THESE DE DOCTORAT

DE
L'UNIVERSITÉ D'ANGERS
SOUS LE SCEAU DE
LA COMUE ANGERS – LE MANS

ECOLE DOCTORALE N° 642
Ecole doctorale Végétal, Animal, Aliment, Mer, Environnement
Spécialité : *Sciences agronomiques*

Par
Margaux GUY

Cultiver du pois chiche dans un contexte de faible utilisation d'intrants en l'associant à une plante de services fauchée : gestion des adventices et de l'ascochytose

Thèse présentée et soutenue à Angers, le 16 décembre 2025
Unité de recherche : USC LEVA, ESA, INRAE

Rapporteurs avant soutenance :

Lionel ALLETTO	Directeur de recherche, INRAE, Castanet-Tolosan
Safia MEDIENE	Professeur, AgroParisTech, Palaiseau

Composition du Jury :

Président :	Anis LIMAMI	Professeur, Université d'Angers, Angers
Examinateurs :	Laurent BEDOUSSAC	Professeur, ENSFEA, Castanet-Tolosan
	Hélène MARROU	Maître de conférences, Institut Agro, Montpellier
Dir. de thèse :	Guénaëlle HELLOU	Professeur, Institut Agro, Angers
Co-encadr. de thèse :	Mathieu LORIN	Enseignant-chercheur, ESA, Angers
	Xavier BOUSSELIN	Enseignant-chercheur, ESA, Angers

Financements

Cette thèse a été financée par le département AgroEcoSystèmes de l'INRAE et la Région Pays-de-la-Loire. Elle est également adossée au projet ANR SPECIFICS (ANR-20-PCPA-0008), financé par le Programme Prioritaire de Recherche « Cultiver et Protéger Autrement » (PPR CPA).

















Remerciements

L'ensemble des réalisations produites dans cette thèse n'aurait pas pu se faire sans la participation d'un grand nombre de personnes, dont le soutien, les encouragements et la bienveillance m'ont portée pendant ces trois années. Ces prochains mots sont pour vous remercier, et vous exprimer toute ma gratitude.

En premier lieu, je souhaite remercier mes encadrants de thèse, Guénaëlle Hellou, Mathieu Lorin et Xavier Bousselin, dont l'accompagnement, le soutien et l'investissement m'ont énormément aidée dans la réalisation de tout ce travail. Vous m'avez chacun encouragée à pousser ma réflexion différemment, d'une façon très complémentaire. Travailler à vos côtés m'a permis d'apprendre plein de choses sur le merveilleux monde des associations de cultures et de l'agronomie, MERCI. Vous m'avez aussi bien faite rire ! Avec tout ça, je trouve que nous avons formé une bonne équipe, et j'ai eu de la chance de vous avoir en tant qu'encadrants. Je terminerai en disant que je jure solennellement de toujours écrire mes highlights dès le début de la rédaction.

J'adresse mes remerciements à Lionel Alletto et Safia Médiène pour avoir accepté le rôle de rapporteurs de cette thèse. Je remercie également Anis Limami, Laurent Bedoussac et Hélène Marrou d'avoir accepté d'être examinateurs. Un grand merci aux membres de mon comité de suivi de thèse, Delphine Moreau, Christophe Le May, Florian Celette, Isabelle Maître et Quentin Lambert. Nos échanges ont toujours été riches, constructifs, et m'ont aidée à avancer dans la thèse. Merci aussi pour votre bienveillance et vos encouragements.

Je souhaite adresser toute ma gratitude à l'équipe du LEVA, dont l'ensemble des membres a toujours été d'une grande bienveillance envers moi dès mon arrivée. Je remercie Joëlle Fustec pour son investissement envers les doctorants de l'unité, qui a contribué à la bonne réalisation de ma thèse. Merci à Magalie Streiff pour son aide sur la partie administrative, pour nos discussions et pour avoir eu la patience de me rappeler les codes analytiques que je n'ai décidément jamais réussi à retenir. Merci à chacun des membres de l'équipe, grâce à vous je garde de très bons souvenirs de mon temps passé au LEVA. Merci aussi aux stagiaires, dont la présence a toujours apporté plein de joie et de dynamisme. J'adresse des remerciements tout

particuliers à Chloé Gaudinat qui a été une super stagiaire et dont le travail sérieux m'a beaucoup aidée dans ma thèse. Pour te citer : « je n'aurais qu'un mot à dire : architecture ».

Mention spéciale à l'équipe technique du LEVA, Vincent Oury, Julien Poret et Sylvie Vincent qui ont supporté mes (nombreux) soupirs au quotidien, et m'ont accompagnée dans le suivi de l'expérimentation. Ensemble nous avons broyé du pois chiche, fait des prélèvements de biomasse parmi la jungle d'adventices et compté des ramifications, merci et désolée à la fois, surtout pour la notation architecture (encore elle). J'ai beaucoup apprécié nos conversations sur le monde, le quotidien, nos week-ends, tout ça va me manquer ! Nous avons aussi bien rigolé, que ce soit au quotidien ou pendant le tournage de notre film oscarisé, merci pour ces moments.

Merci aussi aux doctorants que j'ai pu rencontrer à l'ESA, et avec qui nous nous sommes toujours serrés les coudes. Petite dédicace à Vincent Baillet, qui a été un bon compagnon de galère, et grâce à qui je me suis sentie moins seule quand je travaillais le week-end. Merci aussi à Antinéa Sallen, nos discussions m'ont permis de me changer les idées, de décompresser et de bien rire aussi.

Je remercie aussi mes amis qui ont été à mes côtés pendant ces années, et qui ont participé à mon épanouissement pendant cette thèse. Sarah, en écrivant ces lignes je me souviens de nos conversations au lycée sur le doctorat, qui à l'époque me paraissait être une chose inaccessible, la vie est bien faite !

Je souhaite enfin remercier ma famille pour leur soutien indéfectible et leur présence à mes côtés. Merci à mes parents de m'avoir encouragée et poussée à toujours donner le meilleur de moi-même. Merci à ma sœur pour son humour, son entrain et sa joie de vivre. Merci aussi à ma pep. Enfin, merci à Quentin, d'avoir pris soin de moi, de m'avoir soutenue et d'être mon rayon de soleil au quotidien.

MERCI !

Valorisation de la thèse

Article :

Guy M., Lorin M., Bousselin X., Corre-Hellou G. Intercropping chickpea with a competitive service plant and mowing the inter-rows controls weeds and ascochyta blight while mitigating interspecific competition. *European Journal of Agronomy* (en cours de révision).

Article en préparation :

Guy M., Lorin M., Bousselin X., Corre-Hellou G. Introducing a mowed competitive service plant reduces ascochyta blight severity and modifies the shoot architecture of chickpea. Pour une soumission à *Field Crops Research*.

Autres publications :

Guy, M., Lorin, M., Bousselin, X., Corre-Hellou, G., 2025. Intercropping Chickpea with a Competitive Service Plant and Mowing the Inter-rows Controls Weeds and Ascochyta Blight while Mitigating Interspecific Competition. SSRN [Preprint]. https://doi.org/10.2139/ssrn.5436278

Guy, M., Lorin, M., Bousselin, X., Corre-Hellou, G., 2025. Weed and ascochyta blight control in mowed chickpea-service plant intercrops in Western France [dataset]. https://doi.org/10.57745/05KBPZ

Communication orale en congrès international :

Guy M., Lorin M., Bousselin X., Corre-Hellou G., 2024. Intercropping chickpea with a mechanically controlled service plant: a promising way to manage weeds while mitigating interspecific competition. 18th Congress of the European Society for Agronomy, Rennes, France.

Posters :

Guy M., Lorin M., Bousselin X., Corre-Hellou G., 2023. Effect of intercropping chickpea with a companion plant on weed control during early growth. Fourth International Legume Society Conference, Granada, Spain.

Guy M., Lorin M., Bousselin X., Corre-Hellou G., 2024. Improving weed control while managing interspecific competition by intercropping chickpea with a mechanically regulated service plant. Journée scientifique de l'école doctorale VAAME, Nantes, Frances.

Interventions orales :

Guy M., Lorin M., Bousselin X., Corre-Hellou G., 2024. Intercropping chickpea with a mowed service plant can reduce weed biomass and ascochyta blight severity in low-input cropping systems. Journée des doctorants de la SFR QuaSav, Angers, France.

Présentation de résultats de la thèse lors des réunions annuelles du projet ANR SPECIFICS (2023 à 2025).

Interventions ponctuelles pour présenter des résultats de la thèse et le doctorat à des élèves de M1 et M2 (Ecole Supérieure des Agricultures).

Animation scientifique :

Participation à la Nuit Angevine des Chercheurs (2024).

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE 1
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE 3
1. Diversifier les systèmes de culture et diminuer leur dépendance aux intrants en produisant des légumineuses à graines 3
1.1. Limites du modèle agricole actuel et solutions apportées par l'agroécologie 3
1.2. Principe et intérêts de la diversification des systèmes de culture 5
1.3. Intérêts des légumineuses à graines comme cultures de diversification 7
1.4. Contraintes liées à la culture des légumineuses à graines dans un contexte de limitation du recours aux intrants et au travail du sol 8
2. Le pois chiche comme culture de diversification : production, biologie et agronomie 10
2.1. Etat des lieux sur la production de pois chiche en France et dans le monde 10
2.2. Etablissement des composantes du rendement et de la qualité de la graine 11
3. Enjeux agronomiques autour la culture du pois chiche dans le Grand Ouest 16
3.1. Maîtriser la compétition exercée par les adventices 16
3.2. L'ascochytose, un frein majeur à la production de pois chiche 18
4. Associer le pois chiche pour favoriser son insertion dans les systèmes de culture sobres en intrants et en travail du sol 23
4.1. Fonctionnement et services rendus par les associations de cultures 23
4.2. Associer le pois chiche pour le produire sans pesticides 27
PROBLEMATIQUE ET DEMARCHE EXPERIMENTALE 31
1. Questions et hypothèses de recherche 31
2. Démarche expérimentale 34
2.1. Choix des espèces de plantes de services 34
2.2. Fauche de l'inter-rang du pois chiche 38
2.3. Dispositif expérimental 39
2.4. Conduite de la culture 41
2.5. Mesures et notations 41
3. Organisation du manuscrit 43
CHAPITRE 1 : INTERCROPPING CHICKPEA WITH A COMPETITIVE SERVICE PLANT AND MOWING THE INTER-ROWS CONTROLS WEEDS AND ASCOCHYTA BLIGHT WHILE MITIGATING INTERSPECIFIC COMPETITION 44
1. Introduction 46
2. Materials and methods 49
2.1. Experimental site and pedoclimatic conditions 49
2.2. Experimental design 50
2.3. Measurements 54
2.4. Statistical analyses 55
3. Results 56

3.1. Biomass accumulation dynamics 56
3.2. Ascochyta blight severity 63
3.3. Relationship between biomass accumulation and ascochyta blight severity at the grain-filling stage 64
3.4. Chickpea grain yield 65
3.5. Effect of adding an earlier mowing date in the chickpea-oat intercrops 67
4. Discussion 68
4.1. The competitive ability of the service plant during early growth shapes the dominance relationships in the intercrop 68
4.2. Intercropping chickpea with oat or mowing the inter-rows under high weed pressure limits ascochyta blight severity 69
4.3. Mechanically regulating a highly competitive service plant to simultaneously control weeds and ascochyta blight while mitigating interspecific competition 70
5. Conclusion 72
CHAPITRE 2 : INTRODUCING A MOWED COMPETITIVE SERVICE PLANT REDUCES ASCOCHYTA BLIGHT SEVERITY AND MODIFIES THE SHOOT ARCHITECTURE OF CHICKPEA 73
1. Introduction 75
2. Materials and methods 76
2.1. Experimental site and pedoclimatic conditions 76
2.2. Experimental design 78
2.3. Trial management 79
2.4. Measurements 79
2.5. Statistical analyses 80
3. Results 82
3.1. Shoot architecture of chickpea 82
3.2. Ascochyta blight severity on leaves and proportion of blighted pods 89
4. Discussion 91
4.1. Effect of introducing oat in the inter-rows of chickpea on its shoot architecture 91
4.2. Mowing the inter-rows of chickpea mitigates interspecific competition 92
4.3. Introducing oat decreases ascochyta blight severity along the main axis of chickpea 93
4.4. Role of the main crop's plasticity in mowed intercropping systems 95
5. Conclusion 96
CHAPITRE 3 : INTRODUCING MOWED OAT AS A SERVICE PLANT IN CHICKPEA-BASED INTERCROPS REDUCES WEED DENSITY AND ALTERS THE WEED COMMUNITY STRUCTURE 97
1. Introduction 98
2. Materials and methods 99
2.1. Experimental site and pedoclimatic conditions 99
2.2. Experimental design and trial management 99
2.3. Measurements and calculations 99
2.4. Statistical analyses 100

3. Results 102
3.1. Biomass accumulation by chickpea, oat, and weeds 102
3.2. Weed community structure 105
4. Discussion 109
4.1. Introducing oat decreased weed biomass and density, while reducing the abundance of barnyard grass 110
4.2. Inter-row mowing had a limited or no effect on the weed community diversity and composition 112
4.3. Agronomic implications and prospects for better understanding the effects of mowed service plants on weed communities 113
5. Conclusion 114
DISCUSSION GENERALE 115
1. Influence du choix de l'espèce de plante de services et de la fauche sur la maîtrise des bioagresseurs 116
1.1. Retour sur les plantes de services testées 116
1.2. Effets sur les adventices 118
1.3. Limitation de la sévérité de l'ascochytose et interactions entre bioagresseurs 121
2. Faucher la plante de services pour réorienter les rapports de dominance au cours du cycle 124
2.1. Importance clef du déclenchement de la fauche 124
2.2. Rôle de la plasticité de l'architecture aérienne de la culture principale 125
2.3. Quelle mise en œuvre opérationnelle de la régulation de la plante de services ? 126
3. Vers de nouvelles façons de concevoir et d'évaluer les associations de cultures 130
3.1. Flexibilité apportée par la fauche dans la conception des associations et leur gestion au cours du cycle 130
3.2. Repenser les méthodes d'évaluation des performances des associations 131
4. Perspectives de recherche 133
CONCLUSION 135
LISTE DES FIGURES 137
LISTE DES TABLEAUX 139
TABLE DES ANNEXES 140
BIBLIOGRAPHIE 174

Introduction générale

La production de légumineuses à graines à destination de l'alimentation humaine est un enjeu majeur des transitions alimentaire et agroécologique. Les services que ces cultures sont susceptibles de rendre à l'échelle du système de culture, mais aussi à une échelle plus globale, en font des espèces particulièrement intéressantes (van Loon et al., 2023; Watson et al., 2017).

Toutefois, l'existence de verrous de l'échelle parcellaire jusqu'à celle de la filière, entrave l'introduction des légumineuses à graines dans les systèmes agricoles (Magrini et al., 2016; Meynard et al., 2018). A l'échelle parcellaire, leur sensibilité à divers stress biotiques et abiotiques mène à d'importantes fluctuations du rendement (Cernay et al., 2015). Cette instabilité de la production, d'autant plus marquée lorsque l'on veut limiter le recours aux intrants et au travail du sol, diminue l'attractivité de ces cultures auprès des agriculteurs.

Parmi les légumineuses à graines, le pois chiche (*Cicer arietinum* L.) est l'une des espèces les plus cultivées au monde (FAO, 2025). A l'instar des autres espèces de cette famille, le rendement du pois chiche peut être sujet à d'importantes fluctuations, en partie imputables aux adventices et à l'ascochytose (Singh et al., 2022; Whish et al., 2002). Néanmoins, cette culture présente des avantages agronomiques intéressants, notamment une meilleure tolérance au stress hydrique, et un faible nombre de ravageurs par rapport aux autres légumineuses à graines (Benjamin and Nielsen, 2006; Romeis et al., 1999). Ces caractéristiques sont particulièrement pertinentes pour contribuer à l'adaptation des systèmes de culture au dérèglement climatique (IPCC, 2023), et diminuer l'utilisation de produits phytosanitaires (Duru et al., 2021; Tilman et al., 2002).

Avec plus de 80% de la production mondiale localisée en Asie, peu de références existent en Europe sur cette espèce, notamment en France où cette culture reste marginale (Colas and Boudour, 2024; FAO, 2025). A l'échelle du pays, le bassin historique de production est localisé dans le sud du territoire (Lambert, 2023). Ainsi, dans le Grand Ouest où notre étude se situe, le pois chiche est très rarement présent dans les systèmes de culture.

De nombreux travaux ont démontré que l'association de cultures pouvait limiter la pression des adventices et des maladies par rapport aux cultures pures dans des systèmes sobres en intrants (Boudreau, 2013; Corre-Hellou et al., 2011; Gu et al., 2021; Moreau et al., 2025;

Schoeny et al., 2010). Néanmoins, peu d'études ont envisagé la légumineuse à graines comme culture principale d'une association, dont la performance reste très souvent évaluée *via* le rendement total des espèces associées (Bedoussac et al., 2015; Carton et al., 2020; Hauggaard-Nielsen et al., 2008). Un autre type d'association envisageable consiste à introduire une plante de services, c'est-à-dire une espèce non récoltée, cultivée pour fournir des services de support et de régulation (Gardarin et al., 2022; Moreau et al., 2025). Ainsi, associer le pois chiche à une plante de services pourrait permettre de sécuriser sa production. Néanmoins, à notre connaissance, il n'existe aucune étude portant sur cette pratique. De plus, les références sur la culture du pois chiche dans des conditions climatiques analogues à celles du Grand Ouest, ou dans un contexte de faible utilisation d'intrants, sont rares.

Par ailleurs, la compétition interspécifique peut engendrer des pertes de rendements dans les associations de cultures, en particulier lorsque que l'espèce d'intérêt est peu compétitive, comme les légumineuses à graines (Gu et al., 2021; Yu et al., 2016). L'arrangement spatial et les densités de semis peuvent constituer des leviers intéressants à actionner pour orienter le rapport de compétition en faveur de la légumineuse, mais demeurent souvent insuffisants pour éviter les pertes de rendement (Carton et al., 2020; Cheriere et al., 2020). D'autres leviers, tels que la régulation mécanique de l'inter-rang par fauchage, pourraient réorienter, en cours de cycle cultural, les rapports de dominance entre la culture de vente, la plante de services et les adventices (Rowland et al., 2023; Thorsted et al., 2006). Jusqu'à présent, ce levier a toutefois été très peu exploré dans la littérature.

Ainsi, les travaux présentés dans cette thèse visent à **comprendre le fonctionnement d'une association entre le pois chiche et une plante de services, ainsi que sa réponse à l'usage d'un levier innovant, la fauche, qui permettrait de réorienter les rapports de dominance en cours de cycle**. L'objectif de ces associations fauchées est d'en retirer les services suivants : i) atténuer la compétition exercée par les adventices et ii) limiter la sévérité de l'ascochytose, tout en iii) sécurisant la production de pois chiche. Les effets des leviers testées sur le niveau des services rendus sont étudiés sur différents aspects, à l'échelle du couvert, à l'échelle de la plante en évaluant les conséquences sur l'architecture aérienne du pois chiche, ainsi qu'à l'échelle de la communauté adventice.

Synthèse bibliographique

1. Diversifier les systèmes de culture et diminuer leur dépendance aux intrants en produisant des légumineuses à graines

1.1. Limites du modèle agricole actuel et solutions apportées par l'agroécologie

Depuis la seconde moitié du XXème siècle, l'agriculture française et européenne a connu de profondes mutations, marquées par des phénomènes d'agrandissement des exploitations et de spécialisation de la production (Depeyrot and Hugonnet, 2024; Schott et al., 2018). Entre 1970 et 2020, le nombre d'exploitations agricoles en France métropolitaine a ainsi diminué de 76%, passant d'environ 1,6 millions à 389 800, tandis que leur Surface Agricole Utile (SAU) moyenne est passé de 19 à 69 ha sur la même période (Agreste, 2025a). En parallèle, les systèmes de polyculture-élevage, jusqu'alors dominants, ont été progressivement délaissés au profit de systèmes peu diversifiés à spécialisation animale ou végétale. Les assolements se sont également simplifiés, et sont aujourd'hui fortement dominés par une poignée de cultures céréalières et oléagineuses, notamment le blé, l'orge, le maïs, le colza et le tournesol (Colas and Boudour, 2024). Dans les systèmes agricoles orientés vers la production de grandes cultures, ces espèces dominent fortement les rotations, dont la majorité consiste en l'alternance de céréales à paille/oléagineux, céréales à paille/maïs ou céréales à paille/oléagineux/maïs (Firquet and Montcoudiol, 2024). Le phénomène de spécialisation s'est aussi décliné à l'échelle des territoires, aboutissant à la constitution de grands bassins de production, et à une dissociation géographique des productions animales et végétales (Depeyrot and Hugonnet, 2024; Schott et al., 2018). Ces transformations sont liées à la volonté politique d'assurer l'autosuffisance alimentaire de l'Europe dans un contexte d'après-guerre, mais aussi à des innovations techniques et agronomiques ayant permis une augmentation sans précédent de la production agricole (Schott et al., 2018). La forte progression de la mécanisation a soutenu l'agrandissement des parcelles et des exploitations, tandis que la sélection de nouvelles variétés de céréales à haut rendement et l'utilisation de fertilisants chimiques ont participé à l'augmentation de la production. Par ailleurs, le recours croissant

aux engrais de synthèse a renforcé la dissociation entre les ateliers de production animale et végétale (Schott et al., 2018).

Bien que ce modèle agricole ait permis une forte augmentation de la production, ses effets délétères sur l'environnement, la biodiversité et la santé humaine sont maintenant bien connus et largement documentés (Campbell et al., 2017; Tilman et al., 2002; Wan et al., 2025). En effet, l'éloignement de l'élevage, la simplification des assolements et le raccourcissement des rotations culturales ont mené à une dépendance des systèmes de production végétale aux engrais azotés de synthèse et aux pesticides (Altieri, 1999; Duru et al., 2021; Schott et al., 2018). Leur utilisation excessive a mené à des pollutions diffuses des eaux superficielles et souterraines, causant des risques d'eutrophisation, de pertes de biodiversité aquatique et de contamination des captages en eau potable (Mamy et al., 2022; Mignolet et al., 2012). La fabrication et l'utilisation des engrais azotés est aussi à l'origine d'importantes émissions de gaz à effet de serre (Campbell et al., 2017; Tilman et al., 2002). Outre les pollutions aquatiques, les pesticides peuvent aussi polluer l'air et les sols, conduisant à de fortes pertes de biodiversité chez un large éventail de taxons (Wan et al., 2025). De plus, certaines molécules peuvent persister dans les milieux aquatiques et continentaux pendant des décennies, et continuer à être à l'origine de pollution diffuse par effet de rémanence (Mamy et al., 2022; Mignolet et al., 2012). L'usage intensif de pesticides a également entraîné une augmentation des cas de résistance parmi les bioagresseurs, accroissant ainsi le risque d'impasses agronomiques (Gould et al., 2018; Johnson et al., 2009).

Le mode de production agricole dominant repose également sur un recours intensif au travail du sol, ce qui pose des risques de compaction, d'érosion et de perte globale de fertilité (Hamza and Anderson, 2005; Tilman et al., 2002). La faible présence de haies, dont une grande partie a été supprimée lors du remembrement du parcellaire, et l'absence de couvert végétal, accroissent d'autant plus les risques d'érosion du sol par ruissellement des eaux de pluie (Schott et al., 2018; Tilman et al., 2002). Un travail du sol fréquent peut aussi stimuler la dégradation de la matière organique et la libération de nitrates, qui peuvent être lixiviés en cas de précipitations et être à l'origine de pollutions diffuses (Tilman et al., 2002).

Les systèmes de culture simplifiés actuels sont également peu résilients et adaptés à la multiplication et à l'intensification des événements météorologiques extrêmes liés au changement climatique (IPCC, 2023; Lobell et al., 2011). En effet, de nombreuses études menées dans différentes régions du monde prévoient des chutes de rendements dans les

prochaines décennies chez certaines cultures majeures, notamment le blé (Asseng et al., 2015; Kirina et al., 2025; Le Roux et al., 2024; Liu et al., 2016; Luo et al., 2005).

Ainsi, il apparaît nécessaire de repenser l'agriculture dans son ensemble et de concevoir des systèmes de culture sobres en intrants, limitant le recours au travail du sol et résilients face au changement climatique. L'approche agroécologique offre un cadre et des outils qui peuvent permettre d'atteindre ces objectifs (Altieri, 1996; Altieri et al., 2015). L'agroécologie désigne à la fois une discipline scientifique, un mouvement social mais aussi un ensemble de pratiques agricoles plus durables ayant pour but de limiter les impacts anthropiques sur l'environnement (Altieri, 1996; Wezel et al., 2009). Au sens des pratiques, l'agroécologie repose sur la conception de systèmes de culture diversifiés permettant de rendre une diversité de services écosystémiques (Altieri, 1996; Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

1.2. Principe et intérêts de la diversification des systèmes de culture

La diversification des systèmes de culture peut s'opérer à des échelles variées, qu'elles soient spatiales ou temporelles. A l'échelle temporelle, la diversification se traduit par un allongement des successions culturales *via* l'introduction de nouvelles espèces et l'implantation de couverts végétaux d'interculture (Guinet et al., 2023; Persson et al., 2008; Vialatte et al., 2025; Zhao et al., 2022). L'alternance d'espèces de familles botaniques et de périodes de semis différentes, ainsi que l'augmentation du délai de retour des cultures, perturbent le cycle biologique des bioagresseurs (Angus et al., 2015; Hegewald et al., 2018). Ainsi, l'allongement des rotations culturales peut permettre de limiter l'usage de pesticides (Guinet et al., 2023; Wezel et al., 2014), mais aussi d'améliorer la fertilité des sols (Persson et al., 2008), de diminuer les risques de lixiviation de l'azote grâce à l'implantation de couverts végétaux (Amossé et al., 2014; Tosti et al., 2014) et de limiter la dépendance aux intrants azotés *via* l'introduction de légumineuses (Jensen et al., 2020; Peoples et al., 2009).

Les formes de diversification spatiale sont nombreuses et peuvent se décliner à différentes échelles (Figure 0.1). A l'échelle du paysage, l'agencement de parcelles de petites tailles, séparées par des éléments semi-naturels et sur lesquelles sont cultivées des espèces différentes permet de former une mosaïque paysagère (Figure 0.1, Vialatte et al., 2025). Aux abords de la parcelle, la diversification spatiale se manifeste par la plantation de haies et la présence de bandes fleuries. A l'échelle de l'exploitation, elle se traduit par l'augmentation du nombre de cultures différentes dans l'assolement. A l'échelle parcellaire, la diversification

spatiale repose sur l'implantation de mélanges variétaux, l'association de différentes cultures annuelles ou la combinaison d'espèces annuelles et pérennes en agroforesterie (Figure 0.1, Malézieux et al., 2009; Vialatte et al., 2025). Cette diversité spatiale permet de rendre plusieurs services écosystémiques, comme la régulation et la limitation des dégâts de bioagresseurs (Boudreau, 2013; Gu et al., 2021; Vidal et al., 2017), une meilleure valorisation des ressources par rapport aux monocultures *via* la complémentarité entre cultures associées (Bedoussac et al., 2015; Brooker et al., 2015; Hauggaard-Nielsen et al., 2009) ou l'amélioration de la fertilité des sols (Tamburini et al., 2020; Wezel et al., 2014).

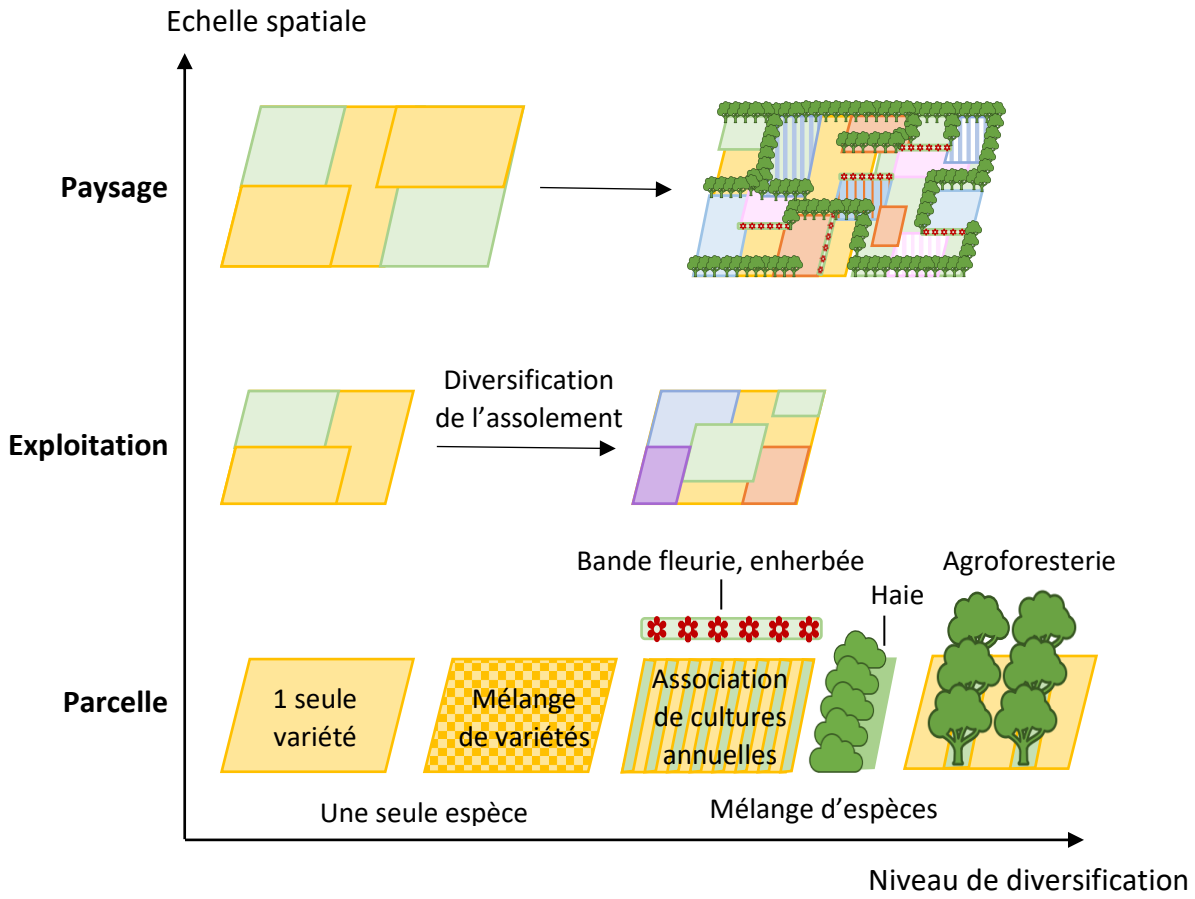


Figure 0.1 : Pratiques de diversification spatiale à l'échelle de la parcelle, de l'exploitation et du paysage (adapté de Vialatte et al., 2025).

Dans le contexte actuel, l'objectif est de diversifier des systèmes de culture dominés par des productions céréalières et oléagineuses. Par conséquent, il est nécessaire d'introduire d'autres espèces moins couramment cultivées, comme les légumineuses à graines.

1.3. Intérêts des légumineuses à graines comme cultures de diversification

Les légumineuses sont des cultures de diversification clefs, susceptibles de rendre une diversité de services écosystémiques (Ditzler et al., 2021; Liu et al., 2025; Reckling et al., 2022; van Loon et al., 2023; Watson et al., 2017).

Un intérêt majeur de ces espèces est la fixation biologique de l'azote atmosphérique (N_2), *via* leur symbiose avec certaines espèces de bactéries (Peoples et al., 2009). Cette capacité diminue la dépendance des systèmes de culture aux fertilisants azotés, ainsi que les émissions de gaz à effet de serre liées à leur fabrication et leur utilisation (Jensen et al., 2020; Watson et al., 2017). La présence de légumineuses dans la rotation peut également améliorer la nutrition de la culture suivante *via* la restitution d'azote par les résidus de culture (Angus et al., 2015; Lorin et al., 2016). Lorsqu'elles sont associées à d'autres espèces, les légumineuses permettent l'expression de complémentarités de niche pour la nutrition azotée (Fustec et al., 2010; Jamont et al., 2013). Dans certains cas, les légumineuses peuvent aussi faciliter la nutrition de la plante associée *via* des transferts d'azote après leur destruction et l'augmentation de la biodisponibilité de certains nutriments (Betencourt et al., 2012; Fustec et al., 2010; Hinsinger et al., 2011; Li et al., 2014; Lorin et al., 2016). Des travaux sur des associations pois chiche-maïs et lupin blanc-blé ont notamment démontré que la libération d'exsudats racinaires par la légumineuse avait pour effet d'hydrolyser le phosphore organique du sol, facilitant ainsi la nutrition de la céréale (Cu et al., 2005; Li et al., 2003). Un autre avantage des légumineuses est qu'elles ne sont pas sensibles aux mêmes maladies et ravageurs que les espèces céréalières et oléagineuses qui dominent actuellement les assolements. Ainsi, allonger les successions culturales en insérant ces espèces perturbe le cycle biologique des bioagresseurs, et diminue leur incidence sur le long terme (Angus et al., 2015). La combinaison de ces services font des légumineuses d'excellents précédents culturaux, dont l'introduction dans les successions culturales peut améliorer le rendement de la culture suivante (Angus et al., 2015; Ditzler et al., 2021; Reckling et al., 2022; Zhao et al., 2022).

Les légumineuses à graines (soja, lentille, pois protéagineux, pois cassé, pois chiche, etc) ont également l'avantage d'avoir des débouchés variées, que ce soit en alimentation animale ou humaine (van Loon et al., 2023; Watson et al., 2017). En alimentation humaine, leur graines riches en protéines en font des alternatives de choix aux protéines d'origine animale, dont la

surconsommation peut avoir des effets néfastes sur la santé (van Loon et al., 2023; World Health Organization, 2023). Des études ont aussi démontré leur intérêt dans la prévention de certaines maladies, comme le diabète (Curran, 2012; Wu et al., 2025).

L'ensemble de ces bénéfices font des légumineuses à graines des espèces candidates particulièrement pertinentes pour diversifier les systèmes de culture. Toutefois, malgré les nombreux services écosystémiques qu'elles sont susceptibles de rendre, les légumineuses à graines demeurent des cultures mineures dont l'adoption par les agriculteurs reste très marginale (Zander et al., 2016).

1.4. Contraintes liées à la culture des légumineuses à graines dans un contexte de limitation du recours aux intrants et au travail du sol

L'importante variabilité du rendement des légumineuses à graines est un frein majeur à leur adoption par les agriculteurs (Cernay et al., 2015; Magrini et al., 2016). Cette instabilité de la production est principalement due aux multiples stress biotiques et abiotiques auxquels elles sont sensibles (Watson et al., 2017).

Les principaux stress abiotiques limitant le rendement des légumineuses à graines sont la sécheresse, l'hydromorphie, les températures trop élevées ou trop basses, et le gel (Chalk et al., 2010; Farooq et al., 2017; Rao et al., 2023). Les légumineuses à graines tolèrent mal l'hydromorphie, qui entraîne une altération du fonctionnement de leur système racinaire. Certaines espèces sont plus sensibles que d'autres à ce stress, la féverole et le haricot étant plus tolérantes que le lupin, le pois chiche, la lentille et le pois (Cowie et al., 1996; Rao et al., 2023). Les légumineuses à graines sont également plus vulnérables face au déficit hydrique que les céréales (Daryanto et al., 2017). En effet, la fixation symbiotique est particulièrement sensible à la sécheresse, ainsi qu'aux températures élevées qui l'accompagne, qui pénalisent sa mise en place et son fonctionnement (Chalk et al., 2010; Kurdali et al., 2002; Streeter, 2003). La germination, la floraison et le remplissage des graines sont des phases particulièrement critiques par rapport aux stress hydrique et thermique, qui peuvent être l'origine d'importantes chutes de rendement lorsqu'ils surviennent à ces stades (Farooq et al., 2017; Rao et al., 2023; Turner et al., 2005). Cette sensibilité varie toutefois entre espèces, la lentille et le haricot étant plus sensibles à la sécheresse que le soja, le pois ou le pois chiche (Daryanto et al., 2017; Farooq et al., 2017).

Les légumineuses à graines ont aussi certains stress biotiques en commun, dont des maladies qui peuvent provoquer de fortes chutes de rendement (Rubiales et al., 2015). La pourriture racinaire causée par *Aphanomyces euteiches* est une maladie tellurique du pois, dont la nuisibilité est très élevée et peut mener à des impasses agronomiques en raison de sa persistance dans les sols infectés pendant plusieurs années. D'autres espèces, comme la lentille ou le haricot, sont hôtes du pathogène et multiplient l'inoculum (Moussart et al., 2008). Une grande majorité des légumineuses à graines est aussi sensible à l'ascochytose, une maladie foliaire dont l'agent pathogène diffère selon l'espèce (Tivoli and Banniza, 2007). La gestion des adventices est également un enjeu majeur pour ces cultures (McDonald, 2003; Paolini et al., 2006; Young et al., 2000). En effet, la faible compétitivité des légumineuses à graines pendant les premières phases de croissance a pour conséquence de laisser les ressources disponibles pour les adventices (Young et al., 2000). Ainsi, en 2021, les traitements herbicides représentaient environ la moitié de l'IFT total moyen du pois protéagineux (5,9 ; Firquet and Montcoudiol, 2025). Les légumineuses à graines ont aussi des ravageurs en commun, dont les bruches. La larve de ces coléoptères se développe à l'intérieur des graines lors du stockage, ce qui nuit fortement à la qualité chez la lentille, le pois et la féverole, et peut empêcher leur valorisation en alimentation humaine (Keneni et al., 2011; Rubiales et al., 2015).

Dans certains cas, la récolte des légumineuses à graines peut aussi soulever des difficultés. Certaines espèces, comme la lentille ou le pois, sont particulièrement sujettes à la verse, ce qui complique la récolte mécanique (Viguier et al., 2018; Watson et al., 2017). Chez le soja, la faible hauteur d'insertion des premières gousses sur la tige peut engendrer des difficultés de récolte et des pertes de rendement (Terres Inovia, 2025).

Ainsi, la culture des légumineuses à graines souffre de nombreuses contraintes agronomiques, qui sont difficilement gérables dans un contexte de faible recours aux intrants et au travail du sol. Certaines espèces sont toutefois moins sensibles aux différents stress biotiques et abiotiques qui peuvent être communs aux légumineuses à graines.

2. Le pois chiche comme culture de diversification : production, biologie et agronomie

2.1. Etat des lieux sur la production de pois chiche en France et dans le monde

Le pois chiche est l'une des légumineuses à graines les plus cultivées au monde (FAO, 2025). En 2023, la production mondiale de pois chiche s'élevait à 16 millions de tonnes (Mt) derrière le soja (371 Mt), l'arachide (54 Mt) et le haricot (28 Mt). Cette année-là, l'Asie concentrait 84% de la production mondiale de pois chiche, contre 3% pour l'Europe. Le premier pays producteur est l'Inde, qui domine très largement avec environ 12 Mt produites en 2023. A titre de comparaison, le deuxième pays producteur était l'Australie avec 935 390 tonnes, suivi par la Turquie, la Russie, l'Ethiopie et la Birmanie (FAO, 2025). La même année, la production française de pois chiche était bien plus faible, et ne s'élevait qu'à 44 391 tonnes (Colas and Boudour, 2024). A l'échelle du pays, les bassins de production qui se concentraient historiquement dans le sud du pays, sont aujourd'hui localisés dans le Poitou-Charentes, en Vendée et en Occitanie (Figure 0.2). Dans le Val-de-Loire où notre étude se situe, les surfaces en pois chiche restent limitées (Agreste, 2025b).

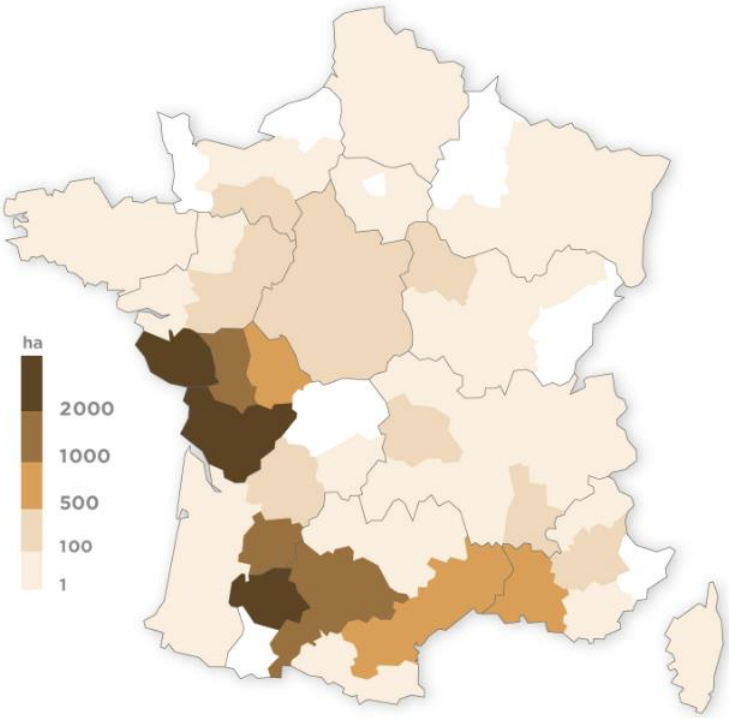


Figure 0.2 : Principales zones de production de pois chiche en France métropolitaine (Source : Terres Univia d'après FranceAgriMer, 2024).

Il existe deux grands types de variétés de pois chiche, Desi et Kabuli, qui diffèrent par leurs caractéristiques morphologiques, leur mode de consommation et leur répartition dans le monde (Singh, 1997; Yadav et al., 2007). Les graines des pois chiches Desi sont petites, de couleurs variées allant du vert au brun et dont la surface est rugueuse. A l'inverse, les graines des pois chiches Kabuli sont plus grosses, beige clair et ont une surface lisse. Les graines de pois chiche Desi sont cassées en deux et consommées sous forme de dahl, tandis que les graines de type Kabuli sont souvent consommées entières. Les pois chiches de type Desi sont principalement cultivés en Asie et en Afrique, tandis que les pois chiches de type Kabuli sont majoritaires en Asie occidentale, Afrique du Nord, Amérique du Nord et en Europe (Jukanti et al., 2012; Yadav et al., 2007). En France, les pois chiches de type Kabuli sont donc les plus répandus (Lambert, 2023). L'offre variétale comprend 22 variétés, Twist étant la plus couramment utilisée (GEVES, 2025a).

Contrairement au soja ou au pois, les graines de pois chiche sont uniquement destinées à l'alimentation humaine. Elles contiennent environ 60% de glucides, 17 à 22% de protéines, 6% de matières grasses et une diversité de nutriments (Jukanti et al., 2012). Le pois chiche est une source intéressante de protéines végétales, et présente de nombreux bénéfices pour la santé humaine (Jukanti et al., 2012; Wu et al., 2025). Alors que la population est encouragée à diminuer sa consommation de viande au profit de protéines végétales, le pois chiche apparaît comme une alternative pertinente (World Health Organization, 2023).

2.2. Etablissement des composantes du rendement et de la qualité de la graine

2.2.1. Implantation et mise en place du peuplement

Le pois chiche est une espèce annuelle. La température minimale nécessaire à la croissance végétative de la plante est de 6°C (Lambert, 2023). En se basant sur cette température de base, le cycle de la culture s'étend sur environ 1500 degrés-jours (Lambert, 2023). En France, le pois chiche est une culture de printemps semée de mi-décembre à mi-avril, et récoltée entre début juillet et fin août, selon la région.

Le potentiel de rendement moyen est compris entre 15 et 30 q ha^{-1} en mode de production conventionnel, et entre 10 et 25 q ha^{-1} en agriculture biologique (Lambert, 2023). Pour atteindre ce potentiel, une densité à la levée de 50 plantes m^{-2} est recommandée (Lambert, 2023). Deux types de semis et d'agencement spatial sont alors possibles pour l'implantation

de la culture. Un semis à faible écartement (12-15 cm) avec un semoir à céréales permet une fermeture de l'inter-rang plus rapide, mais peut provoquer des casses de graines et ne les positionne pas de façon optimale dans le sol. Un semis à large écartement (30-60 cm) avec un semoir monograine assure une meilleure précision, mais la concurrence des adventices peut être plus importante due à la fermeture plus tardive de l'inter-rang. Pour atteindre l'objectif de peuplement à la levée, le pois chiche doit être semé à une densité comprise entre 55 et 65 graines m^{-2} suivant le type de semoir utilisé, à une profondeur d'au moins 3 cm (Lambert, 2023).

2.2.2. Mise en place de la symbiose

En tant que légumineuse, le pois chiche a la capacité de former une symbiose avec certaines espèces de bactéries au niveau de ses racines, permettant à la plante de fixer l'azote atmosphérique. Chez toutes les espèces de légumineuses, la mise en place et le fonctionnement de la symbiose peuvent être altérés en cas de sécheresse, stress thermique, salinité des sols ou limitation en phosphore (Kurdali et al., 2002; Salon et al., 2011). La fixation de l'azote atmosphérique est également inhibée par la présence d'azote minéral dans le sol (Naudin et al., 2011; Voisin et al., 2002). Certaines espèces sont très sensibles à cette inhibition, telles que le pois, le soja et le pois chiche (Guinet et al., 2018; Naudin et al., 2011). D'autres légumineuses le sont moins, comme la féverole et le lupin, qui sont capables de maintenir des niveaux de fixation élevés même en cas de forte teneur en nitrates dans le sol (Guinet et al., 2018; Turpin et al., 2002). Le pic de fixation est atteint lors de la floraison, puis les nodosités entre progressivement en sénescence (Kurdali, 1996; Voisin et al., 2002). Les espèces symbiotiques spécifiques au pois chiche appartiennent au genre *Mesorhizobium* (Jarvis et al., 1997; Nour et al., 1995, 1994; Rivas et al., 2007; Zhang et al., 2012). En France, elle ne sont naturellement présentes que dans les sols alcalins non sableux des régions correspondant au bassin historique de production, dans le sud du pays (Lambert, 2023). A date, un seul inoculant commercial est disponible depuis juin 2024, et un second est en cours d'homologation (Lambert and Pinochet, 2025). Ainsi, dans les régions où les bactéries sont absentes, les semences doivent être inoculées afin d'éviter le recours aux intrants azotés (Lambert, 2023).

2.2.3. Le début de la floraison, une période critique pour l'élaboration du rendement

Le pois chiche a une croissance indéterminée, ce qui signifie que l'entrée dans la phase reproductive n'arrête pas la croissance végétative (Ambika et al., 2021). Le cycle de la culture peut ainsi être découpé en deux grandes périodes : une première phase de croissance végétative, puis une seconde phase à partir du début de la floraison pendant laquelle la plante produit simultanément des organes végétatifs et reproducteurs (Figure 0.3). Leur développement simultané sur la plante génère une compétition inter-organes pour les assimilats, qui s'accentue à partir de l'apparition des graines (Huyghe, 1998). Cette période coïncide avec la diminution progressive de la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique (Turner et al., 2005; Voisin et al., 2002). La concomitance entre ces deux processus peut mener à un déficit en assimilats à l'échelle de la plante, et pénaliser le remplissage des graines (Turner et al., 2005). De plus, le passage dans la phase reproductive marque le début d'une période de sensibilité accrue du pois chiche à plusieurs stress abiotiques (Figure 0.3). Bien que le pois chiche ait une meilleure tolérance à la sécheresse et aux températures élevées que d'autres légumineuses à graines (Benjamin and Nielsen, 2006; Singh, 1997), ces conditions peuvent toutefois engendrer une diminution de la production de fleurs et de gousses, en provoquant leur avortement (Fang et al., 2010; Leport et al., 2006; Turner et al., 2005). Les stades reproducteurs sont également les plus sensibles au gel et aux températures basses, inférieures à 10-15°C (Croser et al., 2003; Srinivasan et al., 1998). Le pois chiche a également une faible tolérance aux excès d'eau, qui diminue au cours du développement reproducteur (Cowie et al., 1996). Les parcelles hydromorphes doivent donc être évitées pour cette culture (Lambert, 2023).

L'architecture aérienne du pois chiche comprend un axe principal, ainsi que des ramifications primaires, secondaires et tertiaires. La position des ramifications primaires détermine le port de la plante, qui est plus ou moins dressé en fonction de leur angle d'insertion sur l'axe principal. Les ramifications primaires insérées sur les premiers nœuds de l'axe principal sont celles produisant le plus de gousses matures à l'échelle de la plante (Siddique et al., 1984; Singh, 1997). A l'inverse, les ramifications tertiaires contribuent très peu au rendement en graines. La plante produit de nombreuses fleurs, dont une grande partie avorte (Zaiter and Barakat, 1995). A l'échelle de la tige, la production des gousses s'opère de façon acropète, de la base vers l'apex (Turner et al., 2005). Chaque gousse contient seulement 1 à 2 graines. Ainsi,

le rendement de la plante dépend principalement du nombre total de gousses produites et du poids de mille graines (PMG) (Gan et al., 2003; Güler et al., 2001). Le PMG est un facteur de qualité majeur dans le cas des pois chiches Kabuli, pour lesquels des valeurs élevées sont recherchées (Lambert, 2023).

La croissance du pois chiche est généralement interrompue en fin de cycle par les conditions sèches estivales. Cependant, en raison notamment de sa croissance indéterminée, la production végétative peut se poursuivre en cas de précipitations (Ambika et al., 2021; Lambert, 2023). Ce phénomène peut retarder la maturité, pénaliser le remplissage des graines, et nuire à la faisabilité de la récolte (Gimenez et al., 2025; Lambert, 2023). Cette dernière peut alors être facilitée en utilisant une faucheuse-andaineuse (Lambert, 2023). Hormis les potentielles difficultés posées par la reprise de végétation du pois chiche, la récolte présente peu de contraintes. Contrairement à d'autres espèces de légumineuses (pois, lentille), la culture n'est pas sujette à la verse, et la hauteur d'insertion des premières gousses n'est pas limitante comme pour le soja (Lambert, 2023).

2.2.4. Chutes de rendement liées aux bioagresseurs

La compétition exercée par les adventices sur le pois chiche est à l'origine de fortes pertes de rendement (Paolini et al., 2006; Whish et al., 2002). En effet, a l'instar des autres légumineuses à graines (McDonald, 2003; Paolini et al., 2006), la phase d'installation du pois chiche est particulièrement critique vis-à-vis des adventices en raison de sa faible compétitivité pour l'acquisition des ressources (Figure 0.3).

L'ascochytose, une maladie foliaire, constitue également un frein majeur à la production de pois chiche à l'échelle mondiale (Singh et al., 2022). La maladie peut survenir dès la levée si les semences sont infectées, mais est davantage prévalente à partir de la floraison. De plus, la sensibilité du pois chiche à l'ascochytose s'accroît au cours du développement, les fleurs et les gousses étant les organes les plus sensibles (Figure 0.3; Chongo and Gossen, 2001; Singh et al., 2022). La culture est également sensible à la fusariose (causée par *Fusarium oxysporum* f. sp. ciceris), une maladie tellurique dont les dégâts varient selon le degré d'infestation de la parcelle (Jiménez-Díaz et al., 2015). Le botrytis (causé par *Botrytis cinerea*) et la sclérotiniose (causée par *Sclerotinia sclerotiorum*) peuvent aussi causer des dommages au pois chiche. Ces maladies sont toutefois plus rares et moins nuisibles (Lambert, 2023). Contrairement au pois et à la lentille, le pois chiche n'est pas sensible à aphanomyces et ne multiplie pas l'inoculum (Moussart et al., 2008).

