une grande variabilité s'observe d'un mélange à l'autre, suggérant des différences de performances liées aux pratiques et contextes pédoclimatiques spécifiques. La mesure du rendement en grains sur pied permet également d'estimer si l'agriculteur est susceptible d'atteindre ses objectifs.

Les tests de Pearson effectués sur les données des lentilles (Figure 23a) et des pois (Figure 23b) ne montrent aucune corrélation significative entre le $Rdt_{Légumineuse}$ et le $Rdt_{Non\ légumineuse}$. L'étude de Bedoussac *et al.* (2015), qui s'appuie sur une méta-analyse de 58 essais en agriculture biologique, met en évidence une relation entre le rendement des espèces du mélange. Dans une grande partie des cas, une augmentation du rendement de la céréale est associée à une diminution du rendement de la légumineuse. Ces observations soulignent également le rôle de la densité de chaque espèce dans l'expression du rendement. Lorsque la densité de céréales est élevée, des pertes de rendement peuvent s'observer sur la légumineuse (Tosti *et al.*, 2023 ; Carton *et al.*, 2019). De plus, Tosti *et al.* (2023) et Carton *et al.* (2019) ont montré une augmentation des pertes de rendement de la légumineuse lorsque la densité de céréales augmente. Ceci justifie donc la nécessité d'adapter les densités de semis afin de trouver un équilibre quant au développement du couvert mais surtout, pour l'équilibre s'exprimant au travers des rendements.

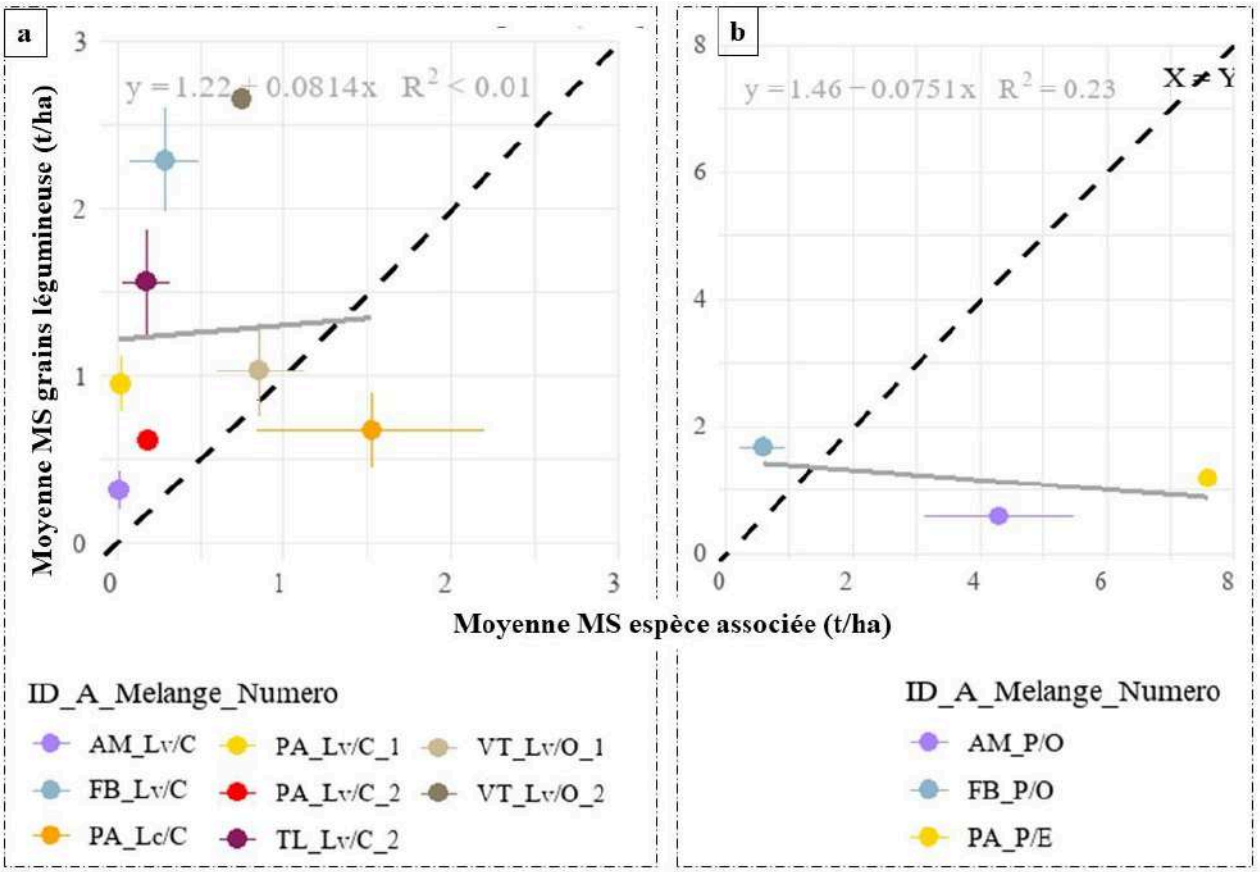


Figure 24 : $Rdt_{Légumineuse}$ en fonction de $MS_{Non\ légumineuse}$ pour les mélanges à base de lentille (a) et de pois (b). (Résultats du test de Pearson : (a) cor = 0,14 et p-value = 0,75 ; (b) cor = -0,86 et p-value= 0,34). Les barres horizontales et verticales correspondent à +/- l'écart-type de MS et la droite grise à la régression linéaire

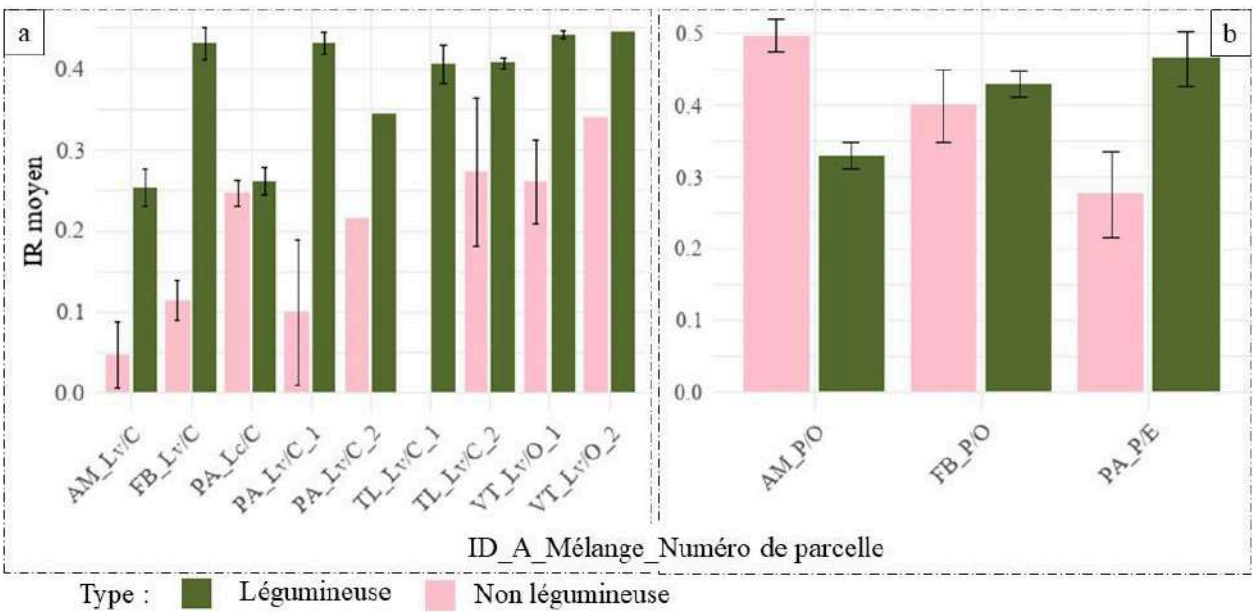


Figure 25 : Indice de récolte (IR) des espèces légumineuses et non légumineuses des mélanges avec lentille (a) et pois (b). Les barres verticales indiquent +/- l'écart-type de l'IR

3.5.3.2. **Relation entre les rendements des espèces associées**

L'objectif est ici d'analyser si le développement de l'espèce associée à un impact sur la légumineuse, au travers de l'étude de la relation entre la biomasse de l'espèce associée et le rendement de la légumineuse. A nouveau, il n'existe pas de corrélation significative (p-value du test de Pearson = 0,9) entre le $Rdt_{Legumineuse}$ et la $MS_{Non\ légumineuse}$ que l'on considère les associations à base de lentille (Figure 24a) ou de pois (Figure 24b).

D'après ces résultats et ceux de la figure 23, il n'est pas possible de valider l'hypothèse selon laquelle le rendement de la légumineuse est négativement corrélé à celui de l'espèce associée. Ceci est cohérent avec les observations de Viguier (2018) mais contraire à l'étude de Akter *et al.* (2004) qui ont comparé le rendement obtenu en culture associée avec celui en culture pure ce qui n'est pas ce que nous étudions. Nos résultats s'expliquent en partie par le fait que nous ne disposons que d'un faible nombre de données et que les associations sont conduites dans des contextes pédoclimatiques et selon des itinéraires techniques différents.

3.5.3.3. **Indice de récolte**

L'indice de récolte (IR) reflète la répartition entre la biomasse en grains et en paille d'une espèce (Figure 25). Dans les mélanges avec lentilles (Figure 25a), l'IR moyen des lentilles varie de 0,25 à 0,45. Hormis les parcelles AM_Lv/C (0,25) et PA_Lc/C (0,26), les IR calculés sont globalement cohérents avec ceux généralement observés en agriculture biologique, autour de 0,40 (Whitehead *et al.*, 2000 ; Solanki *et al.*, 2007 ; Erskine *et al.*, 2009, dans Viguier, 2018).

L'indice de récolte moyen des pois (Figure 25b) est plus élevé avec en moyenne 0,41 (compris entre 0,33 et 0,46). Hormis la parcelle PA_P/E où l'IR est plus élevé (0,46), les données sont globalement cohérentes avec l'indice moyen de 0,36 calculé sur 286 génotypes de pois dans l'étude de Nisar *et al.* (2011).

L'indice de récolte moyen de la cameline est quant à lui de 0,18, ce qui est légèrement inférieur aux données moyennes (0,26 à 0,31) de l'étude de Sintim *et al.* (2016). L'IR du petit épeautre est seulement de 0,28 contre 0,38 pour l'orge (moyenne pour les 4 parcelles) ce qui est cohérent avec la physiologie de ces deux espèces, en lien avec une espèce rustique et à paille haute qu'est le petit épeautre (Bio 82 et FRAB Midi-Pyrénées, 2011).

Les test non paramétrique de Kruskal-Wallis a montré une différence significative des IR de la lentille entre les différentes parcelles (p-value = 0,02) alors que les test post-hoc de Dunn (corrigés avec la méthode Holm) n'ont révélé aucune différence significative (p-values > 0,05). Le test de Kruskal-Wallis a également mis en évidence une différence significative des IR des céréales entre les différentes parcelles (p-value = 0,03), confirmé par le test de Dunn révélant une différence significative (p-value = 0,02) entre l'IR de l'orge de AM_P/O et du petit épeautre de PA_P/E, s'expliquant par les différences physiologiques évoquées précédemment. Les tests de Kruskal-Wallis sur les autres espèces n'ont révélé aucune différence significative entre parcelles (p-value > 0,05).

L'indice de récolte, qui traduit la production de grains par rapport à la biomasse totale de la plante, est généralement stable au sein d'une variété (Académie d'agriculture de France, 2022) mais différents entre les variétés, comme démontré par Dixit *et al.* (2017) dans le cas de la lentille. Ce critère peut s'avérer pertinent pour orienter le choix des variétés et des espèces dans les cultures associées, en vue d'optimiser la composition des mélanges selon les objectifs de rendement.

L'IR des lentilles mesuré dans notre étude a pu être influencé par un déficit hydrique survenu pendant la phase de reproduction, en particulier au moment de la floraison et du remplissage des graines (Idriss *et al.,* 2013). Ce type de stress n'a pas toujours un effet négatif, celui-ci dépend notamment de la variété cultivée et de l'intensité du déficit hydrique (Shrestha et al., 2009). Dans notre étude, les conditions climatiques suggèrent un stress hydrique marqué, sans toutefois entraîner un indice de rendement (IR) très différent de celui habituellement observé.

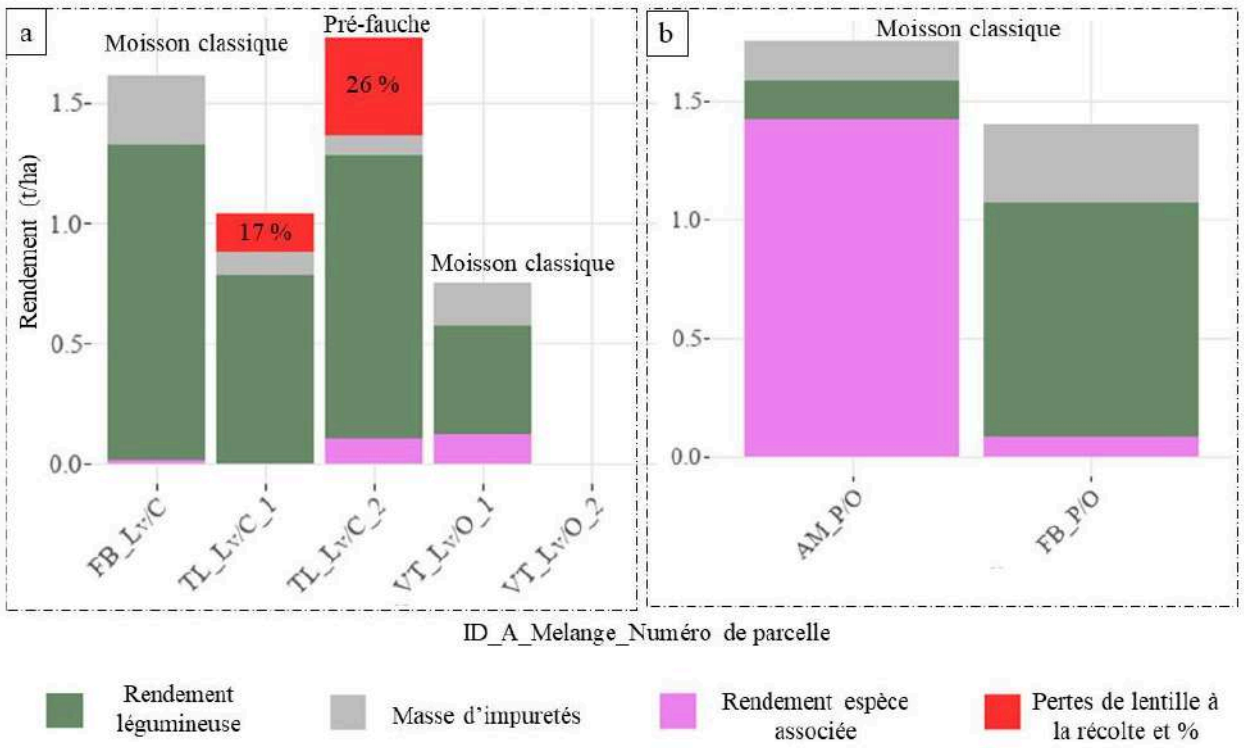


Figure 26 : Rendement en légumineuses, non légumineuses, masse d'impuretés de la moisson et pertes à la récolte en lentille (+% perte en fonction de la modalité) avec (a) les mélanges composés de lentilles et (b) de pois.

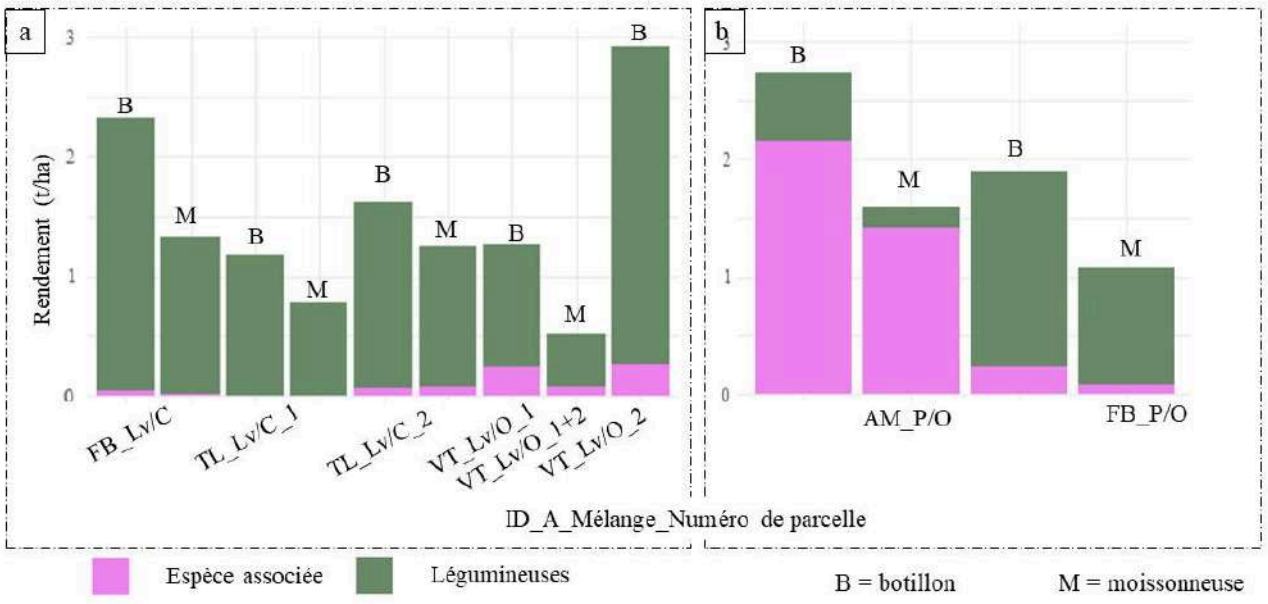


Figure 27 : $Rdt_{Botillon}$ vs $Rdt_{Moisson}$ pour les mélanges (t/ha) avec (a) les mélanges composés de lentilles et (b) de pois.