Héliothis (*Helicoverpa armigera*) est le seul ravageur du pois chiche pouvant être très nuisible pour la production en France (Lambert, 2023; Patil et al., 2017). La larve de cette espèce de lépidoptère perce la gousse et consomme la graine, ce qui altère quantitativement et qualitativement la récolte (Figure 0.3). Le ravageur s'attaque à une grande diversité de cultures comme le maïs ou la tomate, mais également à d'autres légumineuses à graines comme le soja (Patil et al., 2017). En France, héliothis est présente sur l'ensemble du territoire, mais la pression est pour le moment la plus forte dans le sud du pays (Lambert, 2023). Contrairement à la lentille, au pois et à la féverole, le pois chiche n'est pas sujet aux attaques de bruche pendant le stockage (Keneni et al., 2011; Lambert, 2023; Rubiales et al., 2015).

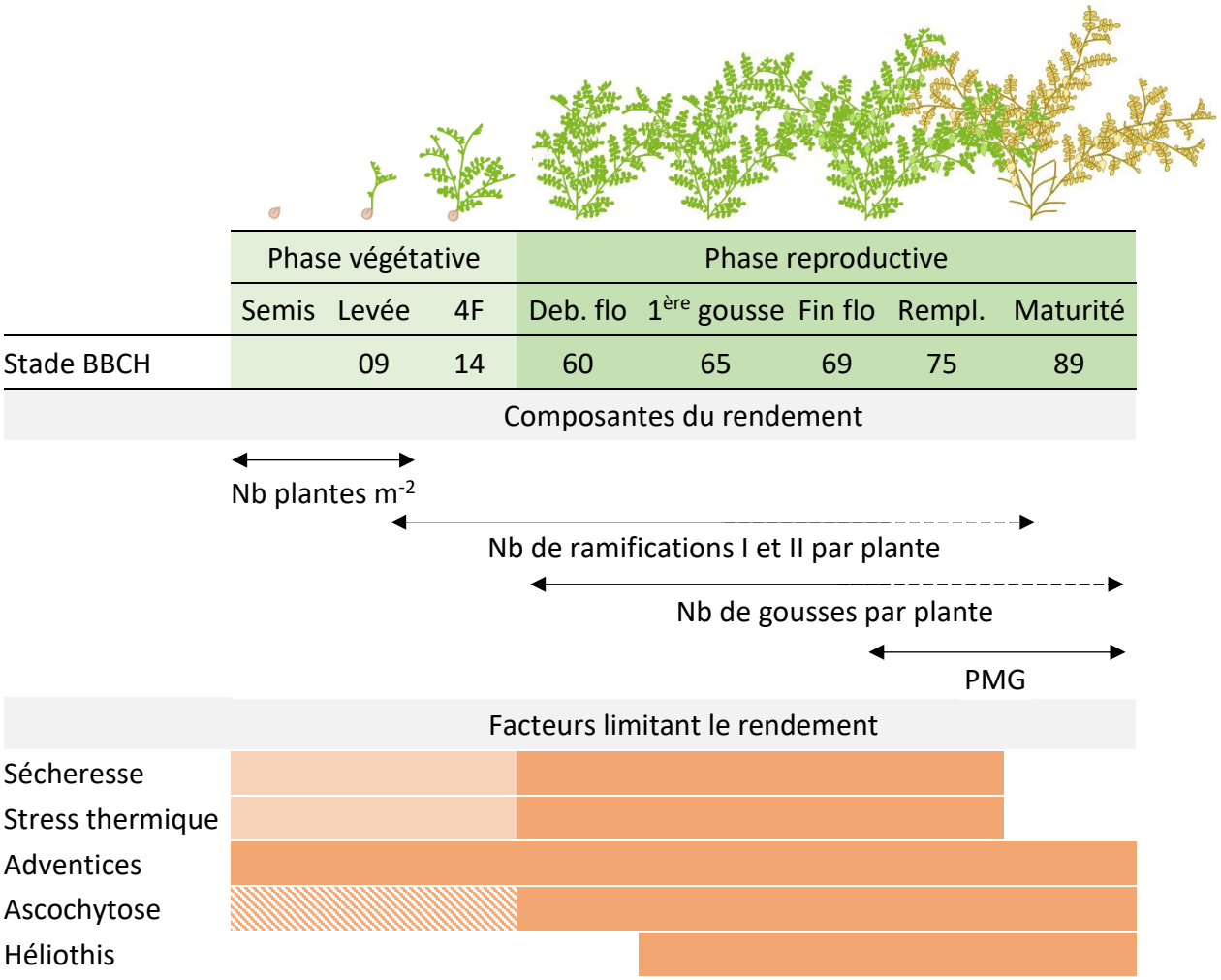


Figure 0.3 : Schéma simplifié du lien entre les phases d'établissement des composantes du rendement du pois chiche et les principaux facteurs limitant leur mise en place (Fang et al., 2010; Lake and Sadras, 2016; Leport et al., 2006; Patil et al., 2017; Rao et al., 2023; Singh et al., 2022; Turner et al., 2005; Wang et al., 2006; Whish et al., 2002). L'intensité de la couleur indique l'amplitude des pertes de rendement potentielles engendrées par la survenue du stress au stade phénologique correspondant. Les hachures indiquent que l'ascochytose est moins fréquente lors de la phase végétative, et reste la plus prévalente à partir du début de la floraison.

Ainsi, la littérature disponible sur le pois chiche témoigne des intérêts nutritionnels et agronomiques de cette culture, qui présente une meilleure tolérance à la sécheresse, n'est pas sensible à aphanomyces et n'est pas sujette aux attaques de bruches, qui sont à l'origine d'importantes chutes de rendement chez d'autres légumineuses à graines. Le pois chiche apparaît donc comme une espèce candidate intéressante pour diversifier les systèmes de culture en limitant l'usage d'intrants. Malgré ses atouts agronomiques, son rendement peut toutefois être limité par certains facteurs biotiques et abiotiques (Figure 0.3). Les stress thermique et hydrique à l'origine de pertes de rendement chez le pois chiche sont davantage prévalents dans les zones au climat chaud et aride, ce qui peut être le cas dans les principaux pays producteurs (Devasirvatham et al., 2015; Fang et al., 2010; Lake and Sadras, 2016; Turner et al., 2005; Wang et al., 2006). Parmi les stress biotiques, les adventices et l'ascochytose font partie des bioagresseurs les plus nuisibles pour la production (Singh et al., 2022; Whish et al., 2002), en particulier dans le Grand Ouest français, où les conditions climatiques douces et humides leur sont particulièrement favorables.

3. Enjeux agronomiques autour la culture du pois chiche dans le Grand Ouest

3.1. Maîtriser la compétition exercée par les adventices

La gestion des adventices est un enjeu majeur pour les légumineuses à graines (Watson et al., 2017; Young et al., 2000). La fermeture tardive du couvert et leur faible compétitivité pour l'acquisition de l'azote du sol laissent les ressources disponibles pour les adventices, leur donnant ainsi un avantage compétitif dès le début du cycle (Corre-Hellou et al., 2011; Paolini et al., 2006; Whish et al., 2002). De précédents travaux sur le pois chiche ont documenté des pertes de rendement allant d'environ 50% jusqu'à 92% en situation non désherbée, par rapport à un témoin désherbé (Banik et al., 2006; Paolini et al., 2006; Radicetti et al., 2012; Whish et al., 2002). Cette faible compétitivité peut également poser problème à l'échelle de la rotation, en laissant les adventices compléter leur cycle et enrichir le stock semencier.

D'après les références techniques disponibles en France, la maîtrise des adventices sans herbicide sur la culture du pois chiche repose essentiellement sur l'utilisation combinée de différents outils de désherbage mécanique (Lambert, 2023). En post-semis-prélevée, l'utilisation de la herse étrille peut permettre de lutter contre le développement précoce des

adventices. Une fois le système racinaire pivotant suffisamment développé, à partir du stade 1-3 feuilles, des passages de herse étrille ou de houe rotative sont possibles jusqu'au stade 8-10 feuilles au maximum. A partir du stade 4-5 feuilles, le désherbage mécanique de l'inter-rang par binage peut permettre de limiter les pertes de rendement (Avola et al., 2008; Lambert, 2023) mais est conditionné à un semis en inter-rang large. Les adventices dans le rang et à proximité du rang restent toutefois difficilement atteignables, en raison du risque d'endommager la culture (Radicetti et al., 2012; Rasmussen et al., 2008). Le désherbage mécanique n'est plus possible à partir de la fermeture de l'inter-rang, qui a généralement lieu autour du début de la floraison (Lambert, 2023).

La réussite de la stratégie de lutte contre les adventices reposant uniquement sur le désherbage mécanique dépend de nombreux facteurs, en particulier des conditions climatiques, mais aussi de la qualité de la préparation du lit de semences, du type de sol, ainsi que des espèces et du stade des adventices présentes (Kurstjens and Kropff, 2001; Mohler et al., 2021; Rasmussen et al., 2010; Richard et al., 2023). Ainsi, l'ensemble de ces conditions rend l'efficacité de ces pratiques incertaines. De plus, le travail du sol intensif nécessaire pour obtenir un état de surface favorisant leur action, notamment la présence de terre fine et l'absence de résidus végétaux, peut à terme altérer la structure du sol et accentuer le risque d'érosion (Hamza and Anderson, 2005; Mohler et al., 2021; Tilman et al., 2002). Par ailleurs, des interventions de désherbage mécanique fréquentes peuvent paradoxalement provoquer de nouvelles levées d'adventices (Schutte et al., 2014).

En matière de lutte chimique, peu de solutions en post-levée sont homologuées pour le pois chiche en France (Lambert, 2023). La stratégie de lutte repose donc sur des applications de post-semis-prélevée par mode d'action racinaire, pour lesquelles peu de matières actives sont disponibles, et dont le spectre d'efficacité est limité (Lambert, 2023).

3.2. L'ascochytose, un frein majeur à la production de pois chiche

L'ascochytose est la maladie la plus fréquente du pois chiche en France et dans le monde (Lambert, 2023; Singh et al., 2022). L'agent pathogène qui en est à l'origine est le champignon aérien *Ascochyta rabiei* (Singh et al., 2022). Les symptômes se manifestent par l'apparition de lésions nécrotiques sur toutes les parties aériennes de la plante, ce qui altère sa capacité photosynthétique (Figure 0.4, Garry et al., 1998). Les nécroses peuvent provoquer la casse des tiges et la perte des gousses situées sur les étages supérieurs (Figure 0.4). Les lésions sur graines sont également très problématiques, puisque celles-ci doivent être indemnes de tâches pour être valorisées en alimentation humaine. La nuisibilité peut ainsi être très importante, pouvant dans les cas les plus sévères, engendrer la perte complète de la récolte (Singh et al., 2022).

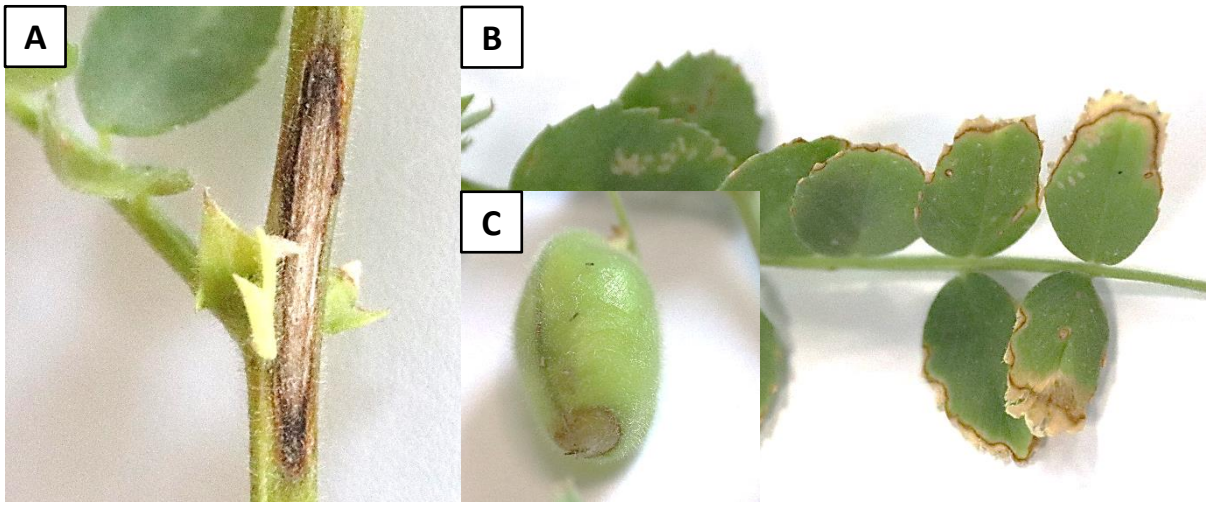


Figure 0.4: Symptômes d'ascochytose sur tige (A), feuille (B) et gousse (C) de pois chiche. Photos : Margaux Guy

3.2.1. Cycle de l'ascochytose

L'agent pathogène existe sous une forme anamorphe capable de reproduction asexuée (*Ascochyta rabiei*), et sous une forme téléomorphe capable de reproduction sexuée (*Didymella rabiei*, Figure 0.5). Le téléomorphe correspond à la forme de conservation du pathogène sur les résidus de cultures pendant l'hiver. En tant que champignon hétérothallique, son développement est conditionné par la présence simultanée des deux types sexuels compatibles MAT1-1 et MAT1-2. La reproduction sexuée produit des pseudothèces contenant des asques, au sein desquels se forment des spores sexuées, les

ascospores (Figure 0.5, Singh et al., 2022). La maturation des pseudothèces requiert des conditions humides et une période d'incubation initiale à des température basses comprises entre 5 et 10°C (Gamliel-Atinsky et al., 2005). La pluie déclenche la libération des ascospores qui sont alors transportées par le vent sur plusieurs kilomètres. Les ascospores peuvent survivre plusieurs semaines à la surface de tissu hôte jusqu'à ce que les conditions climatiques soient favorables à leur germination (Trapero-Casas and Kaiser, 2007). La formation d'un tube de germination permet au pathogène de pénétrer dans l'hôte *via* la cuticule ou les stomates. L'infection se poursuit par la colonisation de l'hôte, lors de laquelle le pathogène sécrète des phytotoxines et des enzymes dégradant la paroi cellulaire. Aux stades d'infection plus avancés, le pathogène forme de nouveaux organes de fructification, les pycnides, qui contiennent des spores asexuées, les conidies (Figure 0.5). Les pycnides forment des points noirs circulaires visibles à l'œil nu sur les lésions, caractéristiques des symptômes d'ascochytose (Singh et al., 2022). Les ascospores et les conidies peuvent germer en conditions humides sur une large gamme de températures allant de 5 à 30°C. La température optimale pour la germination des deux types de spores et la croissance mycélienne est de 20°C. Plus la période d'humidité est longue, plus la sévérité de la maladie est élevée. L'exposition à une période sèche de 6h juste après l'infection augmente également la sévérité de la maladie (Trapero-Casas and Kaiser, 2007).

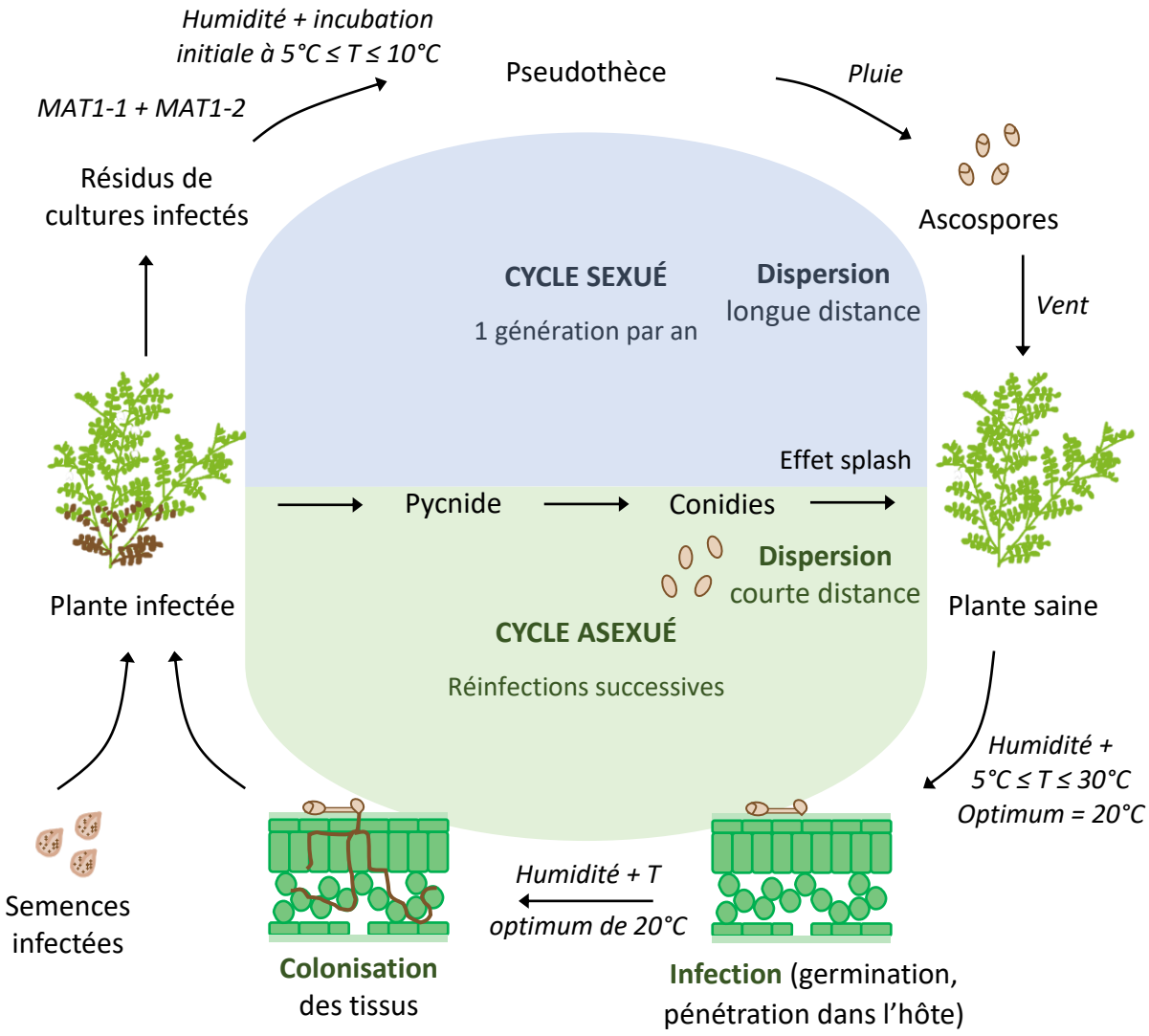


Figure 0.5 : Schéma du cycle de l'ascochytose (adapté de Singh et al., 2022).

3.2.2. Sources d'inoculum

Les résidus de culture et les semences infectées sont les principaux réservoirs d'inoculum primaire (Kaiser, 1997; Singh et al., 2022). Pour cette raison, il est nécessaire de respecter un délai de retour de 5 à 6 ans sur une même parcelle, et d'être vigilant sur la provenance et la qualité sanitaire des semences (Lambert, 2023). Par ailleurs, bien que *Ascochyta rabiei* ne provoque de symptômes que chez le pois chiche, il peut aussi infecter et se multiplier chez d'autres espèces (Hernandez-Bello et al., 2006; Singh et al., 2022). De précédents travaux ont isolé le pathogène chez d'autres légumineuses à graines comme le pois, la lentille, le haricot et la féverole (Hernandez-Bello et al., 2006; Khan et al., 1999; Trapero-Casas and Kaiser, 2009), ainsi que chez plusieurs espèces d'adventices (Trapero-Casas and Kaiser, 2009). Trapero-Casas and Kaiser (2009) ont également documenté la production d'organes de fructification et de

spores par le champignon sur des résidus de culture de ces espèces. Les hôtes alternatifs peuvent donc constituer un réservoir d'inoculum (Khan et al., 1999; Pande et al., 2005; Trapero-Casas and Kaiser, 2009). Les ascospores sont à l'origine de la dispersion du pathogène sur de longues distances et déclenchent les premières infections (Trapero-Casas et al., 1996). Les conidies sont quant à elles responsables des infections secondaires et de la dispersion du pathogène de proche en proche par effet splash (Singh et al., 2022). La forme sexuée du pathogène ne produit qu'une seule génération par an, tandis que la phase asexuée est polycyclique (Singh et al., 2022). Ainsi, les réinfections secondaires successives par les conidies mènent souvent à une progression des symptômes du bas vers le haut de la plante (Tivoli and Banniza, 2007).

3.2.3. Méthodes de lutte

Pour le moment, les principales solutions de lutte existantes sont chimiques. En effet, les efforts de recherche en sélection variétale restent pour le moment infructueux car le pathogène contourne systématiquement les gènes de résistance (Singh et al., 2022). Ce phénomène est en partie dû à sa reproduction sexuée qui engendre une importante variabilité génétique. La présence du téléomorphe, la forme sexuée du champignon, a par ailleurs été confirmée dans les principaux pays producteurs (Singh et al., 2022). Des cas de contournement de résistance ont aussi été rapportés dans des zones où le téléomorphe est absent (Bar et al., 2021; Mehmood et al., 2017). De plus, plusieurs travaux ont documenté l'émergence de nouvelles souches agressives dans certains des principaux pays producteurs de pois chiche (Atik et al., 2013; Bar et al., 2021; Mehmood et al., 2017).

Ainsi, les adventices et l'ascochytose représentent des risques biotiques majeures à considérer pour l'introduction du pois chiche, en particulier dans les systèmes de culture sobres en intrants (Singh et al., 2022; Whish et al., 2002). Dans la littérature, les interactions entre différents stress biotiques sont rarement examinées (Banik et al., 2006; Paolini et al., 2006; Whish et al., 2002; Zhou et al., 2022). Par conséquent, les méthodes de lutte étudiées ne prennent pas en compte les potentiels effets synergiques ou antagonistes entre bioagresseurs. Pourtant, les agriculteurs doivent le plus souvent faire face à la gestion simultanée de plusieurs bioagresseurs sur une même parcelle, et ceci de façon très marquée dans le cadre de systèmes de culture limitant l'usage de produits phytosanitaires. Une meilleure connaissance des interactions et une gestion intégrée des bioagresseurs pourrait permettre de gérer plus efficacement leur pression et leurs conséquences sur la production, tout en évitant de recourir aux pesticides. Dans cette optique, le Programme Prioritaire de Recherche (PPR) « Cultiver et Protéger Autrement » a pour objectif d'explorer de nouveaux fronts de sciences et de développer des innovations de rupture, avec pour ambition de permettre l'émergence d'une agriculture sans pesticide à l'horizon 2030-2040 (INRAE, 2025). C'est dans le cadre de ce programme que se place le projet ANR SPECIFICS, dans lequel cette thèse s'insère. Ce projet de recherche vise à concevoir des systèmes de culture riches en légumineuses à graines et sans pesticides, en adoptant une approche multi-bioagresseurs. L'un des axes travaillés se concentre sur l'exploration de nouveaux leviers agronomiques à l'échelle du système de culture pour améliorer la gestion des bioagresseurs des légumineuses à graines, sans recourir aux pesticides.

4. Associer le pois chiche pour favoriser son insertion dans les systèmes de culture sobres en intrants et en travail du sol

4.1. Fonctionnement et services rendus par les associations de cultures

L'association de cultures consiste à cultiver simultanément au moins deux espèces différentes sur la même parcelle pendant une période significative de leur cycle (Willey, 1990). Différents types d'associations peuvent être distingués en fonction des objectifs de production, de l'arrangement spatio-temporel et des services écosystémiques attendus (Malézieux et al., 2009).

4.1.1. Services rendus par les associations de cultures et mobilisables pour produire des légumineuses à graines

L'association de cultures est une pratique ancestrale encore courante dans les zones tropicales, mais qui a été délaissée dans les pays occidentaux (Malézieux et al., 2009). Pourtant, de nombreuses études ont démontré qu'elle était susceptible de rendre une grande variété de services écosystémiques, en particulier dans les systèmes de culture sobres en intrants (Bedoussac et al., 2015; Brooker et al., 2015; Corre-Hellou et al., 2011; Gardarin et al., 2022; Hauggaard-Nielsen et al., 2008). L'association de plusieurs espèces récoltées peut produire un rendement total plus élevé que celui des monocultures correspondantes, et augmenter la productivité par unité de surface (Bedoussac et al., 2015; Hauggaard-Nielsen et al., 2008; Tilman, 2020). Dans le cas des espèces sujettes à la verse, l'introduction d'une espèce associée peut fournir un effet de tuteur à la culture, et limiter ainsi les pertes de rendement associées (Viguier et al., 2018). La complémentarité entre composantes d'une association permet une utilisation plus complète et efficiente des ressources par rapport à une monoculture (Bedoussac et al., 2015; Bedoussac and Justes, 2010a; Hauggaard-Nielsen et al., 2009). Ainsi, moins de ressources restent disponibles pour les adventices, ce qui peut limiter leur accumulation de biomasse et les pertes de rendement associées (Corre-Hellou et al., 2011; Gu et al., 2021). La libération de métabolites secondaires par l'une des composantes de l'association peut aussi participer au contrôle des adventices par allélopathie (Moreau et al., 2025; Zhang et al., 2021). L'association de cultures peut également limiter les dégâts liés aux ravageurs et aux maladies par rapport aux monocultures (Boudreau, 2013; Gardarin et al., 2022; Moreau et al., 2025).

La limitation de la sévérité des symptômes dans les associations de cultures par rapport aux monocultures a été démontrée pour différentes maladies, notamment pour l'ascochytose sur diverses espèces de légumineuses à graines (Fernández-Aparicio et al., 2011, 2010; Schoeny et al., 2010), dont le pois chiche (Zhou et al., 2022). Plusieurs mécanismes sont impliqués dans la réduction de la sévérité des maladies foliaires chez les cultures associées : i) la modification du **microclimat**, ii) l'effet **barrière**, iii) la modification de l'**architecture de la plante hôte** et iv) l'effet **dilution** (Boudreau, 2013). Chez un grand nombre de champignons aériens, la germination des spores et la croissance mycélienne nécessitent certaines conditions de température et d'humidité (Tivoli and Banniza, 2007). L'introduction d'une autre espèce modifie la biomasse et l'architecture du couvert, ce qui peut altérer certains paramètres du microclimat, et créer des conditions moins favorables au développement du pathogène (Fernández-Aparicio et al., 2011; Schoeny et al., 2010). La présence d'une plante non hôte peut également perturber la dispersion horizontale des spores en créant un obstacle entre la source d'inoculum et la plante hôte (Schoeny et al., 2010; Vidal et al., 2017). Par ailleurs, la compétition pour l'interception du rayonnement exercée par l'espèce associée peut engendrer des modifications de l'architecture aérienne chez la plante hôte, notamment un allongement des entre-nœuds (Fernández-Aparicio et al., 2010; Liu et al., 2017). Pour les maladies se propageant du bas vers le haut de la plante comme l'ascochytose, l'allongement des entre-nœuds augmente la distance entre les lésions nécrotiques et les tissus sains, ce qui peut perturber la dispersion verticale des spores (Fernández-Aparicio et al., 2010; Le May et al., 2009). Enfin, l'effet dilution correspond à la perturbation de l'interception de l'inoculum par la plante hôte en raison de sa plus faible densité et/ou biomasse dans l'association par rapport à la culture pure. Cette diminution peut être due à un choix lors de la conception de l'association, ou bien la conséquence d'une forte compétition interspécifique (Fernández-Aparicio et al., 2011, 2010; Schoeny et al., 2010). L'ensemble de ces mécanismes a toutefois été peu étudié dans des associations à base de pois chiche.

4.1.2. Orienter les interactions biologiques entre les composantes

Par rapport aux monocultures, l'introduction d'espèces supplémentaires génère des interactions interspécifiques qui peuvent être classées en trois grandes catégories : i) la compétition, ii) la facilitation et iii) la complémentarité (Vandermeer, 1989). La **compétition** désigne le processus au cours duquel un individu exerce un effet négatif sur un autre. Au sein

des associations, la compétition interspécifique s'opère pour l'acquisition des ressources en eau, en nutriments et en lumière (Bedoussac et al., 2015; Malézieux et al., 2009). Lorsqu'un individu exerce un effet positif sur un autre, sans réciprocité, l'interaction est qualifiée de **facilitation**. Par exemple, dans les associations blé-lentille, la céréale sert de tuteur à la légumineuse ce qui diminue le risque de verse chez la lentille (Viguier et al., 2018). La **complémentarité** est une forme d'atténuation de la compétition ayant lieu lorsque les espèces associées n'acquièrent pas les ressources au même moment, dans le même espace ou sous la même forme. Ce type d'interactions repose sur la notion de séparation des niches écologiques (Vandermeer, 1989). Associer des céréales et des légumineuses permet de tirer parti de leur complémentarité pour l'acquisition de l'azote, puisque les premières exploitent l'azote minéral du sol, tandis que les secondes fixent l'azote atmosphérique (Bedoussac et al., 2015).

La nature et l'intensité des interactions entre les composantes d'une association évoluent au cours du cycle cultural (Bedoussac and Justes, 2010a). Entre les espèces associées, l'objectif est de favoriser la complémentarité et la facilitation, mais de limiter le plus possible la compétition. A l'inverse, la compétition exercée par la culture vis-à-vis des adventices doit être la plus forte possible. Lorsque l'objectif est de favoriser la production d'une culture en particulier, ici le pois chiche, l'utilisation de plantes de services est une option intéressante. Les plantes de services sont des espèces non récoltées, introduites dans le but de fournir des services de support et de régulation (Gardarin et al., 2022; Moreau et al., 2025). L'introduction d'une plante de services pourrait être une piste pertinente à explorer pour faciliter la culture du pois chiche et sécuriser sa production. Dans cette optique, le choix de l'espèce de plante de services est un premier paramètre clef pour orienter les interactions biologiques au sein de l'association, ainsi que les services écosystémiques rendus.

4.1.3. Importance du choix d'espèce de plante de services

Une diversité d'espèces peuvent être utilisées comme plantes de services (Dijan-Caporalino and Lavoir, 2024; Gardarin et al., 2022; Moreau et al., 2025). Afin de guider ce choix, de nombreux travaux se sont appuyés sur la notion de trait fonctionnel (Bousselin et al., 2021; Cheriere et al., 2023; Damour et al., 2014; Garcia et al., 2020; Garnier and Navas, 2012; Lorin et al., 2017; MacLaren et al., 2023; Ouattara et al., 2025; Tardy et al., 2015). Issu de l'écologie, le terme de trait fonctionnel désigne une caractéristique morphologique, physiologique ou phénologique mesurable à l'échelle de l'individu, et ayant un effet sur sa croissance, sa survie

ou sa reproduction (Violle et al., 2007). Les traits fonctionnels sont des indicateurs des effets de la plante sur l'écosystème (trait d'effet), et de sa réponse aux conditions environnementales (trait de réponse; Violle et al., 2007). Appliqués à l'agronomie et aux associations de cultures, l'approche trait-fonction-service peut être un outil pour guider les assemblages d'espèces et prédire les services rendus selon la combinaison choisie (Damour et al., 2014; Dijan-Caporalino and Lavoir, 2024; Ouattara et al., 2025).

Mélanger des espèces dont les traits sont contrastés, notamment leur hauteur, leur port (dressé, étalé, etc) ou leur architecture racinaire, peut favoriser leur complémentarité en encourageant la séparation des niches écologiques (Brooker et al., 2015; Damour et al., 2014; Ouattara et al., 2025). Des différences de hauteur entre espèces associées ne partageant pas les mêmes maladies peuvent aussi participer à limiter la dispersion des spores des agents pathogènes aériens (Vidal et al., 2017). Certains traits fonctionnels simples, comme la hauteur de la végétation, la potentiel d'accumulation de biomasse, la surface foliaire spécifique, le taux de croissance et d'accumulation de l'azote minéral, sont associées à la compétitivité des espèces vis-à-vis des adventices (Bousselin et al., 2024; Cheriere et al., 2023; Dayoub et al., 2022; Lorin et al., 2015; MacLaren et al., 2023; Tardy et al., 2015; Tribouillois et al., 2015). En se basant sur ces traits, les Brassicaceae et les céréales sont considérées comme des espèces compétitives, dont l'introduction peut contribuer à la régulation des adventices, mais aussi exercer une forte compétition sur la culture de vente (Bousselin et al., 2024; MacLaren et al., 2023; Ouattara et al., 2025; Tribouillois et al., 2015).

Ainsi, le choix des espèces à associer influe sur la gestion des antagonismes entre services, notamment sur le compromis entre le rendement de la culture de vente et la gestion des adventices, qui émerge souvent lorsque l'espèce introduite est fortement compétitive pour l'acquisition des ressources (Carton et al., 2020; Cheriere et al., 2020).

Dans les agrosystèmes, les traits fonctionnels ont aussi été mobilisés pour décrire la réponse de la communauté adventice à la compétition exercée par la culture (Bàrberi et al., 2018; Gaba et al., 2017; Garnier and Navas, 2012). Quelques travaux ont examiné l'effet de l'association de cultures sur la communauté adventice, et ont rapporté une diminution de l'abondance des espèces dominantes par rapport à une culture pure (Lagerquist et al., 2025; Namatsheve et al., 2024; Poggio, 2005; Taab et al., 2023). Parmi ces études, Namatsheve et al. (2024) ont rapporté que la diversité de la communauté adventice n'était pas différente entre cultures associées et monocultures, tandis que Poggio (2005) ont observé une richesse spécifique en

moyenne plus élevée, mais sans pouvoir conclure sur ce potentiel effet. Ainsi, la structure de la communauté adventice dans les associations de cultures reste une thématique peu étudiée, et pour laquelle peu de conclusions claires sont disponibles.

4.2. Associer le pois chiche pour le produire sans pesticides

4.2.1. Espèces candidates pour une association à base de pois chiche

De précédents travaux se sont intéressés aux associations à base de pois chiche (Tableau 0.1). Toutefois, la majorité de ces études n'ont testé qu'une seule combinaison d'espèces à la fois, et n'ont exploré qu'un nombre très restreint de cultures à associer au pois chiche. Par ailleurs, aucune d'entre elles ne traite d'associations entre le pois chiche et une plante de services. Dans certains cas, le pois chiche n'est pas la culture de vente mais est introduit pour fournir des services à une autre culture, souvent pour faciliter la nutrition en phosphore du blé ou du maïs (Li et al., 2003, 2004; Wang et al., 2007; Xia et al., 2013). La majorité des expérimentations plein champ ont été conduites dans les principaux pays producteurs de pois chiche, dans des conditions pédoclimatiques éloignées de celles rencontrées en France (Tableau 0.1). De plus, peu d'entre elles ont été menées dans des conditions de faible utilisation d'intrants. D'après les résultats de ces travaux, le rendement du pois chiche est souvent plus faible en association par rapport à la culture pure, tandis que l'espère associée n'est pas ou moins affectée (Dowling et al., 2023; Gunes et al., 2007; Raza et al., 2023; Zhou et al., 2022). En association, le pois chiche est donc souvent dominé par l'espèce à laquelle il est associé, et souffre de pertes de rendement dues à la compétition interspécifique.

Tableau 0.1 : Liste des principales études menées sur des associations de culture à base de pois chiche.

Référence	Espèce associée	Conditions d'expérimentation	Arrangement spatial Rangs PC : autre *	Cultures synchrones ? (Première semée)	Service recherché	Pays
Banik et al. (2006)	Blé	Plein champ	1 : 1	Oui	Contrôle des adventices	Inde
Betencourt et al. (2012)	Blé	Serre	-	Oui	Nutrition P	France
Dowling et al. (2023)	Lin	Plein champ	2 : 2	Oui	Réduction intrants et coûts associés	Australie
	Canola	Plein champ	2 : 2	Oui		
Gunes et al. (2007)	Blé	Serre	-	Oui	Nutrition NPK + oligoéléments	Turquie
	Blé	Plein champ	2 : 2	Non (blé)		
Heineck et al. (2025)	Canola	Plein champ	Non détaillé	Oui	Rendement additionnel, effet précédent	Etats-Unis
Li et al. (2003)	Blé	Serre	-	Oui	Nutrition P	Australie
Li et al. (2004)	Maïs	Serre	-	Oui	Nutrition P	Chine
McAuley et al. (2025)	Lin	Plein champ	1 : 1	Oui	Rendement additionnel, amélioration biologie et fertilité du sol	Canada
Raza et al. (2023)	Blé	Plein champ	2 : 4	Non (pois chiche)	Rendement additionnel	Pakistan
Wang et al. (2007)	Blé	Serre	-	Oui	Nutrition P	Australie
Xia et al. (2013)	Maïs	Plein champ	3 : 2	Non (pois chiche)	Nutrition P	Chine
Zhou et al. (2022)	Lin	Plein champ	1 : 1 ou mélange sur le rang	Oui	Contrôle ascochytose	Etats-Unis

***** Dans le cas d'espèces cultivées en rangs alternés ou en bandes, le nombre de rangs de pois chiche et de l'espèce associée sont renseignés (nombre de rangs de pois chiche : nombre de rangs de l'espèce associée).

4.2.2. Conception d'une association de cultures à base de pois chiche

L'agencement spatial des différentes composantes d'une association a un effet sur l'intensité de la compétition. Disposer les différentes espèces en rangs alternés, plutôt que de les mélanger sur le rang, limite la compétition interspécifique (Carton et al., 2020; Cheriere et al., 2020). Le choix des densités relatives permet également de donner un avantage compétitif à une espèce par rapport à une autre. Dans les associations, le semis peut être additif ou substitutif (Malézieux et al., 2009). Dans le cas d'un semis additif, la somme des densités relatives des espèces associées est supérieure à 100%. La densité de plantes totale est donc plus élevée dans l'association que dans les cultures pures. Dans le cas d'un semis substitutif, une partie des plantes d'une espèce est remplacée par le même nombre de plantes d'une autre espèce. La densité totale n'est donc pas modifiée entre l'association et les cultures pures, et les différentes espèces ne sont pas semées à leur pleine densité. Ainsi, le choix des espèces, leur arrangement spatio-temporel et les densités relatives permettent d'orienter les rapports de dominance entre composantes d'une association (Bybee-Finley et al., 2022; Carton et al., 2020; Cheriere et al., 2020; Hauggaard-Nielsen et al., 2006). Toutefois, ces choix stratégiques ne sont souvent pas suffisants pour éviter d'importantes chutes de rendement chez les légumineuses à graines (Banik et al., 2006; Carton et al., 2020; Cheriere et al., 2020; Li et al., 2020).

4.2.3. Réorienter les rapports de dominance entre espèces en fauchant la plante de services au cours du cycle cultural

L'utilisation de plantes de services donne la possibilité d'implémenter d'autres leviers d'atténuation de la compétition, comme la régulation mécanique. Dans une étude sur des associations blé d'hiver-trèfle blanc, Thorsted et al. (2006) ont démontré que faucher le trèfle dans les inter-rangs du blé permettait d'atténuer la compétition exercée sur la céréale. De plus, la fauche/tonte participe aussi à la régulation des adventices (Donald, 2007; Rowland et al., 2023). Cette pratique reste encore peu étudiée, mais semble prometteuse pour orienter les rapports de dominance dans les associations en cours de cycle, et est mentionnée dans la littérature récente sur les plantes de services (Gardarin et al., 2022; Moreau et al., 2025).

Les effets des opérations de contrôle mécanique qui reposent sur la coupe des adventices, comme la fauche ou la tonte, sur l'assemblage des communautés ont été étudiés de façon approfondie dans les systèmes viticoles où ces pratiques sont courantes, et répétées plusieurs

fois au cours du cycle de la culture (Bopp et al., 2022; Fried et al., 2022; Guerra et al., 2022; Kazakou et al., 2016; MacLaren et al., 2019). Dans ces systèmes, de nombreux travaux ont rapporté que la fauche engendrait des communautés d'adventices plus diversifiées, en comparaison à l'usage d'herbicides ou au labour (Bopp et al., 2022; Fried et al., 2019; Guerra et al., 2022; Kazakou et al., 2016). Elle peut aussi sélectionner certains traits liés à la tolérance à la fauche, comme l'agencement des feuilles en rosette chez les espèces pérennes (Guerra et al., 2022, 2021). Les résultats des travaux menés sur les systèmes viticoles apportent une première base de connaissances sur la réponse de la communauté adventice à la fauche, mais restent toutefois éloignés des systèmes comprenant des cultures annuelles, sur lesquels peu de références sont disponibles.

Ainsi, la littérature scientifique disponible suggère que l'introduction du pois chiche dans les systèmes de culture pourrait être favorisée *via* l'introduction d'une plante de services et la fauche des inter-rangs. La combinaison de ces deux leviers permettrait de mettre en œuvre une gestion intégrée des adventices et de l'ascochytose, tout en limitant les pertes de rendement dues à la compétition interspécifique. De telles associations pourraient également impliquer des modifications de l'architecture aérienne du pois chiche et de la structure de la communauté adventice.

Problématique et démarche expérimentale

1. Questions et hypothèses de recherche

Diversifier les systèmes de culture à travers l'insertion du pois chiche est un levier pertinent pour répondre à la demande croissante en végétaux riches en protéines pour l'alimentation humaine, tout en limitant les effets néfastes de l'agriculture sur l'environnement et la santé. Toutefois, les chutes de rendement engendrées par la compétition des adventices et par l'ascochytose entravent l'insertion du pois chiche dans les systèmes de culture (Singh et al., 2022; Whish et al., 2002), notamment lorsqu'on souhaite réduire drastiquement l'usage de produits phytosanitaires. Ces contraintes agronomiques sont doublées d'un manque de références disponibles sur cette espèce en France, et plus largement, en Europe.

Combiner l'introduction d'une plante de services à la fauche de l'inter-rang du pois chiche pourrait permettre de lever en partie ces contraintes, tout en limitant les pertes de rendement liées à la compétition interspécifique (Gardarin et al., 2022; Moreau et al., 2025; Thorsted et al., 2006).

Ainsi, l'objectif de ce travail est d'étudier le fonctionnement d'associations entre une légumineuse à graines et une plante de services fauchée, dans un contexte de faible utilisation d'intrants, et en considérant deux bioagresseurs simultanément : les adventices et *Ascochyta rabiei*. Cette étude se concentre sur trois services principaux : i) atténuer la compétition exercée par les adventices et ii) limiter la sévérité de l'ascochytose, tout en iii) sécurisant la production de pois chiche.

La réflexion menée dans cette thèse est articulée autour de trois questions de recherche. Pour chacune de ces questions, des hypothèses ont été formulées en s'appuyant sur les connaissances disponibles sur les caractéristiques du pois chiche, les facteurs limitant son adoption, et le fonctionnement connu des associations.

QR1 : Dans un contexte de faible utilisation d'intrants, quels sont les effets de l'introduction d'une plante de services fauchée sur le contrôle des adventices, la sévérité de l'ascochytose et la productivité du pois chiche ?

H1 : Le choix de l'espèce de plante de services et la fauche de l'inter-rang du pois chiche conditionnent le niveau des services obtenus.

H2 : L'introduction d'une plante de services fauchée entraîne des modifications de l'architecture aérienne du pois chiche et de l'établissement de certaines composantes du rendement.

H3 : L'architecture du pois chiche et la biomasse du couvert influent sur le niveau de sévérité de l'ascochytose.

QR2 : La combinaison du choix d'espèce de plante de services et de la fauche permet-elle d'orienter les rapports de dominance entre le pois chiche, la plante de services et les adventices, ainsi que les compromis entre les services visés ?

H4 : La compétitivité de la plante de services vis-à-vis des adventices est liée à sa dynamique de croissance pendant la phase d'installation.

H5 : Faucher l'inter-rang du pois chiche au début de la floraison permet d'atténuer la compétition exercée par la plante de services et les adventices.

H6 : Introduire une plante de services repoussant après la fauche limite l'accumulation de biomasse par les adventices pour le reste du cycle.

QR3 : Quelle est l'influence de l'introduction d'une plante de services fauchée sur la structure de la communauté adventice ?

H7 : La présence d'une plante de services modifie la structure de la communauté adventice.

H8 : La fauche de l'inter-rang du PC augmente le niveau de diversité de la communauté adventice et sélectionne des espèces tolérantes à la fauche.

L'ensemble des questions de recherche et leur positionnement dans le cycle du pois chiche sont schématisés en Figure 0.6.

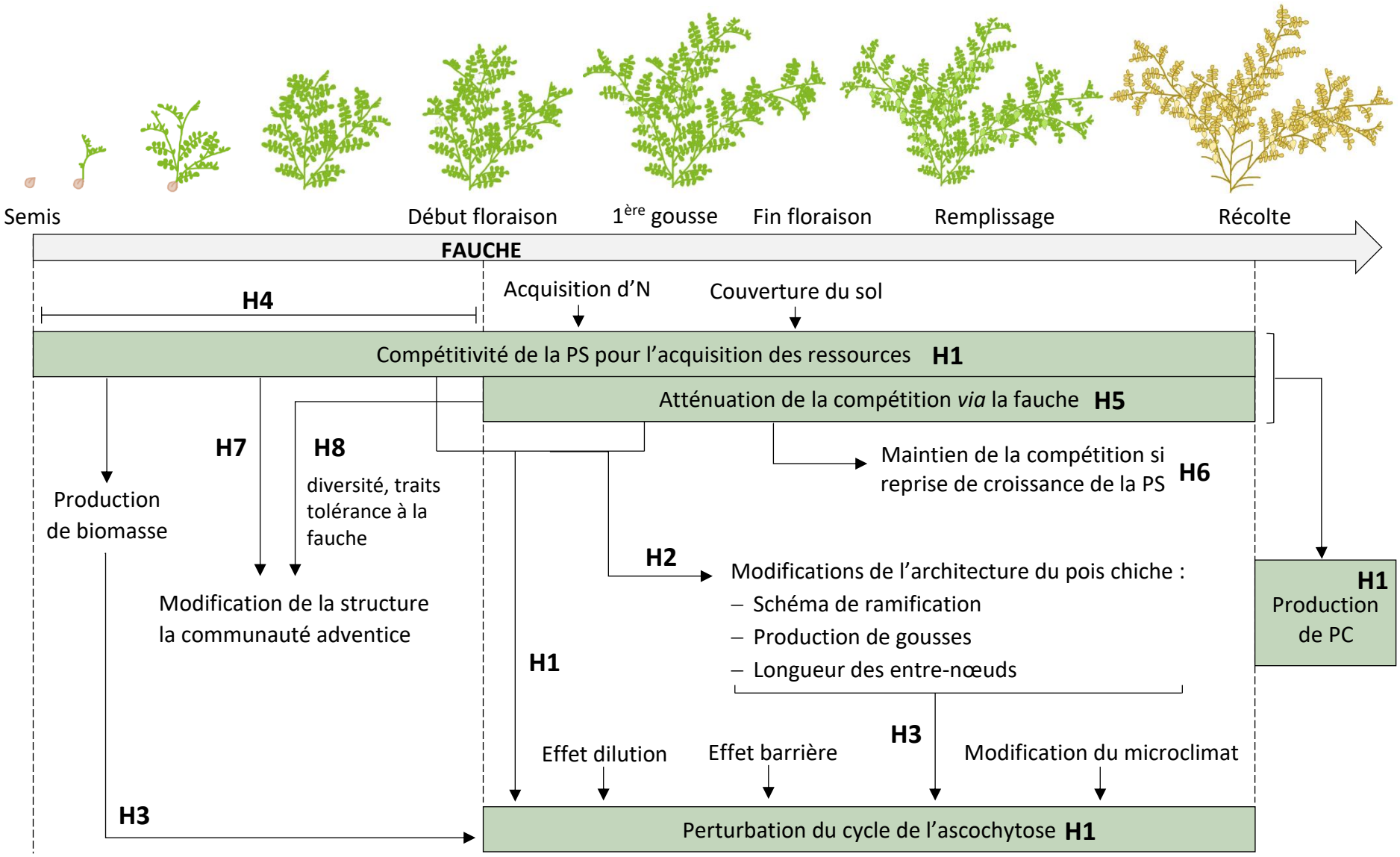


Figure 0.6 : Schéma représentant le positionnement des différentes hypothèses par rapport au cycle du pois chiche. PC : pois chiche, PS : plante de services.

2. Démarche expérimentale

Dans le but de répondre à ces questions de recherche, une expérimentation en plein champ a été conduite à La Ménitré, dans le Maine-et-Loire. Celle-ci a été répétée de façon identique sur deux années consécutives, en 2023 et en 2024. Chaque essai s'est déroulé sur une période allant de fin avril jusqu'à environ début septembre, ce qui correspond à la saison de culture du pois chiche dans cette zone géographique. Les deux années d'expérimentation ont été marquées par des conditions climatiques très contrastées, avec une pluviométrie de 216 mm en 2023 sur la période de l'essai, contre 342 mm en 2024. En comparaison aux normales de saison, calculées entre 2013 et 2022, le cumul de précipitations sur le cycle cultural était proche de la moyenne en 2023, tandis qu'il était 60% plus élevé en 2024 (Météo France, 2024). Ces différences climatiques ont également donné lieu à des différences de pression des adventices et de l'ascochytose, qui était bien plus élevée pendant la deuxième année. Dans cette section, la conception et les caractéristiques du dispositif expérimental sont présentées de manière générale. Une version détaillée est présentée dans le Chapitre 1.

2.1. Choix des espèces de plantes de services

L'objectif de notre expérimentation était de tester différentes stratégies au cours du cycle du pois chiche. Pour cela, un éventail d'espèces présentant des traits contrastés a été choisi, en utilisant une approche trait-fonction-service (Damour et al., 2014; Dijan-Caporalino and Lavoir, 2024; Ouattara et al., 2023), dans le but de créer différents niveaux de compétition au cours du cycle entre le pois chiche, la plante de services et les adventices. Le choix d'espèces s'est orienté vers des cultures annuelles de printemps et d'été, ayant un port dressé afin de pouvoir être fauchée et différentes capacités de repousse. Ainsi, les espèces qui ont été choisies pour être associées au pois chiche sont (Figure 0.7, Tableau 0.2) :

- le trèfle d'Alexandrie, *Trifolium alexandrinum* L., variété Akenaton ;
- la féverole de printemps, *Vicia faba* L., variété Nanaux ;
- la moutarde blanche, *Sinapis alba* L., variété Gracja ;
- l'avoine de printemps, *Avena sativa* L., variété Céleste ;
- le sorgho du Soudan, *Sorghum x drummondii* (Nees ex Steud.) Millsp. & Chase, variété Piper.