3.5.3.4. Rendement moissonneuse et perte à la récolte

Le rendement brut de la récolte mécanique ($Rdt_Brut_{Moisson}$), c'est-à-dire non trié ni nettoyé, communiqué par les agriculteurs (Figure 26) varie de 0,9 à 1,6 t/ha pour les mélanges lentille/cameline (0,75 t/ha pour le mélange lentille/orge) et varie de 1,4 à 1,8 t/ha pour les mélanges pois/céréale. A noter que les parcelles AM_Lv/C, PA_Lv/C_1 et PA_Lv/C_2 n'ont pas été récoltées en raison d'une faible hauteur de la lentille ne permettant pas la récolte mécanique. Par conséquent, les comparaisons effectuées par la suite ne tiendront pas compte de ces parcelles.

De ces rendements bruts ont été définis les rendements de chaque espèce ($Rdt_Net_{Moisson}$; Figure 26), comprenant les grains cassés et bruchés mais pas les impuretés. Pour les mélanges lentille/cameline, le rendement varie de 0,8 à 1,3 t/ha et est de 0,6 t/ha pour le mélange lentille/orge (Figure 26a). Les rendements des légumineuses sont tous supérieurs à ceux de l'espèce associée et les rendements de la lentille sont comparables à ceux généralement observés en culture pure dans les Pays de la Loire (0,5 à 2 t/ha en sortie de parcelle ; CAB Pays de la Loire, 2021). Ce résultat semble contredire l'hypothèse selon laquelle le rendement des légumineuses associées est généralement supérieur à celui des cultures pures, quand le rendement moissonneuse est considéré (Bedoussac *et al.*, 2022). En revanche, d'autres travaux suggèrent que les rendements de la lentille sont similaires voire inférieurs à ceux obtenus en culture pure (Carton *et al.*, 2019).

Les mélanges avec du pois ont des rendements variant de 1,1 à 1,6 t/ha (Figure 26b). Le rendement de la légumineuse est supérieur à celui de l'espèce associée uniquement pour la parcelle FB_P/O. En revanche, dans le cas des mélanges de pois, il est difficile de comparer les résultats obtenus avec les rendements moyens observés en culture pure (35-40 q/ha en pois de printemps ; Terres Inovia, 2025a) du fait que dans les associations le pois n'a pas été semé à 100 % de sa densité pure.

Les pertes à la récolte ont été évaluées pour la lentille à 17 % pour TL_Lv/C_1 récoltée en coupe classique et à 26 % pour TL_Lv/C_2 récoltée par pré-fauche et andainage (Figure 26a). La proximité des parcelles permet de considérer que les contextes pédoclimatiques sont identiques mais ces deux modalités ne sont pas totalement comparables du fait que les mélanges ont été semés à 1 mois d'intervalle (respectivement le 7 mars et le 15 avril) ce qui a nécessairement influencé l'implantation et le développement des espèces. De plus, les pots ont été placés sur deux lignes, l'une proche d'un passage de roues et l'autre au milieu d'un rang sans qu'il soit possible de croiser ce positionnement avec celui du passage des engins de récolte. En d'autres termes, nous ne sommes pas en mesure de savoir si les pots de l'une ou l'autre des parcelles étaient situés sous ou à côté de l'axe de la moissonneuse, qui est la zone sur laquelle sont principalement réparties les pailles et ce malgré l'utilisation d'un répartiteur sur la moissonneuse.

3.5.3.5. Comparaison des rendements bottillons et moissonneuse

Le rendement des botillons ($Rdt_Net_{Botillon}$) est logiquement supérieur au rendement moissonneuse ($Rdt_Net_{Moisson}$; Figure 27). La différence donne à voir des pertes de rendement, entre le rendement sur pied et le rendement récolté, de 24 à 59 % pour la lentille, de 41 à 71 % pour le pois, de -67 % à 75 % pour la cameline et de 34 à 65 % pour l'orge. La perte estimée à -67 % pour la cameline révèle une incohérence en lien probablement avec l'échantillonnage des botillons ayant sous estimé le rendement sur pied.

Les pertes de rendements à la moisson dépendent de différents facteurs tels que les conditions météorologiques, les réglages de la machine (Bedoussac *et al.*, 2022) ou encore la topographie et le nivellement du sol (Viguier, 2018). La difficulté dans le cas des mélanges avec de la lentille provient notamment du fait qu'il faille poser la barre de coupe au sol afin d'être en capacité d'en récolter le maximum (Clair, 2021). La pré-fauche présente l'avantage de favoriser une maturité homogène (CAB Pays de la Loire, 2021 ; Baguet *et al.*, 2023) et d'anticiper la récolte de 8 à 10 jours. En revanche, elle rend souvent la culture sensible à l'égrainage en fonction du stade de développement des espèces (à dire d'experts) et nécessite une anticipation (Terres Inovia, 2023).

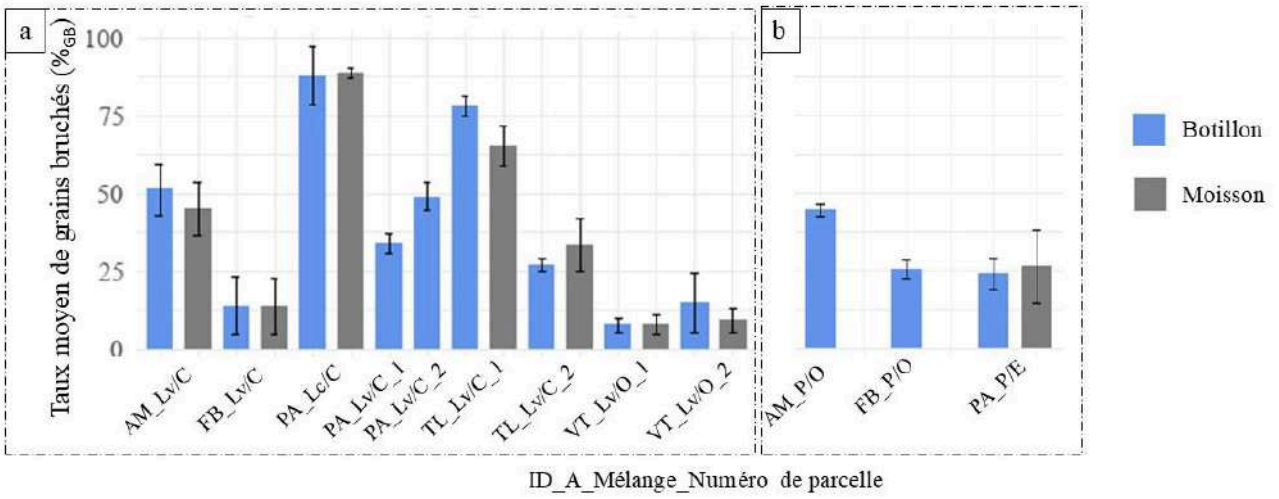


Figure 28 : Taux de grains bruchés pour des botillons et à la moisson pour la modalité air libe de la lentille (a) et du pois (b). Les barres verticales correspondent à +/- l'écart-type du taux de grains bruchés.

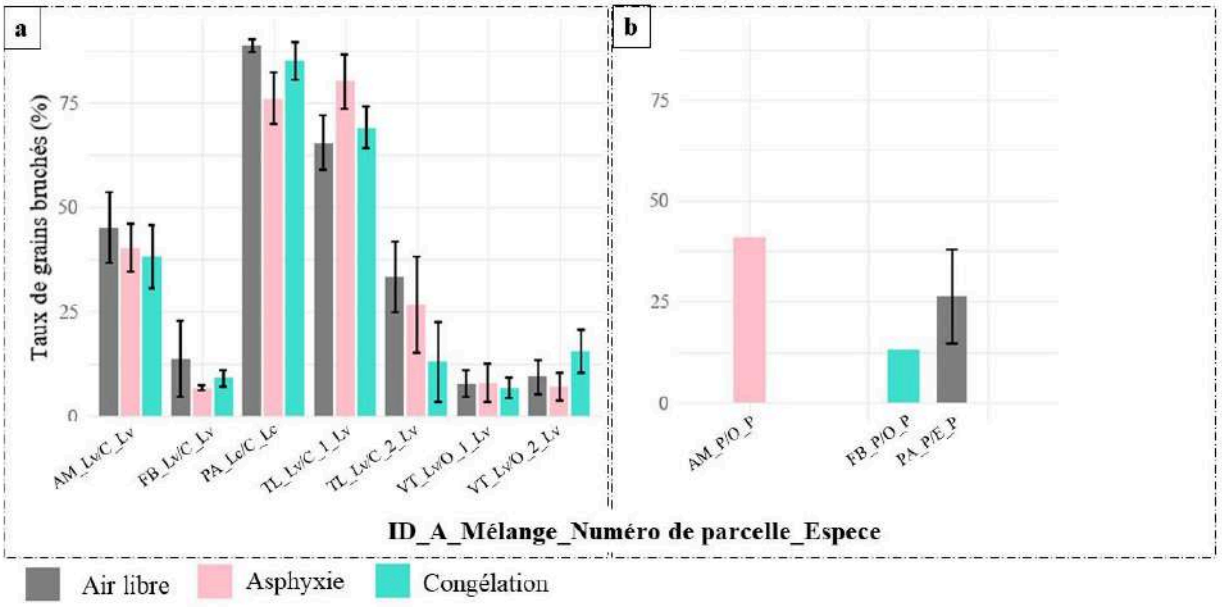


Figure 29 : Taux de grains bruchés à la moisson en fonction de la modalité air libre, asphyxie et congélation de la lentille (a) et du pois (b). Les barres verticales correspondent à +/- l'écart-type du taux de grains bruchés.

3.5.4. Taux de grains bruchés

Le pourcentage de grains bruchés (%GB) a été évalué avant la récolte sur les botillons ($\%GB_{Botillon}$) ainsi que sur des échantillons prélevés à la récolte en sortie de moissonneuse ($\%GB_{Moisson}$), ces derniers ont été laissé à l'air libre (botillons + moisson), congelés (moisson) ou asphyxiés (moisson), ce qui constitue *in fine* 4 traitements.

En moyenne, pour les lentilles, le %GB s'établit entre 8 et 89% (Figure 28a) que ce soit sur les botillons ou à la moisson. Les parcelles les plus touchées sont celles de lentille corail/cameline de PA (88 % sur les botillons et 89 % à la moisson) et celle de lentille verte/cameline de TL_1 (78 % sur les botillons et 65 % à la moisson). Le test de Wilcoxon de comparaison par paires n'indique pas de différences significatives entre les $\%GB_{Botillon}$ et $\%GB_{Moisson}$ (p-value = 0,91).

En moyenne, le $\%GB_{Botillon_Pois_air_libre}$ varie de 24 à 45 % (Figure 28b) mai seul le $\%GB_{Moisson_Pois_air_libre}$ de PA a été mesuré. Il n'est pas possible de tester statistiquement la différence étant donné que nous n'avons qu'une valeur pour AM_P/O et de même pour FB_P/O. Tandis que les taux de grains bruchés des botillons de PA_P/E semblent similaires quelle que soit la modalité étudiée.

Les taux de grains bruchés des lentilles à la récolte varient de 7 à 85 % pour les lots congelés, de 7 à 80 % pour les lots asphyxiés et de 8 à 89 % pour les lots laissés à l'air libre (Figure 29a). Les différences sont très faibles et le test de Kruskal-Wallis permet de confirmer qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements au sein de chaque parcelle (p-value > 0,05 pour toutes les parcelles).

Les taux de grains bruchés des pois sont de 41 % pour AM_P/O, 13 % pour FB_P/O et de 26,31 % pour PA_P/E (Figure 29b).

Les taux de grains bruchés observés dans les parcelles de lentille sont globalement cohérents avec les moyennes issues de la littérature (Terres Univia et Terres Inovia, 2023a et b ; Clair, 2021), bien que ces données soient fortement variables d'une année à l'autre. Il reste cependant difficile de comparer précisément nos résultats aux références disponibles, en raison d'un manque de détails sur les méthodes de calcul utilisées dans les études citées.

Nos résultats montrent que les parcelles récoltées en pré-fauche (TL_Lv/C_2 et les deux parcelles de VT) présentent des taux de grains bruchés globalement inférieurs à ceux des autres associations, à l'exception de FB_Lv/C. Cette tendance suggère que la pré-fauche, en permettant une récolte plus précoce, offre la possibilité de traiter les lots plus rapidement, limitant ainsi le développement larvaire des bruches. Par ailleurs, les dégâts sont principalement causés en amont de la maturité, lors du remplissage des gousses, période correspondant à la ponte des bruches (Dauguet, 2019 ; Biarnès et al., 2024). Pour autant, il n'existe, à l'heure actuelle, aucune solution de prévention en AB (Dauguet, 2019).

Concernant les méthodes de conservation testées (asphyxie et congélation), celles-ci ont montré une efficacité similaire. Les résultats sont toutefois parfois comparables à ceux obtenus sans traitement, ce qui pourrait s'expliquer par une faible taille d'échantillon ou une infestation déjà trop avancée au moment du traitement. Malgré cela, la littérature recommande clairement de congeler ou d'asphyxier les lots de lentilles pour interrompre le développement des larves encore présentes, que ce soit pour la lentille ou le pois (Riquet et Le Bihan, 2020a ; Dauguet, 2024).

Enfin, l'effet des cultures associées sur leur régulation reste encore peu clair : certaines études (Tosti et al., 2023) suggèrent une diminution des pertes en systèmes associés, tandis que d'autres (Viguier, 2018) ne mettent pas en évidence de différences significatives. Nos observations montrent que les mélanges lentille/orge sont moins impactés que les mélanges lentille/cameline, sans pour autant permettre de conclure s'il s'agit d'un effet de dilution, de compétition interspécifique ou encore de prédation. Toutefois, la forte présence d'adventices sur certaines parcelles associée à des taux élevés de bruches suggère que ces zones pourraient également jouer un rôle de refuge pour les ravageurs. Il serait intéressant d'analyser le lien entre adventices et bruches, s'il existe.

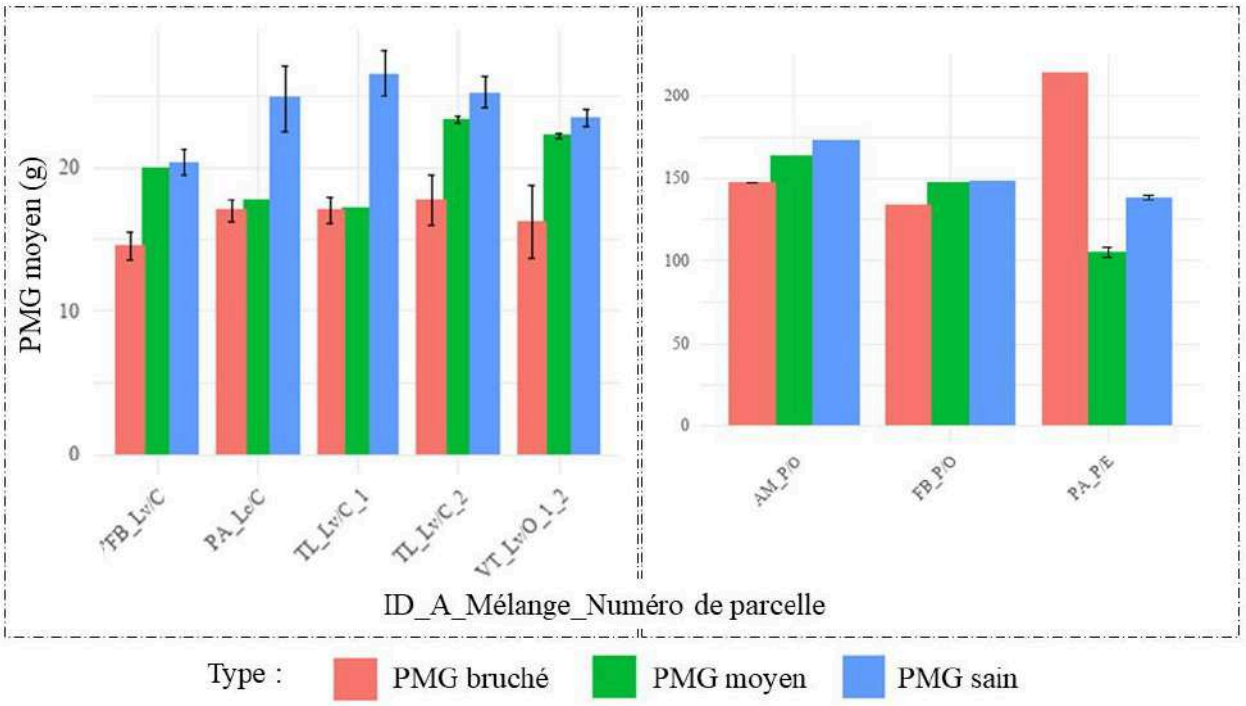


Figure 30 : PMG moyen, bruché, et sain à la moisson de la lentille (a) et du pois (b). Les barres verticales correspondent à +/- l'écart-type du PMG

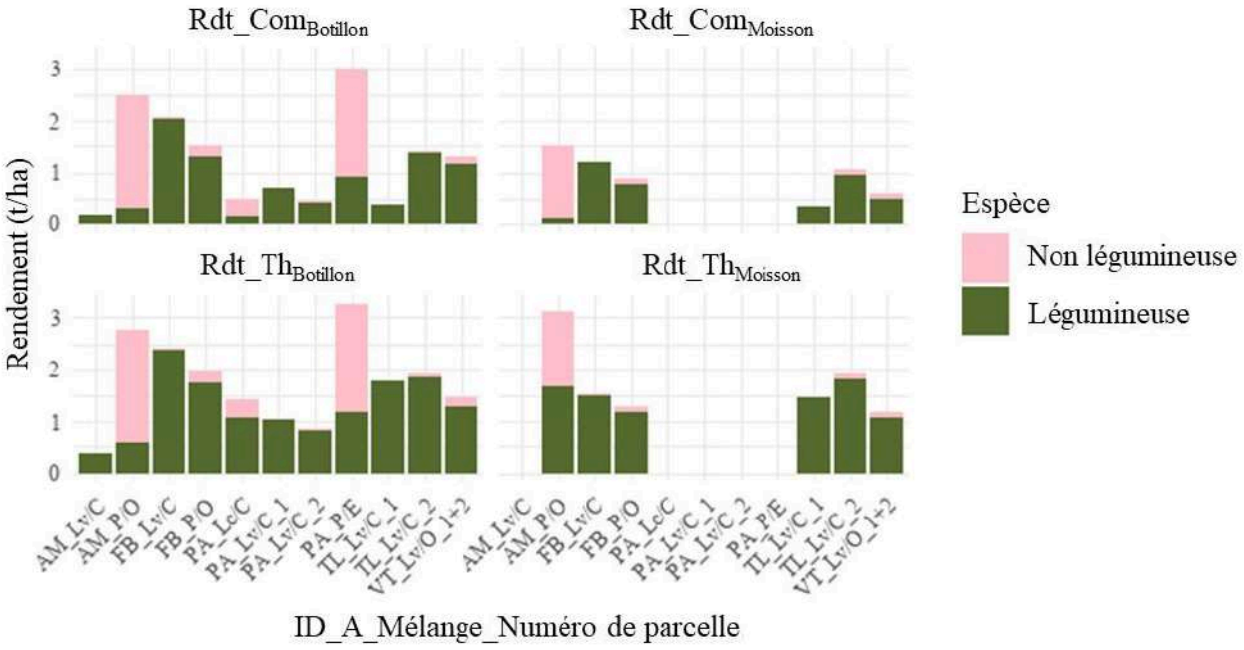


Figure 31 : Rendement commercialisable et théorique (en t/ha) des botillons et à la moisson des espèces des mélanges

3.5.5. PMG, rendement commercialisable et théorique

3.5.5.1. PMG des grains sains et bruchés

La figure 30 présente les PMG des légumineuses récoltées. Le PMG moyen de la lentille (Figure 30a), c'est-à-dire grains bruchés confondu, varie de 17,2 à 23,2 g. Le PMG bruché est bien systématiquement inférieur au PMG des grains sains (non bruchés) dans le cas de la lentille. Le PMG des grains sains varie de 20,3 à 26,5 g ce qui est inférieur au PMG moyen de la lentille (Terres Inovia, 2023). Le PMG du pois varie en moyenne de 105,1 à 163,4 g (Figure 30b). Le PMG bruché est bien inférieur au PMG sain sauf pour le PMG du pois de PA, ce qui n'est pas normal et témoigne d'une erreur. Le PMG moyen des grains de pois sains varie de 138,4 à 173,0 g, ce qui est inférieur au PMG moyen du pois de printemps (230-290 g) et du pois d'hiver (170-200 g) selon Biarnès (2019 et 2025).

Ces faibles PMG peuvent témoigner d'un manque d'eau au remplissage des grains. Ce PMG a ainsi une incidence sur le rendement commercialisable puisqu'il entraîne une diminution de la masse totale des grains récoltés et donc un rendement final moindre. Ces PMG moyen ont été utilisés pour les calculs des rendements suivants.

3.5.5.2. Rendement commercialisable et théorique

Les rendements commercialisables ($Rdt_Com_{Botillon}$) des mélanges sont en moyennes de 0,18 t/ha à 2,08 t/ha pour les mélanges lentille/cameline, 1,25 à 1,30 t/ha pour les mélanges lentille/orge et 1,52 à 2,98 t/ha pour les mélanges pois/céréale (Figure 31). Les pertes de rendement des mélanges dues aux bruches entre la récolte et la commercialisation s'élèvent ainsi entre 6 et 67 %, ce qui souligne des pertes. Le $Rdt_Com_{Moisson}$ varie de 0,34 à 1,21 t/ha pour les mélanges lentille/cameline, il est de 0,59 t/ha pour les mélanges lentille/orge et compris entre 0,87 et 1,53 t/ha pour les mélanges pois/céréale (Figure 31). Ici, les pertes de rendement dues aux bruches s'établissent entre 4 et 56 %. A ces rendements, il faudra également soustraire la part de grains cassés ou écrasés, ce qui signifie qu'il ne s'agit pas du rendement commercialisable stricte. Les rendements, à ce stade, commercialisables en lentilles sont cohérents avec les moyennes observées après tri en culture pure (Baguet *et al.*, 2023). Les rendements en cameline sont cependant très faibles, ce qui limite la double production.

Les rendement théoriques ($Rdt_Th_{Botillon}$), c'est-à-dire en absence de bruches, sont de 0,38 à 2,41 t/ha pour les mélanges lentille/cameline, 1,46 t/ha pour les mélanges lentille/orge et de 1,96 à 3,27 t/ha pour les mélanges pois/orge (Figure 31). Le $Rdt_Th_{Moisson}$ varie de 1,45 à 1,93 t/ha pour les mélanges lentille/cameline, est de 1,18 t/ha pour les mélanges lentille/orge et 1,28 à 3,10 t/ha pour les mélanges pois/orge (Figure 31). Nos résultats confirment l'impact direct des attaques de bruches sur le rendement, et plus particulièrement sur la part commercialisable de la récolte. En effet, les grains infestés ne peuvent pas être valorisés pour l'alimentation humaine, ce qui réduit le rendement. Ainsi, bien que la récolte mécanique puisse engendrer certaines pertes, notamment de grains cassés ou non ramassés, elle contribue également à éliminer une partie des grains bruchés, qui ne sont de toute façon pas valorisables.

Il faut cependant noter que les $Rdt_Th_{Moisson}$ ont été calculées en prenant en compte les pertes estimées à la pré-fauche ou moisson classique chez l'agriculteur TL. Or, même avec un matériel identique et des réglages similaires, les pertes à la récolte peuvent varier d'une parcelle à l'autre. Cela introduit une incertitude dans l'estimation du rendement théorique, qui peut être légèrement surestimé ou sous-estimé selon les cas. Au-delà des pertes mécaniques, la présence de grains bruchés ou endommagés souligne l'importance des étapes de tri et de stockage pour assurer une valorisation en alimentation humaine. Comme l'ont montré Halila (1995, cité dans Wang *et al.*, 2013), les pertes entre le rendement brut au champ et le rendement commercialisable peuvent atteindre 60 à 100 %. Bien que cette étude ne l'ait pas évalué spécifiquement, certaines références suggèrent que les cultures associées pourraient constituer une voie intéressante pour améliorer la qualité des légumineuses à la récolte. Par exemple en réduisant la pression des bruches ou en améliorant la récoltabilité (Viguier, 2018).

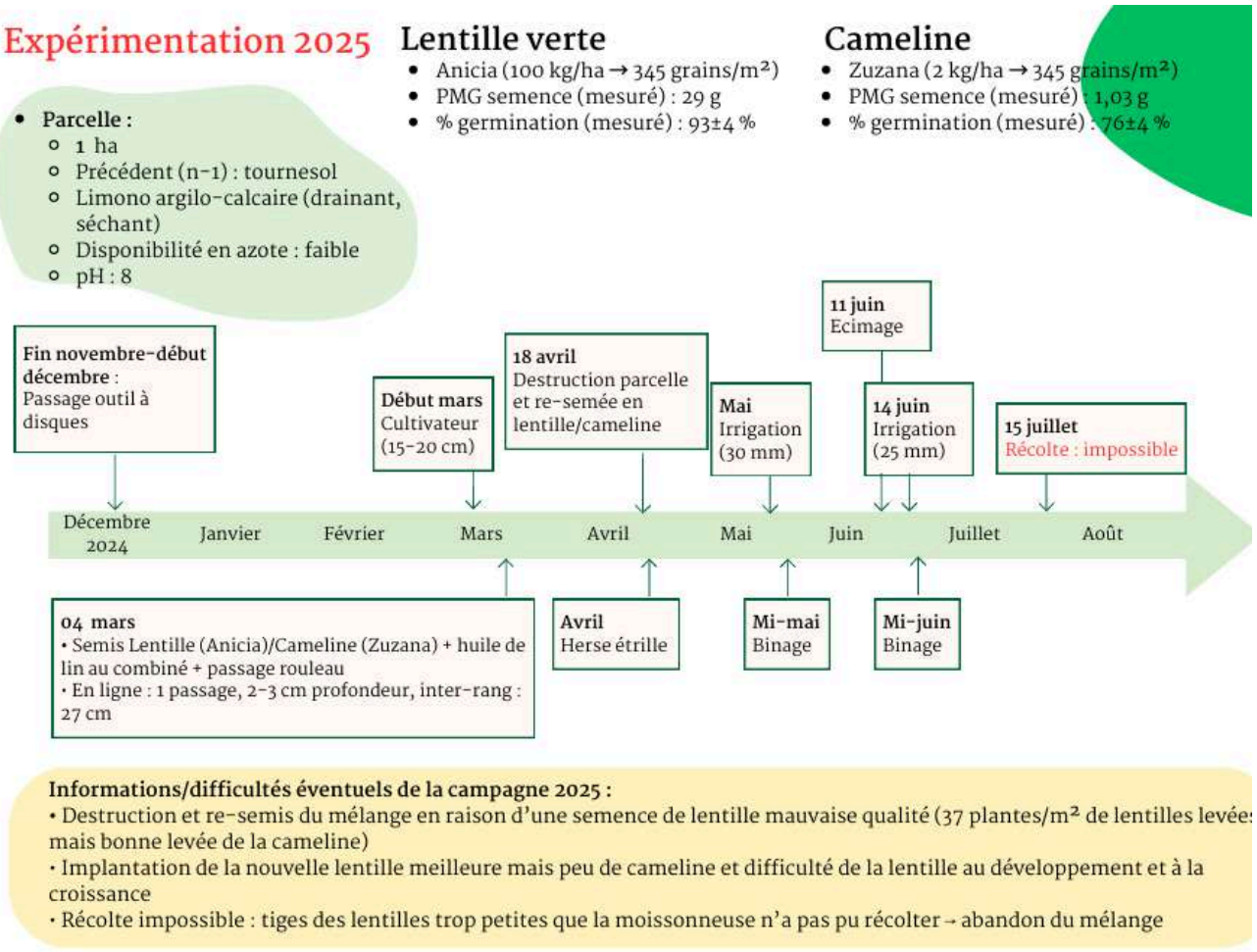


Figure 32 : ITK du mélange Lentille/Cameline chez l'agriculteur AM

3.6. Diagnostic agronomique par ITK

Bien que l'ensemble des parcelles aient fait l'objet d'un suivi technique, nous avons choisi de présenter ici uniquement six diagnostics agronomiques complets. Ce choix repose sur la volonté de croiser les objectifs exprimés par les producteurs avec des indicateurs mesurés pour évaluer leur atteinte. Certaines situations ne sont pas présentées dans cette section à savoir la parcelle TL_Lv/C_1 du fait de l'absence de cameline dans le mélange ou encore des parcelles de l'agriculteur PA (Annexe V), pour lesquelles les rendements n'étaient pas disponibles.

3.6.1. Lentille/cameline

3.6.1.1. AM_Lv/C

- **Analyse et réponses aux objectifs**

L'ITK est détaillé en figure 32 et l'atteinte des objectifs du producteur peut-être résumé ainsi : (1) récolte de lentille (≥1 t/ha) : non atteint, (2) récolte de cameline : non atteint, (3) limitation des adventices : non atteint et (4) limitation de la verse : atteint.

La lentille n'a pas pu être récoltée en raison d'un développement trop faible (hauteur de 23 cm à maturité) et ce malgré la barre de coupe posée au sol. Les gousses devaient être trop basses (Clair, 2021). Les aspérités de terrains liées au désherbage mécanique (herse étrille en avril et 2 binages mi-mai et mi-juin) ont pu empêcher la barre de coupe de la moissonneuse-batteuse de fonctionner correctement et de récolter la culture. Le rendement de la cameline est également très faible du fait d'un écimage le 11 juin ayant coupé une partie des gousses contenant les graines.

La faible disponibilité en azote a probablement limité la croissance de la lentille avant la mise en place de la fixation symbiotique. La cameline a pu en être d'autant plus affectée puisqu'elle dépend entièrement de la ressource en azote du sol. En parallèle, le semis tardif, dans un sol séchant et les conditions climatiques sèches et chaudes de la campagne ont, sans aucun doute, limité la hauteur de la lentille (Fichet *et al.*, 2022) et ceci, malgré l'irrigation mise en place en mi-mai et mi-juin lors de l'apparition de l'inflorescence et de la floraison. Nous émettons l'hypothèse que cette irrigation a été trop tardive mais a permis tout de même de limiter les conséquences de la sécheresse.

La forte présence d'adventices sur la parcelle (53 % de la MS de la parcelle) a engendré une compétition avec le mélange que ce soit pour l'azote (notamment en début de cycle), l'eau (limitante) ou encore la lumière. La levée des adventices semble avoir été facilitée par la destruction du mélange initialement implanté (lentille/cameline), opération qui aurait agit comme un « faux-semis ». Notons que cette destruction a été faite en raison de la faible levée de lentille (37 plantes/m²) en lien avec une mauvaise qualité germinative (27 %). Pour le second semis, l'implantation a été jugée satisfaisante avec 264 plantes/m², soit seulement 18 % de pertes à la levée. La faible densité de cameline (15 plantes/m², soit 90 % de pertes) a entraîné un déséquilibre du mélange. Au final le mélange est peu compétitif globalement vis-à-vis des adventices. Les désherbages mécaniques réalisés à la suite n'ont pas permis de contrôler efficacement cette flore, possiblement car réalisées trop tardivement.

Enfin, l'objectif de limiter la verse de la lentille a été rempli. Les observations en parcelle sont confirmées par la mesure (2 %), en raison d'une faible hauteur de la lentille. Ceci mène à se questionner sur la hauteur minimale à partir de laquelle la lentille verse. La plante compagne n'a cependant que très peu joué le rôle de tuteur en raison de sa faible densité.

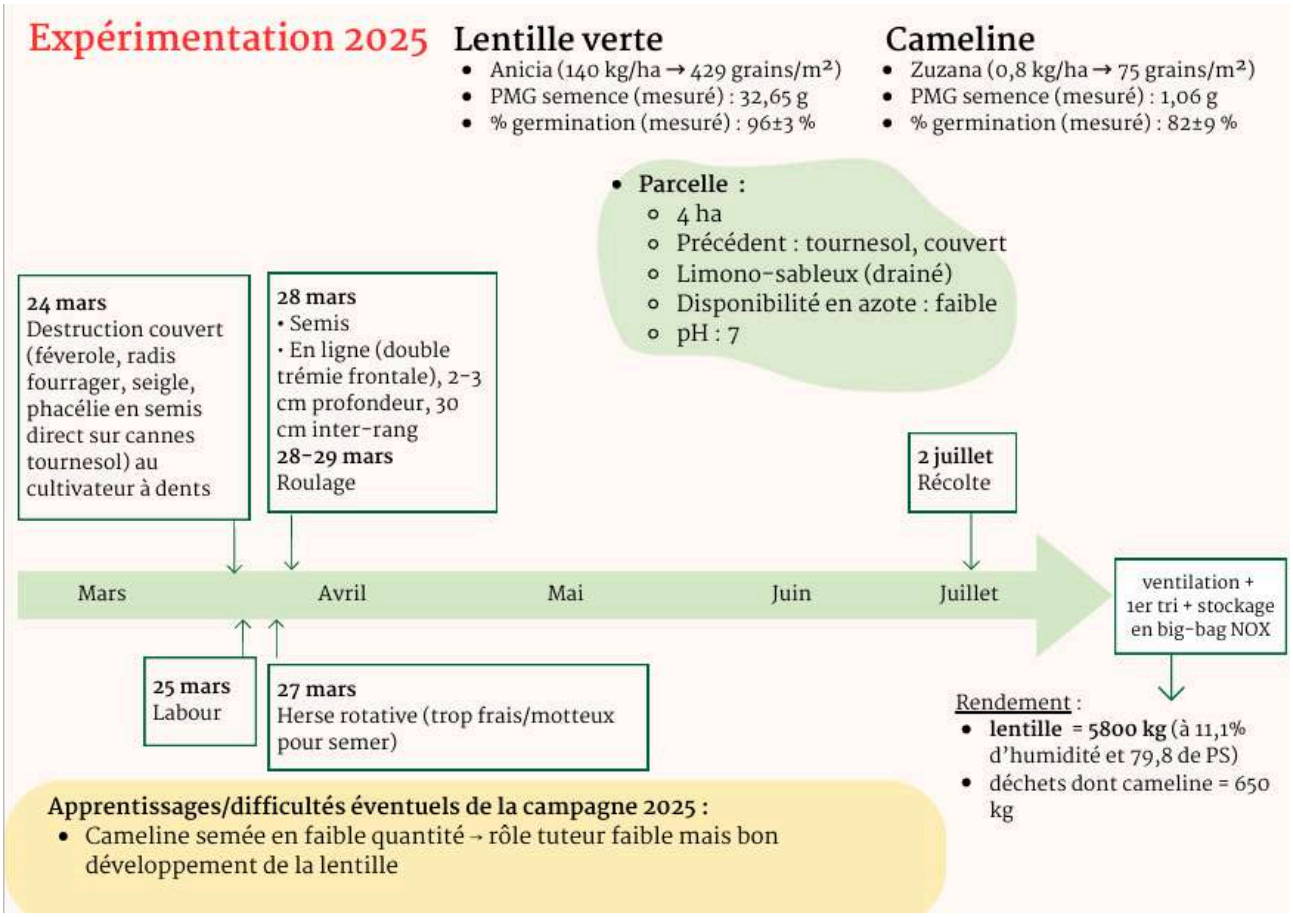


Figure 33 : ITK du mélange Lentille/Cameline chez l'agriculteur FB

- **Pistes d'amélioration**

Pour une prochaine campagne, nous pourrions tout d'abord recommander des actions préventives afin de limiter les adventices, telles qu'un labour et/ou un faux-semis ou la mise en place d'un couvert en interculture. Il serait judicieux de tester la faculté germinative des semences et de calculer le PMG s'il est inconnu afin d'ajuster la densité de semis. La préparation d'un lit de semence fin est également nécessaire pour une bonne implantation de la lentille et, dans la mesure du possible, semer la lentille tôt (mars) afin de limiter les risques de stress hydrique pendant la phase de reproduction. Nous recommandons également de continuer à semer à faible profondeur (2 cm), de mélanger la lentille et la cameline en amont avec de l'huile et de rouler pour garantir un bon contact sol-graine.