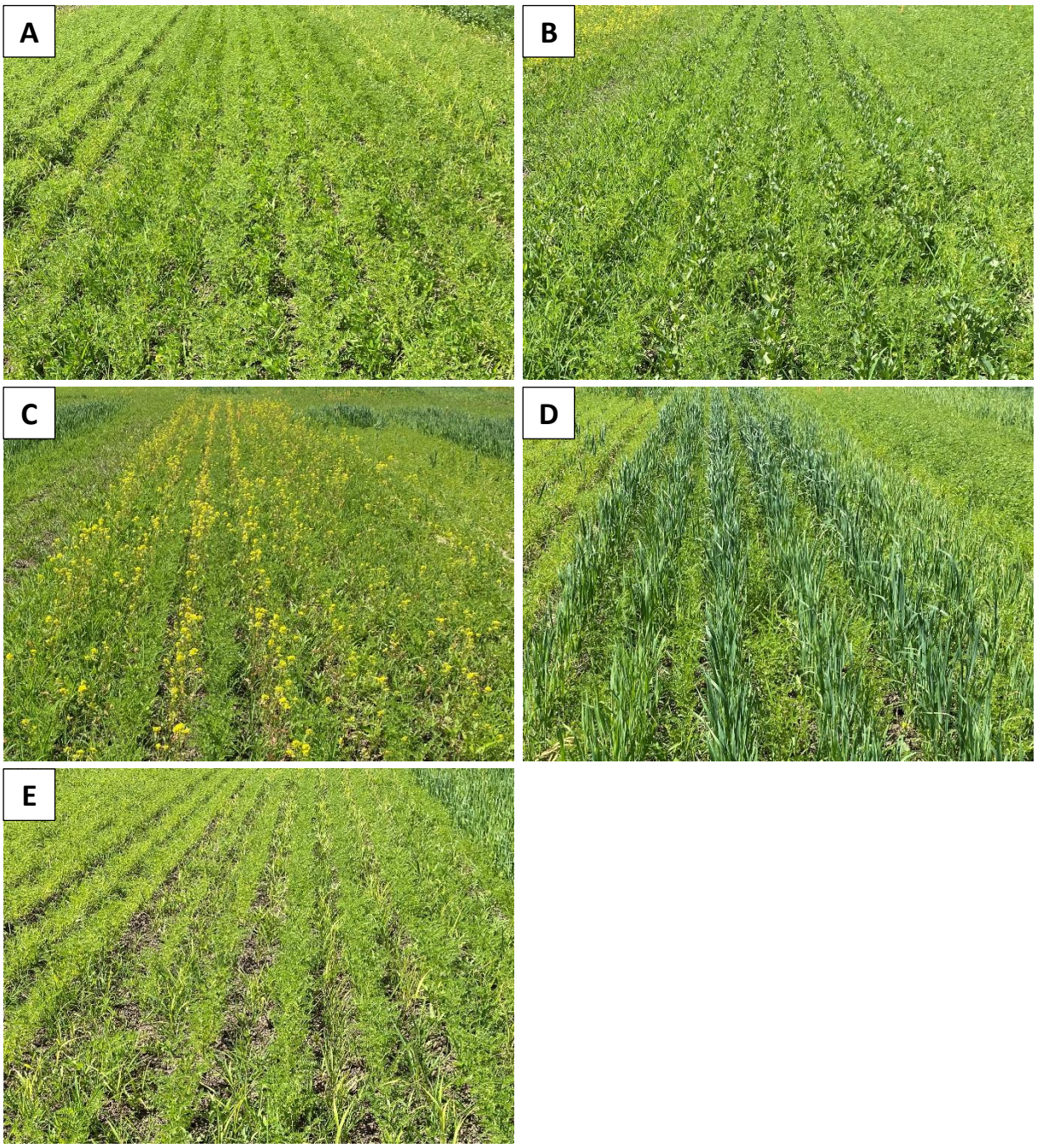


Figure 0.7 : Photographies des associations à base de pois chiche et de trèfle d'Alexandrie (A), féverole de printemps (B), moutarde blanche (C), avoine de printemps (D) ou de sorgho du Soudan (E). Ces photographies ont été prises au stade 13 feuilles du pois chiche, en 2024. Photos : Margaux Guy

L'avoine et la moutarde blanche ont été choisies pour leur forte production de biomasse et compétitivité pour l'acquisition des ressources dès le début de leur cycle (Tableau 0.2, Elhakeem et al., 2021; Tribouillois et al., 2015; Wendling et al., 2016). Elles ont aussi été sélectionnées pour leur différence de réponse à la fauche, après laquelle l'avoine peut reprendre sa croissance, selon son stade phénologique, contrairement à la moutarde. Le trèfle d'Alexandrie et le sorgho du Soudan ont une compétitivité moins importante en début de

cycle que l'avoine et la moutarde. En revanche, ces deux espèces sont susceptibles de produire de grandes quantités de biomasse plus tardivement dans le cycle cultural. Le trèfle et le sorgho peuvent aussi accumuler une forte biomasse après la fauche, en particulier le sorgho, pour lequel une variété multicoupe a été choisie. Le trèfle étant une légumineuse, il se différence des plantes de services précédemment décrites par sa capacité à fixer l'azote atmosphérique (Tableau 0.2). Comme le pois chiche, la féverole appartient à la famille des légumineuses à graines, mais ne présente pas les mêmes caractéristiques morphologiques, et a un taux de fixation plus élevé (Büchi et al., 2015; Guinet et al., 2018). A l'instar de la moutarde, il était attendu que la féverole ne repousse pas après la fauche. Les variétés des plantes de services ont été sélectionnées parmi celles couramment utilisées dans les couverts végétaux d'interculture.

Tableau 0.2 : Traits fonctionnels des espèces de plantes de services sélectionnées pour être associées au pois chiche dans l'expérimentation.

					Traits liés à l'acquisition des nutriments			**Traits liés à l'interception de la lumière**		
Famille	**Nom latin**	**Nom commun**	**Repousse**	**Fix. N_2**	**Longueur racines** (m) (2)	**MS racines** (g) (2)	**CNR** (g N ha^{-1} DJ^{-1}) (1)	**MS aérienne** (t ha^{-1}) (2)	**CGR** (kg MS ha^{-1} DJ^{-1}) (1)	**SLA** (m^2 kg^{-1}) (1)
Fabaceae	*Trifolium alexandrinum* L.	Trèfle d'Alexandrie	Oui	Oui	46.4 ± 4.4	0.81 ± 0.24	81.9 ± 11	6.6 ± 1.3	2.93 ± 0.47	32.9 ± 5.3
Fabaceae	*Vicia faba* L.	Féverole	Non	Oui	38.0 ± 2.3	2.31 ± 0.35	94.5 ± 3.9	7.8 ± 0.8	2.49 ± 0.17	35.1 ± 3.7
Brassicaceae	*Sinapis alba* L.	Moutarde blanche	Non	Non	45.0 ± 8.8	1.15 ± 0.47	134.2 ± 10.8	6.7 ± 0.7	4.56 ± 0.48	26.6 ± 3.4
Poaceae	*Avena sativa* L.	Avoine	Oui	Non	94.5 ± 3.3	0.88 ± 0.14	72.7 ± 30.4	6.5 ± 0.1	2.18 ± 0.86	28.2 ± 3.9
Poaceae	*Sorghum* x *drummondii* (Nees ex Steud.) Millsp. & Chase	Sorgho du Soudan	Oui	Non	60.2 ± 14.4	1.42 ± 0.15	85.8 ± 36.3	5.8 ± 2.1	3.50 ± 1.40	27.8 ± 2.4

Sources : (1) Tribouillois et al. (2015) et (2) Wendling et al. (2016). Les traits présentés dans ce tableau ont été mesurés sur des cultures pures, dans des conditions non limitantes en azote et en eau.

MS correspond à matière sèche et DJ à degré-jour.

Repousse : capacité à repousser après la fauche, Fix. N_2 : capacité à fixer le diazote, CNR : taux d'accumulation de l'azote (*crop N accumulation rate*), CGR : taux de croissance (*crop growth rate*) et SLA : surface foliaire spécifique (*specific leaf area*).

2.2. Fauche de l'inter-rang du pois chiche

La gestion de l'inter-rang du pois chiche a été conduite selon deux modalités différentes : aucune fauche ou une fauche au début de la floraison du pois chiche.

La date de fauche a été raisonnée en fonction de la phénologie du pois chiche. D'après la littérature disponible sur cette espèce, la phase reproductive est une période où la disponibilité des ressources est critique pour l'élaboration du rendement (Kurdali, 1996; Turner et al., 2005). Pour cette raison, le début de la floraison a été choisi comme stade de référence pour la fauche afin de réorienter les rapports de dominance en faveur du pois chiche au début de cette période clef.

Au moment de la fauche, les plantes de services étaient à différents stades phénologiques : l'avoine était à épiaison, la féverole, la moutarde blanche et le trèfle d'Alexandrie étaient à floraison, et le sorgho du Soudan était au stade tallage.

L'inter-rang du pois chiche a été fauché en utilisant un réciprocateur (outil RG-KM réciprocateur, Stihl, Waiblingen, Allemagne) permettant de couper les plantes de services et les adventices à une hauteur d'environ 6 cm sur une largeur de 23 cm (Figure 0.8D), de façon à simuler un passage de tondeuse inter-rang. Après la fauche, les résidus ont été laissés au sol entre les rangs de pois chiche (Figure 0.8A).

Lors de la deuxième année d'expérimentation, un troisième niveau de fauche a été ajouté dans les associations pois chiche-avoine uniquement (Figure 0.8C). L'objectif était d'explorer davantage ce levier en testant les effets de faucher les inter-rangs plus tôt dans le cycle du pois chiche, dans l'association où la compétition interspécifique avec la plante de services était la plus forte. Dans cette modalité, l'inter-rang du pois chiche a été fauché une première fois au stade 10 feuilles. Au regard de la vigueur de reprise de croissance de l'avoine, une seconde fauche a été faite au début de la floraison du pois chiche, en même temps que les autres modalités. Lors de la première fauche au stade 10 feuilles, l'avoine était au stade début montaison.

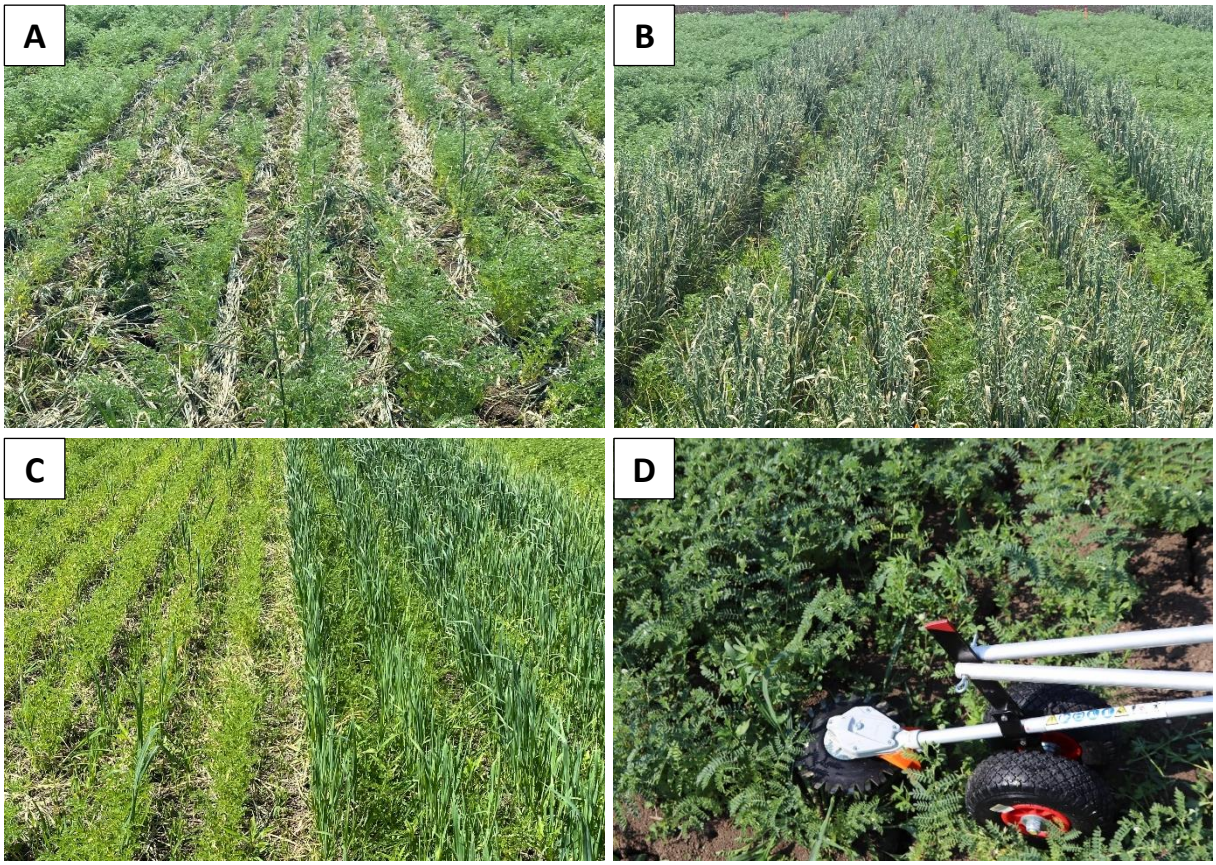


Figure 0.8 : Photographies des différentes modalités de fauche testées et du matériel utilisé pour l'opération. Association pois chiche-avoine venant d'être fauchée (A) ou sans fauche (B) au début de la floraison du pois chiche en 2023. Association avec avoine venant d'être fauchée au stade 10 feuilles (C, à gauche) ou sans fauche (C, à droite) en 2024. Réciprocateur utilisé pour faucher les inter-rangs (D). Photos : Margaux Guy

2.3. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental était arrangé en 4 blocs randomisés au sein desquels la totalité des modalités était présente. Cet arrangement a été répliqué de manière identique entre les deux années d'expérimentation. Chaque micro-parcelle faisait 3 m de large et 20 m de long en 2023, et comprenait 9 rangs de pois chiche. En 2024, chaque micro-parcelle mesurait 2,3 m de large et 22 m de long, et comportait 7 rangs de pois chiche.

2.3.1. Modalités testées

Les modalités testées dans l'expérimentation correspondaient au croisement de 2 facteurs : i) l'espèce de plante de services associée au pois chiche qui comportait 5 niveaux (avoine, féverole, moutarde, trèfle, sorgho) et la modalité témoin pois chiche pur, et ii) la fauche de l'inter-rang du pois chiche avec 2 niveaux (absence de fauche, une fauche au début de la

floraison du pois chiche). Au total, 12 modalités différentes ont donc été testées pendant les deux années d'expérimentation. En 2024, le nombre de modalités était de 13 en raison de l'ajout de l'association pois chiche-avoine fauchée deux fois.

Le dispositif comprenait également un pois chiche pur non inoculé ne fixant pas le N_2, afin d'être utilisé comme plante de référence dans les calculs de taux de fixation, détaillés en Annexe 3.

2.3.2. Arrangement spatial et densités de semis

Le pois chiche a été semé à une densité de 70 graines m^{-2} avec une largeur d'inter-rang de 33 cm. Ces valeurs correspondent à la densité et à l'arrangement spatial recommandés par les instituts techniques dans l'objectif d'atteindre 50 plantes m^{-2} à la levée (Lambert, 2023). Les plantes de services ont été semées additivement au milieu de l'inter-rang du pois chiche, à 50% de leur densité recommandée en pur (Tableau 0.3). Traditionnellement, ces espèces sont semées à plus faible écartement. Dans notre dispositif, semer ces espèces à 50% de leur densité au mètre carré à un écartement environ deux fois plus important revenait donc à une densité au mètre linéaire similaire à ce qu'il peut se faire en culture pure (Tableau 0.3).

La densité du pois chiche à la levée était proche de l'objectif de 50 plantes m^{-2} dans les deux années d'expérimentation, ne variait pas entre modalités et était un peu plus élevée en 2023. La densité à la levée des différentes espèces de plantes de services était similaire entre les deux années pour la plupart des espèces, sauf pour l'avoine et le trèfle où le peuplement était un peu plus dense en 2024 (Tableau 0.3).

Tableau 0.3 : Densités de semis et densité du peuplement à la levée pour le pois chiche et les différentes espèces de plantes de services en 2023 et en 2024.

Espèce	**Densité semée** (graines m^{-2})	**Densité à la levée** (plantes m^{-2})		**Densité à la levée** (plantes par mètre linéaire)	
		2023	2024	2023	2024
Pois chiche	70	52	46	17	15
Avoine	175	120	134	40	45
Féverole	30	17	23	6	8
Moutarde	50	34	29	11	10
Sorgho	54	27	32	9	11
Trèfle	250	87	111	29	37

2.4. Conduite de la culture

La conduite de la culture a été réalisée de manière identique entre les différentes modalités. Dans les deux années d'expérimentation, le précédent était un blé d'hiver en rotation avec du maïs. Aucune culture de pois chiche n'était présente dans la rotation des parcelles environnantes. Le sol était argilo-limoneux en 2023 et argilo-limono-sableux en 2024. Les caractéristiques physico-chimiques du sol des deux parcelles utilisées pour les deux années d'expérimentation sont présentées en détails dans le Chapitre 1.

En 2023, un labour d'hiver a été réalisé pour enfouir les résidus de la culture précédente et détruire les adventices présentes. Le lit de semences a ensuite été préparé en sortie d'hiver avec un passage de herse rotative puis un passage de herse étrille avant le semis. En 2024, la parcelle n'a pas pu être labourée en raison des conditions climatiques très humides et a donc été travaillée avec une machine à bêcher (rotobêche). La préparation du semis a été réalisée au printemps suivant avec un passage de cover crop, de herse rotative puis de herse étrille.

Les modalités ont été semées le 20 avril 2023 et le 30 avril 2024. Dans les associations, le pois chiche et la plante de services ont été semés simultanément avec un semoir à disques à deux trémies, permettant de régler des densités et des profondeurs de semis différentes entre les deux espèces (Easydrill 3020 Fertisem, Sky Agriculture, Châteaubourg, France).

Les espèces de bactérie capables de former une symbiose avec le pois chiche sont absentes de la zone d'étude et aucun inoculant commercial n'était disponible à la vente au moment de l'expérimentation. Avant le semis, les semences de pois chiche ont donc été inoculées avec une souche de *Mesorhizobium muleiense* fournie par l'UMR Agroécologie, INRAE (Dijon, France). L'inoculation n'était pas nécessaire pour la féverole et le trèfle, dont les espèces de bactéries symbiotiques sont naturellement présentes dans les sols de la région.

2.5. Mesures et notations

Une diversité de mesures et de notations a été réalisée pour permettre de tester les différentes hypothèses de recherche.

L'accumulation de biomasse aérienne par le pois chiche, les plantes de services et les adventices a été suivie en dynamique en réalisant 6 prélèvements répartis au cours du cycle de la culture. Deux prélèvements de biomasse ont été faits pendant la phase végétative du pois chiche, un au début de la floraison avant la fauche des inter-rangs, deux pendant la phase reproductive, et un dernier à maturité.

La teneur en azote du pois chiche, des plantes de services et des adventices a été quantifiée au début de la floraison et au stade remplissage. Pour les légumineuses, la teneur en ^{15}N a également été mesurée afin d'évaluer la proportion d'N issue de la fixation symbiotique du N_2 (%Ndfa).

L'architecture du couvert a été évaluée en suivant sa dynamique de recouvrement du sol, et en mesurant la hauteur du pois chiche et des plantes de services de façon régulière pendant le cycle.

L'architecture aérienne du pois chiche a été décrite finement au stade remplissage en notant le nombre de nœuds et de gousses pour chaque tige, ainsi que le nœud d'insertion, la tige d'origine et l'ordre d'apparition de chaque ramification.

La sévérité de l'ascochytose sur les feuilles du pois chiche a été évaluée au stade remplissage à chaque étage de l'axe principale.

Parmi la biomasse prélevée au stade début floraison et remplissage, les espèces d'adventices présentes ont été identifiées et le nombre d'individus par espèce a été compté.

3. Organisation du manuscrit

La suite du manuscrit comprend trois chapitres rédigés en anglais sous forme d'articles scientifiques. Il est à noter que les différentes modalités testées ne sont pas présentes dans leur totalité au sein des trois chapitres de la thèse. Pendant les deux années d'expérimentation, la croissance de la moutarde a été fortement pénalisée par des attaques d'altises dès la levée. En conséquence, le niveau de compétition et les services attendus n'ont pas été atteints dans cette modalité, pour laquelle les résultats obtenus étaient très similaires au pois chiche pur au vu de la faible vigueur de la moutarde. Pour cette raison, cette association n'a pas été incluse dans les trois chapitres de la thèse. Par ailleurs, parmi les autres modalités, seule l'association pois chiche-avoine a permis d'aboutir à un niveau de compétition interspécifique élevé. En 2024, les autres plantes de services ont été fortement dominées par les adventices, rendant les effets de leur introduction difficilement discernables. Hormis la moutarde, l'ensemble des plantes de services a été considéré pour décrire de façon globale le niveau des services rendus par les différentes modalités testées. En revanche, seule l'association avec l'avoine a été intégrée aux analyses pour l'exploration plus fine des effets de la compétition interspécifique sur l'architecture aérienne du pois chiche, et sur la structure de la communauté adventice. Les données issues de l'ensemble des modalités sont présentées en annexe.

Le **Chapitre 1** décrit le niveau des services rendus par l'ensemble des associations testées (hormis celle incluant la moutarde), en considérant simultanément la biomasse d'adventices et la sévérité de l'ascochytose. L'analyse se concentre sur l'effet du choix d'espèce de plantes de services, de la fauche et de leur interaction sur les deux bioagresseurs et la production du pois chiche. Les synergies entre bioagresseurs et conditions abiotiques sont également discutées. Ce chapitre traite de la première et de la deuxième question de recherche.

Le **Chapitre 2** s'intéresse plus précisément à l'architecture aérienne du pois chiche et à la sévérité des symptômes d'ascochytose à l'échelle de la plante en réponse à l'introduction de l'avoine et à la fauche des inter-rangs. Ce chapitre porte également sur les deux premières questions de recherche.

Le **Chapitre 3** vise à étudier le niveau de diversité et la composition de la communauté adventice en réponse à l'introduction de l'avoine et à la fauche. Ce chapitre apporte des éléments de réponse à la troisième question de recherche.

Chapitre 1 : Intercropping chickpea with a competitive service plant and mowing the inter-rows controls weeds and ascochyta blight while mitigating interspecific competition

Ce chapitre correspond à un article scientifique en cours de révision pour la revue *European Journal of Agronomy*.

Abstract

Chickpea (*Cicer arietinum* L.) is a promising crop for adapting to climate change and reducing the reliance of cropping systems on synthetic N fertilizers. However, its yield is highly variable, mainly due to weed competition and ascochyta blight (*Ascochyta rabiei*). Hence, this study investigated the effects of intercropping chickpea with a mowed service plant to control both weeds and ascochyta blight, while mitigating competition to minimise yield reductions.

In a two-year field experiment in Western France, chickpea was grown as sole crop and intercropped with four single service plants (Egyptian clover, faba bean, oat, and Sudan grass) in alternate rows. These species were chosen for their contrasted traits, allowing to create different levels of interspecific competition. Chickpea's inter-rows were either mowed at the beginning of flowering or left without mechanical regulation.

Introducing oat decreased weed biomass in both years. Under high weed and disease pressures, adding unmowed oat reduced both weed biomass and ascochyta blight severity by 66% and 56% compared to the unmowed sole chickpea, respectively. No differences were found between the sole chickpea and the other intercrops. Unlike the other species, oat had a high biomass production early in the crop cycle, which partly explains its weed-suppression effect. However, adding oat reduced chickpea grain yield in 2023 by 72%, although mowing limited this reduction to 48%.

This study highlights that intercropping chickpea with a mowed competitive service plant that generates an aerated canopy, like oat, can help to control both weeds and ascochyta blight, while mitigating interspecific competition.

Keywords: Cicer arietinum; Inter-row mowing; Weed control; Disease control; Row intercropping**.**

1. Introduction

The European agricultural sector has become highly specialised in high-yielding cereal and oilseed crops, with a strong dependency on fertilisers and pesticides. The detrimental impacts on the environment by the current agricultural model have been widely acknowledged, and this shift from diversified to specialised high-input cropping systems is now being called into question (Campbell et al., 2017; Tilman et al., 2002). Furthermore, the negative effects of the Western diet, rich in animal protein, on both human and environmental health, contributes to the growing interest in alternative protein sources (World Health Organization, 2023).

Grain legumes have emerged as serious candidates to address these issues (van Loon et al., 2023; Watson et al., 2017). Growing these crops provides protein-rich grains and reduce the reliance of cropping systems on nitrogen inputs thanks to the symbiotic fixation of atmospheric nitrogen (Peoples et al., 2009). Chickpea (*Cicer arietinum* L.) is one of the most commonly grown grain legumes worldwide and has multiple agronomic advantages (FAO, 2025). Indeed, chickpea has a high drought tolerance and can withstand drier growing conditions than other grain legumes (Benjamin and Nielsen, 2006; Farooq et al., 2017). This feature is particularly relevant given the expected increase in frequency and intensity of extreme weather events, such as droughts, due to climate change (IPCC, 2023). Moreover, chickpea has few insect pests, which is particularly interesting for reducing pesticides use (Romeis et al., 1999; Rubiales et al., 2015). Still, chickpea is a minor crop in Europe, especially in France, where only 26,534 ha were cultivated in 2023 (Colas and Boudour, 2024).

Like other grain legumes, chickpea has a high inter-annual yield variability because of its sensitivity to several biotic stresses (Cernay et al., 2015). Chickpea has a slow crop establishment and an open canopy which results in a poor competitive ability against weeds. Previous studies have documented yield reductions of at least 50% due to weed competition (Banik et al., 2006; Whish et al., 2002).

In addition to weeds, ascochyta blight—a foliar disease that causes necrotic lesions on all aerial plant parts—is also responsible for high yield reductions potentially even leading to complete crop failure (Singh et al., 2022). The causal agent exhibits both asexual (*Ascochyta rabiei*) and sexual (*Didymella rabiei*) stages in its life cycle. *D. rabiei*, which overwinters on contaminated seeds or infected stubble, is responsible for the long-distance dispersal of the pathogen by producing airborne ascospores (Trapero-Casas et al., 1996). A single sexual cycle

is completed during the growing season while the asexual phase is polycyclic. *A. rabiei* is thus responsible for spreading the disease on the infected host and to the neighbouring plants by producing conidia dispersed over short distances by rain splash (Singh et al., 2022). The causal agent is pathogenic to *Cicer* species only (Hernandez-Bello et al., 2006), although alternative hosts can be infected and may serve as a source of inoculum (Hernandez-Bello et al., 2006; Khan et al., 1999; Trapero-Casas and Kaiser, 2009). Despite extensive research on genetic breeding, the pathogen can overcome host resistance (Bar et al., 2021; Mehmood et al., 2017). Therefore, alternative strategies are needed to address weed and disease control issues in chickpea, without resorting to pesticides.

Intercropping consists in growing two or more species in the same field for a significant period of their life cycle (Willey, 1990). Among the different types of intercrops, introducing a service plant—a non-harvested species grown to provide supporting and regulating services—is an interesting option (Gardarin et al., 2022; Moreau et al., 2025). Indeed, this type of intercrop can provide ecosystem services, such as weed control, while allowing one to focus only on the cash crop production. Higher resource-use efficiency is a mechanism often cited in studies to explain the weed-suppressive ability of intercrops. This leaves fewer resources available for weeds, limiting their biomass production (Bedoussac et al., 2015; Corre-Hellou et al., 2011). In a meta-analysis on various types of species combinations, Gu et al. (2021) found that intercropping reduced weed biomass by 58% on average relative to the less suppressive sole crop, which was often a legume.

Intercropping can also improve disease control (Boudreau, 2013). Previous studies on ascochyta blight of various grain legume species (Fernández-Aparicio et al., 2010; Hauggaard-Nielsen et al., 2008; Schoeny et al., 2010), including chickpea (Zhou et al., 2022), reported a disease-suppression effect of intercropping. Research on pea-cereal intercrops attributed this effect to the combination of a diversity of mechanisms including i) microclimate alteration, ii) barrier effect by a non-host plant decreasing splash dispersal, and iii) host dilution (Fernández-Aparicio et al., 2010; Schoeny et al., 2010). Ascochyta blights of pea and chickpea have different causal agents but are both splash-dispersed and require similar microclimatic conditions for epidemiological development (Tivoli and Banniza, 2007). Hence, previous results on ascochyta blight reduction in pea-based intercrops may apply to chickpea-service plant intercrops.

Little research has been published on chickpea-based intercrops, with chickpea as the main cash crop. In prior studies, chickpea was often analysed for its effects on the nutrition of a cereal in both field (Gunes et al., 2007; Xia et al., 2013) and greenhouse experiments (Betencourt et al., 2012; Li et al., 2003, 2004). Besides, a majority of the previous studies that examined chickpea-based intercrops in field experiments were conducted under high input conditions. Also, most of them were located in the main areas of chickpea production such as India, Australia, and North America, under contrasted pedoclimatic conditions compared to Western Europe (Banik et al., 2006; Dowling et al., 2023; Heineck et al., 2025; McAuley et al., 2025; Zhou et al., 2022). Furthermore, they all reported that chickpea yield was reduced by intercropping, while the production of the associated species was not or less affected. Hence, chickpea is often dominated by the other component in intercrops.

Thus, introducing a service plant could be an interesting approach for harnessing the agronomic benefits of intercropping in a low-input cropping system, while limiting the intensity of interspecific competition compared to mixing chickpea with another cash crop. Nevertheless, to our knowledge, no previous works have studied chickpea-service plant intercrops.

Spatial arrangements in alternate rows and relative sowing densities in favour of the cash crop can also limit interspecific competition. However, they are usually not sufficient to prevent yield reductions (Carton et al., 2020; Cheriere et al., 2020). Still, growing the cash crop and the service plant on separate rows enables one to manage them differently, and paves the way for implementing additional levers to reduce interspecific competition. For instance, Thorsted et al. (2006) effectively reduced interspecific competition in wheat-clover intercrops by cutting the legume in the inter-rows of the cereal. Thus, this work offers prior knowledge about mechanically regulating the service plant to mitigate interspecific competition in intercrops. Moreover, Rowland et al. (2023) reported that mowing the inter-rows in no-till soybean planted into roller-crimped cereal rye decreased weed biomass by at least 60% compared to an unweeded control. Hence, mechanical regulation could be a key lever for driving the dominance relationship between the cash crop, the associated species, and weeds in intercrops.

Thus, the purpose of this study was to test whether intercropping and mowing the inter-rows allows to control both weeds and ascochyta blight while mitigating interspecific competition to stabilise chickpea yield without resorting to pesticides.

2. Materials and methods

2.1. Experimental site and pedoclimatic conditions

A field experiment was conducted for two consecutive years (2023, 2024) in La Ménitré, France (47°23'37.3"N, 0°14'57.6"W, altitude 20 m). Separate plots from the same site were used for each year of the experiment. In 2023, the trial was undertaken on a clay loam soil. In 2024, the soil was a sandy clay loam. Both soils were at least 90 cm deep (Table 1.1). The soil mineral nitrogen content at sowing in the 0-90 cm soil layer was 88 kg ha^{-1} in 2023 and 99 kg ha^{-1} in 2024. In both years, the preceding crop was winter wheat in a two-year crop rotation with maize.

Table 1.1: Description of the topsoil (0-30 cm) of the experimental fields.

	2023	2024
Clay (%)	42.0	43.9
Silt (%)	49.9	41.1
Sand (%)	8.1	15.0
Organic matter (%)	2.9	4.4
pH_{H2O}	6.8	7.1
P_{Olsen} (g kg^{-1})	0.057	0.032
Exchangeable K^+ (g kg^{-1})	0.208	0.214
CEC (meq $100g^{-1}$)	28.7	29.6

The precipitation levels were much higher in the second year of the experiment (Figure 1.1). During the growth period, there was 342 mm of total rainfall in 2024, which was 58% and 60% higher than 2023 and the 10-year average (2013-2022), respectively. Specifically, the weather in June, which corresponded to the beginning of chickpea flowering, was particularly contrasted between the two years of the experiment. In 2024, the total rainfall during this period was 142 mm, which was 71% and 125% higher than 2023 and the 10-year average, respectively. The weather conditions during the period of crop establishment were also very contrasted between the two years of the experiment. Indeed, the experimental field only received 5 mm of rain during the first ten days after sowing the 2023 trial, versus 45 mm in

2024. Therefore, the weather was much more humid in 2024 than in 2023, especially during the crop establishment period and at the beginning of chickpea flowering (Figure 1.1).

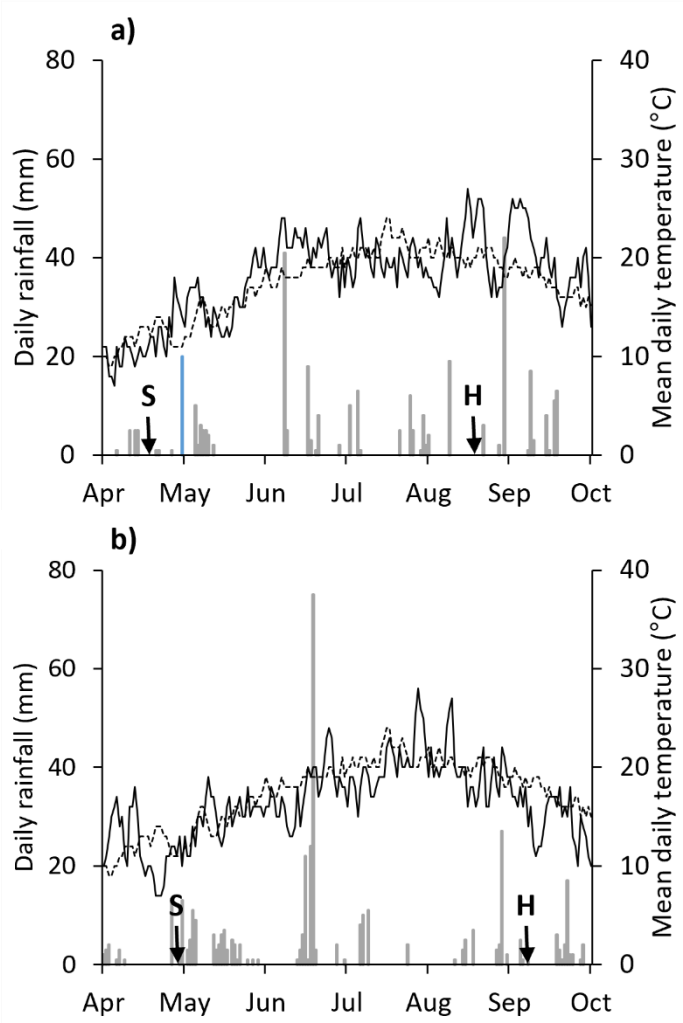


Figure 1.1: Daily rainfall and mean daily temperature recorded near the experimental site in 2023 (a) and 2024 (b) (Météo France, 2024). The black solid line is the mean daily temperature during the time of the experiment. The dashed line shows the mean daily temperature averaged over a ten-year period (2013-2022). Grey bars stand for daily rainfall and blue bars correspond to irrigation. S: sowing date, H: harvest date.

2.2. Experimental design

Two factors were tested in this experiment: i) the species of service plant intercropped with chickpea, and ii) whether or not to use chickpea inter-row mowing. The experiment was arranged in a randomised complete block design with four replicates. In 2023, the plots were 20 m long and 3 m wide consisting of nine chickpea rows. In 2024, they were 22 m long and 2.3 m wide with seven chickpea rows.

2.2.1. Service plant species

Four annual service plant species with contrasted traits were selected to be intercropped with chickpea: i) spring oat (*Avena sativa* L., cv. Celeste), ii) Sudan grass (*Sorghum x drummondii*, cv. Piper), iii) Egyptian clover (*Trifolium alexandrinum* L., cv. Akenaton) and iv) spring faba bean (*Vicia faba* L., cv. Nanaux) (Tribouillois et al., 2015). Spring oat has an erect growth habit, a deep fibrous root system, and has a high competitive ability for resource acquisition and high biomass production from the early stages of growth (Tribouillois et al., 2015; Wendling et al., 2016). After mowing, oat was expected to regrow and maintain competition with weeds, while leaving a substantial amount of biomass on the ground. Conversely, Sudan grass was expected to be less competitive during the early growth stages of chickpea, but able to produce a much higher amount of biomass after mowing. Egyptian clover is a fodder legume with a shallow tap root system, a semi-erect growth habit, a slow crop establishment, and the ability to regrow after mowing (Ouattara et al., 2023; Wendling et al., 2016). This species is commonly used as service plant in intercrops (Bousselin et al., 2024; Lorin et al., 2015; Verret et al., 2017a). Spring faba bean is a grain legume with a shallow tap root system, an erect growth habit, a higher nitrogen fixation rate than Egyptian clover, and was expected to wither after mowing unlike the other species (Büchi et al., 2015; Wendling et al., 2016). The erect growth habit was a critical criterion to ensure that all the service plants could be mowed. Among the service plant and weed species examined in this study, only faba bean was previously identified as a potential alternative host of *Ascochyta rabiei* (Trapero-Casas and Kaiser, 2009).

Chickpea was grown as sole crop and intercropped with each of the four species of service plants. Chickpea was sown at a density of 70 seeds m^{-2} with an inter-row spacing of 33.2 cm, corresponding to the full density and the spatial arrangement recommended by the local agricultural institutes. In the intercrops, the service plants were sown in the middle of chickpea's inter-rows at 50% of their recommended densities following an additive design (Figure 1.2). The seeding densities for the service plants were 250, 30, 175 and 54 seeds m^{-2} for Egyptian clover, faba bean, oat and Sudan grass respectively. These densities correspond to 83, 10, 58 and 18 seeds per linear meter, respectively. All seeds used were certified.

The chickpea cultivar sown in this experiment is Twist. This Kabuli-type cultivar, susceptible to ascochyta blight, is the most commonly grown in France.

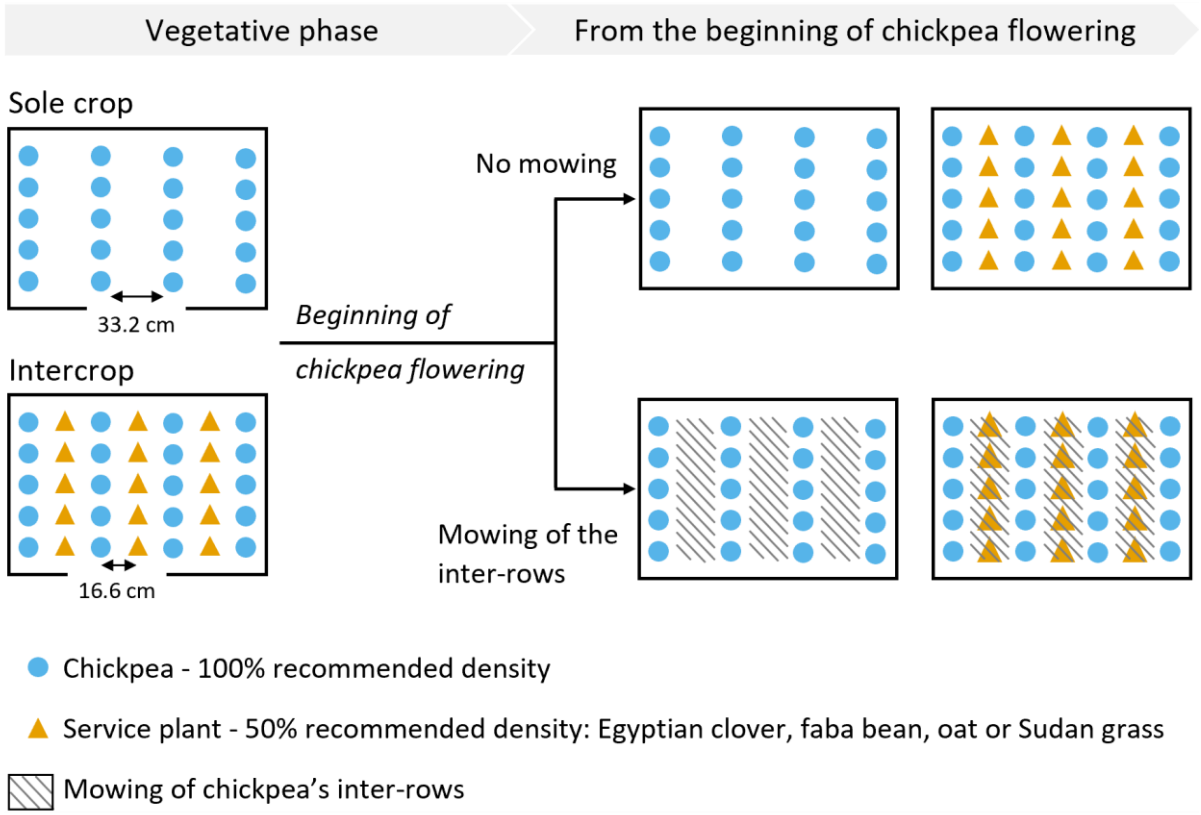


Figure 1.2: Spatial arrangement and mowing design of the field trials

2.2.2. Inter-row mowing

The inter-rows of chickpea were either mowed at the beginning of chickpea flowering or left without mechanical regulation (Figure 1.2). At the time of mowing, faba bean, Egyptian clover and oat were all at the flowering stage, and Sudan grass was at the tillering stage.

The inter-rows were mowed using a brush cutter equipped with a 23-cm-wide cutting head (RG-KM rotary cutting head KombiTool, Stihl, Waiblingen, Germany). After mowing, the service plant and weed residues were left on the ground between the chickpea rows.

In 2024, a third level of inter-row mowing was added in the chickpea-oat intercrops to investigate the effects of adding an earlier mowing date. In this treatment, the inter-rows were mowed firstly at the 10-leaf stage of chickpea, and then a second time at the beginning of chickpea flowering. At the time of the first mowing, Egyptian clover, faba bean, and Sudan grass were at the 5-leaf stage, and oat was at the beginning of stem elongation.

2.2.3. Trial management

In the 2023 experiment, the soil was ploughed during winter to incorporate stubble and destroy volunteers and weeds. Before sowing, the seedbed was prepared using a rotary harrow and a tine weeder to break the clods and control the remaining weeds. In 2024, the

field could not be ploughed during winter because of the high amount and frequency of rainfall. Instead, the field was spaded in January, and three passes were done with a disc cultivator, a rotary harrow, and a tine weeder in April. The chickpea sole crops and the intercrops were sown on 20th April 2023 and 30th April 2024. In the intercrops, the chickpea and the service plant were sown simultaneously with a disc seeder allowing for separate control of the seeding densities and sowing depths of the two species (Easydrill 3020 Fertisem, Sky Agriculture, Châteaubourg, France). Chickpea was sown at an average depth of 3.5 cm. In 2023, the service plants were sown at a depth of 1 cm. In 2024, they were sown a bit deeper, at a depth of 1.5 cm on average, in the event that the growing conditions during crop establishment were as dry as in the previous year.

As the rhizobia specific to chickpea are absent from the soils of the area of study, the seeds were inoculated before sowing with a *Mesorhizobium muleiense* strain supplied by UMR Agroécologie, INRAE (Dijon, France). Inoculation was not necessary for faba bean and Egyptian clover, as their rhizobia are already present in the soil. The presence of active nodules was later confirmed for chickpea, faba bean, and Egyptian clover.

In 2023, a single application of the molluscicide SLUXX HP (containing 29.7 g kg^{-1} of ferric phosphate) was done at sowing, at a rate of 7 kg ha^{-1}, to prevent slug damage at emergence. Before crop emergence, weeds were destroyed using a non-selective herbicide (with glyphosate as the active ingredient) applied once at 3 L ha^{-1}. In 2024, the same molluscicide was applied weekly for three consecutive weeks in light of the high amount and frequency of rainfall. In 2023, the field was irrigated once ten days after sowing with 20 mm of water to secure crop emergence (Figure 1.1). No irrigation was needed in 2024.

2.3. Measurements

2.3.1. Plant sampling

The above-ground biomass of chickpea, service plants, and weeds were sampled from the four central rows over 0.8 m long and 0.664 m wide. The harvested area contained two rows of chickpea and two rows of service plant. Sampling was done at six stages throughout chickpea's cycle, with an emphasis on the early growth and the period following the mowing date at the beginning of chickpea flowering (Table 1.2).

Table 1.2: Distribution of the six plant samplings throughout chickpea's cycle.

Chickpea phenological stage	DAS [(1)]		GDD [(2)]	
	2023	2024	2023	2024
5-leaf	26	22	228	200
10-leaf	42	37	402	356
Beginning of flowering	54	55	586	558
Mowing of the inter-rows	55	59	602	625
End of flowering (2023) or pod set (2024)	70	71	832	776
Grain-filling	89	90	1101	1054
Maturity	123	132	1593	1655

[(1)] Number of days after sowing

[(2)] Growing degree days, computed using a base temperature of 6°C for chickpea (Soltani et al., 2006)

At maturity, chickpea samples were threshed to separate the grains from the straw. The grains were then cleaned using a densiometric cleaning and sorting column. All samples were dried at 70°C for 48 hours and then weighed.

Weeds were counted and species were identified on each sampling plot at the beginning of chickpea flowering and at the grain-filling stage.

2.3.2. Assessment of ascochyta blight severity

Ascochyta blight severity was visually assessed at the grain-filling stage on ten random chickpea plants. Disease severity was scored on leaves at each node of the main stem *via* a 0-4 scale: 0 = no symptoms, 1 = 1-25% of the leaf area necrotic, 2 = 25-50% of the leaf area necrotic, 3 = 50-75% of the leaf area necrotic, and 4 = 75-100% of the leaf area necrotic. A

mean disease score at the plant scale was then computed by averaging the scores of the nodes (Schoeny et al., 2010).

2.4. Statistical analyses

All statistical analyses were performed using the R software (R Core Team, 2025). Plant biomass, mean disease score, and chickpea yield data were analysed by performing linear mixed models using the lme4 package (Bates et al., 2015). Data from the two years of the experiment were analysed separately, and a model was fitted for each date. The service plant treatments (sole chickpea, clover, faba bean, oat, Sudan grass) and the mowing treatments of chickpea's inter-rows (no mowing, one mowing at the beginning of chickpea flowering) were fixed factors. The experimental block was defined as a random factor. The effects of the fixed factors and their interaction were tested by performing type II ANOVAs. The validity of the model assumptions was systematically checked with the Shapiro-Wilk test for normality, and the Bartlett test for homoscedascity. The multiple comparisons were performed using Dunnett's test with the sole chickpea as the control treatment. In case of significant interaction between the two fixed factors, the reference was the unmowed sole chickpea. The proportion of variance attributed to each fixed effect and their interaction, namely the part R^2, was computed using the partR2 package (Stoffel et al., 2021).

The chickpea-oat intercrops with two mowing dates were only compared to the two other chickpea-oat intercrop treatments (no mowing and one mowing at the beginning of chickpea flowering). The multiple comparisons were performed using Tukey's HSD test. When non-normality and heteroscedasticity were not resolved by log-transformation, the Mann-Whitney U Test or Kruskal-Wallis test were used, depending on the number of mowing treatments to compare. In this case, the multiple comparisons were conducted using Dunn's test.

The mowed and unmowed treatments of the service plants biomass data were analysed separately, using Tukey's HSD test to compare the means. For the yield data of 2024, only the mowed treatments were analysed by testing the effect of the service plant species.

To investigate the relationship between disease severity and plant biomass, linear models were fitted with the mean disease score as the response variable, and the biomass of the different components of the mixture as the explanatory variable. The residuals were checked for normality with the Shapiro-Wilk test and visually checked for homoscedasticity.

All statistical tests were considered significant when the p-value was lower than 0.05.

3. Results

3.1. Biomass accumulation dynamics

3.1.1. Chickpea biomass

Chickpea biomass varied greatly between the two years of experiment. In the unmowed sole crop, chickpea accumulated 705 g m^{-2} of biomass at maturity in 2023 as opposed to 111 g m^{-2} in 2024. In the unmowed intercrops, chickpea biomass at maturity varied between 214 g m^{-2} and 677 g m^{-2} in 2023, while it ranged from 29 g m^{-2} to 158 g m^{-2} in 2024 (Figure 1.3).

Adding oat decreased chickpea biomass compared to the sole crop in both years, while the other service plants had seldom an effect (Figure 1.3). In 2023, intercropping chickpea with oat reduced chickpea biomass from the beginning of flowering ($p < 0.001$, part $R^2 = 0.89$) until maturity compared to the sole crop ($p < 0.001$, part $R^2 = 0.43$, Figure 1.3d). For instance, chickpea accumulated 214 g m^{-2} of biomass by maturity in the unmowed intercrop with oat, which was 70% lower than the unmowed sole crop. Adding Sudan grass reduced chickpea biomass by 25% at the 5-leaf stage ($p < 0.01$, part $R^2 = 0.48$, Figure 1.3e), and adding unmowed clover decreased it by 34% at the grain-filling stage relative to the unmowed sole crop ($p < 0.001$, part $R^2 = 0.44$, Figure 1.3b). No other significant differences were found between the sole crop and these two intercrops for the rest of the crop cycle. Faba bean did not have any significant effect on chickpea biomass. In 2024, adding unmowed oat decreased chickpea biomass by 44% at pod set ($p < 0.05$, part $R^2 = 0.18$, Figure 1.3i), and adding unmowed faba bean decreased it by 74% at maturity, compared to the unmowed sole crop ($p < 0.05$, part $R^2 = 0.13$, Figure 1.3h). No significant effect of the other species of service plants was found.

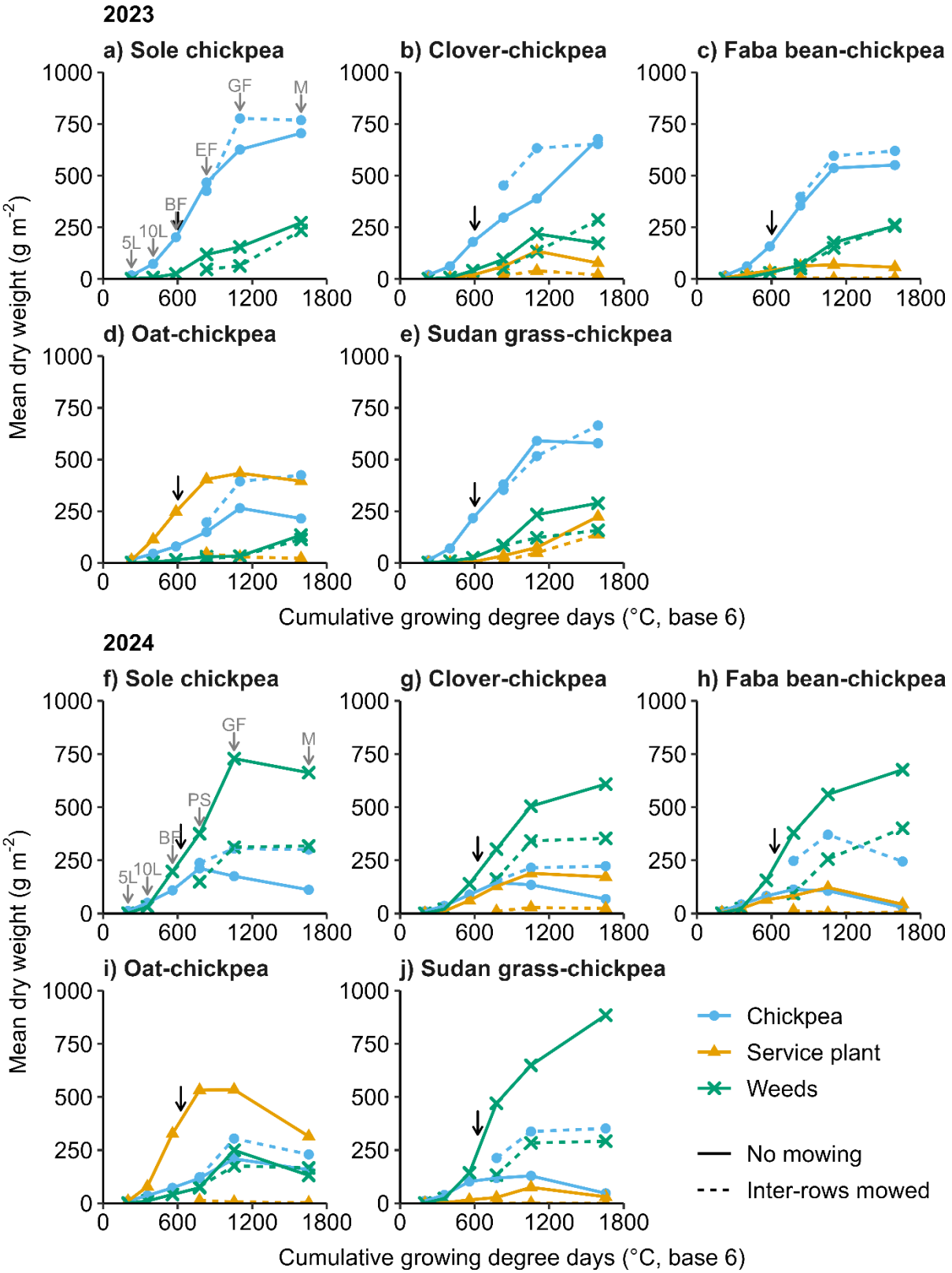


Figure 1.3: Dry matter accumulation of chickpea, service plants, and weeds in the different treatments during the two years of the experiment. Each symbol corresponds to the averaged value of the blocks for each treatment (n=8 until the 3rd sampling then n=4). The mowing date is indicated by a black arrow. 5L: 5-leaf stage of chickpea, 10L: 10-leaf stage, BF: beginning of flowering, PS: pod set, EF: end of flowering, GF: grain-filling stage, M: maturity.