Une irrigation à la levée de la lentille en cas de précipitations insuffisantes ou de sécheresse précoce pourrait favoriser une bonne implantation. En revanche, si les adventices sont déjà très présentes, ceci est à éviter ou à combiner avec un désherbage. Le désherbage pourrait être effectué en pré-levée à l'aveugle en veillant à ne pas perturber le lit de semence et au stade 3-4 feuilles de la lentille (Riquet *et al.*, 2023a). Il est également possible d'effectuer un roulage après le dernier passage de herse étrille jusqu'au stade 8-10 feuilles de la lentille pour niveler et enfouir les cailloux présents en surface afin de faciliter la récolte. Enfin, si la lentille est très basse à l'approche de la maturité et que les conditions sont réunies, c'est-à-dire 4-5 jours de sec après pour le séchage des andains et lentilles pas trop sèches, une pré-fauche pourrait être envisagée pour assurer une récolte.

3.6.1.2. **FB_Lv/C**

- **Analyse et réponses aux objectifs**

L'ITK est détaillé en figure 33 et l'atteinte des objectifs du producteur peut être résumé ainsi : (1) produire de la lentille : atteint, (2) rôle tuteur de la cameline : non atteint et (3) limiter la verse : non atteint.

Le rendement moisson de la lentille s'élève à 1,3 t/ha, ce qui permet d'atteindre l'objectif premier. Le rendement de la cameline est quant à lui très faible avec 0,01 t/ha, ce qui est cohérent avec les objectifs puisque cette espèce n'est pas valorisée par l'agriculteur. Les rendements en sortie de parcelles sont jugés corrects par l'agriculteur bien qu'il considère que « cela aurait pu être mieux ». Ces rendements peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs. es conditions climatiques sèches et chaudes tout au long de la campagne ont conduit à l'avortement de fleurs, ayant alors une incidence sur le développement des gousses. L'agriculteur estime également que ces conditions climatiques ont conduit à une récolte précoce qui n'a pas permis à la lentille d'exprimer pleinement son potentiel.

La verse de la lentille (43 %) est apparue tôt dans le cycle, dès la phase de développement du fruit et ce en lien avec des épisodes orageux. Cette verse a eu une influence sur la récolte qui a été plus délicate en raison de gousses basses. Ceci explique en partie la différence de rendement entre le rendement sur pied et récolté (43 % pour la lentille et 97 % pour la cameline). Cette verse s'explique par l'absence de l'effet tuteur de la cameline, due à une faible densité de peuplement (5 plantes/m²). Ceci s'explique par de fortes pertes à la levée (92 %), malgré un bon taux de germination de la semence (82 %). Ces résultats soulignent la difficulté d'implantation de cette espèce. Notons également la présence modérée d'adventices (10,4 % de la biomasse parcellaire), alors même que l'agriculteur n'a pas effectué de désherbage mécanique, ayant pu avoir une influence sur cette implantation. Enfin, le taux de grains bruchés, jugé moyen pour cette campagne (9,8 %), a induit, dans le cas présent, une perte de rendement de la lentille de 0,12 t/ha entre le rendement récolté et le rendement commercialisable.

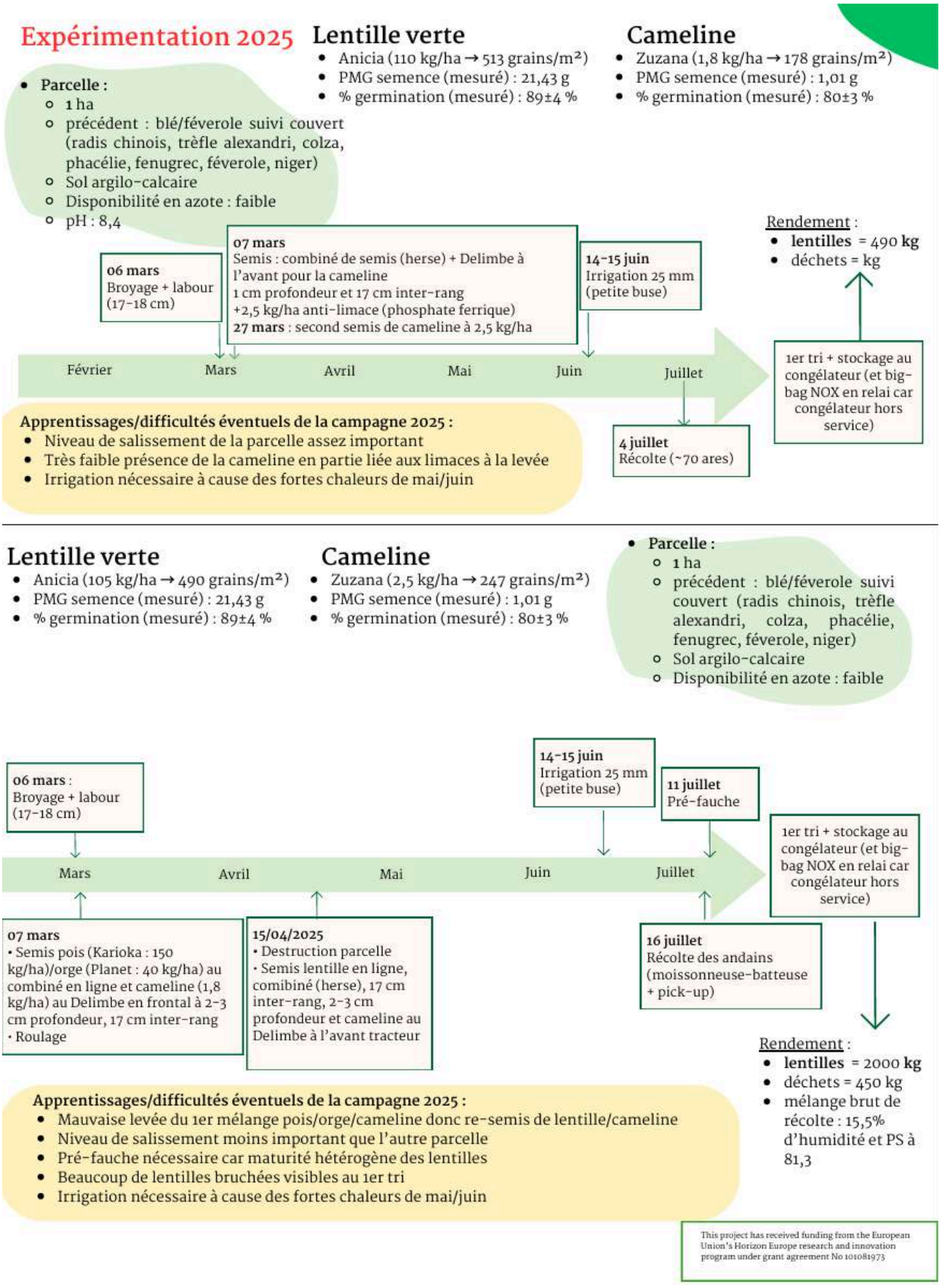


Figure 34 : ITK des mélanges Lentille/Cameline chez l'agriculteur TL

- **Pistes d'amélioration**

Pour une prochaine campagne, quand bien même l'agriculteur ne souhaite pas valoriser la cameline, nous pourrions recommander une augmentation de la densité de semis à 1 kg/ha pour assurer un minimum de peuplement et avoir les effets associés, en particulier pour la réduction de la verse. Une autre alternative serait d'utiliser une autre espèce comme par exemple une céréale (orge ou blé) semée en faible densité de l'ordre de 20 kg/ha. Il serait pertinent de continuer le semis avec une double trémie et un roulage, combinaison ayant permis une bonne implantation de la lentille. Enfin, pour la gestion des adventices (chénopodes et rumex notamment), il pourrait être pertinent d'effectuer un faux-semis en amont ou d'envisager un désherbage mécanique dès que possible.

3.6.1.3. **TL_Lv/C_2**

L'ITK est détaillé en figure 34 et l'atteinte des objectifs du producteur peut être résumé ainsi : (1) produire de la lentille en sortie de la parcelle (≥1 t/ha) : atteint, (2) produire de la cameline : atteint et (3) gestion des bruches : non atteint.

Le rendement à la moisson de la lentille est de 1,2 t/ha et de 0,10 t/ha pour la cameline ce qui répond aux objectifs visés par l'agriculteur pour la lentille mais pas pour la cameline ce qui peut s'expliquer par plusieurs facteurs. D'une part, la maturité hétérogène des lentilles a conduit l'agriculteur à choisir une récolte par pré-fauche qui a entraîné des pertes estimées à 0,41 t/ha, soit un niveau supérieur à celui observé en moisson classique (0,16 t/ha). D'autre part, le taux de grains bruchés à la récolte (autour de 25 %) avec *in fine* un rendement commercialisable estimé à 0,97 t/ha pour la lentille, montre que le mélange seul ne suffit pas à réguler ce ravageur. Or, comme il n'existe aucun moyen de lutte en AB contre les bruches, la limitation des dommages doit s'effectuer par la congélation ou l'asphyxie après la récolte.

Le couvert végétal cultivé était bien structuré, ce qui a permis une sécurisation du rendement du fait notamment d'une faible verse de la lentille (5 %). Ce résultat semble lié à la fois au rôle partiel de la cameline, et à la présence d'adventices (19 % de la biomasse parcellaire), qui conjointement, ont pu participer au maintien de la structure du couvert. La pression en adventices sur cette parcelle est bien inférieure à celle observée sur la parcelle voisine (38 %). Cette différence s'explique par l'historique des parcelles, qui constituaient à l'origine une seule et même parcelle. Sur celle étudiée ici, la destruction d'un premier semis de pois/orge/cameline a probablement contribué à la réduction de la flore adventice en jouant un rôle de faux-semis involontaire mais efficace.

Les conditions climatiques chaudes et sèches ont, à nouveau, induit un stress hydrique, observé au travers de l'avortement de fleurs et de plantes "brûlées" et l'irrigation (25 mm au 14-15 juin) a cependant permis de limiter les dégâts sur le développement et le remplissage des gousses.

Les pertes à la levée de la cameline (83 %) témoigne de la difficulté d'implantation de cette espèce, ce qui a des conséquences à la fois sur sa production mais aussi sur celle de l'espèce associée. Nous émettons l'hypothèse que le semis à la volée est en partie responsable de cette faible levée. Cette mauvaise levée de la cameline a limité son rôle de tuteur pour la lentille mais sans être préjudiciable dans le cas présent du fait de la faible verse observée. Malgré les pertes à la levée de la lentille (20 %) la densité finale était conforme aux attentes avec 309 plantes/m² mais nous avons constaté une forte hétérogénéité sur la parcelle en raison notamment d'un sur-semis sur le côté droit du tracteur en raison d'un problème technique.

- **Pistes d'amélioration**

La destruction du premier semis, en grande partie due à une forte pression de limaces, suggère qu'un report de la date de semis pourrait être envisagé mais cette piste semble risquée dans un contexte de changement climatique avec des périodes de sécheresse qui devraient être de plus en plus précoces. Dans le cas présent, l'agriculteur ne souhaite pas nécessairement désherber ses mélanges, ce qui nous amène à proposer d'effectuer un faux-semis avant le semis ou avant la levée des cultures et ce afin de limiter autant que possible la pression des adventices sur la parcelle et leur concurrence avec les cultures.

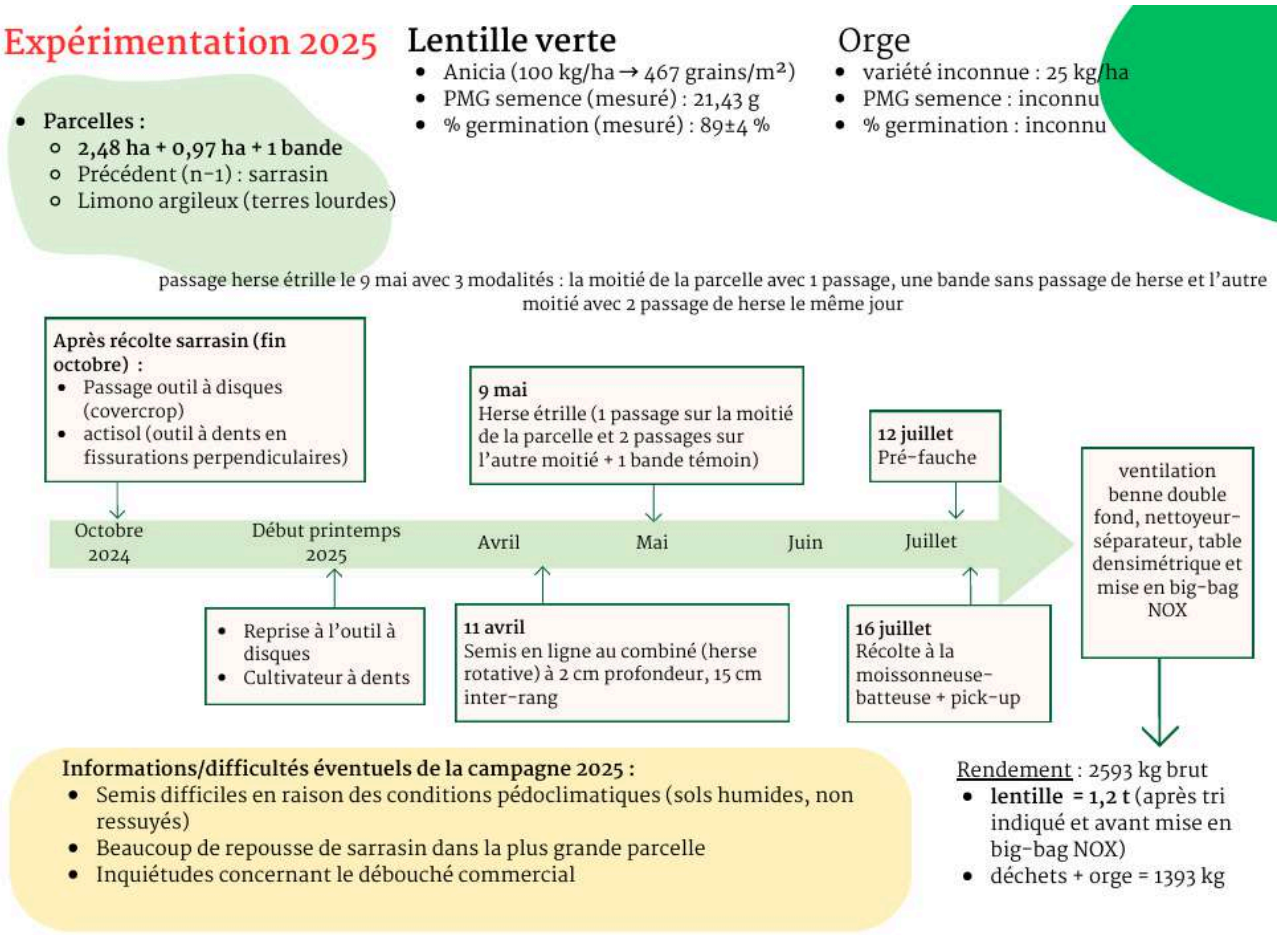


Figure 35 : ITK du mélange Lentille/Orge chez l'agriculteur VT

La cameline semble être difficile à implanter et comme il s'agit d'une culture de rente pour l'agriculteur il est nécessaire d'identifier des solutions techniques. Tout d'abord nous suggérons de maintenir le semis en ligne et à faible profondeur (2 cm) des deux espèces en conservant le même inter-rang et en mélangeant au préalable les graines avec de l'huile. Si les difficultés d'implantation de la cameline ne peuvent être résolues alors il peut être envisagé de remplacer la cameline par une céréale (orge ou blé) qui pourrait être valorisée pour l'alimentation des animaux de la ferme. Dans ce cas, les densités de semis recommandées seraient de 100 kg/ha pour la lentille et 20 kg/ha maximum pour la céréale. Ce choix conduirait l'agriculteur à cultiver la cameline en tant que culture principale (pure ou en mélange) pour maintenir cette production dans son assolement.

3.6.2. Lentille/orge (VT_Lv/O_1 et 2)

- **Analyse et réponses aux objectifs**

L'ITK est détaillé en figure 35 et l'atteinte des objectifs du producteur peut être résumé ainsi : (1) produire de la lentille (≥1 t/ha) : non atteint, (2) limiter la concurrence avec l'orge : atteint et (3) limiter la verse : atteint.

Le rendement moisson des deux parcelles s'élève à 0,51 t/ha pour la lentille, ce qui ne permet pas d'atteindre l'objectif fixé et il en est de même pour le rendement de l'orge qui n'a été que de 0,1 t/ha. Pour autant, le rendement sur pied de la lentille était de 1,0 t/ha ce qui signifie que les pertes lors de la récolte sont de 50 %. Le taux de grains bruchés (9 %) est relativement modéré et constitue une très faible perte de rendement. *In fine*, le rendement commercialisable de la lentille est de 0,49 t/ha auxquels il faut encore soustraire les grains cassés et ratatinés.

En parallèle, l'enherbement important sur la parcelle 1 (40 % d'adventices dans la biomasse parcellaire) et plus modéré sur la parcelle 2 (17 %) a entraîné une concurrence certaine avec le mélange. C'est le cas notamment du sarrasin qui était très développé sur la parcelle 1 et qui a donc joué un rôle compétitif important dès la levée du mélange et pour lequel le désherbage mécanique au stade 4-5 feuilles de la lentille (9 mai) a semblé peu efficace. A l'inverse, ce salissement semble avoir permis de "protéger" la lentille pendant la période chaude et sèche, mais a aussi sûrement contribué à une maturité hétérogène qui a justifié la pré-fauche.