Mowing the inter-rows led to a higher chickpea biomass in most treatments in both years (Figure 1.3). No significant interaction was ever found between the two fixed factors. In 2023, mowing increased chickpea biomass at the grain-filling stage only, except in the intercrop with Sudan grass ($p < 0.05$, part $R^2 = 0.08$). In the mowed sole crop, chickpea accumulated 768 g m^{-2} of biomass, which was 24% higher than in the unmowed treatment (Figure 1.3a). In the mowed intercrops with Egyptian clover, faba bean, and oat, chickpea biomass was 63%, 11%, and 49% higher relative to the corresponding unmowed treatment, respectively (Figure 1.3b-d). Chickpea biomass at maturity also tended to be twice as high in the intercrop with mowed oat compared to the unmowed intercrop ($p = 0.072$, Figure 1.3d). In 2024, the positive effect of mowing on chickpea biomass was visible in all treatments at all sampling dates. In the mowed sole crop, chickpea accumulated 301 g m^{-2} of biomass at maturity, which was 2.7-fold higher than in the unmowed treatment (Figure 1.3f). In the intercrops, chickpea biomass was 1.5- (chickpea-oat) to 8.6-fold higher (chickpea-faba bean) in the mowed treatment compared to the corresponding unmowed intercrop ($p < 0.001$, $R^2 = 0.32$, Figure 1.3g-j).

3.1.2. Service plants biomass

The service plants differed in their biomass accumulation dynamics, with oat having the highest biomass production from the 5-leaf stage in both years ($p < 0.001$, Figure 1.3). After oat, faba bean had the second highest biomass production from the 5-leaf stage to the beginning of chickpea flowering in 2023, and to the 10-leaf stage in 2024 ($p < 0.001$, Figure 1.3). However, faba bean accumulated 40 g m^{-2} of biomass at the beginning of chickpea flowering in 2023 ($p < 0.001$, $R^2 = 0.93$, Figure 1.3c), and 65 g m^{-2} of biomass in 2024 ($p < 0.001$, $R^2 = 0.98$, Figure 1.3h), which was six and five times lower than oat, respectively. Moreover, faba bean only contributed to 20% of the total biomass of the mixture at this date, while oat accounted for 74% of it, on average. Egyptian clover had a slower crop establishment but tended to surpass the biomass production of faba bean at the later stages of the cycle. Thus, the biomass of clover at the grain-filling stage was 135 g m^{-2} in 2023 and 189 g m^{-2} in 2024, which was 1.5 and 2 times higher on average than faba bean, respectively (Figure 1.3). Sudan grass had the lowest biomass production from the 5-leaf stage ($p < 0.001$, $R^2 = 0.97$, Figure 1.3e) to the beginning of chickpea flowering in both years ($p < 0.001$, $R^2 = 0.98$, Figure 1.3j). In 2023, its biomass sharply increased at the end of the crop cycle, but remained low in 2024 (Figure 1.3,e).

The service plants had different responses to mowing depending on the treatments and the year (Figure 1.3). Faba bean withered after mowing in both years. In 2023, Egyptian clover and oat had a very limited regrowth. Indeed, mowed oat accumulated 44 g m^{-2} of biomass at most by the end of chickpea flowering, while unmowed oat biomass was nine times higher (Figure 1.3d). After mowing, clover produced 39 g m^{-2} of biomass at most at the grain-filling stage, while unmowed clover biomass was 3.4 times higher (Figure 1.3b). Sudan grass stood out by having a fast regrowth, producing at least six times more biomass at harvest than the other mowed service plants. In 2024, oat regrew after being mowed at the 10-leaf stage, but did not when the first mowing was at the beginning of chickpea flowering (Figure 1.3i, Annexe 1). None of the other service plants resumed their growth after mowing apart from Egyptian clover, which had a very limited regrowth by accumulating 28 g m^{-2} of biomass at most by the grain-filling stage (Figure 1.3).

3.1.3. Weed biomass

The weed pressure was much higher in 2024 than in 2023. In the unmowed sole chickpea, weed biomass at the grain-filling stage was 155 g m^{-2} in 2023, as opposed to 728 g m^{-2} in 2024 (Table 1.3, Table 1.4). At the same date, weed density was 84 plants m^{-2} in 2023, compared to 214 plants m^{-2} in 2024. In both years, the dominant weed species were barnyard grass (*Echinochloa crus-galli*), lady's thumb (*Persicaria maculosa*), and manyseed goosefoot (*Chenopodium polyspermum*).

In the two years of the experiment, intercropping chickpea with oat was the only way to significantly decrease weed biomass compared to the sole chickpea (Table 1.3, Table 1.4). Mowing the inter-rows had a limited effect in 2023, but strongly decreased weed biomass in 2024 in the treatments with high weed infestation. The lowest values of weed biomass were always found in the mowed chickpea-oat intercrops, on average (Table 1.3, Table 1.4).

Intercropping chickpea with oat decreased weed biomass in both years, but no significant effect of the other service plants was found (Table 1.3, Table 1.4). In 2023, introducing unmowed oat led to a weed biomass of 29.6 g m^{-2} at the end of chickpea flowering ($p < 0.01$, part $R^2 = 0.23$, Table 1.3), and of 32.5 g m^{-2} at the grain-filling stage, which was 75% and 79% lower than the unmowed sole crop, respectively ($p < 0.001$, part $R^2 = 0.37$, Table 1.3). At chickpea maturity, weed biomass was on average 51% lower in the intercrop with unmowed oat relative to the unmowed sole crop ($p = 0.099$, part $R^2 = 0.14$, Table 1.3). In 2024, intercropping chickpea with oat significantly reduced weed biomass from the 10-leaf stage

($p < 0.05$, part $R^2 = 0.45$, Table 1.4) until maturity ($p < 0.001$, part $R^2 = 0.32$, Table 1.4). At the beginning of chickpea flowering, there was 41.2 g m^{-2} of weed biomass in the chickpea-oat intercrop, which was 79% lower than in the sole crop ($p < 0.001$, part $R^2 = 0.52$, Table 1.4). In both years, there were no significant differences between the sole chickpea and the other intercrops (Table 1.3, Table 1.4).

Mowing the inter-rows reduced weed biomass in most treatments in 2024, but had no significant effect in 2023 (Table 1.3, Table 1.4). Although not significant, mowing tended to decrease weed biomass at the end of chickpea flowering in 2023, except in the intercrop with Sudan grass ($p = 0.108$, Table 1.3). Indeed, there was 118.4 g m^{-2} of weed biomass in the mowed sole crop, which was 61% lower than the unmowed treatment. In the mowed intercrops with Egyptian clover, faba bean, and oat, weed biomass was on average 47%, 25%, and 34% lower compared to their corresponding unmowed treatment, respectively (Table 1.3). In 2024, mowing the inter-rows reduced weed biomass at all sampling dates (Table 1.4). At the grain-filling stage, mowing reduced weed biomass by 57% in the sole crop, and by 29% (chickpea-oat) up to 56% (chickpea-Sudan grass) in the intercrops ($p < 0.001$, part $R^2 = 0.32$, Table 1.4). A significant interaction was found at pod set ($p < 0.001$, Table 1.4) and at chickpea maturity ($p < 0.01$, Table 1.4). Indeed, mowing reduced weed biomass in all treatments except in the intercrop with oat. At pod set, mowing reduced weed biomass by 60% in the sole crop, and by 47%, 75%, and 72% in the intercrops with clover, faba bean, and Sudan grass, respectively ($p < 0.001$, part $R^2 = 0.34$, Table 1.4). At these two dates, weed biomass was always lower in the mowed treatments compared to the unmowed sole chickpea (Table 1.4). In both years, a strong gradient of weed biomass was observed between experimental blocks. For instance, weed biomass at the beginning of flowering in the sole chickpea varied between 5.4 g m^{-2} and 53.8 g m^{-2} in 2023, and between 97.6 g m^{-2} and 427.6 g m^{-2} in 2024.

Table 1.3: Weed dry weight (g m^{-2}) in the sole crop and the intercrops at 6 sampling dates in 2023. Chickpea's inter-rows were either mowed (M) or without mechanical regulation (WM).

		5-leaf	10-leaf	Beg. flowering	End flowering	Grain-filling	Maturity
Sole chickpea	WM	1.0 ± 0.7	7.4 ± 5.2	24.6 ± 15.6	118.4 ± 155.8	155.0 ± 93.7	272.4 ± 123.0
	M				46.6 ± 14.0	63.5 ± 41.5	234.8 ± 148.1
Clover-chickpea	WM	1.0 ± 0.4	7.3 ± 3.9	40.5 ± 29.0 .	94.8 ± 67.4	218.4 ± 148.1	173.3 ± 104.4
	M				49.8 ± 30.0	132.2 ± 99.2	286.5 ± 112.7
Faba bean-chickpea	WM	1.7 ± 1.7	7.6 ± 7.9	29.7 ± 26.0	67.3 ± 38.0	176.5 ± 187.1	256.0 ± 146.7
	M				50.7 ± 27.3	150.1 ± 122.2	262.0 ± 183.4
Oat-chickpea	WM	1.3 ± 1.2	2.7 ± 1.8	14.5 ± 13.7	29.6 ± 20.5 | **	32.5 ± 51.4 | **	133.9 ± 92.1
	M				18.4 ± 13.0	32.2 ± 16.9	112.9 ± 55.8
Sudan grass-chickpea	WM	1.1 ± 1.4	8.5 ± 7.2	23.7 ± 14.6	85.3 ± 61.5	233.3 ± 174.3	288.6 ± 130.7
	M				83.1 ± 66.8	121.5 ± 92.7	157.4 ± 85.6
Species part R^2		0.05 ns	0.12 .	0.15 *	0.23 ** (log)	0.37 *** (log)	0.14 .
Mowing part R^2					0.03 ns (log)	0.01 ns (log)	0.00 ns
Interaction part R^2					0.02 ns (log)	0.06 ns (log)	0.08 ns

Values are means ± standard deviation (n=8 until the beginning of flowering then n=4). For each intercrop, asterisks indicate a significant difference in comparison with the sole chickpea according to Dunnett's test. ns: non-significant, . $p < 0.1$, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$. (log) indicates that the response variable was log-transformed prior to model fitting.

Table 1.4: Weed dry weight (g m^{-2}) in the sole crop and the intercrops at 6 sampling dates in 2024. Chickpea's inter-rows were either mowed (M) or without mechanical regulation (WM).

		5-leaf	10-leaf	Beg. flowering	Pod set	Grain-filling	Maturity
Sole chickpea	WM	1.5 ± 1.2	31.2 ± 11.5	197.6 ± 124.8	374.8 ± 88.2	728.2 ± 215.6	662.1 ± 248.2
	M				149.2 ± 97.1 **	311.6 ± 117.0	317.6 ± 177.4 *
Clover-chickpea	WM	1.0 ± 0.4	20.2 ± 6.7 .	139.4 ± 93.8	302.5 ± 131.6	504.4 ± 72.4	608.2 ± 199.2
	M				161.3 ± 123.9 **	341.2 ± 128.6	353.7 ± 175.1 *
Faba bean-chickpea	WM	1.5 ± 1.0	22.7 ± 5.7	156.3 ± 89.6	378.5 ± 94.6	559.9 ± 182.7	676.0 ± 164.4
	M				93.4 ± 55.4 ***	256.0 ± 151.0	400.4 ± 90.5 .
Oat-chickpea	WM	0.9 ± 0.5	11.0 ± 4.6 **	41.2 ± 5.2 ***	73.3 ± 47.7 ***	249.2 ± 144.8	131.0 ± 49.2 ***
	M				77.6 ± 63.5 ***	175.8 ± 145.9 **	166.0 ± 128.2 ***
Sudan grass-chickpea	WM	1.1 ± 0.4	22.3 ± 5.8	142.7 ± 69.6	470.1 ± 50.9	648.7 ± 140.7	884.8 ± 50.5
	M				132.2 ± 97.6 ***	284.0 ± 201.9	291.6 ± 88.6 **
Species part R^2		0.09 ns	0.45 *	0.52 *** (log)	0.23 ***	0.20 **	0.32 ***
Mowing part R^2					0.34 ***	0.32 ***	0.27 ***
Interaction part R^2					0.13 ***	0.07 ns	0.13 **

Values are means ± standard deviation (n=8 until the beginning of flowering then n=4). For each intercrop, asterisks indicate a significant difference in comparison with the sole chickpea according to Dunnett's test. In case of significant interaction, the control treatment was the unmowed sole chickpea. ns: non-significant, . $p < 0.1$, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$. (log) indicates that the response variable was log-transformed prior to model fitting.

3.2. Ascochyta blight severity

The disease pressure was much higher in 2024 than in 2023. The first symptoms were detected at the end of chickpea flowering in 2023, and at the 10-leaf stage in 2024. In the unmowed sole chickpea, the mean disease score at the grain-filling stage was 0.7 in 2023, while it was 3.2 in 2024, on a 0-4 scale (Table 1.5).

Table 1.5: Mean ascochyta blight severity score (0-4) on chickpea leaves at the grain-filling stage. Chickpea's inter-rows were either mowed (M) or without mechanical regulation (WM).

		2023	2024
Sole chickpea	WM	0.7 ± 0.0	3.2 ± 0.9
	M	0.8 ± 0.1	1.2 ± 0.3 ***
Clover-chickpea	WM	0.5 ± 0.0	3.4 ± 0.2
	M	0.7 ± 0.1	1.1 ± 0.3 ***
Faba bean-chickpea	WM	0.6 ± 0.2	2.6 ± 0.4
	M	0.8 ± 0.1	1.6 ± 0.4 ***
Oat-chickpea	WM	0.5 ± 0.1	1.4 ± 0.4 ***
	M	0.7 ± 0.2	1.2 ± 0.3 ***
Sudan grass-chickpea	WM	0.7 ± 0.1	3.1 ± 0.8
	M	0.8 ± 0.2	1.1 ± 0.1 ***
Species part R^2		0.13 .	0.11 ** (log)
Mowing part R^2		0.33 ***	0.53 *** (log)
Interaction part R^2		0.01 ns	0.15 ** (log)

Ascochyta blight severity was scored on leaves at each node *via* a 0-4 scale: 0 = no symptoms, 1 = 1-25% of the leaf area necrotic, 2 = 25-50% of the leaf area necrotic, 3 = 50-75% of the leaf area necrotic, and 4 = 75-100% of the leaf area necrotic. Values are means ± standard deviation (n=4). For each treatment, asterisks indicate a significant difference in comparison with the unmowed sole chickpea according to Dunnett's test. ns: non-significant, . $p < 0.1$, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$. (log) indicates that the response variable was log-transformed prior to model fitting.

Introducing a service plant had no significant effect on disease severity in 2023, but adding oat strongly decreased it in 2024 ($p < 0.001$, part $R^2 = 0.11$, Table 1.5). Indeed, the mean disease score was 2.3-fold lower in the intercrop with unmowed oat relative to the unmowed sole crop. None of the other service plants had a significant effect (Table 1.5).

In 2023, mowing increased the mean disease score by 0.1 to 0.2 points in both the sole crop and the intercrops ($p < 0.001$, $R^2 = 0.33$, Table 1.5). By contrast, mowing highly decreased disease severity in the sole crop and in the intercrops with clover, faba bean, and Sudan grass in 2024. Indeed, the mean disease score was 2.7-fold lower in the mowed sole crop, and 1.6- (chickpea-faba bean) to 3-fold lower (chickpea-clover) in the mowed intercrops relative to the corresponding unmowed treatment ($p < 0.001$, $R^2 = 0.53$, Table 1.5). The interaction between the two fixed factors was significant, as mowing did not decrease disease severity in the intercrop with oat ($p < 0.01$, Table 1.5).

3.3. Relationship between biomass accumulation and ascochyta blight severity at the grain-filling stage

Ascochyta blight severity at the grain-filling stage was not related to the total plant biomass (Figure 1.4a), but significantly increased with weed and service plant biomass ($p < 0.001$, $R^2 = 0.47$, Figure 1.4b).

Ascochyta blight severity at the grain-filling stage was better correlated with weed biomass alone ($p < 0.001$, $R^2 = 0.59$, Figure 1.4c). Thus, weed control played a key role in ascochyta blight severity: the lower the weed biomass, the better the disease control. Nevertheless, the service plant species also mattered. For instance, the mean disease score in the chickpea-clover intercrop was on average 31% higher than in the chickpea-faba bean intercrop, even though they had similar levels of weed biomass (Figure 1.4c).

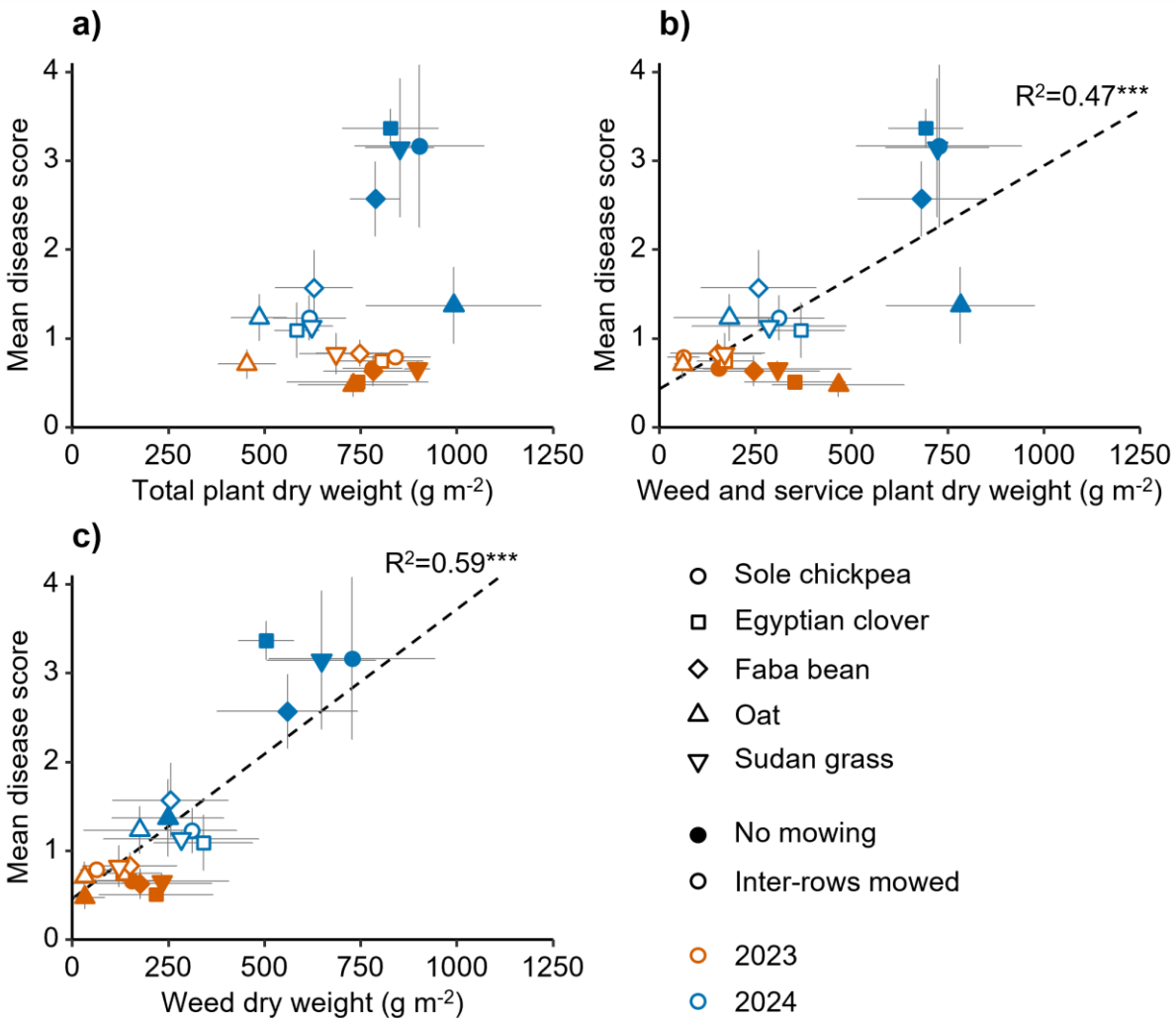


Figure 1.4: Ascochyta blight severity on chickpea leaves at the grain-filling stage as a function of total chickpea, service plant and weed biomass (a), weed and service plant biomass (b) or weed biomass (c). Each symbol corresponds to the averaged value of the four blocks and error bars stand for the standard deviation of the mean. The dashed line in the panels (b) and (c) represent the regression fitted to the data.

3.4. Chickpea grain yield

Chickpea grain yield was extremely variable between the two years of the experiment. Indeed, the unmowed sole chickpea yielded 3.59 t ha^{-1} in 2023, but no grains were harvested in 2024. In the unmowed intercrops, chickpea grain yield varied between 0.99 t ha^{-1} and 3.54 t ha^{-1} in 2023, while the values ranged from 0.00 t ha^{-1} to 0.02 t ha^{-1} in 2024 (Table 1.6).

Introducing unmowed oat decreased chickpea grain yield by 72% compared to the unmowed sole crop in 2023 ($p < 0.001$, part $R^2 = 0.50$, Table 1.6). None of the other service plants significantly affected chickpea grain yield. In 2024, no significant effect of the service plants was found when the

mowed sole crop and the mowed intercrops were compared (p = 0.249). Still, adding unmowed oat allowed a small yield of 0.02 t ha^{-1} while no grains were harvested in any of the other unmowed treatments (Table 1.6).

Table 1.6: Chickpea grain yield (t ha^{-1}) in the sole crop and intercrops in 2023 and 2024. Chickpea's inter-rows were either mowed (M) or without mechanical regulation (WM).

		2023		2024
Sole chickpea	WM	3.59 ± 1.04		0.00 ± 0.00
	M	4.28 ± 0.83		0.04 ± 0.08
Clover-chickpea	WM	3.54 ± 0.44		0.00 ± 0.00
	M	3.58 ± 0.42		0.03 ± 0.04
Faba bean-chickpea	WM	3.03 ± 0.43		0.00 ± 0.00
	M	3.22 ± 0.85		0.03 ± 0.06
Oat-chickpea	WM	0.99 ± 0.34	***	0.02 ± 0.02
	M	1.88 ± 0.71		0.02 ± 0.03
Sudan grass-chickpea	WM	3.05 ± 1.56		0.00 ± 0.00
	M	3.73 ± 1.22		0.06 ± 0.06
Species part R^2		0.50 ***		
Mowing part R^2		0.04 *		
Interaction part R^2		0.02 ns		

Values are means ± standard deviation (n=4). For each intercrop, asterisks indicate a significant difference in comparison with the sole chickpea according to Dunnett's test. Empty cells indicate that the ANOVA assumptions were not met. ns: non-significant, * p < 0.05, ** p < 0.01, *** p < 0.001.

Mowing increased chickpea grain yield in all treatments in 2023, leading to a 19% higher yield in the sole crop (p < 0.05, part R^2 = 0.04, Table 1.6). In the intercrops with oat and Sudan grass, mowing increased chickpea yield by 89% and 22% relative to the corresponding unmowed treatments, respectively. Mowing did not seem to affect the grain yield in the intercrops with clover and faba bean (Table 1.6). Despite the positive impact of mowing, adding mowed oat still reduced chickpea grain yield by 48% compared with the unmowed sole crop. In 2024, mowing the inter-rows in the sole

crop and the intercrops with clover, faba bean, and Sudan grass led to small quantities of chickpea grains. By contrast, no grains were harvested in the unmowed treatments (Table 1.6).

3.5. Effect of adding an earlier mowing date in the chickpea-oat intercrops

In 2024, a third mowing treatment was added in the chickpea-oat intercrops to investigate the effects of adding an earlier mowing date during the vegetative phase of chickpea. In this treatment, the inter-rows were first mowed at the 10-leaf stage, and then a second time at the beginning of chickpea flowering.

Oat grew back after the first mowing at the 10-leaf stage, accumulating 73.6 g m^{-2} of biomass by the beginning of chickpea flowering, which is more than four times lower than the oat biomass in the unmowed intercrop. However, oat did not grow back when mowed at the beginning of chickpea flowering, whether it was for the first or second time (Annexe 1).

Adding an earlier mowing date led to a significant increase in chickpea biomass production at pod set and at the grain-filling stage ($p < 0.05$, Annexe 1 Table A1-1). Indeed, chickpea biomass at pod set was 55% and 61% higher in the intercrop with an additional earlier mowing date compared with a single mowing and no mowing, respectively. However, these differences were not detected by Tukey's HSD test. At the grain-filling stage, adding an earlier mowing date significantly increased chickpea biomass by 80% compared with the unmowed intercrop ($p < 0.05$, $R^2 = 0.51$). Chickpea biomass also tended to be 24% higher in the intercrop with an additional earlier mowing date compared to a single mowing, but these differences were not significant. Chickpea yielded 0.09 t ha^{-1} in the intercrop with two mowing dates, which was not significantly different from the two other treatments.

Weed control was not improved by the addition of an earlier mowing at any sampling date (Annexe 1 Table A1-1). Adding an earlier mowing date led to a mean disease score of 1.3, which was not significantly different from the two other treatments ($p = 0.075$).

4. Discussion

4.1. The competitive ability of the service plant during early growth shapes the dominance relationships in the intercrop

Testing a range of service plant species allowed us to explore various traits combinations and levels of interspecific competition between the intercrop components throughout chickpea's cycle.

Intercropping chickpea with a highly competitive service plant improved weed control regardless of the weed pressure level. In our study, introducing oat consistently decreased weed biomass compared to the sole chickpea. Indeed, cereals are known for their rapid crop establishment (Corre-Hellou et al., 2007; Hauggaard-Nielsen et al., 2009). Oat had the earliest and highest biomass production among the species we tested, which was previously identified as a key trait for weed control by service plant intercropping (Gardarin et al., 2022; Moreau et al., 2025). Hence, adding a species in the inter-rows of chickpea that produces high amounts of biomass early in the crop cycle, like oat, gave a competitive advantage to the service plant at the expense of weeds, and thus compensated for the slow crop establishment of chickpea.

Nevertheless, our findings also revealed that intercropping chickpea with a highly competitive service plant impacted chickpea grain production. Indeed, introducing oat highly decreased chickpea biomass accumulation early in the crop cycle, which may have led to the grain yield reduction recorded in this treatment in 2023. Previous studies on intercrops with grain legumes and other cash crops have identified a trade-off between weed control and yield (Carton et al., 2020; Cheriere et al., 2020). As weed control can only be improved if the service plant has a high competitive ability, having an additional lever to mitigate interspecific competition, like mowing, is even more necessary to avoid high reductions in chickpea grain yield.

Conversely, our results show that introducing a service plant characterised by a slow crop establishment limited the competition exerted on chickpea, but did not improve weed control compared to the sole crop. Consequently, as in the sole crop treatment, chickpea yield was very low in the intercrops with Egyptian clover, faba bean, and Sudan grass under high weed pressure. In our experiment, these service plant species produced low amounts of biomass during the vegetative phase of chickpea, thus giving a competitive advantage to weeds (Carton et al., 2020; Cheriere et al., 2020). Hence, our results clearly indicate that adding a service plant with a low biomass production during the first stages of growth is not recommended as weeds can easily become highly dominant.

4.2. Intercropping chickpea with oat or mowing the inter-rows under high weed pressure limits ascochyta blight severity

In our study, the two experimental years varied greatly in terms of climatic conditions, which allowed us to test our treatments under contrasting biotic pressures. This also provided further evidence of the high yield variability of chickpea caused by weeds and ascochyta blight.

Our findings highlighted that ascochyta blight severity was better related to weed control than to the sum of weed and service plant biomass (Figure 1.4). Intercropping chickpea with oat highly decreased the proportion of weed biomass in the mixture, leaving the service plant as the dominant component. Hence, the canopy of the chickpea-oat intercrops was dominated by oat, a species with an erect growth habit sown in the middle of the inter-rows of chickpea. By contrast, the canopy of the sole crop was dominated by weeds of which we did not control the spatial arrangement. Thus, the architecture of the oat-dominated canopy in the chickpea-oat intercrops may have favoured air circulation between the chickpea rows compared to the dense weed cover in the sole crop. This better aeration of the canopy could have altered the microclimate, making it less favourable for pathogen development. Previous studies have also reported a reduction in ascochyta blight severity on several grain legume species when they were intercropped with a cereal (Fernández-Aparicio et al., 2011, 2010; Hauggaard-Nielsen et al., 2008; Schoeny et al., 2010). Schoeny et al. (2010) found that intercropping pea with either wheat or barley increased the air temperature within the canopy and shortened the leaf wetness duration, which ultimately decreased disease severity on pods. The optimum conditions for *Ascochyta rabiei* to cause severe infections are a constant temperature of 20°C with a leaf wetness duration of 17 hours (Trapero-Casas and Kaiser, 1992). Hence, intercropping chickpea with oat may have altered those parameters and thus impeded the pathogen development. Schoeny et al. (2010) also recorded a sharp decrease in the splash-dispersal of conidia in the pea-wheat intercrops compared with the sole pea. The authors hypothesized that wheat acted as a physical barrier of non-host plants between the pea rows, thus disrupting spores dispersal. In our study, oat produced high amounts of biomass early in chickpea's cycle, which may have created a dense barrier to spore dispersal. Also, our results show that adding oat decreased chickpea biomass at pod set because of interspecific competition. This decrease in host biomass could have also contributed to reducing disease severity in the chickpea-oat intercrops through the dilution effect (Fernández-Aparicio et al., 2010).

In situations of high weed infestation, mowing removed high amounts of biomass between the chickpea rows, which may have also acted on the canopy microclimate. Hence, our results demonstrate that weed control and ascochyta blight severity are related, which implies that they need to be considered simultaneously. Our findings revealed that under high weed pressure, mowing the inter-rows of chickpea can help to limit ascochyta blight epidemics.

Beyond weed control, other factors linked to the characteristics of the service plants also affected ascochyta blight severity. Indeed, adding clover led to a higher mean disease score than adding faba bean, even though the levels of weed biomass were similar between the two unmowed intercrops (Figure 1.4). These differences could be linked to the aerial architecture of the service plants. Egyptian clover had a bushy growth habit compared to faba bean and the other species we tested, which had a more upright architecture. Hence, the high canopy density in the chickpea-clover intercrops may have reduced air circulation and promoted humid conditions favourable for pathogen development (Richard et al., 2013; Tivoli et al., 2013).

4.3. Mechanically regulating a highly competitive service plant to simultaneously control weeds and ascochyta blight while mitigating interspecific competition

As detailed above, our work highlights that intercropping chickpea with a service plant displaying a high competitive ability and generating an aerated canopy like oat, helps to control weeds and to limit ascochyta blight severity under contrasting biotic pressures. However, we also show evidence for a trade-off between chickpea production and weed control (Carton et al., 2020; Cheriere et al., 2020). Mowing the inter-rows is a promising lever for mitigating interspecific competition and manage this trade-off during the growth cycle. Indeed, adding oat reduced weed biomass and disease severity, while mowing the inter-rows tended to limit the decrease in chickpea biomass and grain yield due to interspecific competition.

Still, our findings suggest that the initial mowing strategy needs improvement. Indeed, adding mowed oat still decreased chickpea yield by half compared with the unmowed sole crop in 2023. By the 10-leaf stage, chickpea biomass was already lower in the chickpea-oat intercrop compared to the sole crop. Moreover, mowing improved weed control only in 2024. This year, the weather was colder and wetter than the previous one which delayed chickpea phenology and, by extent, delayed the mowing date. Hence, weeds may have been mowed at a later stage than in the previous year, limiting their

regrowth ability (Meiss et al., 2008). The dead mulch left between the chickpea rows after mowing had also a much higher biomass in 2024, which may have impeded the regrowth of weeds, but also service plants (Teasdale and Mohler, 2000). Overall, these results indicate that a single mowing at the beginning of chickpea flowering is not sufficient and/or too late to control both weeds and the service plant, and avoid high yield reductions due to interspecific competition.

The mowing strategy could be easily improved by adjusting its timing and increasing its frequency. Although different from the species we studied, Thorsted et al. (2006) had to cut white clover in the inter-rows of wheat at least twice to get a similar yield or higher yield than the sole crop wheat. The authors also found that the increase in wheat yield varied depending on the timing of the cut. Besides, Butler et al. (2013) reported that repeated cuttings reduced the growth of several common weed species, while a single cutting was not sufficient.

In our study, adding one mowing date at the 10-leaf stage in the chickpea-oat intercrops tended to further increase chickpea biomass and grain yield compared to a single mowing. This suggests that the first mowing should be done earlier, depending on the relative biomass accumulation of chickpea and oat, rather than considering chickpea phenology only. Another mowing date could also be added later in the crop cycle to keep controlling weeds and prevent an increase in the weed seed-bank (Butler et al., 2013; Tipping, 2008). Overall, more research is needed in field conditions to evaluate the effects of increasing the mowing frequency on interspecific competition and weed biomass in chickpea-based intercrops, but also to better understand its effects at the cropping system scale.

Indeed, under low-input or organic conditions, mechanical weeding during the crop cycle combined with intensive tillage for seedbed preparation is a much more commonly used strategy. Nevertheless, the efficacy of cultivation methods to control weeds depends on a variety of factors including the quality of the seedbed preparation, the soil type, the species and phenological stages of the weeds, and the weather (Kurstjens and Kropff, 2001; Rasmussen et al., 2010; Richard et al., 2023). Frequent soil cultivation can also deteriorate its structure and promote soil erosion (Hamza and Anderson, 2005). In addition, mechanical weeding can trigger new weed emergence flushes and cause crop damage (Lundkvist, 2009; Rasmussen et al., 2008). This supports the interest of introducing a mowed service plant to control weeds rather than growing chickpea as a monocrop and only relying on mechanical weeding. Moreover, this combination of practices gives greater flexibility, and offers additional levers to manage interspecific competition without pesticides nor tillage use.

Still, the mechanical regulation strategy could be completed by combining mowing with other types of no-till mechanical weeding. During the vegetative phase of chickpea, mowing has the advantage of allowing the service plant to grow back for maintaining competition with weeds, which may impede their regrowth. In addition, destroying oat early in the crop cycle might diminish its positive impact on disease reduction. However, mowing may not be sufficient to control weeds when there is a majority of grasses. In our trials, mowing gave weeds the opportunity to grow back while oat had a very limited regrowth—which ultimately gave a competitive advantage to weeds. Hence, combining mowing with other mechanical operations that are usually used to terminate cover crops in no-till cropping systems, such as roller-crimpers, could be an interesting option to prevent weed regrowth later in the crop cycle (Davis, 2010; Mirsky et al., 2011; Rowland et al., 2023).

Overall, our findings indicate that mowing the service plant in the inter-rows of the cash crop is a promising lever for controlling weeds, mitigating interspecific competition, and limiting the drawbacks of mechanical weeding. Still, the mechanical control strategy could be improved by increasing the frequency, adjusting the timing, and/or combining mowing with other types of no-till mechanical weeding.

5. Conclusion

The findings presented here highlight the potential of intercropping chickpea with a mowed competitive service plant for controlling weeds and ascochyta blight under contrasting biotic pressures. We found that cereals with a high competitive ability and generating an aerated canopy like oat are the most promising for chickpea-based intercrops. Still, more research is needed to better adjust and explore various combinations of mechanical control to further attenuate the competition exerted by such competitive service plants, and to keep controlling weeds later in the crop cycle. This work contributes to exploring levers meant to stabilise the production under low-input or organic conditions, and improve the robustness of cropping systems in a time when the inter-annual variability is predicted to increase.

Chapitre 2 : Introducing a mowed competitive service plant reduces ascochyta blight severity and modifies the shoot architecture of chickpea

Ce chapitre correspond à un article scientifique en préparation.

Abstract

Introduction: Intercropping chickpea (*Cicer arietinum* L.) with a mowed competitive service plant, such as oat (*Avena sativa* L.), can control weeds and ascochyta blight in low-input conditions, while limiting interspecific competition. In intercrops, competitive interactions may result in alterations of the shoot architecture in chickpea, with potential consequences on the vertical distribution of disease severity on the plant. The purpose of this study was to investigate the effects of introducing oat, with or without inter-row mowing, on the shoot architecture of chickpea, and on the vertical distribution of ascochyta blight symptoms on the plant.

Methods: In a two-year field experiment (2023, 2024) in Western France, chickpea was grown as sole crop and in intercrop, in which oat was added between the chickpea rows. Chickpea's inter-rows were either mowed at the beginning of chickpea flowering or left without mechanical regulation. Chickpea's shoot architecture was thoroughly described, and ascochyta blight severity on leaves was evaluated at each node on the main axis.

Results: In 2023, under low weed and disease pressures, introducing oat decreased branching, pod production, and node number, while mowing had no significant effect. In the intercrop, internodes were longer at the base of the main axis, but shorter on the upper half of the stem. In 2024, under high weed and disease pressures, intercropping had a limited effect on chickpea's shoot architecture, while mowing increased branching and pod production in the sole crop. Ascochyta blight on leaves was lower in the intercrop, especially under high disease pressure, with visible effects from the first basal nodes of the main axis. Adding an earlier mowing date before flowering in the intercrop doubled pod production, while maintaining the same level of disease control than the intercrops with no mowing or one mowing date.

Conclusion: Introducing a competitive service plant like oat limits ascochyta blight severity from the base of the main axis under high disease pressure, while mowing the inter-rows can promote branch and pod production thanks to the phenotypic plasticity of chickpea. This work underlines the relevance of the mowing strategy for mitigating interspecific competition in intercrops. Mowing the inter-rows during chickpea's vegetative phase gave the most promising results, and should be further investigated.

Keywords: intercropping, inter-row mowing, phenotypic plasticity, shoot architecture, disease control.

1. Introduction

Intercropping, which consists in growing at least two species in the same field for a significant period of their life cycle (Willey, 1990), has been extensively studied over the past decades. It is now well established from a variety of studies that intercropping can enhance resource acquisition (Bedoussac et al., 2015; Bedoussac and Justes, 2010a; Hauggaard-Nielsen et al., 2009), improve weed control (Corre-Hellou et al., 2011; Gu et al., 2021; Hauggaard-Nielsen et al., 2001), and reduce disease damage (Boudreau, 2013; Fernández-Aparicio et al., 2010; Schoeny et al., 2010) in low-input cropping systems. In a previous paper, we examined the effects of species choice and inter-row mowing in chickpea-service plant intercrops. We found that intercropping chickpea with a mowed competitive service plant, like oat, helps to control both weeds and ascochyta blight, while limiting interspecific competition (Guy et al., 2025). Weed-suppression by the chickpea-oat intercrop was partly attributed to the high biomass production of the service plant from the early stages of growth (Guy et al., 2025), confirming previous findings from other studies (Cheriere et al., 2020; Gardarin et al., 2022). Shading by such dominant species was reported to reduce branching (Gao et al., 2023; Liu et al., 2017; Zhang et al., 2023), and increase internode length in soybean, peanut and pea (Fernández-Aparicio et al., 2010; Li et al., 2020; Liu et al., 2017). However, no published work has investigated those effects on chickpea.

Still, the indeterminate growth habit of chickpea implies that the plant continues to produce vegetative organs after the onset of the reproductive development, which suggest that the shoot architecture may evolve through the whole crop cycle (Ambika et al., 2021). Moreover, the few published studies available on chickpea monocrops suggest that competitive interactions might induce plastic responses in the shoot architecture. In a study conducted in a humid subtropical climate, Singh et al. (2019) reported a reduction in branching when plant density was increased from 33 plants m^{-2} to 44 plants m^{-2}. By contrast, under Mediterranean conditions, Siddique et al. (1984) found that branch number was not affected by plant density, whether it was 50, 33 or 23 plants m^{-2}. Differences in water availability might explain these contradictory results. Also, Siddique et al. (1984) only measured the number of basal primary branches. Overall, studies on the phenotypic plasticity of chickpea are lacking, and no clear conclusions have been drawn yet, especially in low-input intercropping systems.

Yet, alterations of the shoot architecture of chickpea, and notably of the branching pattern, may modify pod distribution and production on the plant (Siddique et al., 1984; Siddique and Sedgley, 1985). Besides, longer internodes can contribute to delaying the vertical progression of ascochyta blight, as reported on pea (Fernández-Aparicio et al., 2010; Le May et al., 2009). No previous study has examined the potential link between the shoot architecture of chickpea and ascochyta blight severity to our knowledge, although the need for more research on this topic has been acknowledged (Gan et al., 2007, 2006).

Thus, the purpose of this study was to investigate the effects of introducing oat and mowing the inter-rows of chickpea on its shoot architecture, including yield components, and on the vertical distribution of ascochyta blight symptoms on the plant.

2. Materials and methods

2.1. Experimental site and pedoclimatic conditions

A field experiment was conducted for two consecutive years (2023, 2024) in La Ménitré, France (47°23'37.3"N, 0°14'57.6"W). The two trials were undertaken on different plots from the same site with similar pedological conditions (Table 2.1). The soil was a clay loam in 2023, and a sandy clay loam in 2024. Both soils were at least 90 cm deep. The soil mineral nitrogen content at sowing in the 0-90 cm soil layer was 88 kg ha^{-1} in 2023 and 99 kg ha^{-1} in 2024. In both years, the preceding crop was winter wheat.

Table 2.1: Description of the topsoil (0-30 cm) of the experimental fields.

	2023	2024
Clay (%)	42.0	43.9
Silt (%)	49.9	41.1
Sand (%)	8.1	15.0
Organic matter (%)	2.9	4.4
pH_{H2O}	6.8	7.1
P_{Olsen} (g/kg)	0.057	0.032
Exchangeable K^+ (g/kg)	0.208	0.214
Exchangeable Mg^{2+} (g/kg)	1.170	1.360
CEC (meq/100g)	28.7	29.6

The amount and frequency of rainfall differed markedly between years (Figure 2.1). In 2024, there was 342 mm of rainfall over the cropping season, which was 58% higher than the 2023 trial, and 60% higher than the 10-year average computed between 2013 and 2022. More specifically, the weather conditions in June, which corresponded to the beginning of chickpea flowering, differed greatly between the two years of the experiment and the seasonal norm (Figure 2.1). In 2023, the mean air temperature in June was 2°C warmer than the seasonal norm, and the total rainfall was 32% higher. Conversely, the mean air temperature in June 2024 was close to the 10-year average, but the total rainfall was 125% higher. Therefore, the period surrounding the beginning of chickpea flowering was cooler and more humid in 2024 than in the previous year.

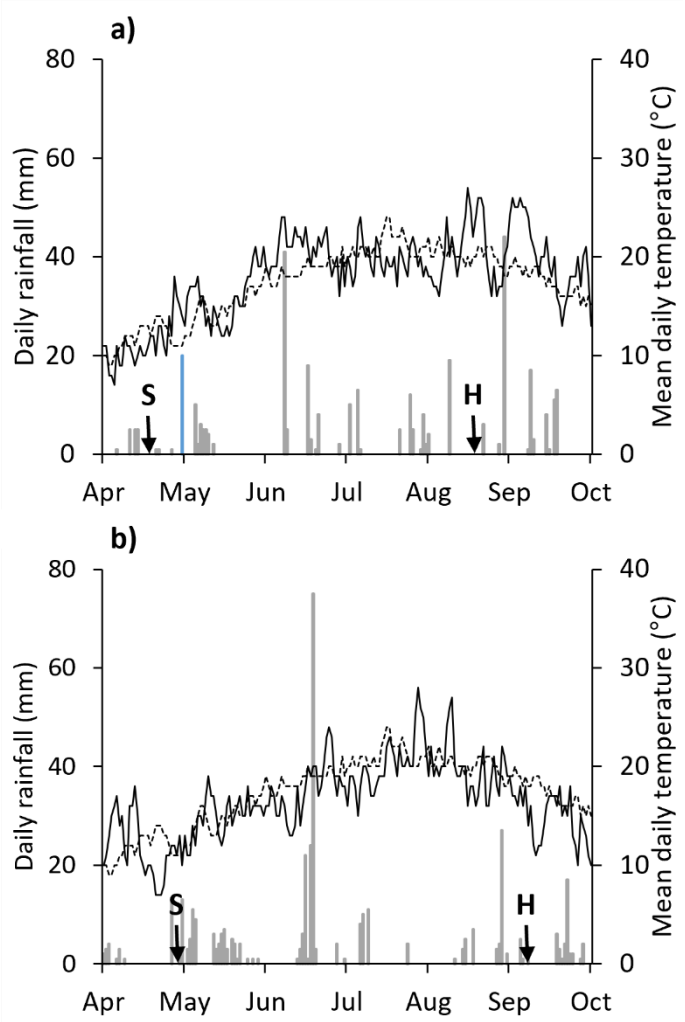


Figure 2.1: Daily rainfall and mean daily temperature recorded near the experimental site in 2023 (a) and 2024 (b) (Météo France, 2024). The black solid line is the mean daily temperature during the time of the experiment. The dotted line shows the mean daily temperature averaged over a ten-year period (2013-2022). Grey bars stand for daily rainfall and blue bars correspond to irrigation. S: sowing date, H: harvest date.

2.2. Experimental design

In this experiment, two factors with two levels each were tested: i) the cropping treatment (sole crop chickpea, chickpea-oat intercrop), and ii) the inter-row mowing treatment (no mowing, one mowing at the beginning of chickpea flowering). The experiment was arranged in a randomized complete block design with four replicates. The plots were 20 m long by 3 m wide in 2023, and 22 m long by 2.3 m wide in 2024.

Chickpea (*Cicer arietinum* L., cv. Twist) was grown as sole crop with a 33 cm inter-row spacing, and in intercrop in which spring oat (*Avena sativa* L., cv. Celeste) was added in the middle of the chickpea inter-rows. The Kabuli-type cultivar used for chickpea is the most frequently grown in France. This cultivar is susceptible to ascochyta blight, and has an erect growth habit.

The inter-rows of chickpea were either not mowed, or mowed once at the beginning of chickpea flowering. At the time of mowing, oat was about 30 cm higher than chickpea in the intercrop in both years of the experiment. In 2023, chickpea and oat were 28 cm and 59 cm high on average, respectively. In 2024, chickpea and oat were 46 cm and 80 cm high on average, respectively.

In 2024, a third treatment of inter-row mowing was added in the chickpea-oat intercrop to explore the effects of adding an earlier mowing date. The inter-rows of chickpea were first mowed at the 10-leaf stage, and then a second time at the beginning of chickpea flowering. At the time of the first mowing date, chickpea and oat were 20 cm and 41 cm high, respectively.

A brush cutter equipped with a 23-cm-wide cutting head (RG-KM rotary cutting head KombiTool, Stihl, Waiblingen, Germany) was used to mow the inter-rows of chickpea. After mowing, the plant residues were left on the ground between the chickpea rows.

Chickpea was sown at a density of 70 seeds m^{-2} with an inter-row spacing of 33 cm, enabling to reach the target density of 50 plants m^{-2} at emergence. These values correspond to the full density and spatial arrangement recommended by the local agricultural institutes. The density of chickpea was equivalent to 16 plants per linear meter, and did not differ between years and treatments. Oat was sown following an additive design in the middle of the inter-rows of chickpea at 50% of the recommended density, corresponding to 175 seeds m^{-2}. The actual plant density of oat was similar between treatments but was slightly lower in 2023, probably due to the drier growing conditions at sowing. The density of oat was 120 plants m^{-2} in 2023, equivalent to 40 plants per linear meter; and 134 plants m^{-2} in 2024, equivalent to 45 plants per linear meter.

2.3. Trial management

In both years, the seedbed was prepared with successive passes of the appropriate implements taking into account the local pedoclimatic conditions (Guy et al., 2025). The chickpea sole crops and the chickpea-oat intercrops were sown on 20th April 2023 and 30th April 2024. Chickpea and oat were sown simultaneously with a disc seeder enabling to set different sowing densities and depth for each species (Easydrill 3020 Fertisem, Sky Agriculture, Châteaubourg, France). Before sowing, the chickpea seeds were inoculated with a strain of *Mesorhizobium muleiense* supplied by UMR Agroécologie, INRAE (Dijon, France). The presence of active nodules on the roots of chickpea was later confirmed.
The experiment was conducted in low-input conditions, with a single non-selective herbicide use before crop emergence in 2023, and molluscicide applications, to secure the trial set-up (Guy et al., 2025).

2.4. Measurements

2.4.1. Plant biomass

The above-ground biomass of chickpea, oat, and weeds was sampled at the grain-filling stage of chickpea in the central rows of the plot. The harvested area was 0.8 m long and 0.664 m wide, containing two rows of chickpea and two rows of oat. Samples were dried at 70°C for 48 hours and then weighed.

2.4.2. Shoot architecture of chickpea

The branching pattern of chickpea and the distribution of pods on the plant were thoroughly described at the grain-filling stage on five random plants per plot. The number of primary, secondary, and tertiary branches per plant was counted. For branches, the node of insertion was noted. The number of nodes and the total number of pods were recorded for the main axis and each branch.
The length of each internode on the main axis of chickpea was also measured at the grain-filling stage on five random plants per plot.

2.4.3. Assessment of ascochyta blight severity

Ascochyta blight severity was visually assessed at the grain-filling stage on ten random plants per plot. Disease severity on leaves was scored at each node on the main axis, using a 0-4 scale: 0 = no symptoms, 1 = 1-25% of the leaf area necrotic, 2 = 25-50% of the leaf area necrotic, 3 = 50-75% of the leaf area necrotic, and 4 = 75-100% of the leaf area necrotic. Nodes without leaflets but with clear necrotic lesions on the rest of the leaf were given the highest score (4). No score was attributed when there were no leaflets and no lesions.

Disease profiles were plotted to visualize ascochyta blight severity on leaves depending on the node rank on the main axis (Fernández-Aparicio et al., 2010; Le May et al., 2009). In order to be representative, within each plot, only the nodes with at least three values of disease score out of the ten plants assessed were kept in the dataset. A mean score per node was then computed by averaging the values of the experimental blocks, and used to plot the disease profiles.

2.5. Statistical analyses

All statistical analyses were performed using the R software (R Core Team, 2025). The two years of the experiment were analysed separately. The number of branches per order and the number of pods per stem category (main axis, primary, secondary, and tertiary branches, total) were analysed *via* linear mixed models (Bates et al., 2015). The cropping treatment (sole chickpea, chickpea-oat intercrop) and the mowing treatment of chickpea's inter-rows (no mowing, one mowing at the beginning of flowering) were fixed factors. The experimental block was a random factor. The effect of the fixed factors and their interaction was tested *via* type II ANOVAs. Observations from the same plot were averaged, and their mean value was used as response variable to meet the independence assumption. The normality of the model residuals and the homogeneity of variance were consistently checked using the Shapiro-Wilk test and the Bartlett test, respectively. When these two assumptions were not met, the response variable was log-transformed. When non-normality and/or heteroscedasticity were not resolved by log-transformation, the data were aligned and ranked prior to model fitting following the Aligned Rank Transform (ART) procedure implemented in the ARTool package (Wobbrock et al., 2011). Cases of data transformation are specified in the tables.

In case of significant interaction between the two fixed factors, the multiple comparisons were performed using Dunnett's test with the unmowed sole chickpea as the control treatment. When

following an ART analysis, the contrast tests were conducted using the art.con function implemented in the ARTool package (Elkin et al., 2021).

The internode length and the disease score data were systematically aligned and ranked prior to analysis (Wobbrock et al., 2011). In order to be representative, within each plot, only the internodes with at least two values of length out of the five plants assessed were kept in the analysis. In the same way, only the nodes with at least three values of disease score out of the ten plants assessed were kept in the analysis. A mixed model was then fitted for each internode or node rank, when there were at least two replicates per treatment.

The intercrop with two mowing dates was only compared to the two other intercropping treatments (no mowing, one mowing date).