Les pertes à la levée ont été estimées à 41 % pour la lentille et 56 % pour l'orge. La concurrence de l'orge sur la lentille semble avoir été limitée en raison de la faible densité de la céréale (26 plantes/m²). A l'inverse, la densité de lentille est inférieure aux objectifs (215 plantes/m²) ce qui n'a certainement pas permis d'être au potentiel de rendement. Malgré la faible densité de l'orge, la lentille a peu versé (3 % dans la parcelle 1 et 17 % dans la parcelle 2) et nous émettons l'hypothèse que la moindre verse sur la parcelle 1 est dûe à la présence du sarrasin qui a servi de tuteur.

- **Pistes d'amélioration**

Nous pourrions recommander d'éviter le précédent sarrasin pour un mélange à base de lentille, afin d'éviter les repousses et la concurrence avec la culture. Nous pourrions également recommander un désherbage plus précoce, à l'aveugle en pré-levée ou au stade 3-4 feuilles de la lentille ou un faux-semis en fonction du précédent cultural. En revanche, la densité lentille/orge semble avoir été adaptée si bien que nous recommandons de la conserver.

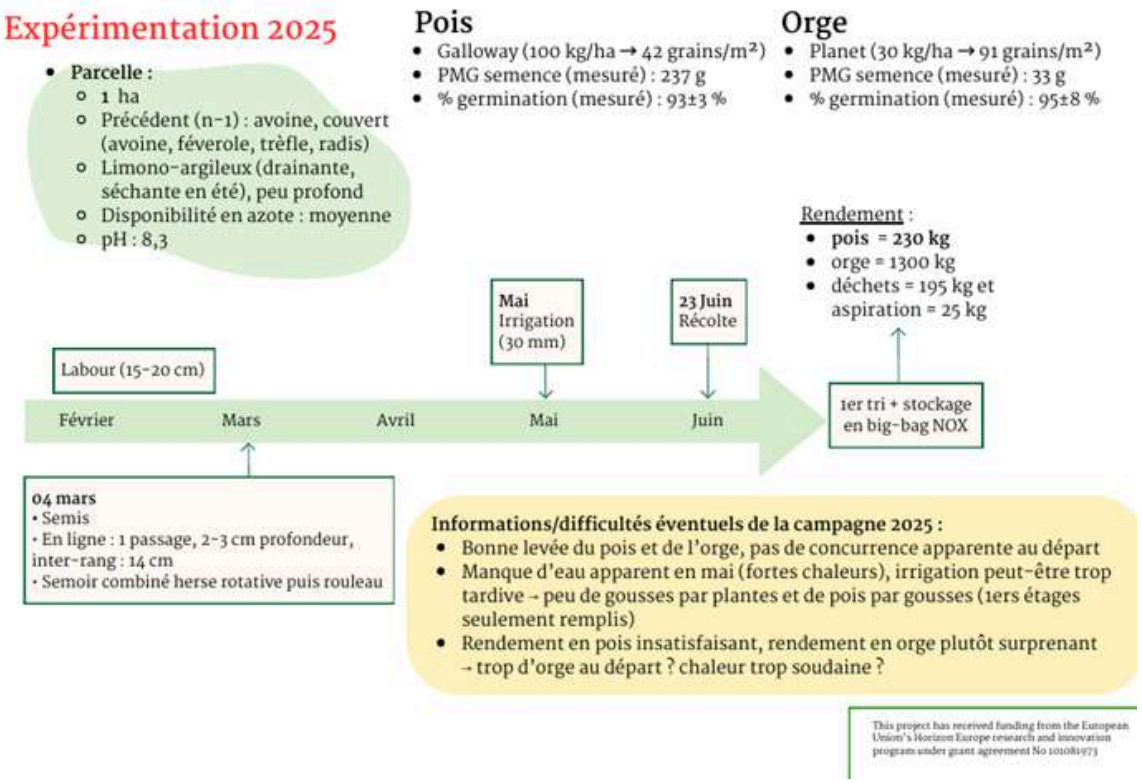


Figure 36 : ITK du mélange Pois/Orge chez l'agriculteur AM

3.6.3. Pois/céréale

3.6.3.1. AM_P/O

- **Analyse et réponses aux objectifs**

L'ITK est détaillé en figure 36 et l'atteinte des objectifs du producteur peut être résumée ainsi : (1) récolte du pois (≥ 2 t/ha sortie de parcelle) : non atteint, (2) rôle tuteur de l'orge (0,5 t/ha sortie de parcelle) : atteint, (3) limiter verse : atteint et (4) couverture du sol pour limiter les adventices : atteint.

Le rendement moisson du pois s'élève à 0,2 t/ha, ce qui est largement inférieur à l'objectif de 2 t/ha et celui de l'orge est de 1,4 t/ha et dépasse largement l'objectif fixé de 0,5 t/ha. Ces rendements s'expliquent par plusieurs facteurs. Tout d'abord, les observations à la récolte nous ont permis de détecter une grande part de grains cassés dus à la fois aux réglages de la moissonneuse-batteuse mais également à des grains bruchés fragiles et se cassant lors de la récolte sachant que le taux de grains bruchés est important (41%). *In fine*, l'agriculteur ne pourra pas valoriser plus de 0,1 t/ha de pois sans tenir compte des grains cassés et ratatinés. Le faible rendement du pois est lié à un faible nombre à la fois de graines/gousses (2 à 3) et de gousses/plantes. Le stress hydrique en phase de floraison et de reproduction semble avoir empêché la formation de gousses sur les derniers étages et ce malgré l'irrigation, celle-ci étant été trop tardive (mai) et/ou insuffisante.

L'implantation du mélange est un facteur impactant l'ensemble des composantes de rendement mais nos mesures ont donné à voir des incohérences entre les mesures de densités levées et potentielles. (88 vs 76 plants/m² pour l'orge et 68 vs 35 plantes/m² pour le pois). Ces résultats indiquent soit une densité de semis sous-estimée soit une surestimation lors des comptages. La disponibilité en azote estimée comme moyenne pour cette parcelle a certainement profité à l'orge qui est plus compétitive que le pois. La densité du mélange a cependant permis de limiter les adventices (7 % de la biomasse parcellaire) en raison notamment de la compétitivité de l'orge. Concernant l'objectif de limiter la verse du pois, celui-ci a été atteint suggérant que l'orge est un bon tuteur pour le pois dont les vrilles permettent de bien structurer le couvert.

- **Pistes d'amélioration**

Afin d'améliorer la conduite de ce mélange, nous pourrions recommander dans un premier temps de calculer le PMG des semences pour s'assurer de la densité semée de chaque espèce. En complément, la densité de l'orge pourrait être réduite à 20 % de la densité de pois afin de limiter la concurrence interspécifique si l'objectif est de produire majoritairement du pois. Ensuite, dans les sols séchants, il pourrait être intéressant de semer plus tôt et dans un lit de semence bien aéré pour faciliter le développement des nodosités du pois. Après l'implantation, il convient de surveiller les premiers signes de stress hydrique, notamment en cas de temps chaud et sec, et ce dès l'apparition de l'inflorescence afin d'anticiper une irrigation éventuelle. Enfin, il faut veiller à un bon réglage de la moissonneuse-batteuse pour limiter les grains cassés à la récolte.

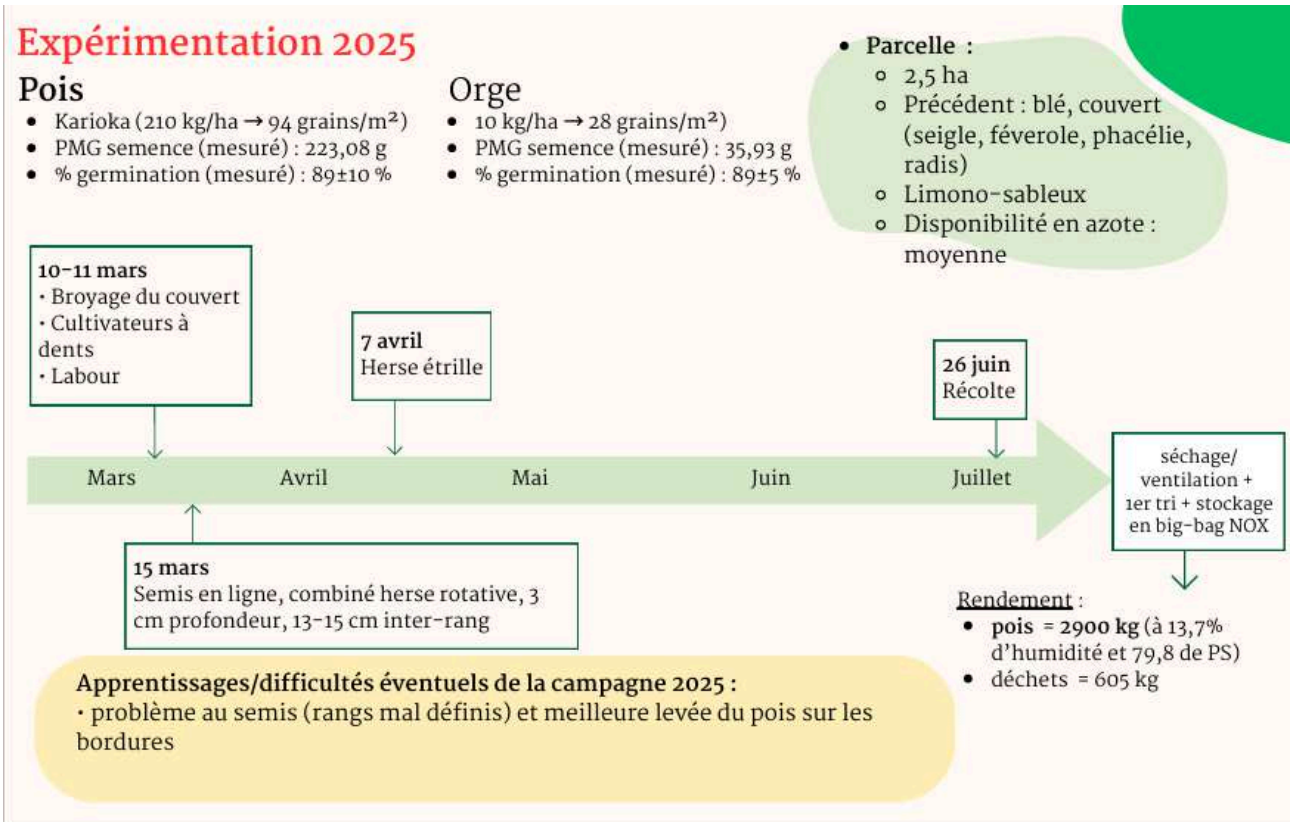


Figure 37 : ITK du mélange Pois cassé/Orge chez l'agriculteur FB

3.6.3.2. **FB_P/O**

- **Analyse et réponses aux objectifs**

L'ITK est détaillé en figure 37 et l'atteinte des objectifs du producteur peut être résumée ainsi : (1) produire du pois : atteint, (2) limiter la verse du pois : atteint et (3) limiter les adventices : partiellement atteint.

Le rendement du pois à la moisson s'élève à 1,0 t/ha ce qui permet d'atteindre l'objectif de production visé. Toutefois, seulement 0,4 t/ha est effectivement valorisée à l'issue d'un premier tri. En effet, les petits et les gros grains sont sortis avec respectivement les petits et les gros déchets et nécessite un second tri. La qualité est également affectée par un taux élevé de grains bruchés atteignant jusqu'à 61 % pour les gros grains. Par ailleurs, la perte de rendement estimée par la différence entre le rendement des bottillons et le rendement moisson est de 41 % probablement du fait de pertes mécaniques lors de la moisson à travers une égrenage.

Les conditions climatiques, marquées par la chaleur et la sécheresse, combinées à un sol à tendance hydromorphe, ont probablement accentué le stress hydrique. Celui-ci se traduit par une observation d'avortements floraux et un développement hétérogène du pois, plus vigoureux en bordure de parcelle qu'au centre. La concurrence entre le pois et l'orge semble avoir été bien maîtrisée du point de vue de l'équilibre entre les deux espèces. Pour autant, le rendement en orge reste trop faible avec seulement 0,1 t/ha qui s'explique par la faible densité (18 plants/m²) alors que celle du pois était de 76 plantes/m².

En ce qui concerne les adventices, leur gestion apparaît insuffisante du fait qu'elles représentent 27 % de la biomasse parcellaire. Le passage de herse étrille, réalisé avant la formation des vrilles, n'a pas permis un contrôle satisfaisant tout comme l'hétérogénéité du peuplement a facilité l'installation des adventices à certains endroits. Le couvert précédent, composé notamment de légumineuses et de crucifères, a probablement contribué à une bonne disponibilité en azote ce qui a été bénéfique pour le mélange mais aussi pour les adventices.

- **Pistes d'amélioration**

Nous pourrions recommander une légère augmentation de la densité de semis de la céréale, à environ 15 kg/ha, afin d'améliorer la lutte contre les adventices sans pour autant pénaliser le pois. Une attention particulière doit également être portée aux réglages du semoir pour garantir une implantation régulière du mélange, ce qui favoriserait une meilleure concurrence avec les adventices. Nous recommandons également un roulage après le semis afin de favoriser le contact terre-graines. Concernant la lutte contre les adventices, au-delà de la densité de semis, il pourrait être intéressant d'effectuer un passage de herse étrille en pré-levée en complément du désherbage effectué en post-levée avant la formation des vrilles. En cas de forte pression, un labour ponctuel ou un faux-semis peut être envisagé. Enfin, il serait intéressant de valoriser l'ensemble des pois récoltés mais ceci nécessite d'évaluer le rapport coût-bénéfice d'un tri supplémentaire.

Conclusion et perspectives

Cette étude visait à évaluer les performances agronomiques de mélanges d'espèces conduits chez des agriculteurs biologiques du territoire angevin. Les objectifs étaient variables et multiples : assurer une production de légumineuses (lentilles ou pois protéagineux), double production, limiter la concurrence interspécifique mais aussi réduire la verse et la pression des adventices. La campagne a été marquée par des conditions climatiques particulièrement contraignantes, avec une sécheresse précoce affectant l'ensemble du cycle, mais principalement les phases de floraison et de reproduction. Ces conditions ont fortement limité les rendements de lentille et de pois, conduisant à des résultats globalement insatisfaisants pour les producteurs. Par ailleurs, plusieurs parcelles de lentille n'ont pas pu être récoltées montrant que même conduites en mélange cette culture reste difficile à maîtriser. Les mélanges d'espèces ne permettent pas toujours de lever les contraintes associées à la culture des légumineuses, en particulier lorsque l'implantation de certaines espèces compagnes, comme la cameline, s'avère difficile et très variable. Ces mélanges n'ont donc pas permis d'atteindre l'ensemble des objectifs fixés, en raison d'interactions complexes entre espèces, mais aussi du fait des facteurs biotiques et abiotiques.

Nos résultats n'ont montré aucune corrélation significative entre les biomasses et rendements des espèces du mélange, ni entre la biomasse totale du mélange et les adventices. En revanche, analysés individuellement, nos résultats ont permis de souligner l'influence de la densité de chaque espèce sur la compétition interspécifique, ainsi que sur la concurrence vis-à-vis des adventices. Le rôle de tuteur assuré par l'espèce compagne semble également dépendre de sa densité et de son développement. Aucune corrélation significative entre la biomasse de l'espèce associée et la verse des légumineuses n'a été mise en avant. Par ailleurs, certaines parcelles semblent montrer une influence non négligeable des adventices sur la régulation de la verse, complexifiant l'interprétation des effets du mélange.

Concernant la récolte, la stratégie de pré-fauche permet d'ouvrir la voie à des traitements des grains post-récolte plus précoces (asphyxie, congélation). En revanche, des pertes de rendement sont associées à cette technique, ce qui nécessite une réflexion stratégique en fonction du rapport coûts-bénéfices. Nos résultats ont également montré une efficacité comparable des méthodes congélation et d'asphyxie quant à la réduction des bruches des légumineuses. En revanche, les taux de grains bruchés ne sont pas significativement différents de ceux observés sur les lots témoins conservés à l'air libre alors même que ces traitements sont considérés comme nécessaires pour stopper le développement des bruches.

Bien que le nombre de parcelles suivies reste relativement faible pour garantir une analyse pleinement robuste, il apparaît difficile d'envisager un suivi plus large compte tenu des contraintes techniques et organisationnelles. Sur une période de six mois, avec une seule opératrice chargée du suivi, il n'a pas été possible de réaliser l'ensemble des mesures prévues chez tous les agriculteurs, ce qui limite la portée de l'analyse. Par ailleurs, certaines incohérences ont été relevées au cours des mesures, notamment relatives à la densité levée suggérant une surestimation du peuplement lors des comptages au champ, ou une sous-estimation du pourcentage de germination, ou plus raisonnablement, une sous-estimation par l'agriculteur de la densité semée. Ces limites mettent en évidence la difficulté d'assurer un suivi précis et individualisé, en raison de la complexité et de la singularité de chaque itinéraire technique.

Enfin, face à la diversité des enjeux liés aux mélanges d'espèces, une analyse économique de ceux-ci semble nécessaire car la rentabilité reste un enjeu crucial pour les agriculteurs. Ceci mène à plusieurs pistes de réflexion, tant sur les itinéraires techniques que sur les aspects organisationnels et économiques qu'il s'agisse de la gestion post-récolte (tri, stockage) ou de la mise en place de projets collectifs pour valoriser ces mélanges (utilisation de tireurs optiques, structuration de filières spécifiques).

Références bibliographiques

Académie d'agriculture de France, 2022. *La croissance des plantes et des peuplements végétaux : mesure et modélisation*.

Anil L., **Park J.**, **Philipps R.H.**, et **Miller A.**, 1998. Temperate intercropping of cereals for forage: a review of the potential for growth and utilization with particular reference to the UK. *Grass and Forage Science*, DOI : 10.1046/J.1365-2494.1998.00144.X

Arvalis, 2024. *Céréales à paille : évaluer la qualité germinative des semences de ferme*. https://www.arvalis.fr/infos-techniques/cereales-paille-evaluer-la-qualite-germinative-des-semences-de-ferme (Consulté le 4 septembre 2025).

Augagneur M., **Bouviala M.**, **Brun L.**, **Burel E.**, **Ménard J.**, et **Riquet G.**, 2021. *Produire des semences en agriculture biologique : lentille*. https://www.fnams.fr/wp-content/uploads/2021/04/2021-04-fichebio-lentille.pdf (Consulté le 2 septembre 2025).

Baguet C., **Fichet E.**, **Champion J.**, **Olwen T.**, **Bourrel S.**, **Mialon A.**, **Farré E.**, **Cipolla L.**, et **Terres Inovia**, 2023. *Fiche technico-économique - Lentille bio*.

Bedoussac L., 2018. *De l'analyse des performances et du fonctionnement des associations d'espèces à leur insertion dans les systèmes de culture et les filières*. (Mémoire en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches). Toulouse, France : Université de Toulouse Institut National Polytechnique de Toulouse. , 135 p.

Bedoussac L., **Journet E.-P.**, **Hauggaard-Nielsen H.**, **Naudin C.**, **Corre-Hellou G.**, **Jensen E.S.**, et **Justes E.**, 2015. Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. *Agronomy for Sustainable Developement*, 35, p. 911‑935. DOI : 10.1007/s13593-014-0277-7

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*, 330 (1), p. 19‑35. DOI : 10.1007/s11104-009-0082-2

Bedoussac L., **Lisa A.**, **Elina D.**, **Salembier C.**, et **Jeuffroy M.-H.**, 2022. *De la théorie à la mise en pratique des mélanges d'espèces*. DOI : 10.17180/b5f1-w556

Biarnès V., 2019a. *Conditions de récolte du pois*. https://www.terresinovia.fr/-/conditions-de-recolte-du-pois (Consulté le 12 août 2025).

Biarnès V., 2019b. *Les stades repères du pois*. https://www.terresinovia.fr/-/les-stades-reperes-du-pois (Consulté le 16 mai 2025).

Biarnès V., 2025. *Semer son pois de printemps au bon moment*. https://www.terresinovia.fr/-/semer-son-pois-de-printemps-au-bon-moment (Consulté le 12 août 2025).

Biarnès V., **Robert C.**, et **Ruck L.**, 2024. *Bruche : des graines perforées*. https://www.terresinovia.fr/-/bruche-des-graines-perforees (Consulté le 16 mai 2025).

Bio 82 et **FRAB Midi-Pyrénées**, 2011. *Petit épeautre : une céréale ancienne pleine d'avenir*.

Biowallonie, 2022. *Culture du pois*. https://www.biowallonie.com/wp-content/uploads/2022/06/Culture-du-pois.pdf (Consulté le 10 août 2025).

Bize N. et **Choupault S.**, 2020. *Cameline* (22). https://www.agrobio-bretagne.org/voy_content/uploads/2021/12/Web_22-CAMELINE.pdf (Consulté le 23 mai 2025).

Boisclair J. et **Estevez B.**, 2006. Lutter contre les insectes nuisibles en agriculture biologique : intervenir en harmonie face à la complexité. *Phytoprotection*, 87 (2), p. 83‑90. DOI : 10.7202/013977ar

Buhler D.D., 2004. Weed‑Crop Competition: A Review. Second Edition. By Robert L Zimdahl. *The Quarterly Review of Biology*, 79 (4), p. 449‑449. DOI : 10.1086/428237

CAB Pays de la Loire, 2021. *Les grandes cultures bio*.

Cabeza-Orcel P., **Chavassieux D.**, et **Vericel G.**, 2024. *Associations céréale-protéagineux : trouver le juste équilibre* (524). https://www.perspectives-agricoles.com/qualite-debouches/associations-cereale-proteagineux-en-bio (Consulté le 23 mai 2025).

Callaway R.M., 2007. Direct Mechanisms for Facilitation. Dans : Callaway R.M. (éd.). *Positive Interactions and Interdependence in Plant Communities*. Dordrecht : Springer Netherlands, p. 15‑116. DOI : 10.1007/978-1-4020-6224-7_2

Carr P.M., **Gardner J.J.**, **Schatz B.G.**, **Zwinger S.W.**, et **Guldan S.J.**, 1995. Grain Yield and Weed Biomass of a Wheat–Lentil Intercrop. *Agronomy Journal*, 87, p. 574‑579. DOI : 10.2134/agronj1995.00021962008700030030x

Carton N., **Viguier L.**, **Bedoussac L.**, **Journet E.-P.**, **Naudin C.**, **Piva G.**, **Corre-Hellou G.**, et **Justes E.**, 2019. Produire des légumineuses à graines au moyen de l'association avec une céréale : cas de la lentille et du lupin blanc d'hiver. *Innovations Agronomiques*, 74, p. 129‑141. DOI : 10.15454/xfdvdp

Catteau Magali, 2024. *Aurions-nous pu prédire la crise de l'agriculture biologique ?* (2402). https://opera-connaissances.chambres-agriculture.fr/doc_num.php?explnum_id=199848 (Consulté le 24 mars 2025).

Clair D., 2021. *Fiches techniques des cultures bio*. https://interpat-aude.fr/assets/uploads/ressources/3-fiches-techniques-legumineuses.pdf (Consulté le 5 septembre 2025).

Cocoual C. et **Dupont A.**, 2022. *POIS PROTEAGINEUX DE PRINTEMPS EN AGRICULTURE BIOLOGIQUE*.

CODEX STAN 171-1989. *NORME POUR CERTAINS LÉGUMES SECS*.

Crews T.E. et **Peoples M.B.**, 2004. Legume versus fertilizer sources of nitrogen: ecological tradeoffs and human needs. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 102 (3), p. 279‑297. DOI : 10.1016/j.agee.2003.09.018

Dauguet S., 2019. D5 : Lutter contre les bruches des légumineuses : des solutions chimiques et physiques au stockage. *Perspectives agricoles*, (467), p. 69‑71.

Dauguet S., 2024. *Stockage du pois*. https://www.terresinovia.fr/-/stockage-du-pois (Consulté le 5 septembre 2025).

De Notaris C., **Mortensen E.Ø.**, **Sørensen P.**, **Olesen J.E.**, et **Rasmussen J.**, 2021. Les mélanges de cultures de couverture comprenant des légumineuses peuvent s'autoréguler pour optimiser la fixation de N2 tout en réduisant le lessivage des nitrates. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 309, p. 107287. DOI : 10.1016/j.agee.2020.107287

Delobel A., 2008. Les bruches. *Insectes*, 150(3), p. 15‑18.

Demie D.T., **Döring T.F.**, **Finckh M.R.**, **van der Werf W.**, **Enjalbert J.**, et **Seidel S.J.**, 2022. Mixture × Genotype Effects in Cereal/Legume Intercropping. *Frontiers in Plant Science*, 13, p. 846720. DOI : 10.3389/fpls.2022.846720

Devienne S., 2018. Les révolutions agricoles contemporaines en France. Dans : Chouquer G., Maurel M.-C. (éd.). *Les mutations récentes du foncier et des agricultures en Europe*. Besançon : Presses universitaires de Franche-Comté, p. 25‑52. DOI : 10.4000/books.pufc.5643

Dixit G.P., **Kumar A.**, et **Parihar A.K.**, 2017. Variability for harvest index and biomass in lentil (Lens culinaris Medik) varieties. *Legume Research*,

Enjalbert J., **Flutre T.**, **Lemarié S.**, **Martin P.**, **Morel J.B.**, **Moutier N.**, **Fugeray-Scarbel A.**, **Cordeau S.**, **Barbot S.**, **Pilet-Nayel M.-L.**, **Corre - Hellou G.**, **Deytieux V.**, **Burstin J.**, **Bedoussac L.**, **Aubertot J.-N.**, et **Justes E.**, 2024. Des projets engagés dans la diversification végétale. *Phytoma*, 771, p. 31‑36. DOI : https://hal.science/hal-04478335v1

FAO, 2002. *Agriculture mondiale: horizon 2015/2030 (Rapport abrégé)*. ISBN 92-5-204761-1

FAO, 2003. *Optimisation de la population végétale, de l'émergence et de l'établissement des cultures*. https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/61d25d35-073e-4344-ac0e-439490c7e47c/content/y5146e07.htm?utm_source=chatgpt.com (Consulté le 4 septembre 2025).

Fichet E., **Thibaud O.**, **Bourrel S.**, et **Cipolla L.**, 2022. *Bilan essais lentilles*. https://www.terresinovia.fr/documents/20126/726505/Bilan-lentilles.pdf/052df44e-8cbc-f715-771b-7f40fc01bbbe?t=1696423630475 (Consulté le 4 septembre 2025).

Florence A.M., **Higley L.G.**, **Drijber R.A.**, **Francis C.A.**, et **Lindquist J.L.**, 2019. Cover crop mixture diversity, biomass productivity, weed suppression, and stability. *PLOS ONE*, 14 (3), p. e0206195. DOI : 10.1371/journal.pone.0206195

FNAMS, 2025. *Pois protéagineux*. https://www.fnams.fr/produire/production-de-semences/cereales-et-proteagineux/pois/ (Consulté le 4 septembre 2025).

GAB Ile-de-France et **Chambre d'agriculture Ile-de-France**, 2004. *Fiche technique lentille bio*. https://geco.ecophytopic.fr/documents/20182/21720/pdf_lentille_6.pdf (Consulté le 18 juin 2025).

Gaborit A., 2024. *Grandes cultures biologiques : les clés de la réussite*. 142 p.https://gers.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Occitanie/067_Inst-Gers/1-DOCUMENTS/agriculturebiologique/Guide_grandes_cultures_biologiques.pdf (Consulté le 24 mars 2025).

Gayard M., **Berger F.**, et **Delval P.**, 2018. *Associer plusieurs espèces cultivées pour diversifier une culture | Ecophytopic*. https://ecophytopic.fr/leviers/prevenir/associer-plusieurs-especes-cultivees-pour-diversifier-une-culture (Consulté le 24 mars 2025).

Grondin A., **Guyomarc'h S.**, et **Laplaze L.**, 2023. *Le système racinaire des plantes : de l'ombre à la lumière*. https://www.encyclopedie-environnement.org/vivant/racines-plantes/ (Consulté le 10 août 2025).

Guet G., **Chotard A.**, et **Riman K.**, 2011. *Mémento d'agriculture biologique*. 3e éd.Paris, France : France Agricole, 368 p. ISBN 978285572017

Guillemot T., 2020. *MOISSONNEUSE-BATTEUSE | VIDEO : Battage en bio : et si on décomposait le chantier | l'Agriculteur Normand*. https://www.agriculteur-normand.com/battage-en-bio-et-si-decomposait-le-chantier (Consulté le 11 août 2025).

Hauggaard-Nielsen H., **Ambus P.**, et **Jensen E.S.**, 2003. The comparison of nitrogen use and leaching in sole cropped versus intercropped pea and barley. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 65 (3), p. 289‑300. DOI : 10.1023/A:1022612528161

Havard M., **Alaphilippe A.**, **Deytieux V.**, **Estrogues V.**, **Labeyrie B.**, **Lafond D.**, **Meynard J.-M.**, **Petit M.-S.**, **Plénet D.**, **Picault S.**, et **Fayolat V.**, 2017. *Guide de l'expérimentateur système : concevoir, conduire et valoriser une expérimentation système pour les cultures assolées et pérennes*. GIS PIClég, GIS Fruits, Réseau ECOVITI, RMT Systèmes de culture innovants, GIS Relance Agronomique, 172 p.https://hal.inrae.fr/hal-02791737/file/2017_Guide_experimentateur_systeme_Havard_et_al_version_numerique1_1.pdf (Consulté le 8 avril 2025).

Hedan M., **Bourlet C.**, **Hirschy M.**, **Blocaille S.**, **Leveau L.**, et **Halska J.**, 2021. *Associer des cultures avec des espèces annuelles - GECO*. https://geco.ecophytopic.fr/web/guest/concept/-/concept/voir/http%253A%252F%252Fwww%252Egeco%252Eecophytopic%252Efr%252Fgeco%252FConcept%252FCultiver_Des_Associations_D_Especes_Annuelles (Consulté le 24 mars 2025).

Houpert A. et **Botrel Y.**, 2023. *La politique de développement de l'agriculture biologique : une évaluation*. https://www.senat.fr/rap/r19-277/r19-277.html (Consulté le 9 septembre 2025).

IAASTD, 2009. *Agriculture at a crossroads - Global report*. https://www.unep.org/resources/report/agriculture-crossroads-global-report (Consulté le 9 avril 2025).

Ickowitz A., **Powell B.**, **Rowland D.**, **Jones A.**, et **Sunderland T.**, 2019. Agricultural intensification, dietary diversity, and markets in the global food security narrative. *Global Food Security*, 20, p. 9‑16. DOI : 10.1016/j.gfs.2018.11.002

Idriss O., **Chafika H.**, et **Nsarellah N.**, 2013. Comparaison de lignées avancées de lentille sous stress hydrique durant la phase de floraison et formation des gousses. *Nature & Technologie*, 8, p. 53‑61.

Insee, 2023. *En février 2023, les prix à la consommation augmentent de 1,0 % sur un mois et de 6,3 % sur un an - Informations rapides - 63 | Insee* (63). https://www.insee.fr/fr/statistiques/6966536 (Consulté le 24 mars 2025).

Institut Technique de l'Agriculture Biologique, 2014. *Fiche technique - le pois protéagineux en AB*. https://www.bio-bretagne-ibb.fr/wp-content/uploads/Fiche-pois-Itab.pdf (Consulté le 22 mai 2025).

Jevtić R., **Župunski V.**, **Grčak M.**, **Živančev D.**, et **Knežević D.**, 2023. Cereal–Pea Intercropping Reveals Variability in the Relationships among Yield, Quality Parameters, and Obligate Pathogens Infection in Wheat, Rye, Oat, and Triticale, in a Temperate Environment. *Plants*, 12 (11), p. 2067. DOI : 10.3390/plants12112067

Joya R. et **Hamon J.**, 2021. *Freins et leviers logistiques au développement de systèmes de culture diversifiés et riches en légumineuses*. https://agriculture.gouv.fr/freins-et-leviers-logistiques-au-developpement-de-systemes-de-culture-diversifies-et-riches-en-0 (Consulté le 18 août 2025).

Justes E., **Bedoussac L.**, **Corre - Hellou G.**, **Fustec J.**, **Hinsinger P.**, **Jeuffroy M.-H.**, **Journet E.-P.**, **Louarn G.**, **Naudin C.**, et **Pelzer E.**, 2014. Les processus de complémentarité de niche et de facilitation déterminent le fonctionnement des associations végétales et leur efficacité pour l'acquisition des ressources abiotiques. *Innovations Agronomiques*, 40, p. 1‑24. DOI : 10.17180/bdvp-ha42

Justes E., **Bedoussac L.**, **Dordas C.**, **Frak E.**, **Louarn G.**, **Boudsocq S.**, **Journet E.-P.**, **Lithourgidis A.S.**, **Pankou C.**, **Zhang C.**, **Carlsson G.**, **Jensen E.S.**, **Watson C.**, et **Li L.**, 2021. The 4C approach as a way to understand species interactions determining intercropping productivity. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 8 (3), p. 387‑399. DOI : https://doi.org/10.15302/J-FASE-2021414

Justes E., **Bedoussac L.**, et **Prieur L.**, 2009. Est-il possible d'améliorer le rendement et la teneur en protéines du blé en Agriculture Biologique au moyen de cultures intermédiaires ou de cultures associées ? *Innovations Agronomiques*, 4, p. 165‑176. DOI : 10.17180/b4x5-2753

L'Agence bio, 2024. *Les chiffres du Bio - Panorama 2023*. https://www.agencebio.org/wp-content/uploads/2024/09/AB-PRESSE-2023-210x297-JUILLET-BAG.pdf (Consulté le 24 mars 2025).

L'Agence bio, 2025. *Observatoire de la production bio nationale*. https://www.agencebio.org/observatoire-de-la-production-bio-nationale/ (Consulté le 25 août 2025).

Lamine C. et **Bellon S.**, 2009. *Transition vers l'agriculture biologique : Pratiques et accompagnements pour des systèmes innovants*. Editions Quae. ISBN 978-2-7592-0502-8

Laserna-Ruiz I., **De-Los-Mozos-Pascual M.**, **Santana-Méridas O.**, **Sanchez-Vioque R.**, et **Rodrıguez-Conde M.F.**, 2012. Screening and selection of lentil (Lens Miller) germplasm resistant to seed bruchids (Bruchus spp.). *Euphytica*, 188, p. 153‑162. DOI : 10.1007/s10681-012-0752-7

Latruffe L., **Nauges C.**, **Allaire G.**, **Cahuzac E.**, **Garapin A.**, **Lemarié S.**, et **Poméon T.**, 2013. *Freins et incitations au développement de l'agriculture biologique en France : une analyse à plusieurs niveaux.* Institut National de la Recherche Agronomique, 16 p. p.https://hal.science/hal-01123950 (Consulté le 1 avril 2025).

Le Bihan Z., 2022a. *Lentille : comment bien choisir son tuteur ?* https://www.terresinovia.fr/documents/20126/3391024/Proleobio_matin1-tuteur_lentille_26avril22_ZLeBihan.pdf/224e93b3-22bd-6345-a404-b5708ce331e9?t=1651672161748 (Consulté le 4 septembre 2025).

Le Bihan Z., 2022b. *Les stades repères de la lentille*. https://www.terresinovia.fr/-/les-stades-reperes-de-la-lentille (Consulté le 16 mai 2025).

Le Bihan Z., **Jauvion V.**, **Dauguet S.**, **Ruck L.**, et **Riquet G.**, 2025. Evaluation des dégâts liés à la bruche (Bruchus signaticornis) sur la lentille en France métropolitaine et état des lieux des travaux de lutte. *Innovations Agronomiques*, 99, p. 165-176. DOI : 10.17180/ciag-2025-vol99-art14ff.

Le Bihan Z., **Robert C.**, et **Ruck L.**, 2024. *Ravageurs de la lentille durant le remplissage des gousses*. https://www.terresinovia.fr/-/ravageurs-de-la-lentille-durant-le-remplissage-des-gousses (Consulté le 11 août 2025).