3. Results

3.1. Shoot architecture of chickpea

3.1.1. Branching pattern

Chickpea branched more in 2024 than in 2023 (Figure 2.2, Table 2.2). In 2023, the unmowed sole chickpea had on average 4.1 primary branches, 3.8 secondary branches, and 0.8 tertiary branch (Figure 2.2a, Table 2.2). In 2024, the unmowed sole chickpea had on average 5.2 primary branches, 3.9 secondary branches, and 0.5 tertiary branch (Figure 2.2c, Table 2.2). The two experimental years were also highly contrasted in terms of weed pressure (Annexe 2). In 2023, there were 155 g m^{-2} of weed biomass in the unmowed sole crop compared to 728 g m^{-2} in 2024 (Annexe 2).

Table 2.2: Number of branches per order of chickpea at the grain-filling stage in the sole crop and in the intercrop with oat. The inter-rows of chickpea were either mowed at the beginning of flowering (M) or without mechanical regulation (WM).

			Primary	Secondary	Tertiary	Total
2023	Sole chickpea	WM	4.1 ± 0.5	3.8 ± 0.9	0.8 ± 0.4	8.7 ± 1.5
		M	4.3 ± 0.5	4.0 ± 0.9	0.8 ± 0.4	9.0 ± 1.7
	Chickpea-oat	WM	3.1 ± 0.9	2.1 ± 0.8	0.2 ± 0.4	5.4 ± 1.8
		M	3.3 ± 0.6	1.9 ± 0.4	0.0 ± 0.0	5.2 ± 0.5
	Intercropping		*	***	*** (art)	***
	Mowing		ns	ns	ns (art)	ns
	Interaction		ns	ns	ns (art)	ns
2024	Sole chickpea	WM	5.2 ± 1.7	3.9 ± 1.0	0.5 ± 0.7	9.5 ± 2.0
		M	6.7 ± 2.6	8.1 ± 1.7	2.1 ± 0.9	16.9 ± 5.1
	Chickpea-oat	WM	4.1 ± 1.6	3.9 ± 2.1	1.0 ± 1.1	9.0 ± 3.9
		M	5.9 ± 0.8	8.2 ± 3.6	2.0 ± 1.3	16.0 ± 4.5
	Intercropping		ns	ns	ns	ns
	Mowing		*	**	*	**
	Interaction		ns	ns	ns	ns

Values are means ± standard deviation (n=4). Asterisks indicate significance levels for each factor: ns $p \geq 0.05$, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$. (art) indicates that the data were aligned and ranked prior to model fitting.

In 2023, branching was significantly reduced on intercropped chickpea compared to the sole crop, while no differences were found between mowing treatments (Figure 2.2, Table 2.2). The total number of branches on chickpea was 34% lower in the unmowed intercrop compared to the unmowed sole crop ($p < 0.001$, Table 2.2). There was on average 1 less primary branch ($p < 0.05$) and 1.7 fewer secondary branches ($p < 0.001$, Table 2.2, Figure 2.2a-b) on chickpea in the unmowed intercrop than in the unmowed sole crop. There were also fewer tertiary branches on intercropped chickpea, but their number was also below 1 on average in the sole crop ($p < 0.001$, Table 2.2).

In 2024, the branching pattern of intercropped chickpea was not different from the sole crop's, but varied markedly between mowing treatments (Figure 2.2c-d, Table 2.2). Indeed, the total number of branches on chickpea was 78% higher in the mowed sole crop and the mowed intercrop compared to their corresponding unmowed treatment ($p < 0.01$, Table 2.2). In the mowed sole crop, the number of primary, secondary, and tertiary branches on chickpea was 1.3 ($p < 0.05$), 2.1 ($p < 0.01$), and 4.2 times higher than in the unmowed treatment, respectively ($p < 0.05$, Table 2.2). Likewise, the number of primary, secondary, and tertiary branches on chickpea was 1.4 ($p < 0.05$), 2.1 ($p < 0.01$), and 2 times higher in the mowed intercrop than in the unmowed treatment, respectively ($p < 0.05$, Table 2.2).

In 2024, the branching pattern of chickpea was similar between the intercrops with one and two mowing dates (Annexe 2 Table A2-1).

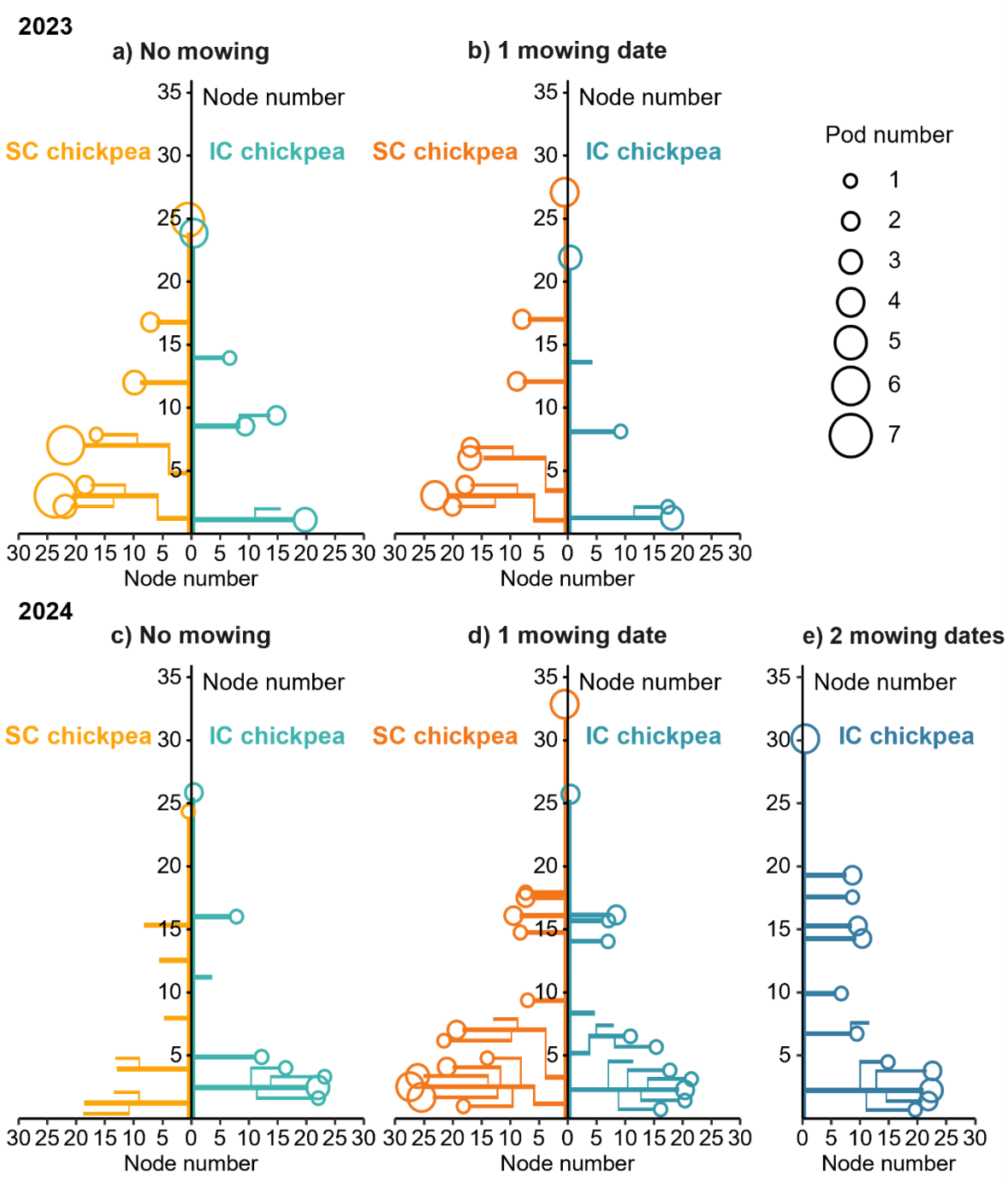


Figure 2.2: Mean shoot architecture of chickpea at the grain-filling stage in the different cropping and mowing treatments in the two years of the experiment. For each treatment, the mean number of primary branches on the plant, and the mean number of secondary branches on each primary branch is represented. On each graph, the vertical bar corresponds to the main axis, and the horizontal bars represent the primary and secondary branches with their average node number. In the unmowed intercrop in 2023, the mean node number of the second primary branch was lower than the mean insertion node of its secondary branch. Therefore, the secondary branch was placed at the tip of the primary branch to avoid inconsistencies on the graph. The circles stand for the mean number of pods carried by each stem.

3.1.2. Node number and internode length

In the unmowed sole chickpea, there were 27.4 nodes on average on the main axis in 2023, and 24 nodes in 2024.

In 2023, node number was significantly lower on intercropped chickpea compared to the sole crop, but did not differ between mowing treatments (Figure 2.3a-b). There were on average 5.2 more nodes on the main axis of chickpea in the unmowed sole crop than in the unmowed intercrop ($p < 0.001$). Internodes tended to be longer at the base of the main axis in the intercrop, but shorter on the upper half of the stem, compared to the sole crop (Figure 2.3a-b). In the unmowed intercrop, the internodes between the 3rd and 5th ranks were 0.3 to 0.4 cm longer than in the unmowed sole chickpea ($p < 0.05$, Figure 2.3a-b). By contrast, the internodes between the 13th ($p < 0.05$) and 22nd ranks ($p < 0.001$) were 0.2 to 0.7 cm shorter in the unmowed intercrop (Figure 2.3a-b). Mowing only had a significant effect at the 5th and 13th ranks, as the internodes were 0.2 to 0.4 cm longer in the mowed treatments compared to their corresponding unmowed treatments (Figure 2.3a-b).

In 2024, the number of nodes on the main axis of chickpea was similar between the sole crop and the intercrop, and significantly differed between mowing treatments in the sole crop alone (Figure 2.3c-d). In the unmowed sole crop, there were 24 nodes on the main axis of chickpea, compared with 32 nodes in the mowed treatment. This year, the length of the internodes varied between the sole crop and the intercrop at the 10th and 11th ranks only (Figure 2.3c-d). In the unmowed intercrop, these internodes were 0.6 ($p < 0.05$) and 0.4 cm ($p < 0.01$) longer than in the unmowed sole crop, respectively. Aside from one exception, there were no differences in internode length between mowing treatments (Figure 2.3c-d).

In 2024, the comparison of the intercrops indicated that node number on the main axis of chickpea was not significantly different between the treatments with no mowing (25.5, Figure 2.3c), one mowing date (25.3, Figure 2.3d), and two mowing dates (29.1, Figure 2.3e). However, the internodes between the 11th and 15th ranks tended to be, or were significantly shorter, in the intercrop with two mowing dates (Figure 2.3c-e).

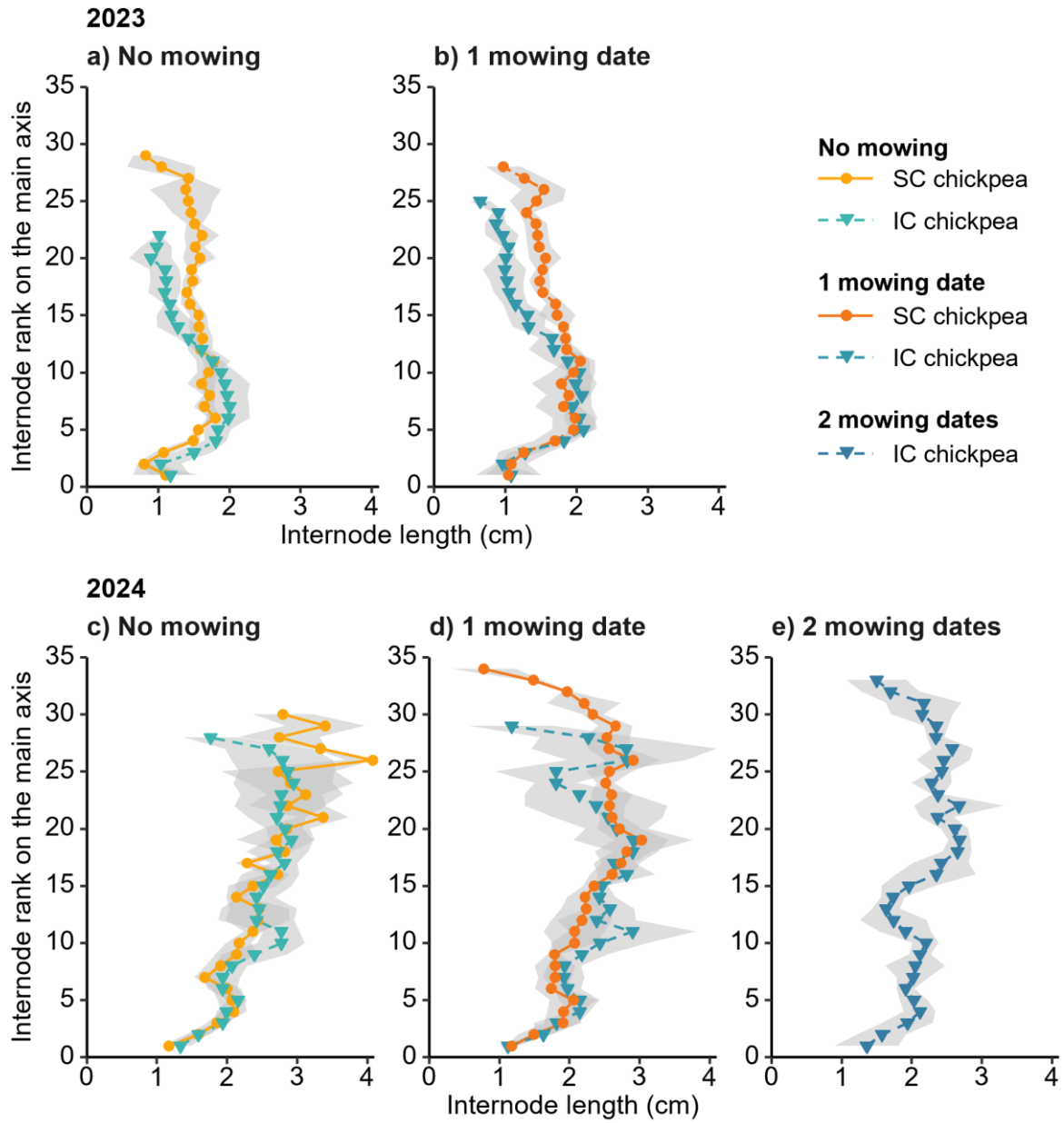


Figure 2.3: Length of each internode on the main axis of chickpea at the grain-filling stage in the different cropping and mowing treatments in the two years of the experiment. Within each plot, only the nodes with at least three values of disease score out of the ten plants assessed were kept in the dataset. Each symbol corresponds to the averaged value of the experimental blocks. Only nodes with at least two replicates are plotted. The grey area corresponds to the standard deviation of the mean.

3.1.3. Pod production and distribution

Pod production by chickpea was extremely variable between the two years of the experiment (Figure 2.2, Table 2.3). In 2023, there were 31.3 pods on average in total on the unmowed sole chickpea, as opposed to 1.9 in 2024 (Table 2.3). In 2023, there were 5.4 pods on the main axis, 17.6 pods on the primary branches, 8.3 pods on the secondary branches, and 0.2 pod on the

tertiary branches on average in the unmowed sole chickpea (Table 2.3). Hence, the primary branches had the highest pod production, while tertiary branches had the lowest. In 2024, pod number was below 1 on average on the main axis and all branch orders alike (Table 2.3).

In 2023, the number of pods on the main axis of chickpea and most branch orders was significantly lower in the intercrop than in the sole crop, while it tended to differ between mowing treatments in the sole crop alone (Figure 2.2a-b, Table 2.3). The total number of pods in the unmowed intercrop was 58% lower than in the unmowed sole crop ($p < 0.001$, Figure 2.2a, Table 2.3). Pod number was 31% lower on the main axis ($p < 0.05$), 63% lower on the primary branches ($p < 0.001$), and 67% lower on the secondary branches ($p < 0.001$, Figure 2.2a, Table 2.3) in the unmowed intercrop compared to the unmowed sole crop. The number of pods on the tertiary branches was always below 1 on average, and did not significantly differ between cropping treatments (Table 2.3). In the mowed sole crop, the number of pods on the primary branches tended to be 18% lower compared to the unmowed treatment ($p = 0.053$, Figure 2.2a-b, Table 2.3). No other significant differences were found between mowing treatments (Table 2.3).

In 2024, the number of pods on the main axis and most branch orders was the lowest in the unmowed sole chickpea (Figure 2.2c-e, Table 2.3). For instance, the total pod number was 6.2 times higher in the unmowed intercrop than in the unmowed sole crop (Figure 2.2c, Table 2.3). Aside from the tertiary branches, a significant interaction between the cropping and the mowing treatment was detected in all analyses, as mowing only increased pod production in the sole crop (Table 2.3). Indeed, there were 25.3 pods on the mowed sole chickpea, compared to 1.9 pods in the unmowed treatment (Figure 2.2c-d, Table 2.3).

In 2024, the number of pods on the primary branches was twice as high in the intercrop with two mowing dates compared to the intercrops with no mowing and one mowing date (11.0 pods, $p < 0.05$, Annexe 2). Consequently, the total number of pods tended to be twice as high in the intercrop with two mowing dates (22.1 pods, $p = 0.082$, Annexe 2).

Table 2.3: Number of pods on the main axis and each branch order of chickpea at the grain-filling stage in the sole crop and in the intercrop with oat. The inter-rows of chickpea were either mowed at the beginning of flowering (M) or without mechanical regulation (WM).

			Main axis	Primary	Secondary	Tertiary	Total
2023	Sole chickpea	WM	5.4 ± 2.3	17.6 ± 2.4	8.3 ± 1.2	0.2 ± 0.2	31.3 ± 5.7
		M	6.2 ± 1.2	14.4 ± 1.3	8.3 ± 3.1	0.5 ± 0.4	29.4 ± 4.5
	Chickpea-oat	WM	3.7 ± 1.1	6.5 ± 2.7	2.7 ± 2.5	0.2 ± 0.4	13.0 ± 5.8
		M	3.1 ± 0.9	6.0 ± 1.0	2.3 ± 1.0	0.0 ± 0.0	11.4 ± 2.3
	Intercropping		*	***	***	. (art)	***
	Mowing		ns	.	ns	ns (art)	ns
	Interaction		ns	ns	ns	* (art)	ns
2024	Sole chickpea	WM	0.6 ± 0.6	1.0 ± 1.2	0.4 ± 0.5	0.0 ± 0.0	1.9 ± 2.2
		M	4.4 ± 2.7 **	12.0 ± 9.9 **	8.4 ± 5.8 **	0.7 ± 0.6	25.3 ± 18.3 **
	Chickpea-oat	WM	2.5 ± 1.6 .	5.4 ± 1.9 *	3.8 ± 3.1 .	0.2 ± 0.4	11.8 ± 4.1 **
		M	1.9 ± 1.6	5.3 ± 3.7 *	4.4 ± 3.5 .	0.5 ± 1.0	12.1 ± 9.4 **
	Intercropping		ns	ns (log)	ns (art)	ns (art)	. (log)
	Mowing		*	** (log)	** (art)	ns (art)	** (log)
	Interaction		**	** (log)	* (art)	ns (art)	** (log)

Values are means ± standard deviation (n=4). Asterisks indicate significance levels for each factor: ns $p \geq 0.1$, . $p < 0.1$, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$. In case of interaction, asterisks indicate a significant difference with the unmowed sole chickpea according to Dunnett's test. (log) indicates that the response variable was log-transformed. (art) indicates that the data were aligned and ranked prior to model fitting.

3.2. Ascochyta blight severity on leaves and proportion of blighted pods

The ascochyta blight pressure was much higher in 2024 than in 2023 (Figure 2.4). In 2023, the disease scores on leaves recorded in the unmowed sole chickpea were all close to or below 1 on the 0-4 scale, with the higher values located on the upper half of the stem (Figure 2.4). Conversely, the values ranged from 2 to 4 in 2024 (Figure 2.4). This year, the highest disease scores were recorded at the base of the main axis, and decreased as the nodes were higher on the stem.

In 2023, intercropping chickpea with oat led to a lower ascochyta blight severity on leaves at the upper nodes of the main axis, while mowing led to a slight increase in the middle part of the stem (Figure 2.4a-b). At the 18^{th}, 20^{th}, 22^{nd}, and 24^{th} nodes, the disease scores were 0.3 to 0.4 point lower in the unmowed intercrop than in the unmowed sole crop ($p < 0.05$, Figure 2.4a). Besides, between the 9^{th} ($p < 0.05$) and the 14^{th} nodes ($p = 0.05$), the disease scores were significantly or tended to be 0.2 to 0.4 point higher in the mowed treatments than in their unmowed counterpart. Still, ascochyta blight severity on leaves remained low (Figure 2.4a-b).

In 2024, intercropping chickpea with oat, or mowing the inter-rows in the sole crop, led to a strong decrease in ascochyta blight severity on leaves from the first basal nodes of the main axis (Figure 2.4c-e). At the 4^{th} and 5^{th} nodes, the disease scores were 0.7 to 1.6 points lower in the intercrop than in the sole crop, regardless of the mowing treatment ($p < 0.05$, Figure 2.4). Intercropping also reduced disease severity higher on the stem, at the 24^{th} ($p < 0.05$) and 29^{th} nodes ($p < 0.01$, Figure 2.4). Between the 9^{th} and the 21^{st} nodes, a significant interaction was found between the cropping and the mowing treatment, as mowing highly decreased disease severity in the sole crop, but not in the intercrop (Figure 2.4). On this part of the stem, the disease scores were significantly lower in the mowed sole crop and in the unmowed intercrop, compared to the unmowed sole crop (Figure 2.4). Up to the 17^{th} node, disease severity was also significantly lower in the intercrop with one mowing date compared to the unmowed sole crop (Figure 2.4).

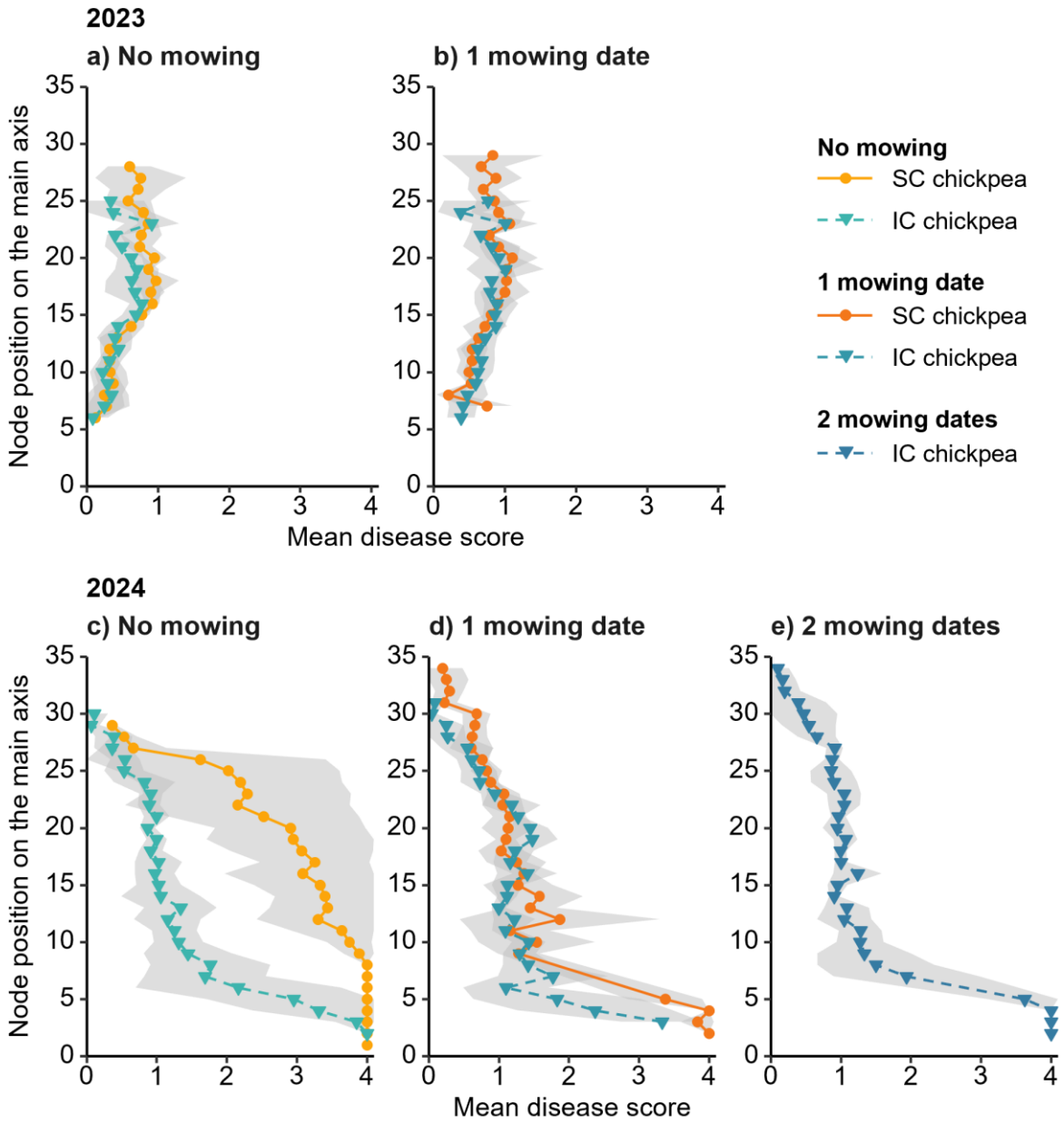


Figure 2.4: Ascochyta blight severity profile on chickpea leaves along the main axis at the grain-filling stage in the different cropping and mowing treatments in the two years of the experiment. Within each plot, only the internodes with at least two values of length out of the five plants assessed were kept in the dataset. Each symbol corresponds to the averaged value of the experimental blocks. Only internodes with at least two replicates are plotted. The grey area corresponds to the standard deviation of the mean.

In 2024, the comparison of the intercrops with no mowing, one mowing date, or two mowing dates revealed few differences between treatments (Figure 2.4c-e). The disease scores were 0.3 to 0.5 point higher in the intercrop with one mowing date compared to the unmowed intercrop between the 19th ($p < 0.05$) and the 21st nodes ($p < 0.05$, Figure 2.4c-d). Aside from

the 21st and 27th nodes, disease severity in the intercrop with two mowing dates was not significantly different from the two other mowing treatments (Figure 2.4c-e).

In 2023, the proportion of blighted pods on the secondary branches was significantly lower in the intercrop than in the sole crop ($p < 0.01$). In the unmowed sole crop, 12% of the pods on the secondary branches had lesions of ascochyta blight, compared with 0.9% on average in the unmowed intercrop. Moreover, there were no differences between mowing treatments. In 2024, there were not enough pods to allow any comparison.

4. Discussion

4.1. Effect of introducing oat in the inter-rows of chickpea on its shoot architecture

In our study, the shoot architecture of chickpea displayed a high plasticity in reaction to competition with oat and weeds, leading to contrasted responses depending on the year. In 2023, under low weed pressure, chickpea was shaded by oat in the intercrop but was the dominant component in the sole crop. Thus, introducing oat in the inter-rows of chickpea altered its branching pattern, internode length, and pod production. By contrast, in 2024, the weed pressure was earlier and higher (Guy et al., 2025). Thus, chickpea was always shaded, either by weeds in the sole crop, or by oat in the intercrop. Hence, this year, the addition of oat only led to a few differences in branching pattern, node number, and internode length, compared to the sole crop.

In 2023, the number of branches of all orders and of pods was lower in the intercrop. Also, there were fewer nodes on the main axis of intercropped chickpea, with longer internodes at the base, and shorter internodes on the upper half of the stem. Our findings are in line with the literature, as previous studies recorded reduced branching, lower pod production, fewer nodes, and internode elongation on grain legume species intercropped with taller crops (Fan et al., 2018; Gao et al., 2023; Li et al., 2020; Liu et al., 2017; Zhang et al., 2023). Previous works also found shorter internodes at the upper ranks on the stem of soybean intercropped with maize, compared to sole soybean (Li et al., 2020; Liu et al., 2017). In intercrops, shading by a taller species alters light quantity and quality for the subordinate crop (Fan et al., 2018; Liu et al., 2017; Yang et al., 2014). In shade-avoiding species, this triggers a set of morphological responses, including inhibition of branching and internode elongation (Ballaré and Pierik,

2017; Franklin, 2008). A decrease in resource availability due to interspecific competition may also limit the amount of assimilates available for branch and pod production (Yang et al., 2014; Zhang et al., 2023). Thus, shading by oat must have altered the light signals intercepted by chickpea, while increased interspecific competition may have reduced resource availability, eventually leading to reduced branching and pod production.

It is worth noting that despite the higher weed pressure, the unmowed sole chickpea branched slightly more in 2024 than in 2023. A reason for this result may be the differences in weather conditions between the two years. Indeed, rainfall was much higher in 2024, which is known to promote vegetative growth in chickpea (Ambika et al., 2021). Overall, our results suggest that prolonged shading, either by a taller service plant or weeds, can limit branching, modify internode length, and reduce pod production in chickpea.

4.2. Mowing the inter-rows of chickpea mitigates interspecific competition

In 2024, under high weed pressure, mowing the inter-rows of chickpea at the beginning of flowering led to a higher number of branches of all orders, and to a higher number of nodes and pods in the sole crop. In this trial, there were 197 g m^{-2} of weed biomass in the sole crop at the time of mowing, and 368 g m^{-2} of weed and oat biomass in the intercrop, of which 89% was oat (Guy et al., 2025). Thus, mowing created a sudden opening in the vegetation cover, by cutting down large amounts of oat and/or weed biomass. This could be compared to the opening in the canopy resulting from the harvest of an earlier-maturing species in a relay intercrop. In such a cropping system, Luo et al. (2024) reported a growth recovery of soybean after maize was harvested during the vegetative phase of the legume. Indeed, the number of branches on soybean was lower in the intercrop than in the sole crop at the beginning of flowering, but there were no differences between the two treatments at the grain-filling stage (Luo et al., 2024). The authors notably linked this result to the increase in incident photosynthetic active radiation after maize harvest (Luo et al., 2024). In our study, mowing must have then mitigated interspecific competition for light interception, but may have also altered light quality and increased nutrient availability for chickpea. Yet, mowing did not affect the branching pattern of chickpea in 2023, even in the intercrop. This year, the weed pressure was much lower than in 2024, with only 25 g m^{-2} of weed biomass in the sole crop at the time

of mowing (Guy et al., 2025). Thus, the much lower intensity of interspecific competition with weeds, together with the lower rainfall compared to the 2024 trial, may explain this result.

Furthermore, adding an earlier mowing date at the 10-leaf stage of chickpea in the intercrop tended to increase the number of primary branches and doubled their pod number, compared to the intercrop with one mowing date at flowering. This is in line with the literature, as Luo et al. (2024) found that the timing of light recovery determined the ability of the legume to recover from the reduction in branching induced by shading. In their study, branching was stimulated in soybean when maize was harvested during the vegetative phase of the legume, but soybean did not recover when the cereal was harvested later during the reproductive phase (Luo et al., 2024). Also, in our study, adding an earlier mowing date during the vegetative phase resulted in shorter internodes in the middle of the stem compared to the two other mowing treatments. Moreover, it is very interesting to note that chickpea was first mowed at the 10-leaf stage—meaning that there were ten internodes—and that the differences in length that we recorded were between the 11^{th} and 15^{th} internodes on the main axis. This suggests that mowing the inter-rows during the vegetative phase further mitigated interspecific competition, with an almost immediate effect.

Thus, mowing the inter-rows of chickpea can limit the reduction in branching and pod production caused by the presence of a competitive service plant or weeds. In the intercrop, having an early mowing date during the vegetative phase of chickpea further mitigated interspecific competition and promoted pod production by the primary branches.

4.3. Introducing oat decreases ascochyta blight severity along the main axis of chickpea

Under high disease pressure, introducing oat decreased ascochyta blight severity from the very first nodes at the base of the main axis. Moreover, in both years, the addition of oat consistently led to a decrease in disease severity on the upper layers of vegetation. Previous studies on pea found that longer internodes were associated with lower ascochyta blight severity (Fernández-Aparicio et al., 2010; Le May et al., 2009; Schoeny et al., 2008). This result was attributed to the longer distance between healthy tissues and necrotic lesions, thus decreasing the chance of success of conidia to reach the upper layers of vegetation. In our 2024 trial, internode elongation can't fully explain our results, as the sole crop and the intercrop only significantly differed at the 10^{th} and 11^{th} ranks. Another main explaining factor

must be the differences in weed biomass, which was considerably higher in the sole crop in 2024 (Guy et al., 2025). At the time of disease assessment, there was 728.2 g m^{-2} of weed biomass in the unmowed sole crop, which was 2.9 times higher than in the unmowed intercrop (Guy et al., 2025). This much higher weed biomass may have promoted humid microclimate conditions in favour of pathogen development in the sole crop (Tivoli et al., 2013). Weeds may also act as alternative hosts, thus promoting inoculum build-up and secondary infections, but the species from which *Ascochyta rabiei* was previously isolated were not present in our experiment (Hernandez-Bello et al., 2006; Khan et al., 1999; Pande et al., 2005). By contrast, the intercrop displayed a more open canopy favouring air circulation. Besides, the presence of a service plant with an erect growth habit, like oat, in the middle of the chickpea rows, may have contributed to disease reduction by disrupting spores dispersal through the barrier effect (Schoeny et al., 2010).

In 2023, the disease pressure was much lower, making the differences between cropping treatments less visible. Still, a slightly lower ascochyta blight severity was recorded on the upper half of the main axis in the intercrop. Although weed biomass was once again higher in the sole crop, it only reached 155 g m^{-2} in the unmowed treatment (Guy et al., 2025). Therefore, microclimate alteration may have not been the main driver for disease reduction in the intercrop in 2023. However, the lower proportion of blighted pods on the secondary branches suggest that the splash-dispersal of spores may have been disrupted by the presence of oat. Thus, our findings show that intercropping chickpea with oat limited ascochyta blight severity, especially when the pressure was high, and that weed control, microclimate alteration, and the presence of a non-host barrier probably had a greater influence on disease severity than internode elongation.

Overall, our results demonstrate that introducing oat limits ascochyta blight severity on leaves, with a strong effect from the very first nodes of the main axis of chickpea under high disease pressure. While mowing oat did not further decrease disease severity, we found that it mitigated interspecific competition, especially when an early mowing date was performed at the 10-leaf stage. Also, intercropping chickpea with oat was more efficient at decreasing disease severity from the base of the main axis than mowing the sole crop. This means that introducing a mowed competitive service plant strongly limits ascochyta blight severity, while concurrently mitigating interspecific competition thanks to the high phenotypic plasticity of chickpea.

4.4. Role of the main crop's plasticity in mowed intercropping systems

High agronomic performances and phenotype uniformity across various environments have been a target of plant breeding, which may ultimately reduce phenotypic plasticity (Gage et al., 2017; Lemoine et al., 2025; Semchenko and Zobel, 2005). In Europe, investment in plant breeding for grain legumes is lacking, especially for chickpea (Magrini et al., 2016; Meynard et al., 2018; Watson et al., 2017). For instance, the registration of the cultivar Twist that we used in our experiment, which is the most frequently grown in France, dates back to 1991 (GEVES, 2025b). The high variability between years, treatments, and individuals that we recorded in our study demonstrates the high plasticity of the shoot architecture of chickpea.

More recently, numerous studies conducted outside of Europe investigated the notion of crop ideotype in chickpea for plant breeding purposes (Ambika et al., 2021; Anbessa et al., 2007; Eker et al., 2022; Lake et al., 2016; Rubio et al., 2004). Several of these studies suggest that fewer branches, and more specifically fewer higher-order branches, is a trait of interest in chickpea; either for facilitating combine harvest (Singh et al., 2019), or for increasing seed yield (Basso et al., 2024; Gaur et al., 2008). Yet, a high phenotypic plasticity of the shoot architecture gives a competitive advantage, as the plant can adapt its morphology depending on the environmental signals. This ability is especially valuable in intercrops, as it promotes niche partitioning between associated species and contributes to its benefits (Zhu et al., 2015), probably even more in low-input cropping systems.

In our study, the benefits of mowing in terms of branch and pod production that we recorded in 2024 were greatly due to the high plasticity of chickpea's shoot architecture. We also found that this plasticity was especially high during the vegetative phase. Indeed, pod production was doubled and the internodes quickly shortened after the inter-rows were mowed at the 10-leaf stage, compared to the intercrops with no mowing or one later mowing date. Thus, having at least one mowing date during the vegetative phase of chickpea seems promising to mitigate interspecific competition and promote pod production.

Overall, the phenotypic plasticity of the shoot architecture of chickpea is valuable for designing low-input intercropping systems and managing interspecific competition along the crop cycle.

5. Conclusion

In this work, we demonstrated that introducing a competitive service plant like oat limits ascochyta blight severity from the base of the main axis under high disease pressure, while mowing the inter-rows can promote branch and pod production thanks to the plasticity of chickpea. Introducing oat and mowing the inter-rows of chickpea during the vegetative phase seemed the most promising and deserves further investigation. Indeed, this allowed to double the number of pods compared to the other mowing treatments, while maintaining a low level of ascochyta blight severity. Thus, intercropping chickpea with a mowed competitive service plant is a way to overcome some of the obstacles hindering chickpea production in low-input conditions, and benefit from the crop's plasticity.

Chapitre 3 : Introducing mowed oat as a service plant in chickpea-based intercrops reduces weed density and alters the weed community structure

Ce chapitre correspond à un article scientifique en préparation.

1. Introduction

Intercropping can improve weed control compared to monocultures in low-input cropping systems (Corre-Hellou et al., 2011; Gu et al., 2021; Willey, 1990). In a previous chapter, we examined the effects of species choice and inter-row mowing on weed biomass accumulation in chickpea-service plant intercrops (Guy et al., 2025). Our findings indicate that the introduction of mowed oat allowed to significantly decrease weed biomass compared to the sole crop, while limiting the competition exerted by the service plant on chickpea (Guy et al., 2025).

Intercrops are often studied for their effects on weed biomass or total abundance, but previous works also suggest that the structure of the weed community may also be altered (Namatsheve et al., 2024; Poggio, 2005). More specifically, several studies reported a reduction in the abundance of the dominant weed species in intercrops compared to sole crops (Lagerquist et al., 2025; Namatsheve et al., 2024; Poggio, 2005; Taab et al., 2023). Still, the body of literature available on this topic remains limited to our knowledge, with most studies being conducted under very different pedoclimatic conditions than those of Western Europe (Namatsheve et al., 2024; Poggio, 2005; Taab et al., 2023).

Mowing may also act as a filter on the weed community, which has been extensively documented in vineyards where this practice is widespread and repeated several times over the growing season (Bopp et al., 2022; Fried et al., 2022; Guerra et al., 2022, 2021; Kazakou et al., 2016; MacLaren et al., 2019). In ecology, disturbance of intermediate intensity are thought to generate the highest levels of diversity among plant communities (Connell, 1978; Kazakou et al., 2016; Roxburgh et al., 2004). As such, previous studies documented that mowing promoted weed diversity, and also selected species with specific traits, such as perennials with rosette leaves (Guerra et al., 2022, 2021; Kazakou et al., 2016; MacLaren et al., 2019). However, in these studies, mowing is compared to other weed management practices, mainly herbicides and tillage, and not to an unmowed control as in our study (Guy et al., 2025). Moreover, in perennial cropping systems, weeds are in contact with a single crop, and agronomic practices are repeated over the years. Thus, inter-row mowing in vineyards selects weed species in the long term. By contrast, much less is known about the short-term effect of occasional mowing on weed communities in annual cropping systems, in which crops and farming practices change regularly.

Thus, the purpose of this study was to investigate the effects of intercropping chickpea with oat and inter-row mowing on the weed community structure in low-input conditions.

2. Materials and methods

2.1. Experimental site and pedoclimatic conditions

A two-year field experiment was conducted in 2023 and 2024 in La Ménitré, France (47°23'37.3"N, 0°14'57.6"W). Different fields from the same site were used to conduct the two trials. In both years, the preceding crop was winter wheat, in a two-year crop rotation with maize. The two years of the experiment were highly contrasted in terms of climatic conditions, with 58% more rainfall over the 2024 growing season than in 2023. These climatic differences also led to contrasted weed and disease pressures, which were much higher in 2024 than in 2023. The pedological and climatic conditions of the experiment are presented into details in the previous chapters.

2.2. Experimental design and trial management

Two factors were tested in this experiment: i) the cropping design (sole chickpea, chickpea-oat intercrop), and ii) the use of mowing in chickpea's inter-rows (no mowing, one mowing at the beginning of chickpea flowering). The complete description of the experimental design and the trial management is also available in the previous chapters.

2.3. Measurements and calculations

2.3.1. Plant sampling

The aboveground biomass of chickpea, service plants, and weeds was sampled at the beginning of chickpea flowering and at the grain-filling stage. Plants were harvested in the central rows of the plots over 0.8 long and 0.664 m wide, corresponding to a surface of 0.531 m^2. The sampling area contained two rows of chickpea and, in the intercrops, two rows of service plant. The samples were then oven-dried at 70°C for 48 hours before weighing.

2.3.2. Calculation and visualization of the weed community diversity

When harvesting weeds, the species were identified and their abundance was recorded. Weed density was calculated by summing the total number of weeds, and dividing it by the size of the harvested area (0.531 m^2). The same type of calculation was done to compute the density of each weed species in the different treatments.

Weed community diversity and evenness were evaluated through three indicators based on the density data: species richness (S), Shannon's diversity index (H), and Pielou's evenness index (J). Species richness was defined as the number of species present in the quadrat. Shannon's diversity index reflects the number of species present, along with the distribution of individuals between them. This index was computed as follows:

$$H' = -\sum_{i=1}^{S} p_i \, ln(p_i)$$

where p_i is the proportion of species i, and S is species richness. The lowest value possible of H' is 0, and indicates that there is only one species. H' has no theoretical upper limit, the higher its value, the higher the diversity (Magurran, 1988). A separate measure of evenness can be computed using H', namely Pielou's evenness index:

$J = H'/\ln(S)$.

J is comprised between 0 and 1, the maximum value corresponding to a situation where all species are equally abundant (Magurran, 1988). All diversity indices were computed using the vegan package in R (Oksanen et al., 2025).

Rank-abundance plots were constructed to visualize the density of the five most abundant weed species in each treatment (Poggio, 2005). The mean density of these species was computed by averaging the values of the four experimental blocks and plotted to draw the rank-abundance plots. Each weed species was represented using its corresponding EPPO code (EPPO, 2025). Species belonging to the *Rumex* genus were grouped under the corresponding EPPO code (1RUMG). *Convolvulus arvensis* and *Calystegia sepium* were given the code referring to the *Convolvulaceae* family (1COVF).

2.4. Statistical analyses

All statistical analyses were performed using the R software (R Core Team, 2025). The two years of the experiment were always analysed separately. The plant biomass data and diversity indices were analysed by fitting linear mixed models for each sampling date (Bates et al., 2015). The fixed factors were the cropping treatment (sole chickpea, chickpea-oat intercrop), and the inter-row mowing treatment (no mowing, one mowing at the beginning of chickpea flowering). The experimental block was set as a random factor. The normality of the residuals and the homogeneity of variances were systematically checked using Shapiro-Wilk and Bartlett's tests, respectively. Independence of observations was ensured for all models.

In situations of non-normality and/or heteroscedasticity, the response variable was log-transformed. In case of significant interaction between the cropping and the mowing factors, the multiple comparisons were performed using Dunnett's test, with the unmowed sole chickpea as the control treatment (Lenth, 2023).

The total weed abundance and the number of individuals of the dominant weed species were analysed as count data by fitting generalized linear mixed models with a negative binomial distribution and a log link function using the glmmTMB package (McGillycuddy et al., 2025). Residuals were visualized and checked for overdispersion using the DHARMa package (Hartig, 2024). Significance of effects was tested with type III Wald chi-square tests. All statistical tests were considered significant when the p-value was lower than 0.05.

3. Results

3.1. Biomass accumulation by chickpea, oat, and weeds

The two years of the experiment displayed contrasted biomass distributions between chickpea, oat, and weeds (Figure 3.1). Indeed, the weed pressure differed markedly between experimental years, with values of weed density and biomass that were respectively 3.7 times and 8 times higher on average in the sole crop at the beginning of flowering in 2024 than in 2023 (Figure 3.1a,c; Table 3.1). Thus, in unmowed conditions, the sole crop was dominated by chickpea in 2023, and by weeds in 2024 (Figure 3.1). However, in the unmowed intercrop, oat was always the dominant component compared to both chickpea and weeds, as the service plant consistently accumulated high amounts of biomass (Figure 3.1). Thus, chickpea biomass was decreased in the intercrop at the beginning of flowering, being respectively 2.6 times ($p < 0.001$, Figure 3.1a), and 1.5 times lower ($p < 0.05$, Figure 3.1c) than in the sole crop in 2023 and 2024. At this stage, both weed biomass and density also tended to be, or were significantly reduced, in the intercrop compared to the sole crop. In 2023, there was a 38% lower weed abundance ($p < 0.001$, Table 3.1) in the intercrop than in the sole crop, and weed biomass also tended to be 41% lower ($p = 0.108$, Figure 3.1a). In 2024, the decrease in weed biomass in the intercrop was much higher than that of weed density, as they were reduced respectively by 79% ($p < 0.001$, Figure 3.1c) and by 35% ($p < 0.05$, Table 3.1) compared to the sole crop. At the grain-filling stage, chickpea biomass was lower in the intercrop than in the sole crop in 2023, while there were no differences between these treatments in 2024 (Figure 3.1b,d). In both years, weed biomass was reduced in the intercrop compared to the sole chickpea at the grain-filling stage, and weed density also tended to be decreased in 2023 (Figure 3.1b,d; Table 3.1). This year, weed biomass and density were respectively 4.8 times ($p < 0.05$, Figure 3.1b) and 1.5 times ($p = 0.085$, Table 3.1) lower in the intercrop than in the sole crop, in unmowed conditions. In 2024, weed biomass was 2.9 times lower in the unmowed intercrop compared to the unmowed sole crop ($p < 0.01$, Figure 3.1d).

Table 3.1: Weed density (plants m^{-2}) in the different treatments at the beginning of chickpea flowering and at the grain-filling stage in 2023 and 2024.

			2023	2024
Beginning of flowering				
	Sole chickpea	WM	95.3 ± 35.4	352.4 ± 46.5
	Oat-chickpea	WM	59.1 ± 29.5	228.1 ± 39.3
	p-value		< 0.001 ***	0.018 *
Grain-filling				
	Sole chickpea	WM	83.8 ± 20.3	214.2 ± 74.1
		M	141.7 ± 105.5	148.8 ± 19.3
	Oat-chickpea	WM	55.1 ± 19.4	156.8 ± 57.1
		M	89.9 ± 25.6	145.5 ± 62.2
	Intercropping p-value		0.085 .	0.113
	Mowing p-value		0.032 *	0.110
	Interaction p-value		0.867	0.427

Values are means ± standard deviation (n=8 at the beginning of flowering then n=4). Asterisks indicate significance levels for each factor: . p < 0.1 * p < 0.05, ** p < 0.01, *** p < 0.001.

In the two years of the experiment, mowing the inter-rows led to a higher chickpea biomass in both the sole and the intercrop (Figure 3.1b,d). After mowing the intercrop, oat had a limited regrowth in 2023, and did not grow back at all in 2024, leaving chickpea as the dominant component (Figure 3.1b,d). Also, in 2023, mowing the intercrop allowed to limit the reduction in chickpea biomass compared to the unmowed sole crop, and in 2024, it even led to an average 74% higher chickpea biomass (Figure 3.1b,d). The effects of mowing on weeds were also very contrasted between years. In 2023, mowing did not significantly affect weed biomass, but increased weed density by 69% in the sole crop and by 64% in the intercrop (Figure 3.1, Table 3.1). By contrast, in 2024, mowing strongly reduced weed biomass by 57% in the sole crop and by 29% in the intercrop, without affecting weed density (Figure 3.1, Table 3.1).

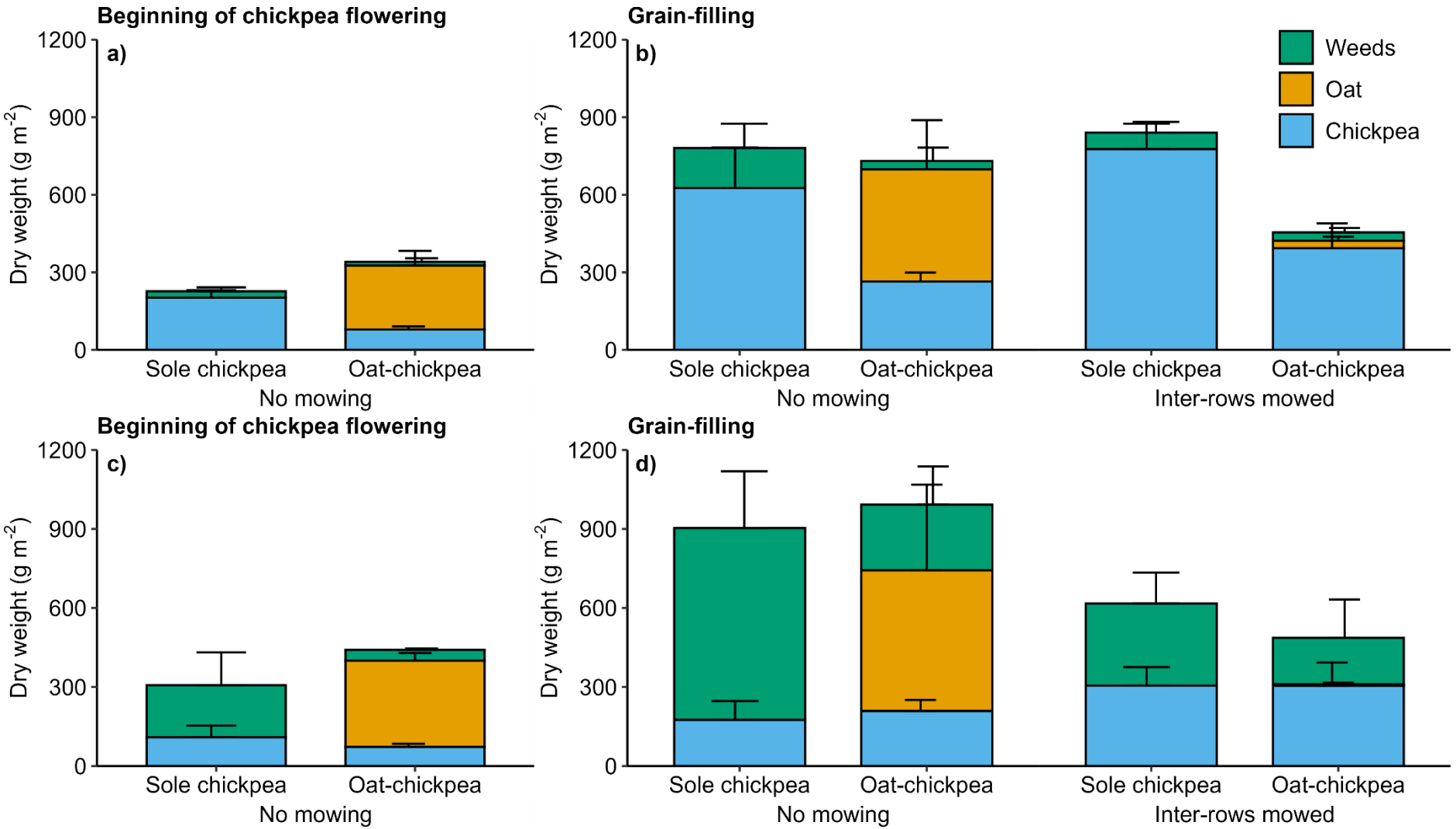


Figure 3.1: Dry matter accumulated by chickpea, oat, and weeds in the different treatments at the beginning of chickpea flowering and at the grain-filling stage in 2023 and 2024. Bars correspond to the mean of the four blocks. Error bars represent the standard deviation.

3.2. Weed community structure

3.2.1. Abundance of the dominant species

The dominant weed species were the same in both years, and corresponded to species commonly found in France in crop rotations including winter cereals and maize. These species were lady's thumb (*Polygonum persicaria*, POLPE), barnyard grass (*Echinochloa crus-galli*, ECHCG), and manyseed goosefoot (*Chenopodium polyspermum*, CHEPO, Figure 3.2). In 2023, they represented respectively 34%, 29%, and 9% on average of the total weed abundance recorded in the sole chickpea at the beginning of flowering (Figure 3.2a). At the grain-filling stage, their order of dominance was changed, as manyseed goosefoot accounted for 36% of the total weed abundance, followed by lady's thumb (27%), and barnyard grass (26%, Figure 3.2b). In 2024, at the beginning of chickpea flowering, there were 59% of barnyard grass, 16% of lady's thumb, and 9% of manyseed goosefoot in the unmowed sole chickpea (Figure 3.2e). At the grain-filling stage, barnyard grass was even more dominant, representing 76% on average of the total weed number, compared to 7% for manyseed goosefoot and lady's thumb (Figure 3.2f).

Introducing oat had a significant effect on the abundance of barnyard grass (ECHCG), while it did not affect the two other dominant species, lady's thumb (POLPE) and manyseed goosefoot (CHEPO, Figure 3.2). In 2023, the density of barnyard grass was lower in the intercrop than in the sole crop at the beginning of flowering, and tended to be lower at the grain-filling stage (Figure 3.2a-d). At the beginning of flowering, barnyard grass density was 11 ± 5 plants m^{-2} in the intercrop, which was 59% lower than in the sole crop (27 ± 20, $p < 0.01$, Figure 3.2a,c). At the grain-filling stage, there were 10 ± 5 plants m^{-2} of barnyard grass in the unmowed intercrop, which was half as high on average as in the unmowed sole crop (19 ± 9, $p = 0.093$, Figure 3.2b,d). In 2024, the introduction of oat did not affect barnyard grass density at the beginning of flowering, but led to a significant reduction at the grain-filling stage (Figure 3.2e-h). At this stage, barnyard grass density was 98 ± 91 plants m^{-2} in the unmowed intercrop, corresponding to a 42% decrease compared to the unmowed sole crop (170 ± 100, $p < 0.05$, Figure 3.2f,h). In both years of the experiment, mowing the inter-rows did not have a significant effect on the abundance of the three dominant weed species (Figure 3.2).

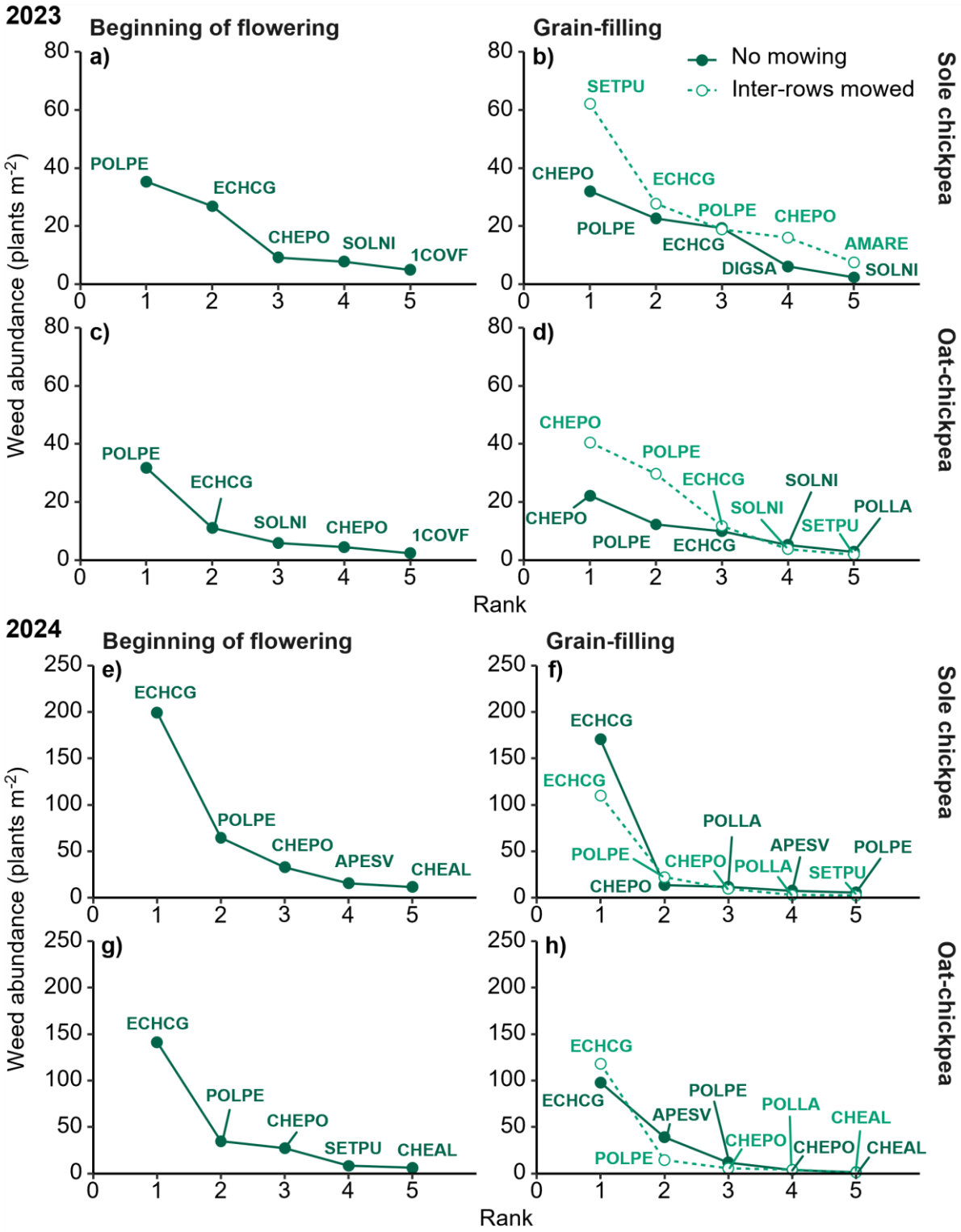


Figure 3.2: Rank-abundance plots representing the five most abundant weed species in each treatment at the beginning of chickpea flowering, and at the grain-filling stage, in 2023 and 2024. Each point corresponds to the mean of the four blocks. AMARE: *Amaranthus retroflexus*, APESV: *Apera spica-venti*, 1COVF: *Convolvulus arvensis* and *Calystegia sepium*, CHEAL: *Chenopodium album*, CHEPO: *Chenopodium polyspermum*, DIGSA: *Digitaria sanguinalis*, ECHCG: *Echinochloa crus-galli*, POLLA: *Persicaria lapathifolia*, POLPE: *Persicaria maculosa*, SETPU: *Setaria pumila*, SOLNI: *Solanum nigrum*.

3.2.2. Diversity indices

Weed community diversity differed between experimental years. Shannon's diversity index (H') and Pielou's evenness index (J) were on average higher in 2023 than in 2024 (Table 3.2). In 2023, the values of H' varied between 1.15 and 1.82 at the beginning of chickpea flowering in the sole crop, while they varied between 0.58 and 1.65 in 2024. At the same stage, evenness ranged from 0.64 to 0.93 in the sole crop in 2023, and from 0.27 to 0.71 in 2024. By contrast, species richness (S) was on average lower in 2023 than in 2024 (Table 3.2). There were 5 to 7 species per quadrat at the beginning of chickpea flowering in 2023, compared to 6 to 11 species per quadrat in 2024. The same trends also apply to the indices computed at the grain-filling stage. Thus, the weed community occurring in the experimental field from the 2023 trial had on average fewer species but a higher evenness than in 2024.

Shannon's diversity index tended to be lower in the intercrop than in the sole crop at the beginning of flowering in 2023, while no significant effect was found in 2024 (Table 3.2). In 2023, the differences between cropping treatments were small, as the value of H' was 1.40 on average in the sole crop, compared to 1.11 in the intercrop ($p = 0.068$, Table 3.2). No significant differences between the sole crop and the intercrop were found at the grain-filling stage in either year (Table 3.2). Mowing the inter-rows led to lower values of Shannon's diversity index in 2023, which was not the case in 2024. In 2023, the differences were small in the sole crop, as the value of H' only differed by 0.12 point on average between mowing treatments ($p < 0.05$, Table 3.2). The effects of mowing were more visible in the intercrop, as the value of H' was 0.42 point lower in the mowed treatment than in its unmowed counterpart ($p < 0.05$, Table 3.2).

Table 3.2: Shannon's diversity index (H'), species richness (S), and Pielou's evenness index (J) computed on the weed abundances recorded in the different treatments at the beginning of chickpea flowering at the grain-filling stage in 2023 and 2024.

			H'	S	J
Beginning of chickpea flowering					
2023	Sole chickpea	WM	1.40 ± 0.11	6.00 ± 0.41	0.79 ± 0.07
	Oat-chickpea	WM	1.11 ± 0.11	4.50 ± 0.41	0.74 ± 0.12
	p-value		0.068 .	0.005 **	0.576 ns
2024	Sole chickpea	WM	1.04 ± 0.31	8.75 ± 1.04	0.48 ± 0.13
	Oat-chickpea	WM	1.03 ± 0.23	6.75 ± 0.87	0.54 ± 0.11
	p-value		0.934	0.047 *	0.417
Grain-filling					
2023	Sole chickpea	WM	1.15 ± 0.17	4.00 ± 0.82	0.85 ± 0.12
		M	1.03 ± 0.25	4.75 ± 0.96	0.67 ± 0.16
	Oat-chickpea	WM	1.46 ± 0.16	5.75 ± 0.96 .	0.84 ± 0.03
		M	1.02 ± 0.21	4.50 ± 1.00	0.70 ± 0.18
	Intercropping p-value		0.167	0.111 (log)	0.903
	Mowing p-value		0.019 *	0.670 (log)	0.017 *
	Interaction p-value		0.153	0.040 * (log)	0.719
2024	Sole chickpea	WM	0.75 ± 0.46	5.00 ± 1.41	0.45 ± 0.23
		M	0.71 ± 0.39	4.25 ± 0.50	0.49 ± 0.26
	Oat-chickpea	WM	0.46 ± 0.25	4.00 ± 1.15	0.36 ± 0.25
		M	0.57 ± 0.25	4.25 ± 0.50	0.40 ± 0.19
	Intercropping p-value		0.225	0.374 (log)	0.439
	Mowing p-value		0.849	0.859 (log)	0.697
	Interaction p-value		0.673	0.374 (log)	0.994

Values are means ± standard deviation (n=8 at the beginning of flowering then n=4). Asterisks indicate significance levels for each factor: . $p < 0.1$ * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$. In case of interaction, asterisks indicate a significant difference with the unmowed sole chickpea according to Dunnett's test. (log) indicates that the response variable was log-transformed.

Species richness was consistently lower in the intercrop than in the sole chickpea at the beginning of flowering in both years (Table 3.2). Indeed, there were respectively 2.5 ($p < 0.01$) and 2.0 fewer ($p < 0.05$, Table 3.2) species on average in the intercrop than in the sole crop in 2023 and 2024. In 2023, the weed species that were found in the sole crop while being completely absent from the intercrop were *Chenopodium album, Sonchus asper*, and *Senecio vulgaris*. In 2024, the species were *Portulaca oleracea*, *Senecio vulgaris*, *Kickxia spuria*, *Polygonum aviculare*, *Mercurialis annua*, *Amaranthus retroflexus*, and *Stellaria media*. In both years, these species were among the least abundant in the sole crop, as only a few individuals were found per quadrat (Annexe 7). No significant differences between cropping treatments were found at the grain-filling stage in either year (Table 3.2). However, the interaction between the cropping and the mowing factors was significant in 2023 ($p < 0.05$, Table 3.2). The multiple comparisons revealed that species richness tended to be higher in the unmowed intercrop than in the unmowed sole crop, with 1.75 more species on average (Table 3.2). Mowing did not have a significant effect on species richness in either year (Table 3.2).

Pielou's evenness index did not significantly vary between the sole crop and the intercrop at any sampling date, in either year (Table 3.2). However, mowing the inter-rows of chickpea led to lower values of evenness at the grain-filling stage in 2023, which was not the case in 2024 (Table 3.2). Evenness was reduced by 0.18 and 0.14 point in the mowed sole crop and intercrop compared to their unmowed counterpart, respectively ($p < 0.05$, Table 3.2).

4. Discussion

In our experiment, the two years turned out to be very contrasted in terms of climatic conditions, which resulted in different levels of weed pressure. The weed community was characterised by the same three dominant species in both years, but was less even in 2024 as barnyard grass was extremely dominant. A great majority of the weed species identified in our experiment were annuals. Also, all of them were competitive (C), ruderal (R), or both (CR), according to Grime's life strategy classification (Bàrberi et al., 2018; Grime, 1974). Ruderal species are characterised by a fast seedling establishment and growth, which makes them well adapted to highly disturbed habitats. On the other hand, competitive species display a high competitive ability for resource acquisition, which is particularly detrimental for crop yield. These life strategies are very common in agricultural systems, being nutrient-rich and highly

disturbed habitats (Hickman et al., 2025; MacLaren et al., 2020). This was especially true in our experimental fields, as the usual cropping system was characterised by a short rotation of only two crops, frequent soil cultivation, and high-input conditions.

4.1. Introducing oat decreased weed biomass and density, while reducing the abundance of barnyard grass

In our study, introducing oat strongly reduced weed biomass, while also reducing weed density. Many previous studies also reported a reduction in weed biomass due to the introduction of a cereal in grain legume-based intercrops compared to the sole legume (Bedoussac et al., 2015; Carton et al., 2020; Corre-Hellou et al., 2011; Hauggaard-Nielsen et al., 2001). This weed suppressive ability of cereals is notably attributed to their high competitive ability for resource acquisition from the early stages of growth (Bedoussac and Justes, 2010a; Corre-Hellou et al., 2007; Hauggaard-Nielsen et al., 2001). Thus, fewer resources are available to weeds, which in turn, limits their biomass accumulation. Furthermore, as most annual weeds require light for seed germination (Juroszek and Gerhards, 2004), high biomass production by oat may have disrupted this process by limiting the amount of incident light reaching the soil (Bedoussac and Justes, 2010a). Also, the chickpea-oat intercrop covered the soil faster than the sole chickpea (Annexe 5), which is critical for effectively controlling weeds (Riemens et al., 2022). There is also evidence suggesting that oat may have allelopathic properties impairing weed germination and growth (Campiglia et al., 2010b; Kato-Noguchi et al., 1994). In our study, the suppressive effect of oat on weed density was especially visible at the beginning of chickpea flowering, while the results were less clear at the grain-filling stage, especially in 2024. Plant mortality in the sole crop due to interspecific competition between chickpea and weeds, but also between weed species, may have blurred the differences in weed density with the intercrop. As the weed pressure was much higher in 2024, with a single species dominating the weed community by the grain-filling stage, interspecific competition between weed species must have been enhanced compared to the 2023 trial. This may explain why no differences in weed density between cropping treatments were visible this year.

The introduction of oat also altered the weed community structure, by consistently reducing its species richness at the beginning of chickpea flowering. However, there were no differences in weed community evenness between cropping treatments, meaning that the

distribution of individuals between weed species was not changed. Our results partially concur with those of Poggio (2005), who found that species richness in pea sole crops tended to be higher than in pea-barley intercrops. Also, aside from one out of the three trials, evenness was not significantly different between the pea-barley intercrop and the sole pea (Poggio, 2005). In our study, the decrease in weed community richness was at the expense of rare species, which were only present in the sole crop in small numbers. A low initial seedbank, combined with the high competitive ability of oat for resource acquisition, might explain why these species were not found in the intercrop. For instance, at the beginning of flowering in 2024, species with a trailing growth habit, such as *Stellaria media*, *Portulaca oleracea*, *Kickxia spuria*, *Lysimachia arvensis*, or *Veronica persica*, were either completely absent from the intercrop, or only present in very small numbers (Annexe 7; Bàrberi et al., 2018). As oat had a fast growth in height (Annexe 4), which is a key trait for light interception (Garnier and Navas, 2012; Violle et al., 2009), this suggests that these weed species may not have been competitive enough for acquiring this resource compared to the service plant. Besides, all these weed species were completely gone by the grain-filling stage, in both the sole crop and the intercrop.

Our findings also revealed that introducing oat decreased the density of barnyard grass compared to the sole chickpea. These results are in line with the literature, as previous works also found that the abundance of dominant weed species was reduced in intercrops compared to sole crops (Lagerquist et al., 2025; Namatsheve et al., 2024; Poggio, 2005; Taab et al., 2023). Gaba et al. (2018) reached similar conclusions when comparing a control treatment without crop to a sole winter wheat. The authors hypothesised that dominant weed species needed high amounts of nitrogen to accumulate biomass, and were thus especially affected by reductions in nitrogen availability (Gaba et al., 2018). In our study, barnyard grass was equally dominant with lady's thumb in 2023, and extremely dominant in 2024. As this weed species thrives on nitrogen-rich soils (Bàrberi et al., 2018), the depletion of this resource by oat may have impeded barnyard grass growth, potentially leading to plant mortality. Shading by the service plant may have also contributed to decreasing barnyard grass density by hindering seed germination (Juroszek and Gerhards, 2004). Yet, no effect was found on the density of the two other dominant species, lady's thumb and manyseed goosefoot, even though both of them also need high amounts of mineral nitrogen (Bàrberi et al., 2018). As barnyard grass and oat both belong to the *Poaceae* family, and thus display similar characteristics and requirements, niche overlap might have been more important than between oat and the two

other weed species. Also, it should be noted that the sowing of our trial was delayed at the very end of April in both years of our experiment due to the pedoclimatic conditions, thus favouring the emergence of summer annuals, like barnyard grass. Under normal circumstances, with an earlier sowing date between mid-March and early April, it can be hypothesised that the suppressive effect of oat on barnyard grass may be even more pronounced than our observations. Thus, this effect deserves further investigation under different growing conditions than in our study.

4.2. Inter-row mowing had a limited or no effect on the weed community diversity and composition

Mowing the inter-rows of chickpea reduced weed biomass in both the sole and the intercrop. However, mowing also led to higher weed densities in both cropping treatments in 2023. Cutting down weeds and/or oat in the inter-rows opened the canopy, which may have increased the amount of incident light reaching the soil. This may have in turn promoted weed germination (Juroszek and Gerhards, 2004), thus increasing weed density compared to the unmowed treatment. As weed biomass was not increased by mowing, this suggests that the increase in weed density was mainly comprised of small seedlings. By contrast, there were no such effect of mowing in 2024. As the levels of both oat and weed biomass were on average higher during this trial, the plant residues that were left between the chickpea rows after mowing formed a thick layer, which may have impeded new weed emergence (Campiglia et al., 2010b).

However, mowing the inter-rows of chickpea had a very limited effect on the weed community diversity. This outcome doesn't completely concur with the literature, as previous studies in vineyards found that mowing promoted weed diversity (Guerra et al., 2022, 2021; Kazakou et al., 2016; MacLaren et al., 2019). Still, these studies compared mowing to herbicide use and tillage, and were conducted in perennial cropping systems, in which inter-row mowing was repeated over the growing season and between years. In our study, out of the three diversity indices and the two years of the experiment, a significant difference between treatments was only found once. In 2023, mowing led to a less even weed community in both the sole crop and the intercrop, implying that some of the weed species became more dominant. As no significant increase in the density of lady's thumb, barnyard grass, or manyseed goosefoot was found, this result may be due to a decrease in the abundance of the rarer species (Annexe 7),

which we were not able to put into evidence. Also, in the sole crop, the distribution of weed species in the experimental field may have influenced this result. Indeed, the density of *Setaria pumila* (SETPU on Figure 3.2) was much higher in the mowed sole crop than in the unmowed treatment due to the presence of a patch in one of the plots. This may have contributed to the lower value of evenness caused by mowing in the sole crop, but still doesn't explain our results in the intercrop. Hence, further research is needed to confirm this result. Overall, mowing the inter-rows had no effect on the weed community, either on its diversity, or on the abundance of the dominant species.

4.3. Agronomic implications and prospects for better understanding the effects of mowed service plants on weed communities

Weeds are generally studied for their interference with crop production, but recent works suggest that the impact of weed communities depends on their composition, some of them being less detrimental, or even beneficial (Adeux et al., 2019; MacLaren et al., 2020; Storkey and Neve, 2018). More specifically, it is argued that agronomic practices promoting diverse and even weed communities would prevent the emergence of highly competitive dominant weed species that are difficult to control (MacLaren et al., 2020). The latter was typically the case in our experiment, in which the past practices selected competitive ruderal weed species that were highly detrimental for chickpea production, especially in 2024 (Guy et al., 2025). Yet, introducing oat consistently decreased the abundance of barnyard grass, which is a highly problematic weed in a variety of cropping systems (Shabbir et al., 2019; Zhang et al., 2017). A desirable effect that we did not observe would have been an increase in the weed community evenness. This would have implied that the reduction in barnyard grass had allowed the growth of other, potentially less competitive, weed species. Nevertheless, our experimental fields were not completely adapted to put such effects into evidence, given the high specialisation of the weed community, and the presence of patches across the field creating within-block gradients. Besides, we were not able to analyse the link between weed community diversity and crop production due to the very low yields in 2024 (Guy et al., 2025). Also, the combination of the introduction of oat and inter-row mowing may offer interesting perspectives at the crop succession scale. The decrease in the abundance of barnyard grass due to the presence of oat might in the long-term limit the seedbank replenishment. Mowing may also contribute to this effect by preventing weeds from completing their reproductive

development (Butler et al., 2013; Tipping, 2008). As the seeds of barnyard grass can persist in the soil for several years, such effects would be especially valuable (Bàrberi et al., 2018). Still, several mowing operations must be necessary to effectively limit seed production by weeds. In our study, adding an earlier mowing date during the vegetative phase of chickpea in 2024 did not have an effect on the weed community either, but may have one in the long-term.

Overall, the introduction of mowed oat seems promising for limiting the abundance of highly competitive weeds such as barnyard grass, while mitigating the competition between chickpea and the service plant (Guy et al., 2025). Still, further research is required to confirm these results, linking them to chickpea yield, and explore the long-term effects at the crop succession scale.

5. Conclusion

The findings presented in this study underscore that introducing oat is a relevant strategy for decreasing weed biomass and density compared to the sole chickpea, while limiting the abundance of a noxious weed, barnyard grass. These results suggest that, in addition to reducing the weed pressure, introducing oat may also contribute to shaping a less detrimental weed community by decreasing the abundance of dominant competitive species. Still, a consistent reduction in species richness due to the introduction of oat was also put into evidence. This decrease was at the expense of rare species that were only present in very small numbers in the sole crop. Our study also offers prior knowledge about the short-term effects of inter-row mowing in annual intercropping systems, which rarely affected the weed community structure, but increased its density under low weed pressure. Further research with other weed communities and experimental conditions is required to confirm these findings, and answer the remaining questions about the potential long-term effects at the crop succession scale.

Discussion générale

Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse avaient pour objectif d'explorer la combinaison de deux leviers : *i)* l'introduction d'une plante de services et *ii)* la fauche, pour répondre aux enjeux agronomiques autour de la culture du pois chiche dans des conditions de faible utilisation d'intrants et de travail du sol. Nous avons adopté une approche multi-bioagresseurs, en étudiant les effets de ces deux leviers sur les adventices et l'ascochytose simultanément. En effet, ces bioagresseurs sont les deux principaux facteurs limitant le rendement du pois chiche, en particulier dans le contexte du Grand Ouest français. Nos deux années d'expérimentation plein champ ont été marquées par des conditions climatiques très différentes, ce qui a participé à créer de forts contrastes sur la pression des deux bioagresseurs étudiés. Ainsi, les différentes combinaisons testées ont pu être comparées dans un contexte propice à la production de pois chiche, mais aussi dans une situation où les conditions biotiques étaient particulièrement défavorables à la culture.

1. Influence du choix de l'espèce de plante de services et de la fauche sur la maîtrise des bioagresseurs

1.1. Retour sur les plantes de services testées

L'un des objectifs de ce travail était de déterminer l'influence du choix de l'espèce de plantes de services sur le niveau de contrôle des adventices, de limitation de l'ascochytose et de productivité du pois chiche. Afin d'explorer ces effets, un éventail d'espèces présentant des traits contrastés a été choisi, en utilisant une approche trait-fonction-service (Damour et al., 2014; Dijan-Caporalino and Lavoir, 2024; Ouattara et al., 2023), dans le but de créer différents niveaux de compétition au cours du cycle entre le pois chiche, la plante de services et les adventices.

L'avoine a accumulé une quantité de biomasse et d'azote minérale plus importante que le pois chiche, les autres plantes de services et les adventices dès les premiers stades du cycle (Chapitre 1, Annexe 1). L'avoine a également eu une croissance en hauteur plus rapide que le pois chiche et les autres plantes de services testées, atteignant une hauteur maximale parmi les plus élevées (Annexe 4). L'association pois chiche-avoine a aussi couvert le sol plus rapidement que la culture pure et les autres associations (Annexe 5). Après la fauche, l'avoine a accumulé peu de biomasse en 2023, et n'a pas repoussé en 2024. Au début de la floraison du pois chiche, l'avoine était au stade épiaison et a donc été coupée sous les épis, ce qui explique ces résultats. En revanche, l'avoine a repoussé lorsque les inter-rangs ont été fauchés au stade 10 feuilles du pois chiche en 2024, date à laquelle elle était au stade début montaison (Figure A4-2, Annexe 4).

Le sorgho du Soudan est la seule plante de services ayant atteint une hauteur maximale plus importante que l'avoine, sa croissance ayant augmenté de façon importante à partir de la floraison du pois chiche (Annexe 4). En revanche, son accumulation de biomasse et d'azote minéral a été faible, en particulier pendant le début du cycle cultural (Chapitre 1, Annexe 3). Ce résultat était attendu, compte-tenu de la date de semis de l'association qui était précoce vis-à-vis des préconisations pour cette espèce. Néanmoins, l'accumulation de biomasse par le sorgho a aussi été faible sur toute la suite du cycle, particulièrement en 2024. En conséquence, la dynamique de couverture du sol par l'association pois chiche-sorgho était identique à celle du pois chiche pur (Annexe 5). La réponse du sorgho à la fauche a été très contrastée entre les deux années d'expérimentation. En 2023, son accumulation de biomasse après la fauche

a été rapide, égalant presque en fin de cycle la biomasse du sorgho non fauché (à l'instar de la hauteur). A l'inverse, aucune reprise de croissance n'a été observée en 2024 (Annexe 4).

La féverole a eu une dynamique d'accumulation de biomasse et d'azote intermédiaire entre celle du sorgho et de l'avoine pendant la phase d'installation, qui est restée peu élevée sur la suite du cycle (Chapitre 1, Annexe 3). L'évolution de la couverture du sol par le couvert dans l'association pois chiche-féverole était aussi analogue à celle du pois chiche pur (Annexe 5). La féverole n'a pas repoussé après la fauche. Pendant les deux années d'essai, des attaques de sitones ont été observées sur la féverole, mais n'ont pas semblé avoir été nuisibles pour sa croissance.

Le trèfle d'Alexandrie a accumulé une plus grande quantité de biomasse et de façon plus précoce dans le cycle en 2024 qu'en 2023. Cette différence entre années peut s'expliquer par les conditions climatiques plus sèches de la campagne 2023, notamment lors du semis. Le manque de précipitations a eu pour conséquence de retarder la levée des espèces à petites graines, à savoir le trèfle et la moutarde. A l'instar de la féverole, la présence du trèfle d'Alexandrie n'a pas eu d'effet sur la couverture du sol par rapport au pois chiche pur (Chapitre 1, Annexe 5).

Dans nos deux années d'expérimentation, la moutarde blanche a accumulé une quantité de biomasse bien en-dessous des potentiels de production rapportés dans la littérature (Elhakeem et al., 2021; Wendling et al., 2016). Ce résultat est dû à des attaques d'altises qui ont eu lieu dès la levée, pénalisant très fortement la croissance de la moutarde pour toute la suite du cycle. Pour cette raison, nous avons choisi de ne pas l'intégrer dans les analyses des chapitres de la thèse.

Ainsi, malgré la diversité des espèces de plantes de services testées, seule l'avoine a permis d'accumuler une quantité de biomasse significative permettant d'aboutir à un niveau de compétition élevée, tandis que les autres espèces ont toutes été largement dominées soit par le pois chiche, soit par les adventices. Les résultats que nous avons obtenu avec la moutarde montrent que dans un contexte de faible utilisation d'intrants, la sensibilité des plantes de services aux bioagresseurs, mais aussi aux contraintes abiotiques, est un critère majeur pour le choix de l'espèce.

1.2. Effets sur les adventices

1.2.1. Réduction de l'accumulation de biomasse

Dans notre étude, nous avons clairement montré que le choix de l'espèce de plante de services, la fauche et leur interaction conditionnaient fortement le niveau des services obtenus (Chapitre 1). En effet, seule l'avoine a permis de limiter la biomasse d'adventices par rapport au pois chiche pur, contrairement aux autres espèces qui n'ont pas eu d'effet. De plus, dans les modalités où la biomasse d'adventices était très élevée, faucher l'inter-rang du pois chiche a permis de la diminuer. Parmi les plantes de services testées, l'avoine est l'espèce ayant eu la plus forte compétitivité pour l'acquisition des ressources dès le début du cycle, accumulant notamment la plus grande quantité de biomasse (Annexe 3). A l'inverse, des espèces dont la production de biomasse a augmenté plus tardivement dans le cycle, comme le sorgho en 2023, ou le trèfle d'Alexandrie en 2024, n'ont eu aucun effet sur les adventices. Ainsi, lorsque la croissance et la compétitivité de la plante de services sont faibles en début de cycle, une accumulation de biomasse plus tardive ne permet pas de limiter celle des adventices. Par conséquent, nos résultats montrent que l'**espèce de plante de services associée au pois chiche doit impérativement être très compétitive pour l'acquisition des ressources dès le début du cycle** pour diminuer la biomasse d'adventices par rapport à la culture pure. D'après nos résultats, l'avoine de printemps semble être une espèce candidate particulièrement pertinente. De précédents travaux ont également documenté l'effet suppressif de l'introduction d'une céréale par rapport à une culture pure de légumineuse à graines (Bedoussac et al., 2015; Carton et al., 2020; Corre-Hellou et al., 2011; Hauggaard-Nielsen et al., 2001). A l'inverse, les autres espèces testées, dont le trèfle et la féverole, se sont avérées inefficaces pour réguler les adventices. Ainsi, bien que les légumineuses soient des espèces clefs régulièrement utilisées comme plantes de services (Bousselin et al., 2024; Hiltbrunner et al., 2007; Lorin et al., 2015; Verret et al., 2017b), nos résultats montrent qu'elles ne sont pas adaptées pour contrôler les adventices lorsque la culture principale est une espèce peu compétitive pour l'acquisition des ressources (Cheriere et al., 2020; Gu et al., 2021).

La comparaison du pois chiche cultivé pur ou en association avec l'avoine a également mis en évidence que l'introduction de la céréale avait engendré une diminution de la densité d'adventices, dans une moindre proportion que la réduction de leur biomasse. La plus faible densité d'adventices dans l'association par rapport au pois chiche pur suggère que la présence

de la céréale a perturbé leur germination. La rapidité de la croissance en hauteur de l'avoine (Annexe 4) et de la couverture du sol dans l'association (Annexe 5) a pu diminuer la quantité de lumière parvenant jusqu'au sol, nécessaire à la germination d'une grande majorité d'espèces d'adventices (Juroszek and Gerhards, 2004). En revanche, la fauche a engendré une augmentation de la densité d'adventices en 2023. En coupant les plantes dans les inter-rangs, la fauche a créé une ouverture dans le couvert, ce qui a pu augmenter le rayonnement incident au niveau du sol. En 2024, les grandes quantités de biomasse d'avoine et d'adventices qui ont été fauchées dans les inter-rangs ont formé un mulch épais, ce qui peut expliquer pourquoi aucune augmentation de la densité d'adventices n'a été observée cette année-là.

1.2.2. Effets sur la structure de la communauté

Dans notre étude, la comparaison du pois chiche pur et de l'association pois chiche-avoine a mis en évidence une diminution de la richesse spécifique de la communauté adventice en présence de la plante de services. Néanmoins, contrairement à notre hypothèse initiale, la fauche n'a pas eu d'effet sur le niveau de diversité de la communauté. Ces résultats permettent d'apporter un premier socle de connaissances sur l'effet de l'introduction d'une plante de services compétitive et de la fauche sur la communauté adventice. Ces résultats sont toutefois à analyser à la lumière des caractéristiques des communautés que nous avons étudiées. Sur les parcelles choisies pour nos expérimentations, la rotation culturale habituellement pratiquée consistait en l'alternance de blé d'hiver et de maïs. Ces cultures faisaient l'objet de pratiques agricoles intensives, impliquant un travail du sol fréquent, ainsi qu'un usage régulier de fertilisants et d'herbicides. Ce type de pratiques constituent des filtres agronomiques à forte valeur de sélection, aboutissant à des communautés d'adventices spécialisées, peu diversifiées et constituées d'espèces compétitives capables de survivre à ces perturbations intenses (Hickman et al., 2025; MacLaren et al., 2020). Nos résultats montrent bien que les communautés adventices que nous avons étudiées correspondaient à ces critères, surtout en 2024, où le panic-pied-de-coq (*Echinochloa crus-galli*) était très fortement dominant. Pour cette raison, nous n'avons pas pu étudier l'éventuel effet de sélection de traits liés à la tolérance à la fauche parmi les adventices, comme nous l'avions initialement supposé. Par ailleurs, la concentration de certaines espèces d'adventices à quelques endroits de la parcelle, et la présence de gradients à l'intérieur des blocs expérimentaux, a pu limiter la mise en évidence de différences significatives entre nos modalités. Il est toutefois possible que la fauche n'ait pas d'effet sur les communautés végétales sur le court terme, comme le

suggèrent nos résultats. Ces derniers restent toutefois à confirmer sur d'autres types de communautés et dans des conditions de production différentes des nôtres. En complément, mobiliser des méthodes employées en écologie fonctionnelle pourrait permettre d'identifier si l'insertion d'une plante de services et la fauche sélectionnent certains traits parmi les adventices présentes (Bàrberi et al., 2018; Gaba et al., 2014; Garnier and Navas, 2012).

Nos résultats ont aussi mis en évidence que l'introduction de l'avoine diminuait la densité de *Echinochloa crus-galli* par rapport à la culture pure. Cet effet est prometteur, car cette espèce d'adventice estivale compétitive était dominante au sein des communautés étudiées, et est reconnue comme étant particulièrement limitante pour la production agricole (Mohler et al., 2021; Shabbir et al., 2019; Zhang et al., 2017). Par ailleurs, de précédents travaux suggèrent que les communautés adventices diversifiés et équilibrées sont moins délétères pour la production agricole que les communautés dominées par quelques espèces compétitives (Adeux et al., 2019; MacLaren et al., 2020). Dans notre étude, nous n'avons pas pu mettre en relation la structure de la communauté adventice avec la production de pois chiche à cause des rendements très faibles de l'année 2024. Il pourrait être intéressant d'explorer cette corrélation pour identifier si les leviers agronomiques testées sélectionnent une communauté adventice moins délétère pour l'établissement du rendement que celle d'une culture pure sans fauche.

1.3. Limitation de la sévérité de l'ascochytose et interactions entre bioagresseurs

Nos travaux ont également mis en évidence qu'en cas de pression ascochytose élevée, introduire de l'avoine ou faucher l'inter-rang du pois chiche permettaient de limiter la sévérité de la maladie. Nous avons aussi clairement montré que dans l'association avec l'avoine, la sévérité des symptômes était fortement diminuée dès les premiers nœuds de l'axe principal. La céréale a ainsi limité la progression verticale de la maladie vers la partie supérieure de la plante, où se trouvent les gousses (Fernández-Aparicio et al., 2010). Cet enjeu est crucial pour les pois chiches Kabuli puisque les graines sont majoritairement consommées entières, et ne doivent pas comporter de tâches au risque d'un déclassement des lots (Terres Inovia, 2025).

1.3.1. Mécanismes potentiels liés à la plante de services

Bien que les mécanismes impliqués n'aient pas pu être directement identifiés et explicités, nos résultats suggèrent que la diminution de la sévérité de la maladie en présence d'avoine pouvait être liée à son effet sur le microclimat du couvert, sur la dispersion des spores d'*Ascochyta rabiei* et sur la biomasse de la plante hôte (Fernández-Aparicio et al., 2010; Moreau et al., 2025; Richard et al., 2013; Schoeny et al., 2010; Tivoli et al., 2013). En 2024, le pois chiche pur et les autres associations étaient fortement dominés par les adventices. Leur production de biomasse élevée, la diversité des architectures aériennes des espèces présentes et l'impossibilité de contrôler leur arrangement spatial a créé un couvert dense et homogène. A l'inverse, dans l'association pois chiche-avoine, le couvert était dominé par la plante de services, et la biomasse d'adventices était plus faible que dans les autres modalités. De plus, bien que l'avoine ait produit une biomasse élevée, son port dressé et sa disposition en rang au milieu des inter-rangs du pois chiche ont pu favoriser la circulation de l'air au sein du couvert. Les symptômes des maladies causées par des champignons aériens, comme l'ascochytose, sont souvent aggravées dans certaines conditions d'humidité et de température en raison de la biologie de ce type d'agents pathogènes (Tivoli and Banniza, 2007). Pour *Ascochyta rabiei,* à l'origine de l'ascochytose du pois chiche, les conditions optimales pour la germination des spores et la croissance mycélienne sont une température de 20°C et une période d'humidité des feuilles de 17h (Trapero-Casas and Kaiser, 2007, 1992). L'introduction de l'avoine a pu engendrer des modifications du microclimat par rapport à la

culture pure, augmentant la température et diminuant la durée d'humectation des feuilles, comme rapporté par Schoeny et al. (2010) sur des associations blé-pois. Ainsi, le microclimat du couvert pour l'association pois chiche-avoine était certainement moins favorable au développement d'*Ascochyta rabiei* que celui de la culture pure et des autres associations.

Dans le cas des maladies foliaires pour lesquelles la dispersion des spores se fait par effet splash, il a aussi été démontré que la présence d'une plante non hôte au milieu de l'inter-rang pouvait perturber ce processus en créant un obstacle entre les rangs de plante hôte (Schoeny et al., 2010; Vidal et al., 2017). Ainsi, dans notre étude, la présence de l'avoine au milieu de l'inter-rang a pu aussi limiter la dispersion des conidies d'*Ascochyta rabiei* entre rangs de pois chiche. De plus, l'introduction de l'avoine a mené à une diminution de la biomasse de pois chiche en réponse à la compétition interspécifique, ce qui a donc aussi eu pour effet de diminuer la quantité de tissus hôte. Ainsi, la dilution de la biomasse du pois chiche parmi celle de l'avoine non hôte, a pu contribuer à la limitation de la sévérité de l'ascochytose dans cette association.

Un autre mécanisme pouvant contribuer à diminuer la sévérité des symptômes est la modification de l'architecture aérienne de la plante hôte (Boudreau, 2013). En particulier, un allongement des entre-nœuds en réponse à la compétition a pour effet d'augmenter la distance entre les lésions et les tissus sains situés sur les étages supérieurs, et peut ainsi perturber la dispersion verticale du pathogène (Fernández-Aparicio et al., 2010; Le May et al., 2009). Cependant, l'introduction de l'avoine n'a pas engendré de modification de la longueur des entre-nœuds par rapport au pois chiche pur dans notre essai de 2024. Dans notre étude, ce mécanisme ne devait donc pas faire partie des facteurs explicatifs de la sévérité de l'ascochytose, contrairement à notre hypothèse initiale.

1.3.2. Mécanismes potentiels liés à la fauche

L'effet de la fauche que nous avons observé dans certaines modalités pourrait aussi être lié à une modification du microclimat (Tivoli et al., 2013). En effet, la réduction de la sévérité de l'ascochytose par la fauche a été observée dans toutes les modalités dans lesquelles la biomasse d'adventices était initialement très élevée. Dans ces modalités, faucher les inter-rangs a certainement aéré le couvert et réduit le taux d'humidité par rapport aux traitements sans fauche, diminuant ainsi la sévérité de la maladie.

Ainsi, un résultat majeur de nos travaux est la mise en évidence d'un lien entre les deux bioagresseurs : **la sévérité de l'ascochytose augmente avec la biomasse d'adventices**. Ce

résultat est important, car cet effet de synergie entre bioagresseurs implique que la mobilisation d'un levier agissant sur l'un, peut aussi affecter l'autre. Ainsi, tirer parti de ces interactions peut permettre d'améliorer la gestion de plusieurs bioagresseurs à la fois, tout en limitant l'usage de pesticides (Moreau et al., 2025).

1.3.3. Influence des hôtes alternatifs de *Ascochyta rabiei*

Par ailleurs, bien que *Ascochyta rabiei* ne soit pathogène que pour le pois chiche, il peut aussi infecter d'autres espèces, se multiplier et se conserver sur leurs tissus (Pande et al., 2005; Singh et al., 2022). En particulier, plusieurs travaux ont rapporté une production importante d'organes de fructification et de spores par le champignon sur d'autres espèces de légumineuses à graines comme le pois, la lentille, le haricot et la féverole (Hernandez-Bello et al., 2006; Khan et al., 1999; Trapero-Casas and Kaiser, 2009). Il est donc possible que parmi les plantes de services que nous avons testées, les légumineuses aient contribué à multiplier l'inoculum, en particulier la féverole. Certaines adventices ont pu avoir le même effet, qui devait toutefois être limité car les espèces concernées, notamment le chénopode blanc (*Chenopodium album*) ou la morelle noire (*Solanum nigrum*), n'étaient présentes qu'en faibles densité et biomasse (Annexe 7; Trapero-Casas and Kaiser, 2009). Ainsi, introduire une plante de services de la même famille botanique que la culture principale peut engendrer un risque épidémique si elles peuvent être infectées par les mêmes agents pathogènes.

D'après les travaux réalisés dans cette thèse, la plante de services à associer au pois chiche doit donc impérativement être très compétitive pour l'acquisition des ressources dès la phase d'installation afin de maîtriser les adventices et l'ascochytose simultanément. En revanche, cette forte compétitivité précoce, non maîtrisé, a généré un effet indésirable sur la productivité du pois chiche : la biomasse et le rendement ont été diminués par la présence de l'avoine. L'antagonisme entre productivité de la culture principale et gestion des adventices a aussi été rapporté dans d'autres travaux sur des associations céréale-légumineuse à graines (Carton et al., 2020; Cheriere et al., 2020). Dans cette situation, il est donc impératif de disposer d'un levier supplémentaire pour atténuer la compétition.

2. Faucher la plante de services pour réorienter les rapports de dominance au cours du cycle

2.1. Importance clef du déclenchement de la fauche

Dans cette étude, nous avons fait le choix de raisonner la date de fauche, en première approche, en fonction de la phénologie du pois chiche. Au regard de la littérature disponible sur cette espèce, nous avons choisi de placer la fauche au début de la floraison, en considérant qu'à partir de ce stade, la disponibilité des ressources était critique pour l'élaboration du rendement. Ainsi, atténuer la compétition exercée par la plante de services et réorienter le rapport de dominance au profit du pois chiche auraient pu permettre de limiter la perte de productivité.

Nous avons montré que faucher l'inter-rang du pois chiche au début de la floraison permettait bien d'atténuer la compétition exercée par les plantes de services et les adventices. En situation favorable pour la production de pois chiche, la réduction de la perte de rendement par la fauche a été la plus importante pour la plante de services la plus compétitive (avoine). Cependant, l'atténuation de la compétition, trop tardive, n'a pas été suffisante pour limiter la réduction du nombre de ramifications et de gousses, ce qui a mené à une forte chute de rendement par rapport au pois chiche pur en 2023. Ainsi, en 2024, ajouter une fauche au stade 10 feuilles dans l'association pois chiche-avoine, soit 3 semaines avant le début de la floraison, a permis d'obtenir une biomasse de pois chiche en moyenne plus élevée que dans la modalité sans fauche ou avec une seule fauche plus tardive. A l'échelle de la plante, cette fauche précoce additionnelle a mené à une multiplication par deux du nombre de ramifications

primaires et de leur production de gousses, par rapport à la modalité fauchée une seule fois et à la culture pure non fauchée.

Un résultat majeur de nos travaux est donc que **le moment de déclenchement de la fauche est un paramètre clef** à prendre en compte pour réorienter suffisamment tôt les rapports de dominance en faveur du pois chiche lorsque la plante de services est très compétitive. Dans cette situation, **le déclenchement de la fauche au début de la floraison du pois chiche était trop tardif**. Ajouter une fauche supplémentaire pendant la phase végétative a toutefois permis de limiter davantage la compétition interspécifique. Nos résultats concordent ainsi avec ceux de Thorsted et al. (2006), dont l'étude sur des associations blé d'hiver-trèfle blanc a également mis en évidence l'importance clef de la date de fauche pour orienter les rapports de compétition.

2.2. Rôle de la plasticité de l'architecture aérienne de la culture principale

Nos résultats ont mis en évidence la forte plasticité de l'architecture aérienne du pois chiche, en particulier du schéma de ramification, en réponse à l'introduction de l'avoine et à la fauche. Une diminution du nombre de ramifications a notamment été observée en réponse à la compétition interspécifique, ce qui correspond aux résultats rapportés par Heineck et al. (2025) dans leur récente étude sur des associations pois chiche-colza. Dans nos associations pois chiche-avoine fauchées, la plasticité du pois chiche a toutefois permis de partiellement compenser les effets négatifs de la compétition précoce exercée par la plante de services. Certains travaux ont mis en avant l'intérêt de la plasticité dans les associations de cultures (Zhu et al., 2015), tandis que d'autres suggèrent qu'il pourrait être plus intéressant de sélectionner des variétés dont l'architecture aérienne serait moins plastique (Gong et al., 2015; Li et al., 2020; Wu et al., 2017). Dans le cas des associations incluant une plante de services compétitive fauchée, nos résultats indiquent que cette plasticité est un avantage, et permet de tirer parti des situations d'atténuation de la compétition.

Par ailleurs, plusieurs travaux suggèrent qu'une réduction de nombre de ramifications du pois chiche, en particulier secondaires et tertiaires, serait intéressant pour faciliter la récolte mécanique et améliorer le rendement en ne gardant que les ramifications produisant le plus de gousses matures (Basso et al., 2024; Gaur et al., 2008; Siddique et al., 1984; Siddique and Sedgley, 1985; Singh et al., 2019). D'autres travaux se sont intéressés à l'atténuation voire à

la suppression du caractère indéterminé de la croissance des variétés de pois chiche cultivées, afin d'éviter la production de biomasse végétative excessive qui peut survenir en cas de climat humide (Ambika et al., 2021; Gaur et al., 2008; Shamsuzzaman et al., 2002). Ces idéotypes correspondent donc à un pois chiche dont la plasticité de l'architecture aérienne serait moins marquée que les variétés actuelles, *a priori* donc moins adapté aux associations avec une plante de services fauchée. Une autre façon d'atténuer la production végétative excessive du pois chiche, sans modifier définitivement sa capacité de ramification et sa croissance indéterminée, pourrait être de mobiliser des leviers agronomiques. En particulier, la diminution de la quantité de ressources disponibles pour le pois chiche liée à la présence d'une plante de services compétitive en fin cycle pourrait limiter le risque de reprise de végétation. Dans notre étude, les conditions sèches de 2023, et la très forte pression ascochytose de 2024, n'ont pas permis de mesurer les différences de reprise de végétation du pois chiche en fin de cycle entre modalités.

2.3. Quelle mise en œuvre opérationnelle de la régulation de la plante de services ?

2.3.1. Règle de décision pour déclencher la fauche

Dans notre étude, nous avons été amenés à faire certains choix et à ne tester qu'une seule façon d'intégrer la fauche des inter-rangs dans nos associations. La règle de décision choisie, basée sur la phénologie du pois chiche, s'est avérée manquer de flexibilité pour s'adapter à la variabilité des conditions du milieu. En 2024, les précipitations régulières ont en particulier favorisé la croissance de l'avoine, dont la biomasse était élevée au moment de la fauche par rapport à celle du pois chiche. Dans cette situation, le fait de se baser sur la phénologie du pois chiche a engendré un déclenchement de la fauche trop tardif par rapport à la forte production de biomasse par l'avoine. Baser la date de fauche sur la seule phénologie du pois chiche ne permet pas de s'adapter aux fluctuations d'intensité de la compétition exercée par la plante de services.

Par ailleurs, le déclenchement de la fauche est toujours survenu alors que l'avoine avait dépassé le stade épiaison, compromettant ainsi sa repousse (Meiss et al., 2008). Dans notre expérimentation, les conditions n'étaient donc pas réunies pour atténuer la compétition interspécifique. Une piste de réflexion pour améliorer ce levier, et le rendre plus adapté à la variabilité des conditions du milieu, serait de raisonner le déclenchement de la fauche en

fonction de l'intensité de la compétition entre la culture principale et la plante de services. Un indicateur simple, basé par exemple sur une différence de hauteur entre le pois chiche et l'avoine à ne pas dépasser, pourrait permettre d'objectiver ce rapport de dominance et donc d'aider au déclenchement de la fauche. Dans nos deux années d'expérimentation, l'avoine mesurait 30 à 35 cm de plus en moyenne que le pois chiche avant qu'elle ne soit fauchée au début de la floraison, témoignant de sa forte dominance (Annexe 4). En 2023, la biomasse du pois chiche dans l'association avec l'avoine était déjà 39% inférieure à celle de la culture pure dès le stade 10 feuilles, date à laquelle la céréale était en moyenne 14 cm plus haute. En 2024, au même stade, la biomasse du pois chiche pur était faible en raison de la concurrence des adventices et n'était donc pas différente de celle du pois chiche associé à l'avoine, qui était déjà 21 cm plus haute. D'après ces observations, déclencher la première fauche lorsque la hauteur de l'avoine dépasse celle du pois chiche de 10 cm environ pourrait permettre d'aboutir à un compromis satisfaisant pour réorienter suffisamment tôt les rapports de dominance en faveur du pois chiche, tout en ayant laissé suffisamment de temps de croissance à la plante de services. Ainsi, le déclenchement de la première fauche pourrait être raisonné de façon simple et objective, dans des conditions climatiques variées.

2.3.2. Fréquence et hauteur de coupe

D'autres pistes d'amélioration ou de réflexion sur la mise en œuvre de la fauche peuvent être envisagées par rapport à sa fréquence et à la hauteur de coupe. Dans le cas où une première fauche précoce a été effectuée, une règle de décision différente pour la suivante peut être envisagée. Dans notre étude, l'avoine mesurait 15 cm de plus que le pois chiche lorsqu'elle a été fauchée pour la seconde fois au début de la floraison (Annexe 4, Figure A4-2). Dans cette situation, conserver une valeur seuil de différence de hauteur de 10 cm aurait pu être adapté, et aurait déclenché la seconde fauche seulement un peu plus tôt que sur la base de la phénologie du pois chiche. Néanmoins, cet indicateur est aussi dépendant de la hauteur de coupe de la plante de services, et de sa capacité de repousse. En effet, plus la hauteur de coupe est faible, plus la capacité de repousse des plantes est diminuée (Andreasen et al., 2002; Butler et al., 2013). Il pourrait être intéressant d'exploiter ce paramètre et de varier les hauteurs de coupe entre les différentes dates de fauche. Par exemple, faucher les inter-rangs une première fois à une hauteur proche de 10 cm permettrait de favoriser la repousse de la plante de services, et de potentiellement continuer à limiter la pression des adventices et de l'ascochytose. Les fauches suivantes pourraient être faites à une hauteur inférieure, 5 cm par

exemple, soit la valeur la plus faible possible en termes de faisabilité. Ainsi, cela permettrait de limiter plus fortement la repousse de l'avoine et des adventices à l'approche du début du développement reproducteur du pois chiche. Il pourrait aussi être pertinent d'ajouter une fauche plus tardivement dans le cycle en fonction du développement des adventices, ce qui permettrait de les couper avant qu'elles n'arrivent à grenaison (Tidemann et al., 2020) et de limiter la compétition exercée sur le pois chiche pendant le remplissage des graines.