Lebreton P., **Bedoussac L.**, **Bonnet C.**, **Journet E.-P.**, **Justes E.**, et **Colbach N.**, 2023. L'association céréale et légumineuse à l'essai. *Phytoma la Défense des Végétaux*, 769‑770, p. 8.

Lombardot E., 2023. *L'agriculture biologique à la dérive ?* https://www.portail-ie.fr/univers/enjeux-de-puissances-et-geoeconomie/2023/lagriculture-biologique-a-la-derive/ (Consulté le 25 août 2025).

Lucas J.-L. et **Le Bihan Z.**, 2022. *Faichage-andainage des cultures de diversification. Retour d'expériences : pois, lupin, pois chiche, lentile, lin, oléagineux, cameline, soja.* https://www.terresinovia.fr/documents/20126/157424/Guidfauchage-andainage-cultures-2023-V3.pdf/abc7fbc9-9f99-53ae-45d5-bcab169225d2?t=1696583503668 (Consulté le 21 mai 2025).

Magrini M.-B., **Anton M.**, **Cholez C.**, **Corre-Hellou G.**, **Duc G.**, **Jeuffroy M.-H.**, **Meynard J.-M.**, **Pelzer E.**, **Voisin A.-S.**, et **Walrand S.**, 2016. Why are grain-legumes rarely present in cropping systems despite their environmental and nutritional benefits? Analyzing lock-in in the French agrifood system. *Ecological Economics*, 126, p. 152‑162. DOI : 10.1016/j.ecolecon.2016.03.024

Malézieux E., **Beillouin D.**, et **Makowski D.**, 2022. Mieux nourrir la planète : diversifier les cultures pour construire des systèmes alimentaires durables. *Perspective*, (58), p. 1‑4. DOI : 10.19182/perspective/36931

Malézieux E., **Crozat Y.**, **Dupraz C.**, **Laurans M.**, **Makowski D.**, **Ozier-Lafontaine H.**, **Rapidel B.**, **de Tourdonnet S.**, et **Valantin-Morison M.**, 2009. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29 (1), p. 43‑62. DOI : 10.1051/agro:2007057

Marguerie M., 2017. *Culture du pois en bio* (7). https://www.bio-provence.org/IMG/pdf/bio_de_paca_pois_proteagineux.pdf (Consulté le 23 mai 2025).

Melenderez Ruiz J., 2020. *Understanding the low consumption of pulses among french non vegetarian consumers : combining direct and indirect approaches to identify barriers and opportunities*. (Doctoral Thesis). Dijon : Université de Bourgogne-Franche-Comté. , 271 p.

Météo France, 2025. *Climat Beaucouzé - Relevés*. https://meteofrance.com/climat/releves/france/pays-de-la-loire/beaucouze (Consulté le 30 août 2025).

Metivier T., **Baviere G.**, **Delbecque D.**, **Guimas A.**, **Langlois A.**, **Milleville C.**, et **Jourdren A.**, 2014. *Résultats de 3 ans d'essais sur l'autonomie alimentaire en AB : Essais du projet Reine Mathilde à Tracy-Bocage (14)*. https://idele.fr/fileadmin/medias/Documents/essais-reine-mathilde.pdf (Consulté le 10 avril 2025).

Meynard J.-M. et **David G.**, 1992. Diagnostic de l'élaboration du rendement des cultures. *Cahiers Agricultures*, 1(1), p. 9-19 (1).

Nisar M., **Ghafoor A.**, et **Khan M.R.**, 2011. Phenotypic variation in the agronomic and morphological traits of Pisum sativum L. Germplasm obtained from different parts of the world. *Russian Journal of Genetics*, 47 (1), p. 19‑25. DOI : 10.1134/S102279541012104X

Olivier A., 2024. *Agriculture biologique : la Cour des comptes européenne pointe les lacunes des politiques nationales et de l'UE*. https://www.touteleurope.eu/agriculture-et-peche/agriculture-biologique-la-cour-des-comptes-europeenne-pointe-les-lacunes-des-politiques-nationales-et-de-l-ue/ (Consulté le 9 septembre 2025).

Organisation Mondiale de la Santé, 2023. *Viandes rouges et transformées dans le contexte de la santé et de l'environnement : de nombreuses nuances de rouge et de vert. Note d'information*. https://onav.fr/wp-content/uploads/2023/11/OMS-Viande-rouge-et-transformee-dans-le-contexte-de-la-sante-et-lenvironnement-de-nombreuses-nuances-de-rouge-et-de-vert-2023.pdf (Consulté le 22 août 2025).

Pelzer E., **Bazot M.**, **Makowski D.**, **Corre-Hellou G.**, **Naudin C.**, **Al Rifaï M.**, **Baranger E.**, **Bedoussac L.**, **Biarnès V.**, **Boucheny P.**, **Carrouée B.**, **Dorvillez D.**, **Foissy D.**, **Gaillard B.**, **Guichard L.**, **Mansard M.-C.**, **Omon B.**, **Prieur L.**, **Yvergniaux M.**, **Justes E.**, et **Jeuffroy M.-H.**, 2012. Pea–wheat intercrops in low-input conditions combine high economic performances and low environmental impacts. *European Journal of Agronomy*, 40, p. 39‑53. DOI : 10.1016/j.eja.2012.01.010

Pelzer E., **Bedoussac L.**, **Corre - Hellou G.**, **Jeuffroy M.-H.**, **Métivier T.**, et **Naudin C.**, 2014. Association de cultures annuelles combinant une légumineuse et une céréale : retours d'expériences d'agriculteurs et analyse. *Innovations Agronomiques*, 40, p. 73‑91. DOI : 10.17180/83mt-jz86

Pocheville A., 2010. *LA NICHE ÉCOLOGIQUE: CONCEPTS, MODÈLES, APPLICATIONS*. (Thèse : Docteur Sciences de la Vie et de la Santé). ENS Paris : Ecole Normale Supérieure de Paris. https://theses.hal.science/tel-00715471v1/document

Podgórska-Lesiak M. et **Sobkowicz P.**, 2013. Prevention of pea lodging by intercropping barley with peas at different nitrogen fertilization levels. *Field Crops Research*, 149, p. 95‑104. DOI : 10.1016/j.fcr.2013.04.023

Poggio S.L., 2005. Structure of weed communities occurring in monoculture and intercropping of field pea and barley. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 109 (1), p. 48‑58. DOI : 10.1016/j.agee.2005.02.019

Ponisio L.C., **M'Gonigle L.K.**, **Mace K.C.**, **Palomino J.**, **de Valpine**, et **Kremen C.**, 2015. Diversification practices reduce organic to conventional yield gap. *Proceedings of the royal society B*, 282:20141396 (1799). DOI : 10.1098/rspb.2014.1396

Power A.G., 2010. Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365 (1554), p. 2959‑2971. DOI : 10.1098/rstb.2010.0143

Regnier E. et **Ladet N.**, 2021. *Plus de protéines végétales, chiche ? | INRAE*. https://www.inrae.fr/alimentation-sante-globale/proteines-vegetales (Consulté le 8 août 2025).

Remongin X., 2023. *La certification en agriculture biologique*. https://agriculture.gouv.fr/la-certification-en-agriculture-biologique (Consulté le 24 mars 2025).

Riquet G. et **Le Bihan Z.**, 2020a. *Récolte et stockage de la lentille*. https://www.terresinovia.fr/-/recolte-et-stockage-de-la-lentille (Consulté le 21 mai 2025).

Riquet G. et **Le Bihan Z.**, 2020b. *Tout savoir sur l'implantation de la lentille*. https://www.terresinovia.fr/-/l-implantation-de-la-lentille (Consulté le 5 septembre 2025).

Riquet G., **Le Bihan Z.**, et **Duroueix F.**, 2023a. *Le désherbage de prélevée de la lentille*. https://www.terresinovia.fr/-/le-desherbage-de-prelevee-de-la-lentille (Consulté le 6 septembre 2025).

Riquet G., **Le Bihan Z.**, **Robert C.**, et **Ruck L.**, 2024. *Les ravageurs de début de cycle de la lentille*. https://www.terresinovia.fr/-/les-ravageurs-de-debut-de-cycle-de-la-lentille (Consulté le 25 mars 2025).

Riquet G., **Ruck L.**, **Chapelin-Viscardi J.-D.**, et **Loiseau S.**, 2021. Lutter contre la bruche de la lentille (Bruchus signaticornis). *Perspectives Agricoles*, 489.

Sampoux J.-P., **Giraud H.**, et **Litrico I.**, 2019. Which Recurrent Selection Scheme To Improve Mixtures of Crop Species? Theoretical Expectations. *G3: Genes|Genomes|Genetics*, 10 (1), p. 89‑107. DOI : 10.1534/g3.119.400809

Schaller N., 2012. *La diversification des assolements en France : intérêts, freins et enjeux* (51). 4
p.https://agriculture.gouv.fr/telecharger/61970?token=0047b031a1d438c73fba088c67b1127ad50148e7d004c82ff1d62be4bc078942 (Consulté le 24 mars 2025).

Schneider A., 2023a. *Quel est le processus de la fixation azotée symbiotique ?* https://www.terresinovia.fr/-/quel-est-le-processus-de-la-fixation-azotee-symbiotique- (Consulté le 8 mai 2025).

Shrestha R., **Siddique K.H.M.**, **Turner D.W.**, et **Turner N.C.**, 2009. Breeding and Management to Minimize the Effects of Drought and Improve Water Use Efficiency. Dans : *The Lentil: Botany, Production and Uses*.

Sidahmed M.M. et **Jaber N.S.**, 2004. The Design and Testing of a Cutter and Feeder Mechanism for the Mechanical Harvesting of Lentils. *Biosystems Engineering*, 88 (3), p. 295‑304. DOI : 10.1016/j.biosystemseng.2004.04.002

Sintim H.Y., **Zheljazkov V.D.**, **Obour A.K.**, et **Garcia y Garcia A.**, 2016. Managing Harvest Time to Control Pod Shattering in Oilseed Camelina. *Agronomy Journal*, 108 (2), p. 656‑661. DOI : 10.2134/agronj2015.0300

Smadja T., **Romain M.**, et **Lecomte V.**, 2025. L'observatoire des prix payés aux producteurs de légumineuses à graines. Les résultats de la deuxième édition.

Terres Inovia, 2023. *Guide de culture - lentille bio et conventionnelle*. https://www.terresinovia.fr/o/commerce-media/products/146226/guide-lentille/5190480/Guide%20de%20culture%20lentille%202023?download=false&title=fichier.pdf (Consulté le 21 mai 2025).

Terres Inovia, 2025a. *Guide de culture - Pois*. https://www.terresinovia.fr/o/commerce-media/products/454299/guide-pois/6938007/Guide%20de%20culture%20pois%20prot%C3%A9agineux%202025?download=false&title=fichier.pdf (Consulté le 22 mai 2025).

Terres Inovia, 2024. *Guide de culture conventionnelle et biologique cameline*. https://www.terresinovia.fr/o/commerce-media/products/3199327/cameline-guide-de-culture/6377242/Guide%20de%20culture%20cameline%202024.pdf?download=false&title=fichier.pdf (Consulté le 30 août 2025).

Terres Inovia, 2025b. *Protéagineux : premiers résultats de campagne positifs*. https://www.terresinovia.fr/-/proteagineux-premiers-resultats-de-campagne-positifs (Consulté le 2 septembre 2025).

Terres Univia, 2022a. *La filière du pois en France*. https://www.terresinovia.fr/documents/20126/3332226/la-filiere-pois-en-France-juin-2022-terres-univia.pdf/6166b8f6-c8b3-0f0c-3006-002c7295e918?t=1654265216079 (Consulté le 22 mai 2025).

Terres Univia, 2025. *Lentille – Cultures*. https://www.terresunivia.fr/cultures-et-utilisations/cultures/plantes-riches-en-proteines/lentille (Consulté le 25 mars 2025).

Terres Univia, 2022b. *Une idée Légumineuses - Dossier de presse 2022*. https://www.terresunivia.fr/fichiers/cp/2022-06-02-DP-campagne-de-promotion-des-legumineuses.pdf (Consulté le 25 août 2025).

Terres Univia et **Terres Inovia**, 2023a. *Qualité des graines : Lentille récolte 2023*.

Terres Univia et **Terres Inovia**, 2023b. *Qualité des graines : Pois récolte 2023*. https://www.terresunivia.fr/fichiers/publications/qg-pois-2023.pdf (Consulté le 5 septembre 2025).

Thomine E., 2019. *Effet de la diversification spatiale et temporelle des cultures à l'échelle du paysage agricole sur le biocontrôle et les ravageurs de culture*. (Sciences agricoles). COMUE Université Côte d'Azur.

Thoyer S., **Després C.**, **Le Bail M.**, **Meynard J.-M.**, et **Messéan A.**, 2014. La diversification des cultures pour limiter les impacts environnementaux : Freins et leviers agronomiques et économiques en France. *Agronomie, Environnement & Sociétés*, 4(1), p. 63‑69.

Tooker J.F. et **Frank S.D.**, 2012. Genotypically diverse cultivar mixtures for insect pest management and increased crop yields - Tooker - 2012 - Journal of Applied Ecology - Wiley Online Library. *Journal of Applied Ecology*, 49 (5), p. 974‑985. DOI : https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2012.02173.x

Tosti G., **Falcinelli B.**, et **Guiducci M.**, 2023. Lentil–cereal intercropping in a Mediterranean area: Yield, pests and weeds. *Agronomy Journal*, 115 (5), p. 2570‑2578. DOI : 10.1002/agj2.21413

Vandermeer J.H., 1989. *The Ecology of Intercropping*. Cambridge : Cambridge University PressISBN 978-0-521-34689-4 DOI : 10.1017/CBO9780511623523

Verret V., **Pelzer E.**, **Bedoussac L.**, et **Jeuffroy M.-H.**, 2018. Traque aux associations de grandes cultures en France. Dans : *Colloque 'Traque de systèmes innovants', RMT Systèmes de Culture Innovants et Initiative for Design in Agrifood Systems*. https://hal.inrae.fr/hal-04479917

Viguier L.A., 2018. *Analysis of the agronomic and economic performances of lentil-spring wheat intercrops in organic farming*. (Agricultural sciences). Institut National Polytechnique de Toulouse, INTP. https://theses.hal.science/tel-04227235v1/document

Vlachostergios D.N., **Lithourgidis A.S.**, **Baxevanos D.V.**, **Mavromatis A.G.**, **Noulas C.S.**, et **Roupakias D.G.**, 2018. Evaluation of lentil varieties and farming system effect on seed damage and yield loss due to bruchid (Bruchus spp.) infestation. *Crop and Pasture Science*, 69 (4), p. 387‑394. DOI : 10.1071/CP17309

Voisin A.-S., **Guéguen J.**, **Huyghe C.**, **Jeuffroy M.-H.**, **Magrini M.-B.**, **Meynard J.-M.**, **Mougel C.**, **Pellerin S.**, et **Pelzer E.**, 2013. Les légumineuses dans l'Europe du XXIè siècle : Quelle place dans les systèmes agricoles et alimentaires actuels et futurs ? Quels nouveaux défis pour la recherche ? *Innovations Agronomiques*, 30, p. 283‑312. DOI : 10.17180/767p-n553

Wang L., **Gruber S.**, et **Claupein W.**, 2013. Effect of sowing date and variety on yield and weed populations in a lentil–barley mixture. *The Journal of Agricultural Science*, 151 (5), p. 672‑681. DOI : 10.1017/S0021859612000895

Wang L., **Gruber S.**, et **Claupein W.**, 2012. Optimizing lentil-based mixed cropping with different companion crops and plant densities in terms of crop yield and weed control. *Organic Agriculture*, 2 (2), p. 79‑87. DOI : 10.1007/s13165-012-0028-5

Willey R.W., 1979. *Intercropping: It's important and Research Needs. Part 1, Competition and Yield Advantages*. Commonwealth Agricultural Bureaux, 20 p.

W-SoLent, 2023. *La lentille en association en agriculture biologique*.

Zhang K., **Liu Z.**, **McCarl B.A.**, et **Fei C.J.**, 2024. Enhancing Agricultural Soil Carbon Sequestration: A Review with Some Research Needs. *Climate*, 12 (10), p. 151. DOI : 10.3390/cli12100151

Annexes

Annexe I : Tests de germination

Des problèmes récurrents de moisissures ont été observés sur les lots de semences de AM (taux de germination 27 %), ce qui a mené à s'interroger sur le protocole mis en place. Trois échantillons de 100 graines (et 50 pour les pois) ont été mis à germer dans des boîtes de Pétri, tapissées par un papier absorbant humide du 4/04 au 11/04. Les lentilles ayant moisies rapidement au premier test, un deuxième a été réalisé dès le 7/04, avec cette fois ci un trempage au préalable de 6h dans l'eau des lentilles et pois. Pour ce second test, les boîtes ont été moins humidifiées pour limiter les risques de moisissures. Un troisième test a été effectué avec un trempage préalable des lentilles de 6h dans l'eau, suivi d'un passage à l'eau de javel et d'un un rinçage à l'eau. N'ayant pas réussi à faire germer sans moisissure ces lentilles nous en avons déduit un souci de semences, confirmé par l'agriculteur ayant observé de la moisissure en parcelle.