2.3.3. Disponibilité en matériel agricole

Un autre questionnement qui émerge lors de la réflexion sur la mise en œuvre de la fauche de l'inter-rang est la disponibilité en matériel agricole adapté à cette opération. Les faucheuses ou tondeuses inter-rang sont courantes et largement utilisées dans les systèmes de culture pérennes, mais il existe encore peu de solutions disponibles pour les cultures annuelles. En effet, les contraintes qui s'exercent dans ce type de systèmes, notamment liées à la faible largeur de l'inter-rang et au degré de précision nécessaire, rendent complexes la mise au point de tels matériels et la mise en œuvre de telles opérations culturales.

Néanmoins, des essais ont été récemment menés sur un prototype de faucheuse inter-rang par Arvalis en partenariat avec l'entreprise Eco-Mulch, dans le cadre du projet GRAAL (ARVALIS, 2021). En France, une autre faucheuse inter-rang a aussi été développée par le constructeur Bionalan, conjointement avec les équipes de la plateforme CAS-SYS de l'INRAE. En Amérique du Nord, l'entreprise R-Tech commercialise une faucheuse expérimentale inter-rang pour les cultures annuelles, qui fait l'objet de travaux sur des systèmes de culture sans labour pour produire du soja (Rowland et al., 2023), ou des haricots noirs (Darby and Krezinski, 2024). Ces travaux témoignent de l'intérêt des constructeurs agricoles, des instituts techniques et des centres de recherche pour développer ce type de solutions, bien qu'elles ne soient encore qu'au stade de l'expérimentation. Toutefois, la généralisation de l'usage de cette technique reste conditionnée au coût d'acquisition de ces machines, dont le développement et la commercialisation se font pour le moment sur mesure. Leur mobilisation dans une diversité de systèmes de culture pourrait encourager leur déploiement à une plus grande échelle. Il faudrait pour cela parvenir à les utiliser dans une plus grande diversité de situations *via* une plus grande standardisation des inter-rangs et à leur intégration dans les itinéraires techniques.

2.3.4. Combinaison de la fauche avec d'autres techniques de régulation mécanique

Nous avons fait le choix dans cette thèse de nous concentrer uniquement sur la fauche en tant que technique de régulation, mais cette stratégie pourrait être complétée en la combinant à d'autres types de régulation mécanique. En début de cycle, la fauche semble être l'option la plus adaptée, car combinée à un choix d'espèce opportun, elle permet d'avoir une repousse de la plante de services si elle est réalisée suffisamment tôt, et peut être modulée en variant la hauteur de coupe et la fréquence. La fauche a aussi l'avantage de laisser des résidus formant un mulch dans l'inter-rang pouvant réduire la germination des adventices (Campiglia et al., 2010b; Teasdale and Mohler, 2000), tandis qu'une destruction mécanique avec travail du sol peut, à l'inverse, déclencher de nouvelles levées (Batlla and Benech-Arnold, 2014; Schutte et al., 2014). En revanche, avant la fermeture de l'inter-rang par le pois chiche, il pourrait être intéressant d'intégrer une technique de régulation mécanique qui permettrait d'empêcher, ou de fortement réduire, la repousse de la plante de services et des adventices. Ainsi, cela permettrait de réorienter fortement les rapports de dominance en faveur du pois chiche pour la suite du cycle, avant que la fermeture du couvert complexifie ou empêche de nouvelles interventions. Une technique de mulching impliquant un léger travail du sol aurait l'avantage de détruire la végétation. Une autre option intéressante qui ne mobilise pas de travail du sol pourrait résider dans l'utilisation de rouleaux inter-rang, de type rolofaca, qui ont pour effets d'arrêter la croissance des plantes en pinçant les tiges, et de coucher le couvert. De nombreuses études se sont intéressées à ces outils pour la gestion de plantes de services dans des systèmes viticoles (Garcia et al., 2024), légumiers (Canali et al., 2013; Navarro-Miró et al., 2019), et de grandes cultures (Altieri et al., 2011; Mirsky et al., 2011). Le couvert couché en inter-rang peut contribuer à la gestion des adventices en limitant leur densité (Alonso-Ayuso et al., 2020; Mirsky et al., 2011) et leur biomasse (Altieri et al., 2011; Canali et al., 2013; Garcia et al., 2024). En revanche, l'une des principales difficultés associées à l'utilisation de rouleaux est la variabilité de leur efficacité pour arrêter la croissance du couvert, qui dépend des espèces et du stade phénologique auquel elles sont détruites (Alonso-Ayuso et al., 2020; Garcia et al., 2024; Mirsky et al., 2011).

3. Vers de nouvelles façons de concevoir et d'évaluer les associations de cultures

3.1. Flexibilité apportée par la fauche dans la conception des associations et leur gestion au cours du cycle

Traditionnellement, l'orientation des rapports de dominance au sein des associations est fortement conditionnée par les décisions prises lors de leur implantation. Le choix des espèces associées, leur arrangement spatio-temporel et les densités de semis relatives sont alors des critères cruciaux qui influencent fortement les interactions de compétition au sein de l'association (Bedoussac et al., 2015; Cheriere et al., 2020; Dong et al., 2018; Hauggaard-Nielsen et al., 2006). Un défaut de cette approche réside dans la difficulté à réorienter les rapports de dominance au cours du cycle. Ainsi, leur succès dépend très largement de choix faits en amont du semis, mais aussi des conditions biotiques et abiotiques lors de la croissance, c'est-à-dire des facteurs extérieurs difficilement prévisibles et contrôlables, d'autant plus dans un contexte de changement climatique. Un levier mobilisable en cours de cycle qui a été largement documenté est la fertilisation azotée. Cependant, les études menées sur ce sujet, principalement sur des associations céréales-légumineuses à graines, ont montré que la fertilisation ne réorientait le rapport de dominance qu'en faveur de la céréale, et menait donc à une diminution du rendement de la légumineuse à graines par rapport aux traitements non fertilisés (Bedoussac and Justes, 2010a, 2010b; Corre-Hellou et al., 2007; Ghaley et al., 2005; Naudin et al., 2012; Yu et al., 2016). Ainsi, les légumineuses à graines, peu compétitives pour l'acquisition des ressources, se retrouvent souvent dominées par l'espèce à laquelle elles sont associées (Banik et al., 2006; Carton et al., 2020; Cheriere et al., 2020; Hauggaard-Nielsen et al., 2001), ou bien mélangées à des espèces peu compétitives ne permettant pas de limiter efficacement le développement des adventices (Cheriere et al., 2020; Hauggaard-Nielsen et al., 2012).

En revanche, un levier comme la fauche est intéressant car il permet d'intervenir au cours du cycle et de réorienter ponctuellement les rapports de dominance en faveur de la culture de vente. L'implémentation d'un tel levier impose toutefois de repenser la façon dont les associations sont classiquement conçues. En effet, l'utilisation de la fauche impose implicitement l'introduction d'une plante de services, plutôt qu'une autre espèce récoltée, et un arrangement spatial en rangs alternés. Un avantage de la fauche est que la maximisation

de la complémentarité entre espèces associées, bien qu'elle soit traditionnellement un avantage, devient moins centrale et rend le choix de l'espèce à associer moins complexe. Dans le cas des cultures peu compétitives comme les légumineuses à graines, il est ainsi possible de les associer à des espèces très compétitives, qui ont l'avantage de faire efficacement concurrence aux adventices. L'inclusion du levier de fauche ajoute aussi un nouveau critère de sélection de l'espèce de plante de services, sa capacité à repousser ou non après la fauche.

Ainsi, dans des systèmes de culture agroécologiques, sobres en pesticides et en travail du sol, au sein desquels la maîtrise des adventices constitue un enjeu central, la mise en œuvre combinée du levier de fauche ouvre de nouvelles perspectives pour la production de cultures peu compétitives vis-à-vis des adventices.

3.2. Repenser les méthodes d'évaluation des performances des associations

Dans une large majorité des travaux menés sur des associations incluant des plantes de services, la culture principale est une espèce compétitive pour l'acquisition des ressources, comme le blé (Hiltbrunner et al., 2007; Thorsted et al., 2006; Verret et al., 2017b), le maïs (Amossé et al., 2014; Verret et al., 2017b) ou le colza (Bousselin et al., 2024; Lorin et al., 2015; Verret et al., 2017a). Cependant, peu de travaux ont envisagé des associations où la culture principale est peu compétitive, comme les légumineuses à graines, en particulier dans des conditions contraignantes où le recours aux intrants et au travail du sol est limité. Dans ce type de contexte, évaluer la performance agronomique de l'association *via* le rendement annuel de la légumineuse, déjà variable en monoculture, n'est probablement pas la meilleure approche. Du fait de la difficulté à limiter la pression des bioagresseurs dans un tel contexte, d'autant plus dans des conditions d'aléas climatiques croissants, évaluer la capacité de ces associations à fournir un bouquet de services écosystémiques sur un pas de temps pluriannuel semble être plus opportun.

En effet, un bénéfice clef des associations de cultures réside dans leur capacité à stabiliser la production en cas de conditions adverses, plutôt que d'augmenter le rendement lorsque les conditions sont déjà favorables (Raseduzzaman and Jensen, 2017). Dans cette optique, étudier la régulation de plusieurs bioagresseurs, dans des conditions favorables ou non à la culture, permet de mieux mettre en avant la plus-value de l'introduction d'une plante de services.

Néanmoins, les différents services visés sont encore souvent étudiés séparément, ce qui ne permet pas d'explorer leurs potentiels synergies ou antagonismes (Carton et al., 2020; Cheriere et al., 2020; Corre-Hellou et al., 2011; Couëdel et al., 2019; Fernández-Aparicio et al., 2010; Moreau et al., 2025; Schoeny et al., 2010). Par exemple, les quelques travaux menés jusqu'ici sur les bioagresseurs du pois chiche en association ont soit étudié les adventices, soit l'ascochytose (Banik et al., 2006; Zhou et al., 2022). Pourtant, nous avons bien montré dans cette thèse l'existence d'interactions entre ces deux bioagresseurs, ainsi que l'influence des conditions abiotiques. Dans nos travaux, l'année 2023 était très favorable à la culture du pois chiche, avec une faible pression adventice et ascochytose. En se basant uniquement sur les résultats obtenus dans ce type de conditions, l'introduction d'une plante de services fauchée ne paraît pas nécessaire, voire désavantageuse, si elle engendre une perte de rendement. Cependant, les conditions défavorables de l'année 2024, lors de laquelle le pois chiche pur n'a produit aucun rendement, souligne la forte variabilité qui peut survenir entre années, et l'intérêt d'avoir des leviers permettant d'atténuer son effet. Cette forte variabilité interannuelle est notamment liée au contexte très contraint dans lequel se plaçait notre étude, où l'usage d'intrants et le travail du sol étaient limités. Ainsi, dans ce type de contexte, il peut être nécessaire de repenser la notion même de performance des associations. Au-delà de valoriser leur multi-performance à l'échelle annuelle, il semble tout aussi important de valoriser leur robustesse sur le long terme, en mettant en avant leur capacité à limiter la variabilité interannuelle.

4. Perspectives de recherche

Nos travaux ont permis de produire une première base de connaissances sur les services rendus par l'introduction d'une plante de services fauchée associée au pois chiche, dans un contexte de faible utilisation d'intrants et de travail du sol. Ils ouvrent la voie à d'autres recherches qui pourraient être menées pour confirmer et approfondir nos résultats.

La mise en perspective de nos résultats a notamment fait émerger des pistes d'amélioration de la stratégie de fauche concernant sa mise en œuvre opérationnelle, pour laquelle il est possible de faire varier plusieurs paramètres (déclenchement, fréquence et hauteur de coupe). En particulier, l'utilisation d'un indicateur basé sur une différence de hauteur entre le pois chiche et la plante de services pourrait permettre une plus grande adaptabilité quant au déclenchement de la fauche vis-à-vis de la variabilité des conditions du milieu. Pour vérifier cette hypothèse, il pourrait être intéressant de mettre à l'épreuve cet indicateur dans un réseau de parcelles agricoles afin d'explorer une large gamme de contextes de production et de conditions du milieu. Ce dispositif pourrait également permettre d'explorer d'autres types de régulation mécanique en complément de la fauche, et d'évaluer les performances d'associations pois chiche-avoine fauchées de façon plus proche de la réalité agricole. Un tel dispositif permettrait aussi d'évaluer les effets de la plante de services et de la fauche sur une grande diversité de communautés adventices, qui seraient moins spécialisées que celles que nous avons étudiées. De plus, le fait de disposer d'un réseau de parcelles situées dans différentes régions serait une opportunité pour s'intéresser à la gestion d'héliothis. En effet, nous n'avons pas traité cette thématique dans nos travaux car les adventices et l'ascochytose sont les facteurs les plus limitants pour la production de pois chiche dans notre zone d'étude. En revanche, ce ravageur peut être très nuisible dans le sud de la France, sa gestion semble donc primordiale à étudier dans ce contexte de production. Certaines associations de cultures pouvant contribuer à la régulation des ravageurs (Gardarin et al., 2022; Moreau et al., 2025), il pourrait être très pertinent d'étudier les effets sur héliothis dans un réseau de parcelles. Ainsi, cela permettrait d'englober les trois principaux stress biotiques de la culture du pois chiche, et de compléter l'approche multi-bioagresseurs que nous avons adopté dans nos travaux.

Notre étude pourrait aussi être complétée en intégrant des questionnements sur un pas de temps plus long. Des interrogations subsistent notamment sur un potentiel effet précédent

des résidus de fauche, pour lesquels une restitution d'azote au sol et à la culture suivante pourrait être attendue (Brunetto et al., 2011; Campiglia et al., 2010a). Les légumineuses à graines exportent une grande proportion de leur azote dans les graines, et en raison de leur faible biomasse de résidus, permettent une restitution au sol moins importante que d'autres cultures, comme les légumineuses fourragères ou les céréales. La présence de résidus de plante de services fauchée en inter-rang pourrait modifier cette restitution par rapport à une culture pure de légumineuses à graines (Cheriere, 2020), en particulier dans le cas du pois chiche dont l'effet précédent est limité (Guinet et al., 2020). Des questionnements similaires sur la restitution et le stockage de carbone dans le sol peuvent aussi être soulevés. Envisager une expérimentation sur le plus long terme permettrait également d'évaluer la capacité des associations testées à limiter la variabilité interannuelle par rapport à une culture pure de pois chiche conventionnelle. Un essai système pourrait être un dispositif intéressant à mobiliser pour explorer ces thématiques.

Conclusion

Ce travail a permis de produire une première base de connaissances et de montrer la pertinence de la combinaison de l'introduction d'une plante de services et d'un levier innovant, la fauche, pour favoriser la culture du pois chiche tout en limitant le recours aux intrants et au travail du sol. Nos résultats démontrent que cette combinaison de leviers permet de réguler les adventices et l'ascochytose simultanément, tout en atténuant les effets de la compétition interspécifique sur le pois chiche. Nous avons également identifié des pistes d'amélioration pour limiter davantage les effets de la compétition, et permettre une meilleure adaptabilité dans la mise en œuvre du levier de fauche.

Notre étude a permis d'explorer de nombreux aspects du fonctionnement des associations fauchées. Nous avons démontré que dans le cas d'une culture peu compétitive comme le pois chiche, seule l'introduction d'une plante de services très compétitive, ici l'avoine, permet de réguler les adventices et l'ascochytose. L'approche multi-bioagresseurs que nous avons adoptée a révélé l'existence de synergies entre les adventices et *Ascochyta rabiei* : la sévérité de l'ascochytose augmente avec la biomasse d'adventices. Une analyse à l'échelle de la plante a montré qu'en cas de pression élevée, la diminution de la sévérité des symptômes en présence d'avoine s'opérait dès les premiers nœuds à la base de l'axe principale. Nous avons aussi montré que la fauche permettait d'atténuer la forte compétition exercée par l'avoine sur le pois chiche. En revanche, faucher les inter-rangs au stade début floraison n'a pas permis d'éviter une diminution importante du nombre de ramifications, de gousses et du rendement en conditions favorables à la culture. L'ajout d'une fauche plus précoce pendant la phase végétative s'est révélé prometteur pour atténuer davantage la compétition, et limiter plus fortement ses effets négatifs sur le schéma de ramification du pois chiche et sa production. Nos travaux ont ainsi mis en lumière la forte plasticité de l'architecture aérienne du pois chiche en réponse aux variations d'intensité de la compétition. L'étude de la communauté adventice a montré que l'introduction de l'avoine avait engendré des modifications de sa structure par rapport à la culture pure, en diminuant sa richesse spécifique, la densité totale d'adventices, mais aussi la densité d'une espèce très dominante, le panic-pied-de-coq. A l'inverse, nos résultats suggèrent que la fauche n'a pas d'effet à court terme sur la communauté adventice.

Une originalité de notre travail réside dans le fait d'avoir envisagé la légumineuse à graines comme seule culture récoltée de l'association, en se plaçant de surcroît dans un contexte de production très contraint. Ce type d'association implique de raisonner différemment sa conception et l'évaluation de ses performances par rapport aux associations classiquement étudiées où la légumineuse à graines n'est pas la seule culture de vente, et où les contraintes biotiques sont moindres ou volontairement contrôlées. Nos résultats sont ainsi transférables à d'autres cultures peu compétitives, pour lesquelles la gestion des rapports de dominance au sein de l'association est primordiale, dans des contextes biotiques et abiotiques contraignants.

Ainsi, nos travaux offrent des perspectives pour diversifier les systèmes de culture en insérant des espèces mineures et peu compétitives comme le pois chiche, et concevoir une agriculture plus durable et robuste face à la variabilité interannuelle et aux effets du changement climatique.

Liste des figures

Figure 0.1 : Pratiques de diversification spatiale à l'échelle de la parcelle, de l'exploitation et du paysage (adapté de Vialatte et al., 2025). 6
Figure 0.2 : Principales zones de production de pois chiche en France métropolitaine 10
Figure 0.3 : Schéma simplifié du lien entre les phases d'établissement des composantes du rendement du pois chiche et les principaux facteurs limitant leur mise en place 15
Figure 0.4: Symptômes d'ascochytose sur tige (A), feuille (B) et gousse (C) de pois chiche. .. 18
Figure 0.5 : Schéma du cycle de l'ascochytose (adapté de Singh et al., 2022). 20
Figure 0.6 : Schéma représentant le positionnement des différentes hypothèses par rapport au cycle du pois chiche. 33
Figure 0.7 : Photographies des associations à base de pois chiche et de trèfle d'Alexandrie (A), féverole de printemps (B), moutarde blanche (C), avoine de printemps (D) ou de sorgho du Soudan (E). 35
Figure 0.8 : Photographies des différentes modalités de fauche testées et du matériel utilisé pour l'opération. 39
Figure 1.1: Daily rainfall and mean daily temperature recorded near the experimental site in 2023 (a) and 2024 (b) (Météo France, 2024). 50
Figure 1.2: Spatial arrangement and mowing design of the field trials 52
Figure 1.3: Dry matter accumulation of chickpea, service plants, and weeds in the different treatments during the two years of the experiment. 57
Figure 1.4: Ascochyta blight severity on chickpea leaves at the grain-filling stage as a function of total chickpea, service plant and weed biomass (a), weed and service plant biomass (b) or weed biomass (c). 65
Figure 2.1: Daily rainfall and mean daily temperature recorded near the experimental site in 2023 (a) and 2024 (b) (Météo France, 2024). 77
Figure 2.2: Mean shoot architecture of chickpea at the grain-filling stage in the different cropping and mowing treatments in the two years of the experiment. 84
Figure 2.3: Length of each internode on the main axis of chickpea at the grain-filling stage in the different cropping and mowing treatments in the two years of the experiment. 86

Figure 2.4: Ascochyta blight severity profile on chickpea leaves along the main axis at the grain-filling stage in the different cropping and mowing treatments in the two years of the experiment. 90
Figure 3.1: Dry matter accumulated by chickpea, oat, and weeds in the different treatments at the beginning of chickpea flowering and at the grain-filling stage in 2023 and 2024. 104
Figure 3.2: Rank-abundance plots representing the five most abundant weed species in each treatment at the beginning of chickpea flowering, and at the grain-filling stage, in 2023 and 2024. 106

Liste des tableaux

Tableau 0.1 : Liste des principales études menées sur des associations de culture à base de pois chiche. 28
Tableau 0.2 : Traits fonctionnels des espèces de plantes de services sélectionnées pour être associées au pois chiche dans l'expérimentation. 37
Tableau 0.3 : Densités de semis et densité du peuplement à la levée pour le pois chiche et les différentes espèces de plantes de services en 2023 et en 2024. 40

Table 1.1: Description of the topsoil (0-30 cm) of the experimental fields. 49
Table 1.2: Distribution of the six plant samplings throughout chickpea's cycle. 54
Table 1.3: Weed dry weight (g m^{-2}) in the sole crop and the intercrops at 6 sampling dates in 2023. 61
Table 1.4: Weed dry weight (g m^{-2}) in the sole crop and the intercrops at 6 sampling dates in 2024. 62
Table 1.5: Mean ascochyta blight severity score (0-4) on chickpea leaves at the grain-filling stage. 63
Table 1.6: Chickpea grain yield (t ha^{-1}) in the sole crop and intercrops in 2023 and 2024. 66
Table 2.1: Description of the topsoil (0-30 cm) of the experimental fields. 76
Table 2.2: Number of branches per order of chickpea at the grain-filling stage in the sole crop and in the intercrop with oat. 82
Table 2.3: Number of pods on the main axis and each branch order of chickpea at the grain-filling stage in the sole crop and in the intercrop with oat. 88
Table 3.1: Weed density (plants m^{-2}) in the different treatments at the beginning of chickpea flowering and at the grain-filling stage in 2023 and 2024. 103
Table 3.2: Shannon's diversity index (H'), species richness (S), and Pielou's evenness index (J) computed on the weed abundances recorded in the different treatments at the beginning of chickpea flowering at the grain-filling stage in 2023 and 2024. 108

Table des annexes

Annexe 1 : Effect of adding an earlier mowing date in the chickpea-oat intercrops on service provisioning 141
Annexe 2 : Effects of adding an earlier mowing date in the chickpea-oat intercrops on the shoot architecture 143
Annexe 3 : Effect of the service plant species and inter-row mowing on plant N acquisition and N_2 fixation 145
Annexe 4 : Evolution of the plant height of chickpea and service plants along the growth cycle in the different treatments 155
Annexe 5 : Effect of the service plant species on the evolution of ground cover 161
Annexe 6 : Abundance of the dominant weed species in the different treatments 165
Annexe 7 : Abundance of all weed species in the sole chickpea and in the chickpea-oat intercrop 169

Annexe 1 : Effect of adding an earlier mowing date in the chickpea-oat intercrops on service provisioning

This annex corresponds to the supplementary material of Chapter 1.

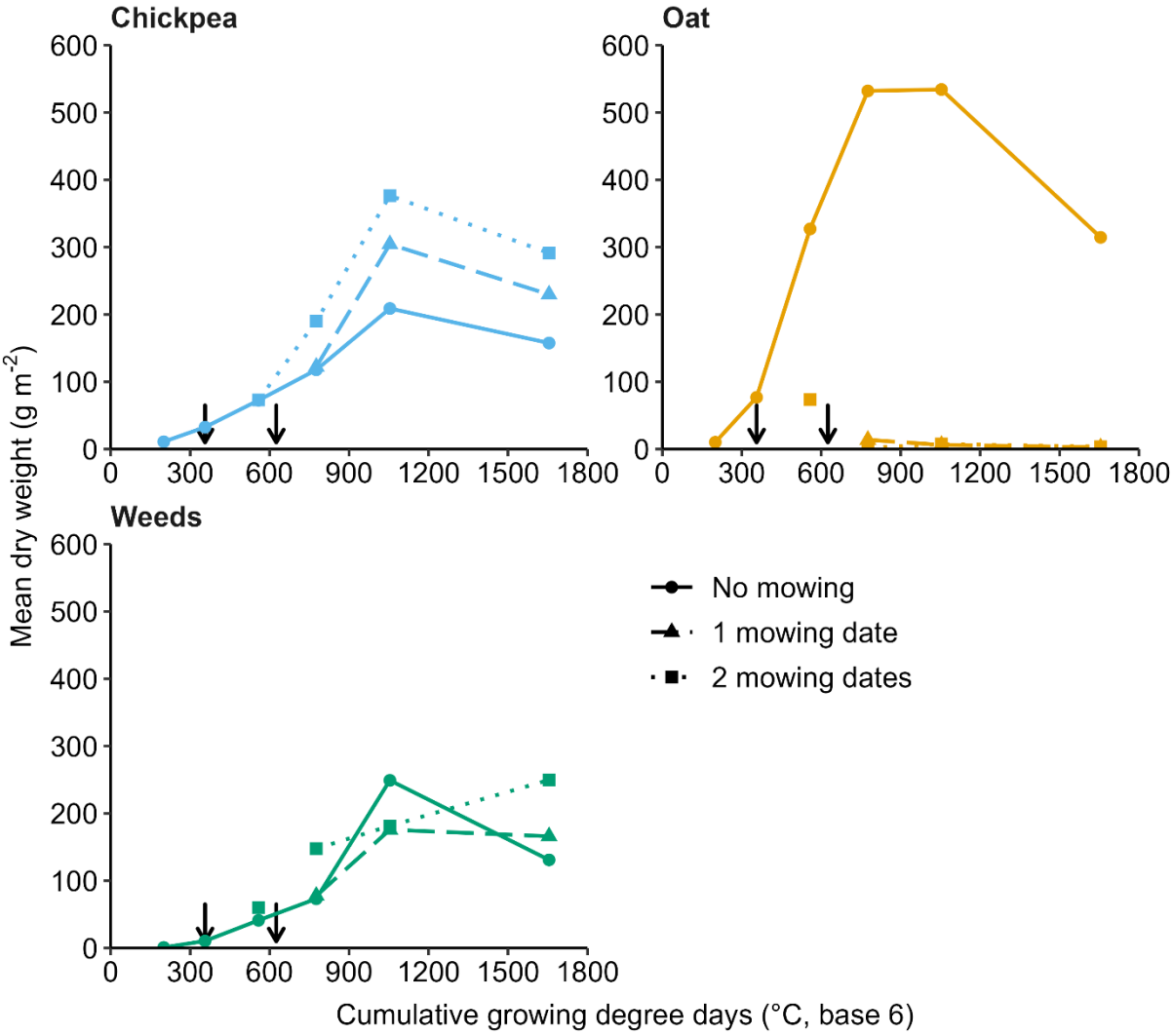


Figure A1-1: Dry weight accumulation of chickpea, oat and weeds in the chickpea-oat intercrops in 2024. The inter-rows were either not mechanically regulated, mowed once (625 GDD) or twice (356 GDD, 625 GDD). The black arrows indicate the two mowing dates. Each symbol corresponds to the averaged values of the four blocks for each treatment.

.

Table A1-1: Dry weight (g m^{-2}) of chickpea, oat and weeds in the chickpea-oat intercrops at 6 sampling dates in 2024. The inter-rows of chickpea were either mowed once (M1), twice (M2) or without mechanical regulation (WM).

		5-leaf	10-leaf	Beg. flowering	Pod set	Grain-filling	Maturity
	WM	11.0 ± 1.5	32.6 ± 10.9	72.5 ± 12.1	117.8 ± 27.1 **a**	209.0 ± 41.7 **b**	157.7 ± 60.6
Chickpea	M1				122.3 ± 50.7 **a**	304.4 ± 88.5 **ab**	229.7 ± 101.5
	M2			73.1 ± 21.9	190.1 ± 31.5 **a**	376.7 ± 73.4 **a**	291.3 ± 155.8
Part R^2				0.00 ns	0.45 *	0.51 *	0.20 ns
	WM	10.3 ± 1.7	77.0 ± 23.4	327.2 ± 29.2	532.1 ± 179.6 **a**	534.3 ± 324.7 **a**	314.6 ± 174.5 **a**
Oat	M1				13.8 ± 13.0 **ab**	6.3 ± 5.7 **b**	2.6 ± 3.3 **b**
	M2			73.6 ± 19.6	1.7 ± 2.8 **b**	7.6 ± 14.7 **b**	3.6 ± 7.3 **b**
Part R^2				0.97 ***	0.92 *	0.82 *	0.85 *
	WM	1.0 ± 0.5	10.6 ± 2.9	41.2 ± 5.2	73.3 ± 47.7	249.2 ± 144.8	131.0 ± 49.2
Weeds	M1				77.6 ± 63.5	175.8 ± 145.9	166.0 ± 128.2
	M2			60.3 ± 37.8	147.8 ± 78.8	181.4 ± 61.1	249.8 ± 127.7
Part R^2				0.06 ns	0.23 ns	0.07 ns	0.19 ns

Values are means ± standard deviation. For each date, different letters within the same column indicate significant differences between mowing treatments according to Tukey's HSD test. ns: non-significant, * $p \leq 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.

Annexe 2 : Effects of adding an earlier mowing date in the chickpea-oat intercrops on the shoot architecture

This annex corresponds to the supplementary material of Chapter 2.

The figure aims at visualising the differences in total branch number on chickpea between the two years of the experiment, in relation to the contrasted levels of weed pressure. This can help to better understand the large differences in the response of chickpea's shoot architecture to the introduction of oat and inter-row mowing between years.

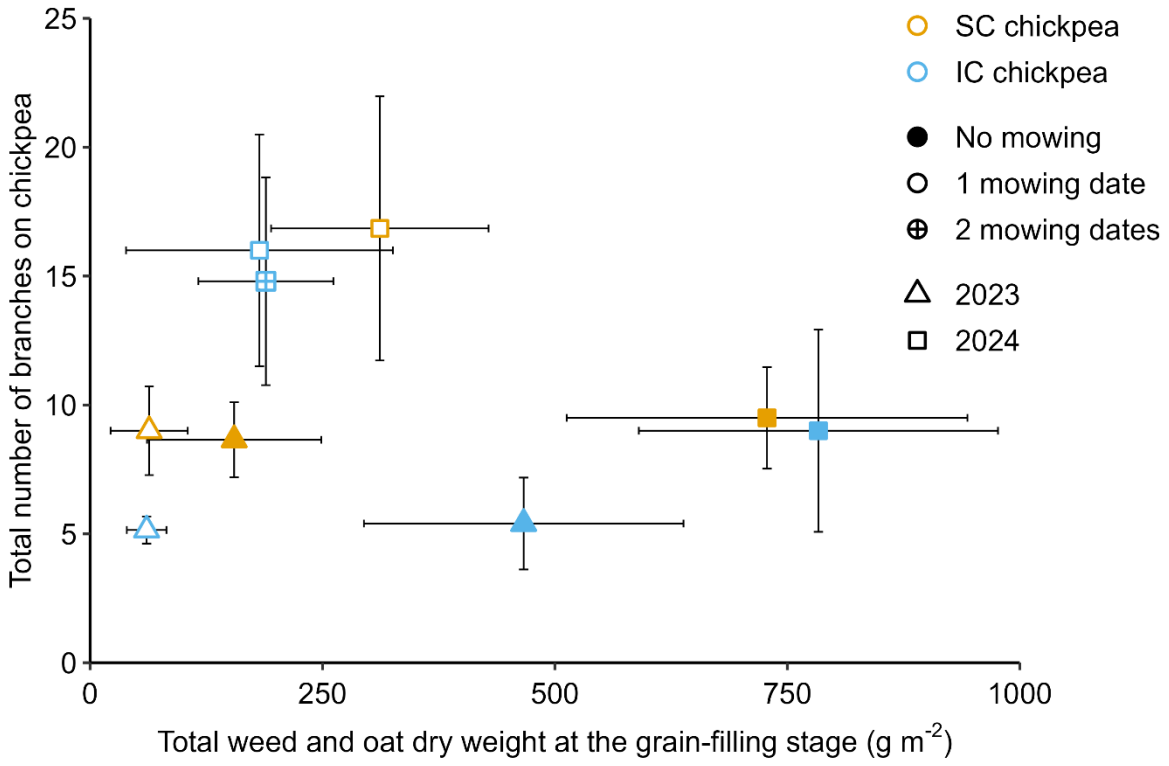


Figure A2-1: Total number of branches on chickpea as a function of the total weed and oat biomass at the grain-filling stage. Each symbol corresponds to the averaged value of the four blocks and error bars stand for the standard deviation of the mean.

Table A2-1: Number of branches per order, and number and proportion of pods on the main axis and each branch order of chickpea intercropped with oat at the grain-filling stage. The inter-rows of chickpea were either mowed once (M1), twice (M2) or left without mechanical regulation (WM).

		Main axis	Primary	Secondary	Tertiary	Total
Number of branches	WM		4.1 ± 1.6	3.9 ± 2.1	1.0 ± 1.2	9.0 ± 3.9
	M1		5.9 ± 0.8	8.2 ± 3.6	2.0 ± 1.3	16.0 ± 4.5
	M2		7.0 ± 1.6	6.5 ± 3.0	1.3 ± 1.5	14.8 ± 4.0
	P-value		0.065 .	0.200 ns	0.272 ns	0.093 .
Number of pods	WM	2.5 ± 1.6	5.4 ± 1.9	3.8 ± 3.1	0.2 ± 0.4	11.8 ± 4.1
	M1	1.9 ± 1.6	5.3 ± 3.7	4.4 ± 3.5	0.5 ± 1.0	12.1 ± 9.4
	M2	4.5 ± 1.8	11.0 ± 3.7	6.3 ± 2.6	0.3 ± 0.6	22.1 ± 6.4
	P-value	0.114 ns (log)	0.046 *	0.448 ns	0.789 ns	0.082 .
Proportion of pods	WM	25.3 ± 16.7	46.7 ± 14.8	26.8 ± 17.7	1.3 ± 2.5	
	M1	19.5 ± 14.7	48.8 ± 11.5	30.2 ± 21.2	1.5 ± 3.0	
	M2	20.7 ± 9.0	47.4 ± 9.2	30.7 ± 8.4	1.1 ± 2.2	
	P-value	0.832 ns	0.917 ns	0.912 ns	0.970 ns (art)	

Values are means ± standard deviation. Asterisks indicate significance levels: ns $p \geq 0.1$, . $p < 0.1$, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$. (log) indicates that the response variable was log-transformed. (art) indicates that the data were aligned and ranked prior to model fitting.

Annexe 3 : Effect of the service plant species and inter-row mowing on plant N acquisition and N_2 fixation

This annex presents the acquisition of soil and atmospheric nitrogen by chickpea, service plants, and weeds in the different treatments that were tested in the experiment.

Materials and methods

The experimental design is the same as described in Chapter 1, with the only difference being that mustard (*Sinapis alba*) was included in the analyses.

The aboveground biomass of chickpea, service plants, and weeds was sampled at the beginning of chickpea flowering and at the grain-filling stage. Plants were harvested in the central rows of the plots over 0.8 m long and 0.664 m wide. The sampling area contained two rows of chickpea and, in the intercrops, two rows of service plant. The samples were then oven-dried at 70°C for 48 hours before weighing.

The dry samples were subsequently ground into a fine powder of 120-µm particles (universal cutting mill Pulverisette 19, variable speed rotor mill Pulverisette 14, FRITSCH, Idar-Oberstein, Germany). After grinding, samples were analysed for their total N content and ^{15}N:^{14}N ratio with an elemental analyser (EA3100, EuroVector, Pavia, Italy) coupled with an isotope ratio mass spectrometer (IsoPrime, Elementar, Hanau, Germany).

The percentage of plant N derived from N_2 fixation (%Ndfa) was determined for chickpea, faba bean and Egyptian clover using the ^{15}N natural abundance method. As the rhizobia specific to chickpea were absent from the soils of the area of study, a non-inoculated chickpea was used as reference crop. The %Ndfa was calculated as follows (Unkovich et al., 2008):

$$\%Ndfa = 100 \times \frac{\delta^{15}N_{reference} - \delta^{15}N_{legume}}{\delta^{15}N_{reference} - \beta fix}$$

where $\delta^{15}N_{reference}$ and $\delta^{15}N_{legume}$ are the values of shoot ^{15}N enrichment of the reference plant (non-inoculated chickpea) and the legume (chickpea, clover, faba bean), respectively. βfix is the isotopic fractionation factor associated with the biological nitrogen fixation processes, and corresponds to the natural ^{15}N enrichment of the legume relying only on nitrogen fixation. The βfix values used for chickpea, faba bean, and clover were -1.75, -0.50, and -0.64, respectively (Unkovich et al., 2008). Soil N acquisition by chickpea, service plants, and weeds was estimated

as the difference between the total amount of shoot N accumulated and the amount of N_2 fixed. Total N was calculated by multiplying crop biomass by N content. The amount of N_2 fixed was the product of total N and %Ndfa.

All the statistical analyses were performed using the R software (R Core Team, 2025). The amount of soil N accumulated by each component and the %Ndfa of chickpea were analysed by performing linear mixed models, similarly to Chapter 1 and Chapter 2. In 2024, one replicate of the unmowed sole chickpea at the grain-filling stage had to be removed from the dataset due to an incoherent value of $\delta^{15}N$, leading to a negative %Ndfa. At the grain-filling stage, after mowing, only the soil N acquisition of unmowed service plants was analysed, and only the species effect was tested. Soil N uptake by service plant species were compared by performing all pairwise comparisons. For the other data, the treatments were always compared to the sole chickpea. Cases of data transformation and use of non-parametric tests are all specified in the tables. Absence of specifications correspond to ANOVAs in which the response variable was not transformed.

Results

The data of the two years of the experiment are displayed on Figure A3-1 and Figure A3-2. The corresponding statistical results are given in Table A3-1 to Table A3-4. The comparison of the chickpea-oat intercrops with 0, 1, or 2 mowing dates from the 2024 trial are presented in Figure A3-3, Table A3-5, and Table A3-6.

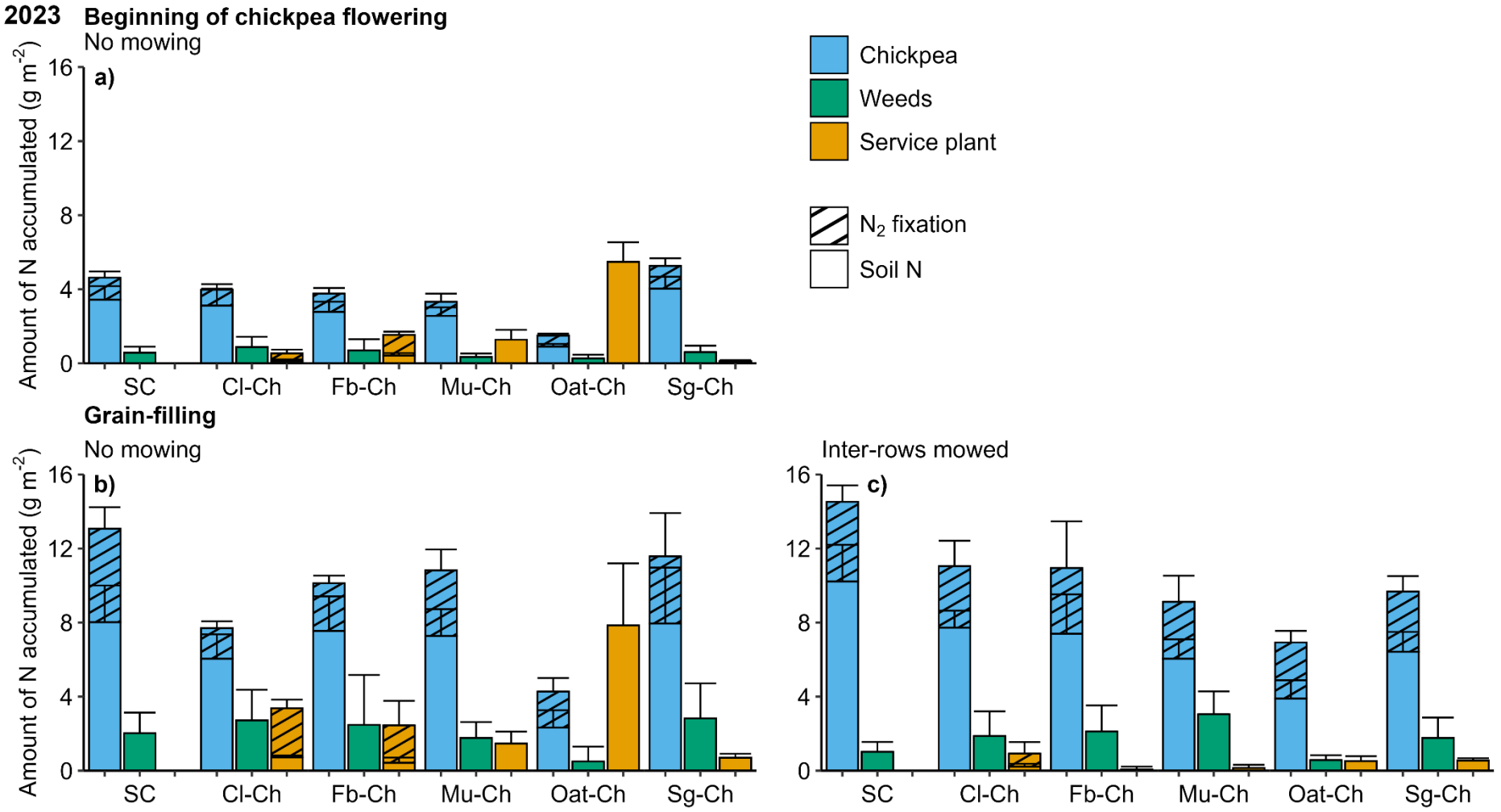


Figure A3-1: Amount of nitrogen accumulated by chickpea, service plants and weeds in the sole crop and in the intercrops with the different species of services plants in 2023. Bars correspond to the mean of the four experimental blocks. Error bars represent the standard deviation. SC: sole chickpea, Cl-Ch: clover-chickpea intercrop, Fb-Ch: faba bean-chickpea, Mu-Ch: mustard-chickpea, Oat-Ch: oat-chickpea, and Sg-Ch: Sudan grass-chickpea. The statistics associated with these figures are detailed in Table A3-1 to Table A3-4.

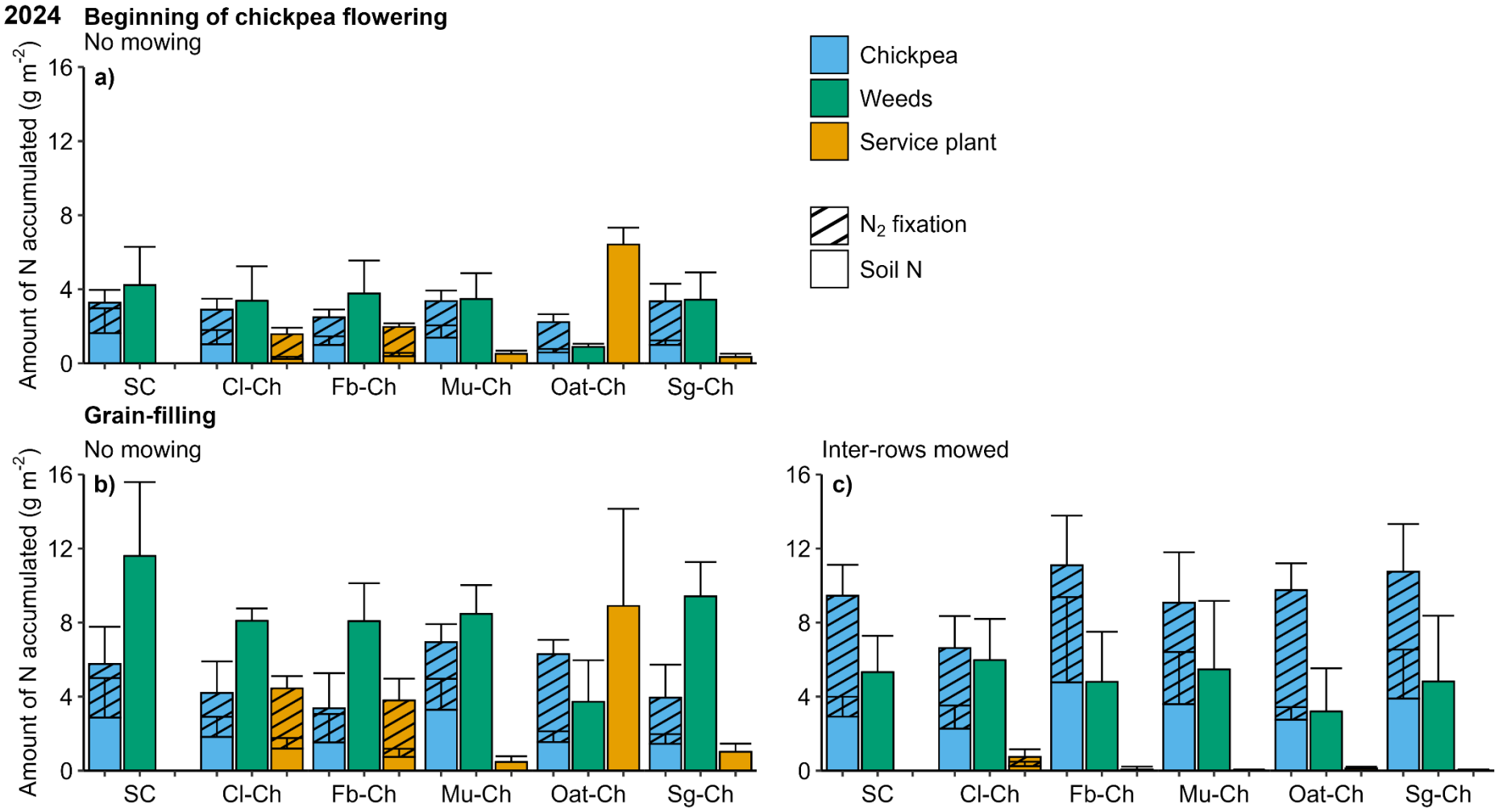


Figure A3-2: Amount of nitrogen accumulated by chickpea, service plants and weeds in the sole crop and in the intercrops with the different species of services plants in 2024. Bars correspond to the mean of the four experimental blocks. Error bars represent the standard deviation. SC: sole chickpea, Cl-Ch: clover-chickpea intercrop, Fb-Ch: faba bean-chickpea, Mu-Ch: mustard-chickpea, Oat-Ch: oat-chickpea, and Sg-Ch: Sudan grass-chickpea. The statistics associated with these figures are detailed in Table A3-1 to Table A3-4.

N_2 fixation by legumes

Table A3-1: Percentage of the total N of chickpea and legume service plants derived from N_2 fixation (%Ndfa) at the beginning of chickpea flowering in the different treatments, before mowing the inter-rows (without mowing, WM).

		2023		2024	
		Chickpea	Service plant	Chickpea	Service plant
Sole chickpea	WM	26.1 ± 8.0		57.6 ± 26.2	
Clover-chickpea	WM	23.1 ± 9.6	75.0 ± 4.7	67.6 ± 15.5	85.7 ± 4.2
Faba bean-chickpea	WM	26.6 ± 7.2	73.3 ± 5.9	62.1 ± 14.5	80.4 ± 6.5
Mustard-chickpea	WM	23.0 ± 12.7		62.1 ± 9.8	
Oat-chickpea	WM	40.2 ± 8.0 ***		74.1 ± 6.3	
Sudan grass-chickpea	WM	22.6 ± 7.8		69.7 ± 11.7	
p-value		< 0.001 ***		0.363 (KW)	

Values are means ± standard deviation (n=8). Asterisks indicate significance levels for each factor: . p < 0.1, * p < 0.05, ** p < 0.01, *** p < 0.001. (KW) Indicates that the data were analysed by performing a Kruskal-Wallis rank sum test.

Table A3-2: Percentage of the total N of chickpea and legume service plants derived from N_2 fixation (%Ndfa) at grain-filling in the different treatments. The inter-rows were either not mowed (WM) or were mowed once at the beginning of chickpea flowering (M).

		2023		2024	
		Chickpea	Service plant	Chickpea	Service plant
Sole chickpea	WM	39.0 ± 8.9		50.4 ± 31.3	
	M	29.9 ± 8.1		69.8 ± 2.7	
Clover-chickpea	WM	21.6 ± 3.3	78.7 ± 3.2	46.6 ± 26.5	74.6 ± 8.0
	M	29.6 ± 7.5	74.8 ± 4.5	66.5 ± 9.8	70.3 ± 7.8
Faba bean-chickpea	WM	25.8 ± 2.9	82.6 ± 1.5	55.7 ± 4.8	81.3 ± 4.3
	M	29.7 ± 15.3		62.0 ± 13.1	
Mustard-chickpea	WM	32.2 ± 6.5		54.3 ± 12.3	
	M	32.8 ± 7.2		63.5 ± 7.7	
Oat-chickpea	WM	45.7 ± 16.5 | *		75.6 ± 5.7	
	M	43.9 ± 1.8 |		72.0 ± 4.7	
Sudan grass-chickpea	WM	30.9 ± 13.0		59.0 ± 11.9	
	M	33.7 ± 7.0		65.8 ± 10.7	
Species p-value		< 0.001 *** (art)		0.001 ** (log)	
Mowing p-value		0.675 (art)		0.601 (log)	
Interaction p-value		0.285 (art)		0.352 (log)	

Values are means ± standard deviation (n=4). Asterisks indicate significance levels for each factor: . p < 0.1, * p < 0.05, ** p < 0.01, *** p < 0.001. (log) indicates that the response variable was log-transformed. (art) indicates that the data were aligned and ranked prior to model fitting.

Soil N accumulated by chickpea, service plants, and weeds

Table A3-3: Amount of soil nitrogen (g m^{-2}) accumulated by chickpea, service plants, and weeds in the different treatments at the beginning of chickpea flowering, before mowing the inter-rows (without mowing, WM).

			Chickpea	Service plant	Weeds
2023	Sole chickpea	WM	3.4 ± 0.7		0.6 ± 0.3
	Clover-chickpea	WM	3.1 ± 0.9	0.1 ± 0.1 **c**	0.9 ± 0.6
	Faba bean-chickpea	WM	2.8 ± 0.6	0.4 ± 0.1 **bc**	0.7 ± 0.6
	Mustard-chickpea	WM	2.6 ± 0.5 .	1.3 ± 0.5 **ab**	0.3 ± 0.2
	Oat-chickpea	WM	0.9 ± 0.1 ***	5.5 ± 1.1 **a**	0.3 ± 0.2
	Sudan grass-chickpea	WM	4.0 ± 0.6	0.1 ± 0.1 **c**	0.6 ± 0.4
	p-value		< 0.001 *** (log)	< 0.001 *** (KW)	0.209 (KW)
2024	Sole chickpea	WM	1.6 ± 1.3		4.2 ± 2.1
	Clover-chickpea	WM	1.0 ± 0.8	0.2 ± 0.1 **c**	3.4 ± 1.9
	Faba bean-chickpea	WM	1.0 ± 0.5	0.4 ± 0.2 **bc**	3.8 ± 1.8
	Mustard-chickpea	WM	1.4 ± 0.7	0.5 ± 0.2 **b**	3.5 ± 1.4
	Oat-chickpea	WM	0.6 ± 0.2	6.4 ± 0.9 **a**	0.9 ± 0.2 ***
	Sudan grass-chickpea	WM	1.0 ± 0.2	0.3 ± 0.2 **bc**	3.4 ± 1.5
	p-value		0.375 (log)	< 0.001 *** (log)	< 0.001 ***

Values are means ± standard deviation (n=8). Asterisks indicate significance levels for each factor: . $p < 0.1$ * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$. Different letters correspond to significant differences between service plant species. (log) indicates that the response variable was log-transformed. (KW) Indicates that the data were analysed by performing a Kruskal-Wallis rank sum test.