Ces observations ont toutefois révélé que la moisissure ne provenait pas uniquement de la qualité des semences d'AM, puisque des symptômes similaires étaient visibles sur les lots d'autres agriculteurs. Cela a renforcé la nécessité d'adapter le protocole. Nous sommes alors venus nous demander si le problème venait de l'ordre de manipulation, du matériel utilisé, de la quantité d'eau dans les boîtes, des temps de trempage ou si l'eau de javel n'empêchait pas la germination des lentilles. A noter que les tests de germination devraient fonctionner sans présence javel, puisqu'en parcelle agricole il n'y en a pas. A la place d'humidifier avec un pulvérisateur les boîtes, j'ai opté pour une humidification directement sous le robinet, ce qui semble avoir déjà permis de diminuer la moisissure. Ensuite, différents rinçage à l'eau de javel ont été testé :

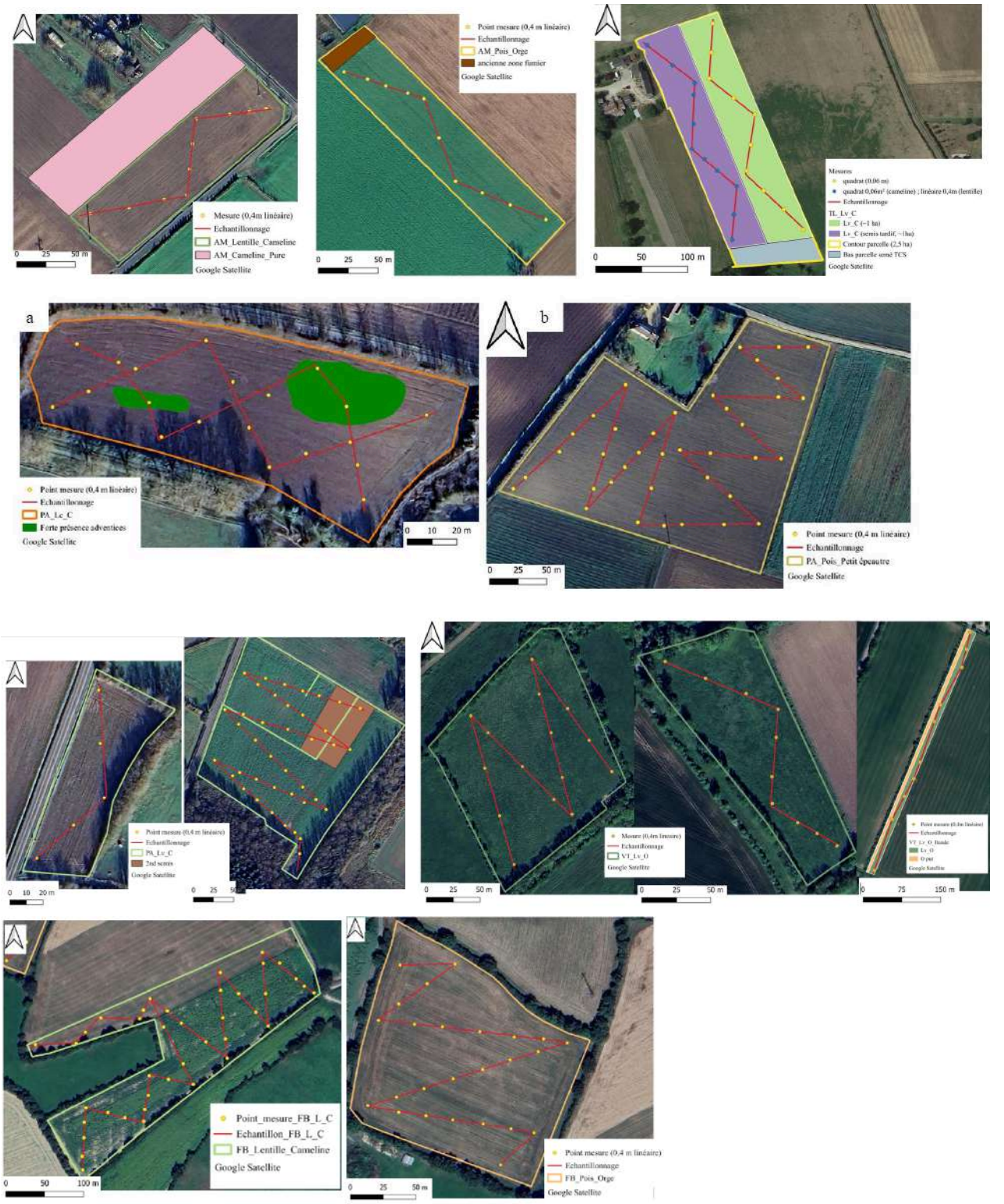
- rinçage à l'eau de javel pure (3,6 %) avant rinçage à l'eau, puis trempage de 6h dans l'eau
- rinçage à l'eau de javel diluée (3,6 %, diluée à moitié avec de l'eau du robinet) avant rinçage et trempage de 6 h dans l'eau
- rinçage à l'eau de javel pure (3,6 %) après trempage de 6 h dans l'eau
- rinçage à l'eau de javel diluée (3,6 % diluée à moitié avec de l'eau du robinet) après trempage de 6 h dans l'eau

Il semblait y avoir un impact de la durée de trempage dans l'eau de javel (5 à 15 min testées), mais aussi de l'ordre de trempage. Visuellement, il y semblait y avoir moins de lentilles moisies lorsque le trempage à la javel était effectué avant le trempage de 6 h dans l'eau. Ainsi, j'ai décidé de tester en comptant précisément le nombre de graines germées, l'impact de la concentration de la javel sur la germination. Pour cela, j'ai utilisé un lot de lentilles très sain, pour lequel aucune moisissure n'avait été observée lors du test de germination (le seul lot dans ce cas jusqu'à présent). J'ai donc utilisé 3 lots de 50 graines, et voici les résultats obtenus :

Type de semence	Modalité	Pourcentage de germination (%)
Semence lentilles verte FB	javel pure	92
Semence lentilles verte FB	javel diluée	100
Semence lentilles verte FB	eau pure	100

Il semblerait que la javel pure fonctionne moins bien. Cependant, il est nécessaire de prendre en compte que ce test n'a été réalisé qu'une seule fois sur 50 graines, ainsi il serait judicieux de réitérer l'expérience pour confirmer ou non ces résultats. Le temps à disposition ne m'a pas permis de tester davantage de graines. De plus, ayant réussi par la suite, avec le protocole présenté dans le mémoire, à faire germer les graines, je n'ai pas consacré plus de temps à ces expériences.

Annexe II : Plans d'échantillonnage des densités levées



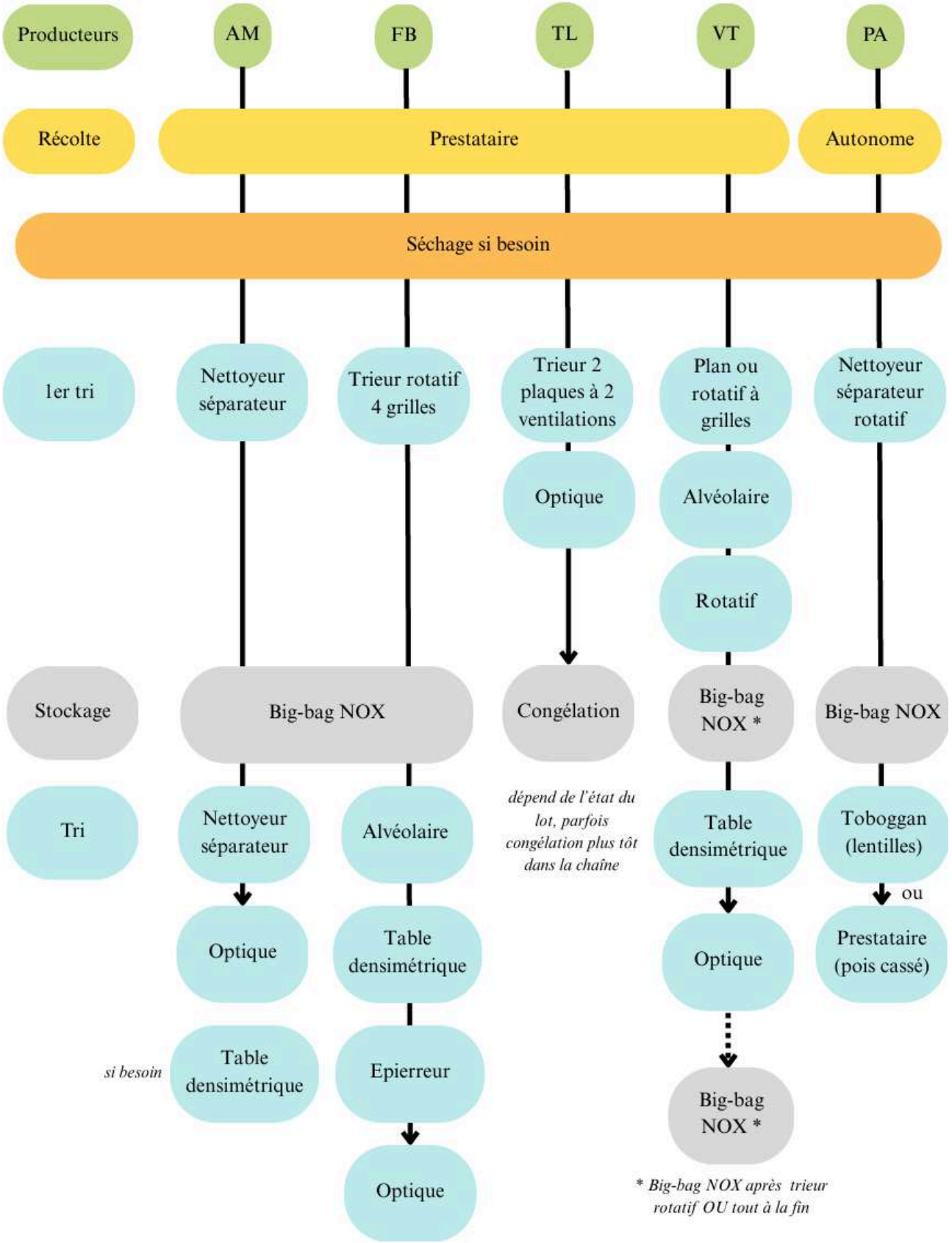
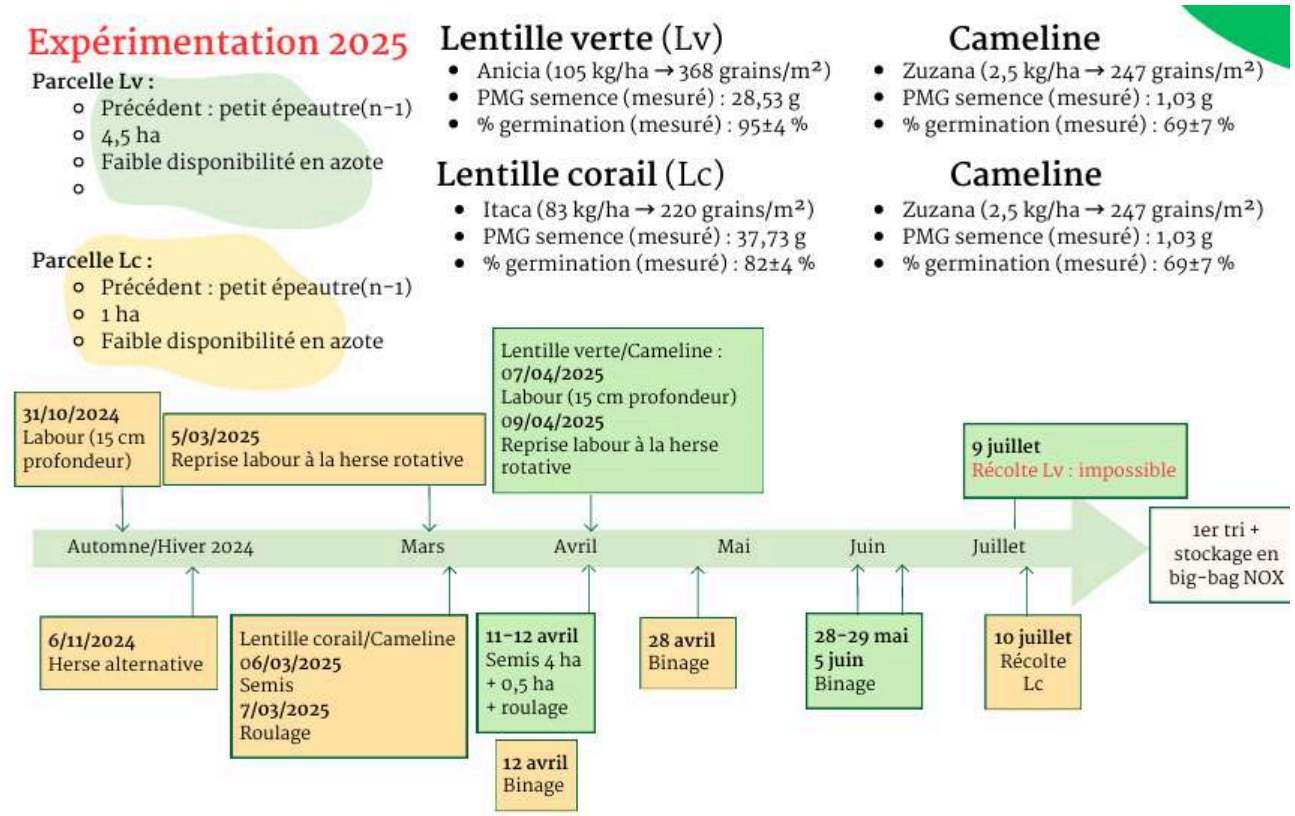
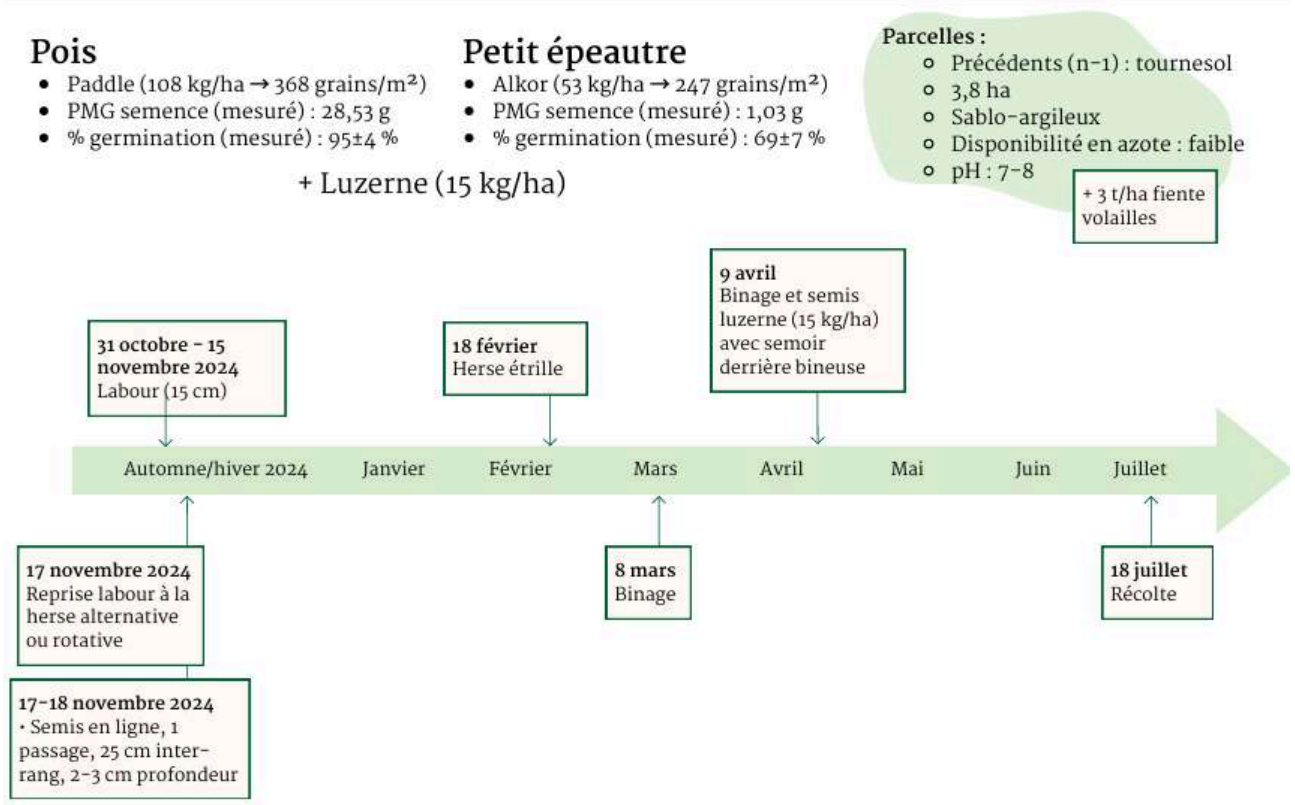
Plan d'échantillonnage des mesures des densités levées avec de gauche à droite et de haut en bas : (1) pois/orge (1 ha) chez AM, (2) lentille/cameline (1 ha) chez AM, (3) lentille/cameline (2 parcelles de 1 ha) chez TL, (4) lentille corail/cameline (1 ha) chez PA, (5) pois/petit épeautre (3,8 ha) chez PA, (6) lentille verte/cameline (0,5 ha) chez PA, (7) lentille verte/cameline (4,0 ha) chez PA, (8) lentille/orge (2,48 ha) chez VT, (9) lentille/orge (0,97 ha) chez VT et (10) bande chez VT, (11) lentille/cameline (4 ha) chez FB et (12) pois/orge (2,5 ha) chez FB,

Annexe III : Stades de développement lors des mesures de hauteur

Stade de la légumineuse : 3-4 F (3-4 feuilles), 5-6 F (5-6 feuilles), 7-8 F (7-8 feuilles), ET (élongation tige principale), AI (apparition inflorescence), F (floraison), DF (développement fruit), RG (remplissage gousses), DM (début maturité), MP (maturité physiologique), MR (maturité récolte) et x = mesure ; xx = 2 mesures à 2 dates

Parcelle	3-4 F	5-6 F	7-8 F	ET	AI	F	DF	RG	DM	MP	MR
AM_Lv/C		x			x	x	x				x
AM_P/O				x			x		x		x
FB_Lv/C					x		xx				x
FB_P/O							xx				x
PA_Lv/C_1	x					x	x				x
PA_Lv/C_2	x					x	x				x
PA_Lc/C				x			x			x	x
PA_P/E					x					xx	x
TL_Lv/C_1				x		x		x		x	x
TL_Lv/C_2	x				x	x	x			x	
VT_Lv/O_1	x		x		x		x			x	
VT_Lv/O_2			x		x		x			x	

Annexe IV : Chaîne de tri et de stockage des légumineuses



Annexe V : Itinéraires techniques des parcelles de PA