Table A3-4: Amount of soil nitrogen (g m^{-2}) accumulated by chickpea, service plants, and weeds in the different treatments at the grain-filling stage. The inter-rows were either not mowed (WM) or were mowed once at the beginning of chickpea flowering (M).

			Chickpea	Service plant	Weeds
2023	Sole chickpea	WM	8.0 ± 2.0		2.0 ± 1.1
		M	10.2 ± 2.0		1.0 ± 0.5
	Clover-chickpea	WM	6.0 ± 1.3	0.7 ± 0.1 **bc**	2.7 ± 1.6
		M	7.7 ± 0.9 *	0.2 ± 0.2	1.9 ± 1.3
	Faba bean-chickpea	WM	7.6 ± 1.9	0.4 ± 0.3 **c**	2.5 ± 2.7
		M	7.4 ± 2.1	0.0 ± 0.0	2.1 ± 1.4
	Mustard-chickpea	WM	7.3 ± 1.5	1.5 ± 0.6 **b**	1.8 ± 0.9
		M	6.0 ± 1.0 *	0.2 ± 0.2	3.0 ± 1.2
	Oat-chickpea	WM	2.3 ± 0.9	7.8 ± 3.3 **a**	0.5 ± 0.8
		M	3.9 ± 1.0 ***	0.5 ± 0.3	0.6 ± 0.3
	Sudan grass-chickpea	WM	8.0 ± 3.0	0.7 ± 0.2 **bc**	2.8 ± 1.9
		M	6.4 ± 1.1	0.6 ± 0.1	1.8 ± 1.1
	Species p-value		< 0.001 ***	< 0.001 *** (log)	0.050 .
	Mowing p-value		0.386		0.413
	Interaction p-value		0.133		0.488
2024	Sole chickpea	WM	2.9 ± 1.8		11.6 ± 4.0
		M	2.9 ± 1.1		5.3 ± 2.0
	Clover-chickpea	WM	1.8 ± 1.1	1.2 ± 0.6 **b**	8.1 ± 0.7
		M	2.3 ± 1.3	0.2 ± 0.2	6.0 ± 2.2
	Faba bean-chickpea	WM	1.5 ± 1.5	0.8 ± 0.4 **b**	8.1 ± 2.1
		M	4.8 ± 4.6	0.0 ± 0.0	4.8 ± 2.7
	Mustard-chickpea	WM	3.3 ± 1.7	0.5 ± 0.3 **b**	8.5 ± 1.5
		M	3.6 ± 2.8	0.0 ± 0.0	5.5 ± 3.7
	Oat-chickpea	WM	1.6 ± 0.6	8.9 ± 5.2 **a**	3.7 ± 2.2
		M	2.8 ± 0.7	0.1 ± 0.1	3.2 ± 2.3 ***
	Sudan grass-chickpea	WM	1.4 ± 0.5	1.0 ± 0.4 **b**	9.4 ± 1.8
		M	3.9 ± 2.6	0.0 ± 0.0	4.8 ± 3.5
	Species p-value		0.544 (log)	< 0.001 *** (log)	0.006 **
	Mowing p-value		0.006 ** (log)		< 0.001 ***
	Interaction p-value		0.259 (log)		0.245

Values are means ± standard deviation (n=4). Asterisks indicate significance levels for each factor: . p < 0.1, * p < 0.05, ** p < 0.01, *** p < 0.001. Different letters correspond to significant differences between unmowed service plant species. (log) indicates that the response variable was log-transformed. Empty p-value cells mean that the mowing factor was not tested.

Differences between mowing treatments in the chickpea-oat intercrops in 2024

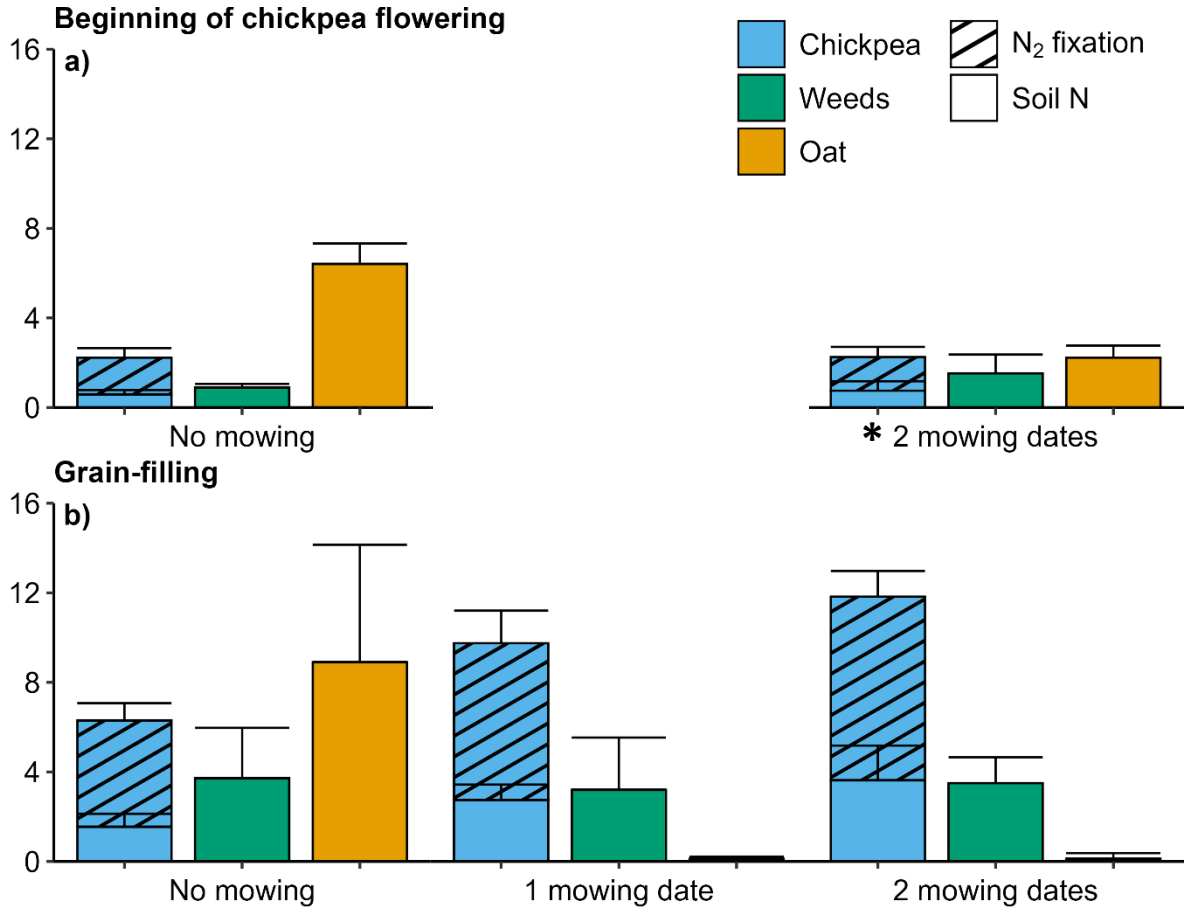


Figure A3-3: Soil nitrogen accumulated by chickpea, oat and weeds in the chickpea-oat intercrops depending on the mowing treatments in 2024. The inter-rows were either not mowed (No mowing), mowed once at the beginning of chickpea flowering (1 mowing date), or were first mowed at the 10-leaf stage then a second time at the beginning of flowering (2 mowing dates). The statistics associated with these figures are detailed in Table A3-5 and Table A3-6.

* At the time of sampling, the inter-rows had only been mowed once in this treatment.

Table A3-5: Percentage of total chickpea N derived from N_2 fixation (%Ndfa) in the chickpea-oat intercrops in 2024. The inter-rows were either not mowed (WM), mowed once at the beginning of chickpea flowering (M1), or were first mowed at the 10-leaf stage then a second time at flowering (M2).

		Beg. flowering	Grain-filling
Oat-chickpea	WM	74.1 ± 6.3	75.6 ± 5.7
	M1		72.0 ± 4.7
	M2	69.2 ± 8.9	70.2 ± 10.3
p-value		0.401	0.585

Values are means ± standard deviation.

Table A3-6: Amount of soil nitrogen (g m^{-2}) accumulated by chickpea, oat, and weeds in the chickpea-oat intercrops in 2024. The inter-rows were either not mowed (WM), mowed once at the beginning of chickpea flowering (M1), or were first mowed at the 10-leaf stage then a second time at flowering (M2).

		Chickpea	Oat	Weeds
Beginning of flowering				
Oat-chickpea	WM	0.6 ± 0.2	6.4 ± 0.9	0.9 ± 0.2
	M2	0.8 ± 0.4	2.2 ± 0.5	1.5 ± 0.8
p-value		0.419		0.177 (log)
Grain-filling				
Oat-chickpea	WM	1.6 ± 0.6	8.9 ± 5.2	3.7 ± 2.2
	M1	2.8 ± 0.7	0.1 ± 0.1	3.2 ± 2.3
	M2	3.6 ± 1.6	0.1 ± 0.2	3.5 ± 1.2
p-value		0.077 .		0.933

Values are means ± standard deviation. Asterisks indicate significance levels for each factor: . $p < 0.1$, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$. (log) indicates that the response variable was log-transformed. Empty p-value cells mean that the mowing factor was not tested.

Acknowledgments

We are most grateful to PLATIN' (PLATeau d'Isotopie de Normandie) core facility for all elemental and isotopic analyses used in this study.

Annexe 4 : Evolution of the plant height of chickpea and service plants along the growth cycle in the different treatments

This annex presents the evolution of the plant height of chickpea and service plants in the different treatments that were tested in the experiment.

Material and methods

The experimental design is the same as described in Chapter 1, with the only difference being that mustard (*Sinapis alba*) was included in the analyses.

Plant height of chickpea and service plants was measured regularly over the growing season on five random plants per plot from the central rows. Plant height corresponded to the distance between the soil and the highest standing point of the plant, without straightening it before measurement.

All data analyses were performed using the R software (R Core Team, 2025). The five values of plant height per plot were averaged to avoid pseudoreplication. Four plants of Sudan grass, belonging to three different plots, escaped mowing and were mistakenly measured as mowed plants. Therefore, these four values were not included in the calculations. For each replicate, a logistic growth curve was fitted on the plant height data of chickpea and unmowed service plants using the nls function in R (Ritz and Streibig, 2009). In the model, time was expressed as growing degree days cumulated since sowing, which were computed using 6°C as base temperature (Lambert, 2023). In 2024, the model failed to converge for one replicate of the unmowed chickpea-clover intercrop treatment and one replicate of the unmowed sole chickpea, leaving three replicates each. Model fitting allowed to estimate the following parameters: H_{max} the value of the higher asymptote corresponding to the maximum plant height, $t_{1/2}$ the inflection point of the curve at which half of H_{max} is reached, and r the height growth rate at $t_{1/2}$.

The parameters of the growth curves were then used as response variables in linear mixed models. Data from the two years of the experiment were analysed separately. The service plant species and the mowing treatments were fixed factors, and the experimental block was set as a random factor. The effect of the service plant species was tested *via* type II ANOVAs.

The normality and homoscedasticity assumptions were systematically checked with Shapiro Wilk's test and Bartlett's test, respectively. When these two assumptions were not met, the response variable was log-transformed. When non-normality and/or heteroscedasticity were not resolved by log-transformation, the data were aligned and ranked prior to model fitting following the Aligned Rank Transform (ART) procedure implemented in the ARTool package (Wobbrock et al., 2011). Cases of data transformation are all specified in the tables. For the chickpea plant height parameters, the multiple comparisons were performed using Dunnett's test with the sole chickpea as the control treatment. In case of significant interaction between the service plant species and the mowing factors, the control treatment was the unmowed sole chickpea. The parameters of the growth curves fitted to the service plants height data were all compared using Tukey's HSD test.

Results

The plant height data and the growth curves are presented in Figure A4-1. The statistical results are given in Table A4-1 (chickpea) and Table A4-2 (service plants). The growth curves and the analyses conducted on the chickpea-oat intercrops with no mowing, one mowing date (beginning of chickpea flowering) or two mowing dates (10-leaf stage, beginning of chickpea flowering) are presented in Figure A4-2 and Table A4-3.

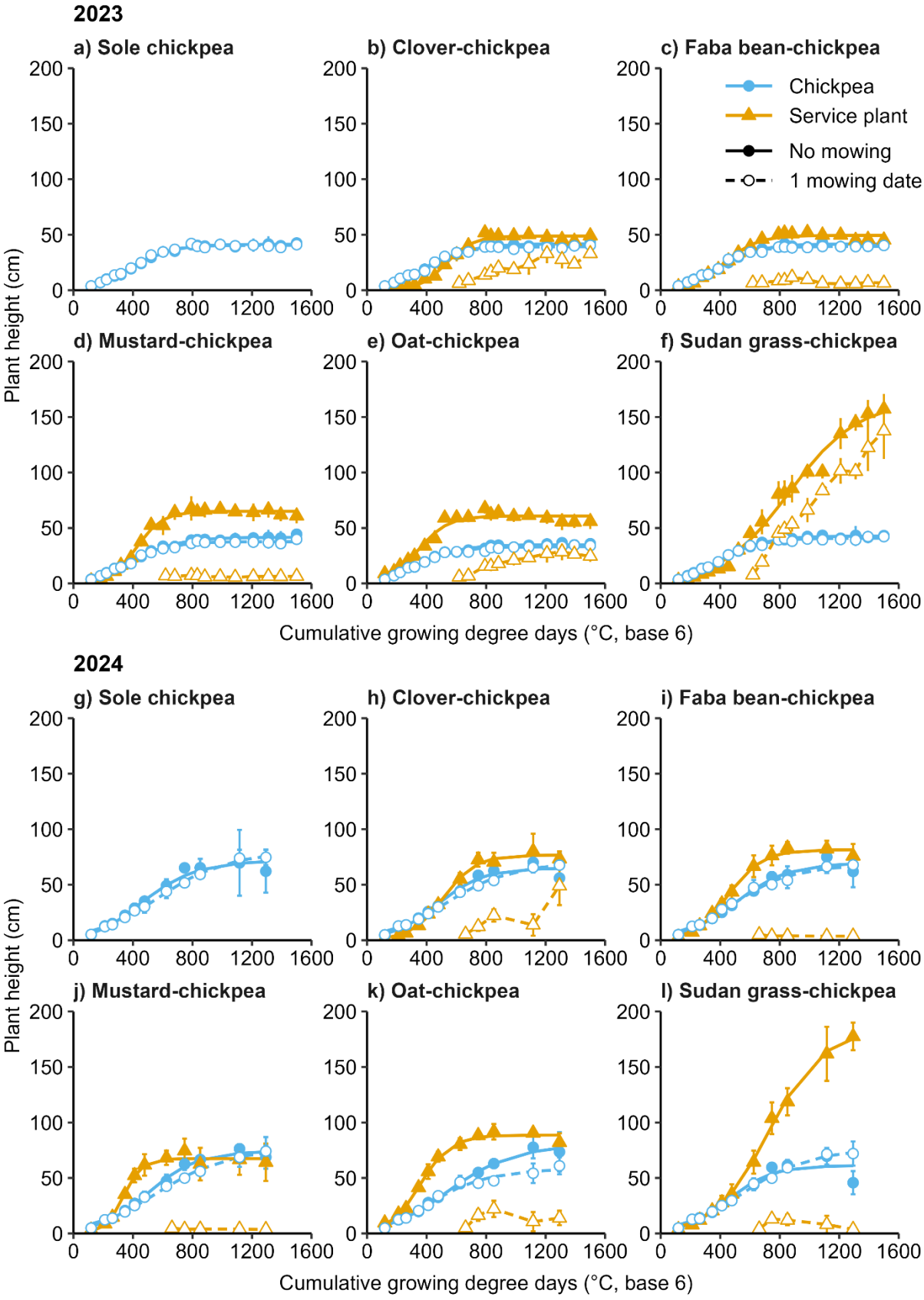


Figure A4-1: Plant height dynamics of chickpea and service plants in the different treatments in 2023 and 2024. Each symbol corresponds to the mean of the four experimental blocks. Error bars represent the standard deviation. Lines represent the growth curves fitted to the data. The statistical analyses associated with this figure can be found in Table A4-1 and Table A4-2.

Table A4-1: Parameters of the plant height growth curves of chickpea in the different treatments in the two years of the experiment. The inter-rows were either without mowing (WM) or were mowed once at the beginning of chickpea flowering (M).

		H_{max} (cm)		$t_{1/2}$ (GDD)		r (10^{-3} GDD^{-1})	
		2023	2024	2023	2024	2023	2024
Sole chickpea	WM	41.3 ± 3.3	71.5 ± 18.1	400.6 ± 19.9	475.6 ± 117.4	7.4 ± 0.8	7.3 ± 2.8
	M	40.5 ± 1.1	78.8 ± 4.8	380.7 ± 19.0	586.8 ± 65.0	8.0 ± 0.6	4.6 ± 0.6 *
Clover-chickpea	WM	41.8 ± 1.5	64.9 ± 5.4	410.0 ± 17.3	474.2 ± 33.7	6.9 ± 0.6	6.7 ± 0.6
	M	39.2 ± 1.2	69.5 ± 9.8	381.1 ± 7.0	545.4 ± 66.2	7.7 ± 0.4	4.9 ± 0.5 *
Faba bean-chickpea	WM	41.6 ± 1.8	69.6 ± 7.9	395.9 ± 6.5	510.7 ± 42.7	7.4 ± 0.3	5.9 ± 0.7
	M	39.4 ± 1.3	67.5 ± 6.7	373.0 ± 11.5	501.0 ± 62.1	8.1 ± 1.1	5.4 ± 0.7
Mustard-chickpea	WM	41.6 ± 3.9	74.2 ± 5.5	407.9 ± 36.8	507.7 ± 37.4	6.8 ± 0.9	6.2 ± 0.7
	M	37.7 ± 1.2	76.9 ± 16.6	379.5 ± 20.9	583.4 ± 98.6	7.5 ± 0.9	4.6 ± 0.6 *
Oat-chickpea	WM	34.8 ± 0.8 ***	80.1 ± 17.8	353.1 ± 4.0 ***	563.1 ± 112.6	7.1 ± 0.2	5.3 ± 1.3
	M	33.1 ± 0.8	58.5 ± 10.0	341.2 ± 14.1	458.7 ± 106.3	7.3 ± 0.9	6.4 ± 2.3
Sudan grass-chickpea	WM	42.8 ± 2.2	61.2 ± 6.5	414.0 ± 33.2	454.0 ± 56.6	7.0 ± 1.2	7.3 ± 0.9
	M	40.8 ± 2.1	75.7 ± 9.4	397.0 ± 32.2	570.8 ± 75.4	7.5 ± 1.7	4.9 ± 0.9 *
Species p-value		< 0.001 *** (art)	0.284	< 0.001 *** (log)	0.613	0.171	0.784
Mowing p-value		< 0.001 *** (art)	0.703	< 0.001 *** (log)	0.015 *	0.001 **	< 0.001 ***
Interaction p-value		0.578 (art)	0.009 **	0.908 (log)	0.004 **	0.921	0.006 **

GDD: Growing degree days (°C, base 6).

Values are means ± standard deviation (n=4). Asterisks indicate significance levels for each factor: * p < 0.05, ** p < 0.01, *** p < 0.001. (art) indicates that the data were aligned and ranked prior to model fitting. (log) means that the response variable was log-transformed before model fitting. H_{max}: the value of the higher asymptote corresponding to the maximum plant height, $t_{1/2}$: the inflection point of the curve at which half of H_{max} is reached, and r: the height growth rate at $t_{1/2}$.

Table A4-2: Parameters of the plant height growth curves of unmowed service plants in the different treatments in the two years of the experiment.

		H_{max} (cm)		$t_{1/2}$ (GDD)		r (10^{-3} GDD^{-1})	
		2023	2024	2023	2024	2023	2024
Clover-chickpea	WM	48.7 ± 2.3 **c**	76.7 ± 5.1 **bc**	532.7 ± 14.1 **b**	512.3 ± 11.2 **b**	11.6 ± 0.7 **a**	9.3 ± 0.9 **b**
Faba bean-chickpea	WM	49.3 ± 1.3 **c**	81.6 ± 8.0 **bc**	429.6 ± 10.0 **c**	456.4 ± 41.1 **b**	9.1 ± 0.5 **b**	9.3 ± 1.5 **b**
Mustard-chickpea	WM	65.0 ± 2.2 **b**	67.4 ± 11.9 **c**	424.6 ± 5.3 **c**	335.5 ± 20.8 **c**	11.3 ± 0.7 **a**	16.9 ± 1.2 **a**
Oat-chickpea	WM	60.8 ± 2.0 **b**	88.7 ± 4.9 **b**	344.9 ± 7.6 **d**	360.0 ± 24.1 **c**	10.0 ± 0.2 **b**	10.0 ± 1.4 **b**
Sudan grass-chickpea	WM	164.6 ± 14.7 **a**	183.0 ± 15.0 **a**	864.6 ± 48.6 **a**	727.2 ± 38.5 **a**	4.4 ± 0.4 **c**	5.6 ± 0.3 **c**
Species p-value		< 0.001 *** (log)	< 0.001 ***	< 0.001 *** (log)	< 0.001 ***	< 0.001 ***	< 0.001 ***

GDD: Growing degree days (°C, base 6).

Values are means ± standard deviation (n=4). Asterisks indicate significance levels for each factor: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$. Different letters indicate significant differences between service plant species. (log) means that the response variable was log-transformed before model fitting. H_{max}: the value of the higher asymptote corresponding to the maximum plant height, $t_{1/2}$: the inflection point of the curve at which half of H_{max} is reached, and r: the height growth rate at $t_{1/2}$.

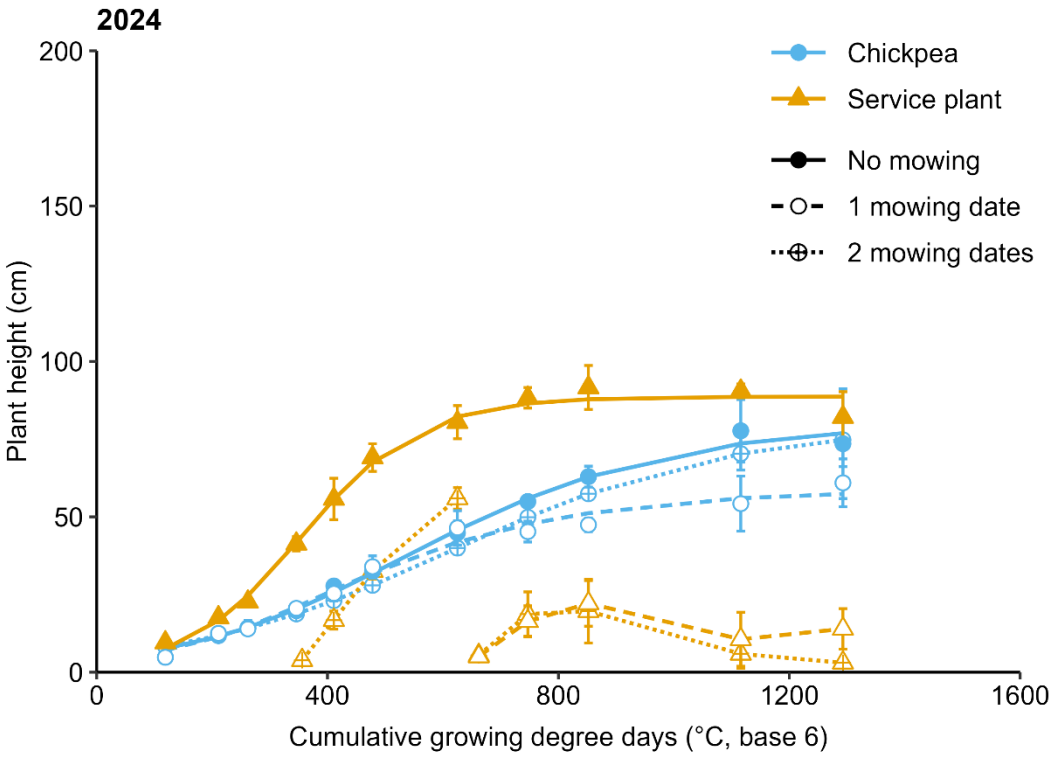


Figure A4-2: Plant height dynamics of chickpea and oat in the three mowing treatments in 2024. Each symbol corresponds to the mean of the four experimental blocks. Error bars represent the standard deviation. Lines represent the growth curves fitted to the data. The statistical analyses associated with this figure can be found in Table A4-3.

Table A4-3: Parameters of the plant height growth curves of chickpea intercropped with oat. The inter-rows were either without mowing (WM), mowed once at the beginning of chickpea flowering (M1), or were first mowed at the 10-leaf stage then a second time at flowering (M2).

	H_{max} (cm)	$t_{1/2}$ (GDD)	r (10^{-3} GDD^{-1})
WM	80.1 ± 17.8	563.1 ± 112.6	5.3 ± 1.3
M1	58.5 ± 10	458.7 ± 106.3	6.4 ± 2.3
M2	79.6 ± 9.5	623.2 ± 66.1	4.3 ± 0.4
p-value	0.095 .	0.129	0.228

GDD: Growing degree days (°C, base 6).

Values are means ± standard deviation (n=4). Asterisks indicate significance levels for each factor: . < 0.1, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$. H_{max}: the value of the higher asymptote corresponding to the maximum plant height, $t_{1/2}$: the inflection point of the curve at which half of H_{max} is reached, and r: the height growth rate at $t_{1/2}$.

Annexe 5 : Effect of the service plant species on the evolution of ground cover

This annex presents the evolution of the percentage of ground cover in the sole chickpea and the different intercrops.

Materials and methods

The experimental design is the same as described in Chapter 1, with the only difference being that mustard (*Sinapis alba*) was included in the analyses.

The percentage of ground cover was determined by image analysis. Its evolution was monitored on a dedicated subplot of 0.7 m long and 0.664 m wide. In mowed plots, the area that was set apart for monitoring the ground cover was kept unmowed. Thus, there were eight replicates per service plant species treatment in total. The area was systematically hand-weeded before taking the pictures. The latter were taken perpendicularly to the ground using a high-resolution camera (Canon EOS 77D, Tokyo, Japan) mounted on a tripod. All pictures were cropped to a size of 0.664 x 0.7 m to ensure that only the subplot would be taken into account in the image analysis. The percentage of green ground cover was then computed using the Canopeo app (Patrignani and Ochsner, 2015).

All data analyses were performed using the R software (R Core Team, 2025). A logistic growth curve was fitted on the data for each replicate using the nls function in R (Ritz and Streibig, 2009). In the model, time was expressed as growing degree days cumulated since sowing, which were computed using 6°C as base temperature (Lambert, 2023). In two replicates of the faba bean-intercrop treatment, the service plant unexpectedly wilted early in its cycle. The complete necrosis of the rooting system indicates that these plants were most likely infected by a soil-borne pathogen. Thus, they were removed from the analysis, leaving six replicates. In 2023, the model failed to converge for one replicate of the chickpea-oat intercrop treatment. Model fitting allowed to estimate the following parameters: GC_{max} the value of the higher asymptote corresponding to the maximum percentage of ground cover, $t_{1/2}$ the inflection point of the curve at which half of GC_{max} is reached, and r the speed of ground coverage at $t_{1/2}$.

The parameters of the growth curves were then used as response variables in linear mixed models. Data from the two years of the experiment were analysed separately. The service plant species was a fixed factor, and the experimental block was set as a random factor. The effect of the service plant species was tested *via* type II ANOVAs. The normality and homoscedasticity assumptions were systematically checked with Shapiro Wilk's test and Bartlett's test, respectively. When they were not met, Kruskal-Wallis rank sum test was used instead, as log-transformation did not allow to satisfy these assumptions. The multiple comparisons were performed using Dunnett's test after an ANOVA with the sole chickpea as the control treatment, or Dunn's test after a Kruskal-Wallis test.

Results

The growth curves fitted to the data are presented in Figure A5-1, and the results of the statistical analyses are detailed in Table A5-1.

Our results show that the chickpea-oat intercrop was the only treatment that was significantly different from the sole chickpea (Figure A5-1d,i; Table A5-1). The time needed to reach half of the final ground cover was on average twice as low in the chickpea-oat intercrop than in the sole crop ($t_{1/2}$, $p < 0.001$, Table A5-1), and the speed of ground coverage was also higher (r, $p < 0.01$, Table A5-1). However, the maximum percentage of ground coverage was also lower than the sole crop's (GC_{max}, $p < 0.001$, Figure A5-1d,i; Table A5-1). Still, this value must be underestimated, as the discoloration of oat leaves due to attacks of cereal leaf beetles made them less detectable by the Canopeo app, which only detects green cover (Patrignani and Ochsner, 2015).

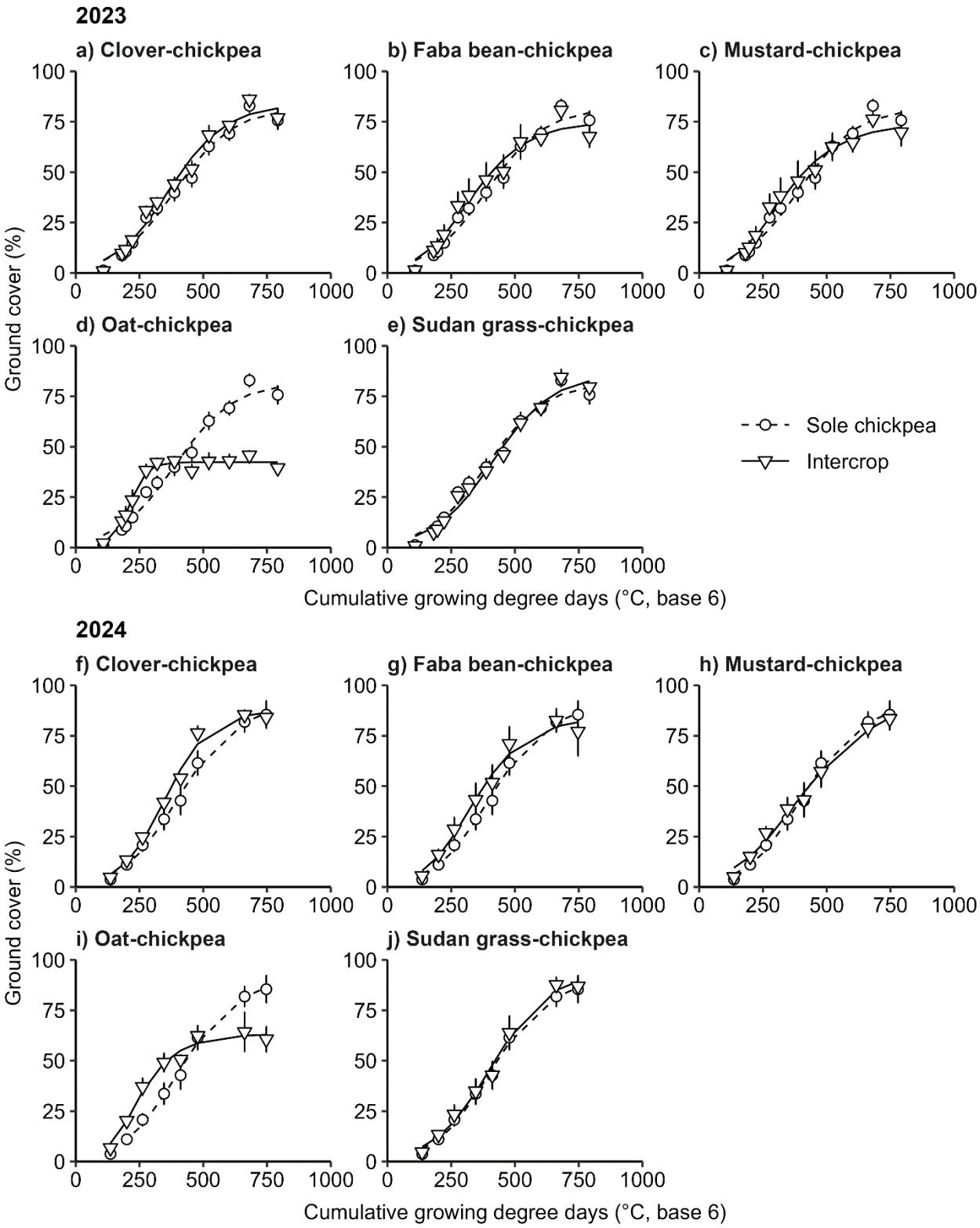


Figure A5-1: Evolution of the percentage of ground covered by the sole chickpea and by the intercrops (chickpea and the service plant combined) in the different treatments in 2023 and 2024. Each symbol corresponds to the mean of the four experimental blocks. Error bars represent the standard deviation. The lines represent the growth curves fitted to the data.

Table A5-1: Parameters of the ground cover growth curves in the sole crop and in the different intercrops.

		GC_{max} (%)	$t_{1/2}$ (GDD)	r (10^{-3} GDD^{-1})
2023	Sole chickpea	78.8 ± 5.5	397.2 ± 25.0	9.4 ± 0.9
	Clover-chickpea	83.6 ± 3.2	372.8 ± 26.6	9.8 ± 1.4
	Faba bean-chickpea	74.8 ± 4.6	339.1 ± 59.2	10.7 ± 2.8
	Mustard-chickpea	74.2 ± 7.2	342.7 ± 74.6	11.4 ± 4.0
	Oat-chickpea	42.3 ± 2.3 ***	211.8 ± 13.2 *	31.6 ± 3.4 *
	Sudan grass-chickpea	85.9 ± 1.4 .	414.8 ± 19.5	8.8 ± 0.7
	p-value	< 0.001 ***	< 0.001 *** (KW)	0.001 ** (KW)
2024	Sole chickpea	92.1 ± 8.8	417.3 ± 36.6	9.8 ± 1.7
	Clover-chickpea	87.4 ± 3.3	352.2 ± 14.4	12.1 ± 1.3
	Faba bean-chickpea	83.7 ± 9.3	343.8 ± 62.8	11.5 ± 3.3
	Mustard-chickpea	96.2 ± 2.6	434.8 ± 46.0	8.2 ± 1.6
	Oat-chickpea	63.9 ± 6.7 ***	260.1 ± 40.8 *	16.9 ± 6.1 .
	Sudan grass-chickpea	93.5 ± 4.1	406.7 ± 32.0	9.3 ± 0.7
	p-value	< 0.001 ***	< 0.001 *** (KW)	0.002 ** (KW)

GDD: Growing degree days (°C, base 6).

Values are means ± standard deviation (n=8). Asterisks indicate significance levels for each factor: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$. (KW) Indicates that the data were analysed by performing a Kruskal-Wallis rank sum test. GC_{max}: value of the higher asymptote corresponding to the maximum percentage of ground cover, $t_{1/2}$: the inflection point of the curve at which half of GC_{max} is reached, and r: the speed of ground coverage at $t_{1/2}$.

Annexe 6 : Abundance of the dominant weed species in the different treatments

This annex presents the weed abundance data of all the treatments tested, as not all of them were included in Chapter 3.

Materials and methods

The experimental design is the same as described in Chapter 1, with the only difference being that mustard (*Sinapis alba*) was included in the analyses.

The measurements presented here were collected according to the same methodology as presented in Chapter 3. The rank-abundance plots were also constructed in the same manner, using EPPO codes to represent the different weed species. AMARE: *Amaranthus retroflexus*, APESV: *Apera spica-venti*, 1COVF: *Convolvulus arvensis* and *Calystegia sepium*, CHEAL: *Chenopodium album*, CHEPO: *Chenopodium polyspermum*, DIGSA: *Digitaria sanguinalis*, ECHCG: *Echinochloa crus-galli*, LOLMU: *Lolium multiflorum*, POLLA: *Persicaria lapathifolia*, POLPE: *Persicaria maculosa*, SETPU: *Setaria pumila*, SOLNI: *Solanum nigrum*, SONAS: *Sonchus asper*.

Results

Following the same outline as Chapter 3, the results section first starts with an overview of the contribution of chickpea, service plants, and weeds to the total biomass of the mixture in the different treatments at the beginning of flowering and at grain-filling (Figure A6-1). Rank-abundance plots then present the density of the five most abundant weed species in the different treatments at the same two stages in 2023 (Figure A6-2) and 2024 (Figure A6-3).

Contribution of chickpea, service plants, and weeds to the total biomass of the mixture

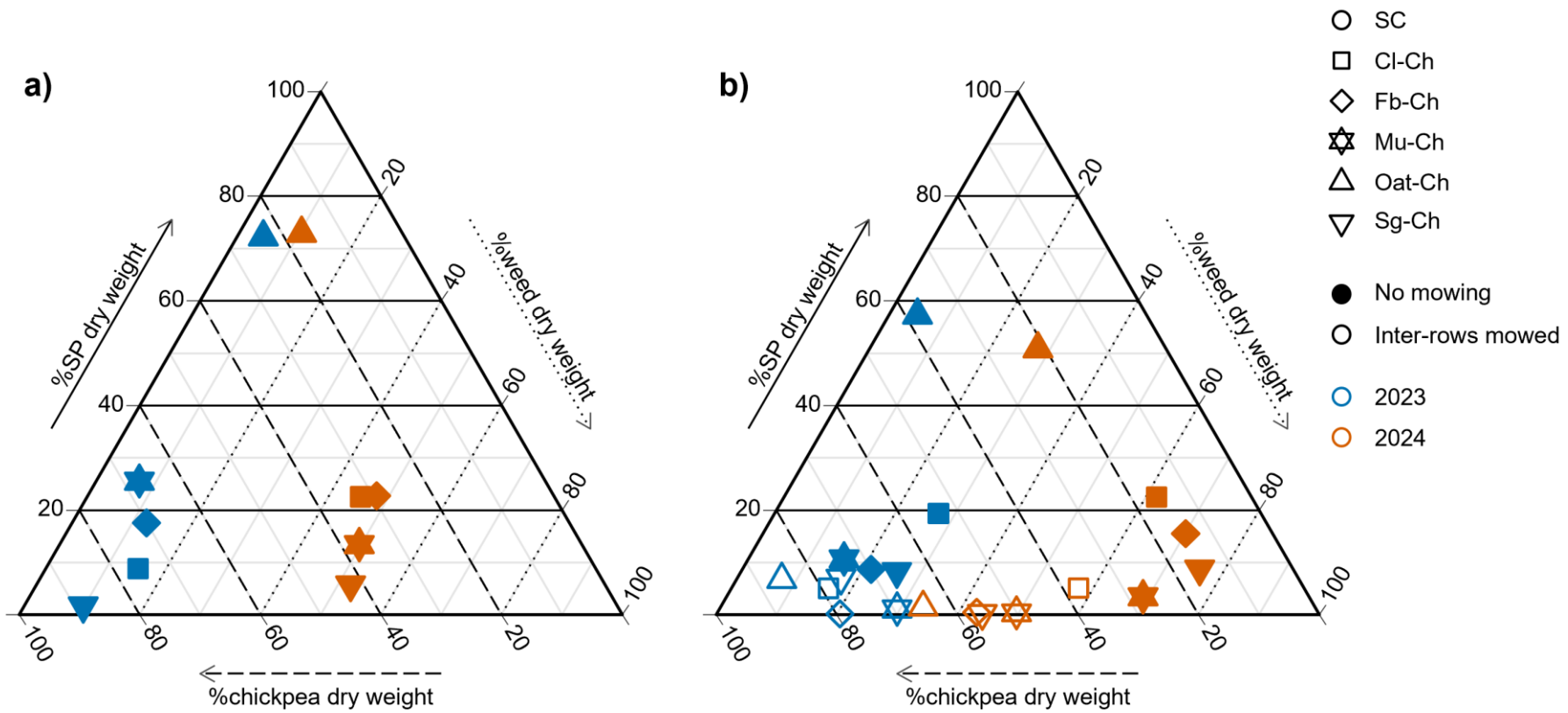


Figure A6-1: Contribution of chickpea, service plants, and weeds to the total biomass of the mixture in the different treatments at the beginning of chickpea flowering (a) and at the grain-filling stage (b) in 2023 and 2024. Each symbol corresponds to the mean of the four experimental blocks. SC: sole chickpea, Cl-Ch: clover-chickpea intercrop, Fb-Ch: faba bean-chickpea, Mu-Ch: mustard-chickpea, Oat-Ch: oat-chickpea, and Sg-Ch: Sudan grass-chickpea.

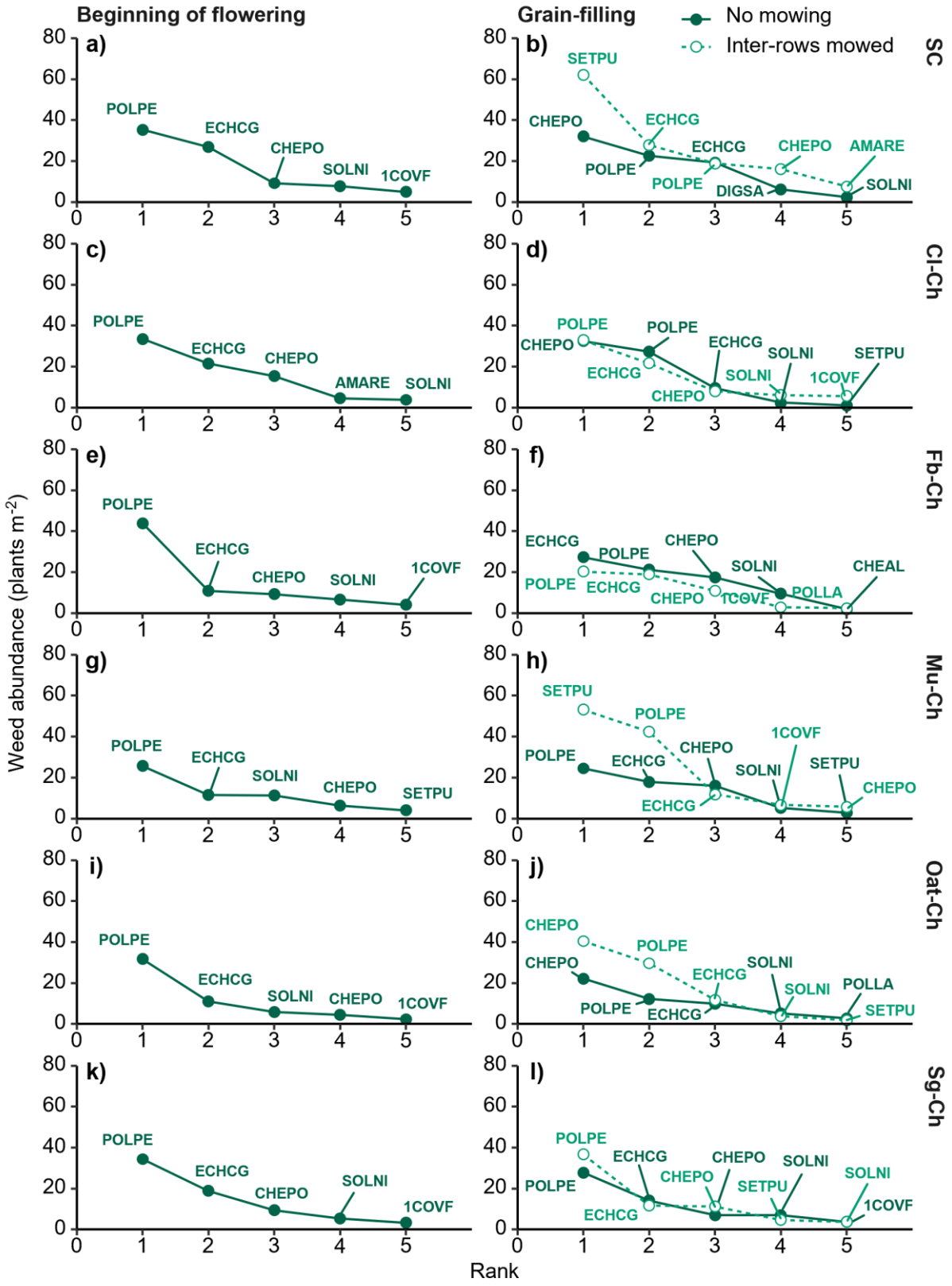


Figure A6-2: Rank-abundance plots representing the five most abundant weed species in each treatment at the beginning of chickpea flowering (left panels), and at the grain-filling stage (right panels), in 2023. Each point corresponds to the mean of the four blocks. SC: sole chickpea, Cl Ch: clover-chickpea intercrop, Fb-Ch: faba bean-chickpea, Mu-Ch: mustard-chickpea, Oat-Ch: oat-chickpea, and Sg-Ch: Sudan grass-chickpea.

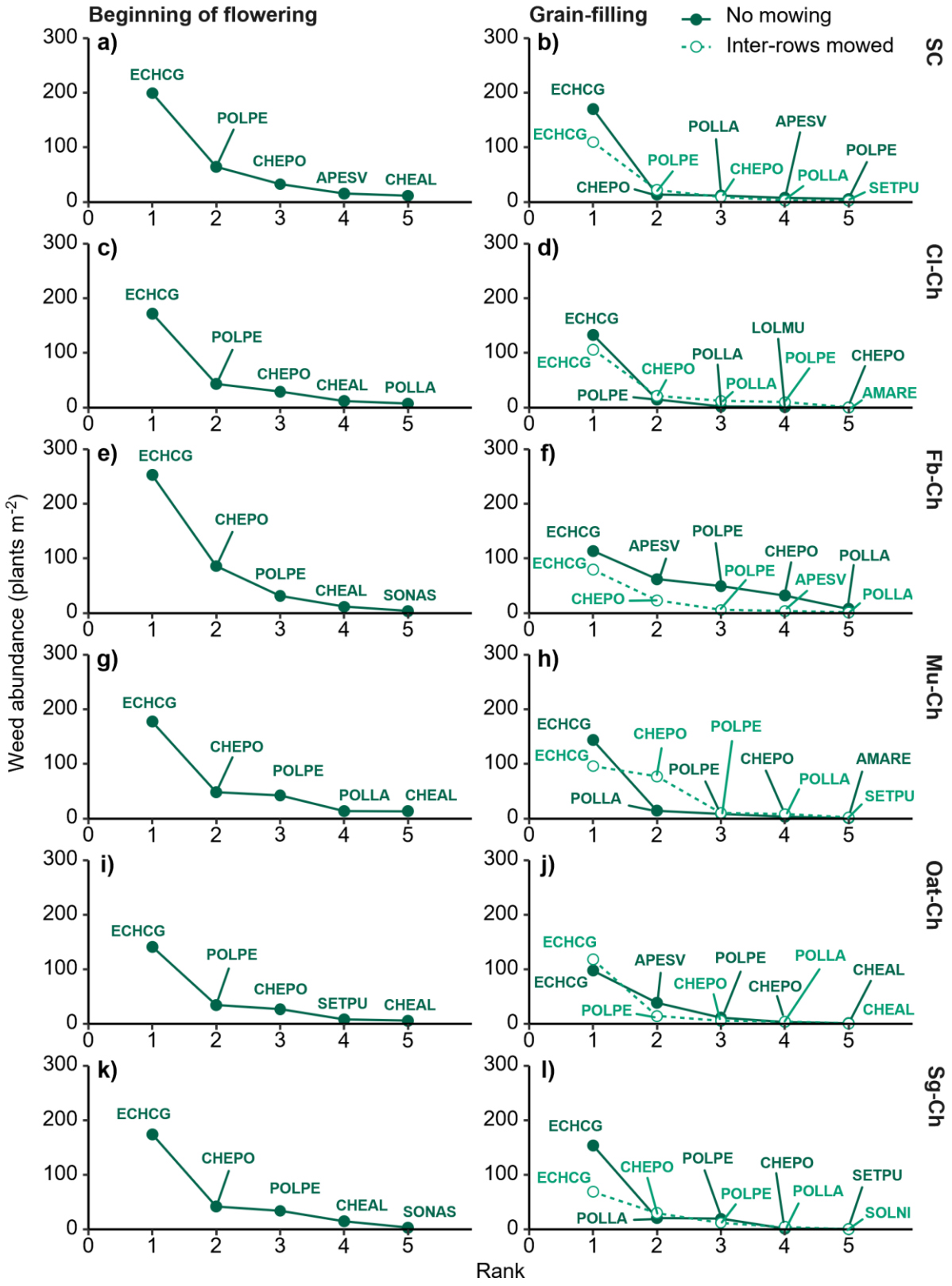


Figure A6-3: Rank-abundance plots representing the five most abundant weed species in each treatment at the beginning of chickpea flowering (left panels), and at the grain-filling stage (right panels), in 2024. Each point corresponds to the mean of the four blocks. SC: sole chickpea, Cl Ch: clover-chickpea intercrop, Fb-Ch: faba bean-chickpea, Mu-Ch: mustard-chickpea, Oat-Ch: oat-chickpea, and Sg-Ch: Sudan grass-chickpea.

Annexe 7 : Abundance of all weed species in the sole chickpea and in the chickpea-oat intercrop

This annex is a supplementary material to Chapter 3. In this section, the abundance of all weed species found in the sole chickpea and in the chickpea-oat intercrop treatments are given.

The experimental design and the methodology of data collection presented here are identical to the description made in Chapter 3. The weed species and their corresponding EPPO code presented in this annex are given in Table A7-1. Their abundance is detailed in Table A7-2 to Table A7-5 in descending order.

Table A7-1: EPPO code and latin name of the weed species found in the sole chickpea and in the chickpea-oat intercrops.

EPPO code	Latin name
AMARE	*Amaranthus retroflexus*
ANGAR	*Lysimachia arvensis*
APESV	*Apera spica-venti*
ATHOR	*Misopates orontium*
1COVF	*Convolvulaceae*
CHEAL	*Chenopodium album*
CHEPO	*Chenopodium polyspermum*
DATST	*Datura stramonium*
DIGSA	*Digitaria sanguinalis*
ECHCG	*Echinochloa crus-galli*
KICSP	*Kickxia spuria*
LOLMU	*Lolium multiflorum*
MERAN	*Mercurialis annua*
POLAV	*Polygonum aviculare*
POLCO	*Fallopia convolvulus*
POLLA	*Persicaria lapathifolia*
POLPE	*Persicaria maculosa*
POROL	*Portulaca oleracea*
1RUMG	*Rumex*
SENVU	*Senecio vulgaris*
SETPU	*Setaria pumila*
SOLNI	*Solanum nigrum*
SONAS	*Sonchus asper*
STEME	*Stellaria media*
VERPE	*Veronica persica*

Table A7-2: Weed species abundance (plants m^{-2}) found in the sole chickpea (SC) and in the chickpea-oat intercrop (IC) in 2023 and 2024. The inter-rows were either not mowed (WM) or mowed once at the beginning of chickpea flowering (M).

			ECHCG	POLPE	CHEPO	SETPU	APESV	POLLA
Beginning of flowering								
2023	SC	WM	26.8 ± 20.2	35.3 ± 21.7	9.2 ± 6.2	0 ± 0	0 ± 0	4.9 ± 6.0
	IC	WM	11.1 ± 5.2	31.8 ± 24.8	4.5 ± 3.1	0 ± 0	0 ± 0	1.2 ± 1.4
2024	SC	WM	199.4 ± 106.6	64.5 ± 71.1	32.7 ± 25.2	6.1 ± 5.5	15.5 ± 19.5	6.1 ± 8.9
	IC	WM	141.2 ± 48.1	34.6 ± 43.2	27.1 ± 23.0	8.2 ± 8.4	5.2 ± 6.2	0.9 ± 0.8
Grain-filling								
2023	SC	WM	19.3 ± 8.7	22.6 ± 9.8	32.0 ± 26.1	0.9 ± 1.9	0 ± 0	0 ± 0
		M	27.8 ± 23.5	18.8 ± 21.1	16.0 ± 11.6	62.1 ± 121.8	0 ± 0	0 ± 0
	IC	WM	9.9 ± 5.0	12.2 ± 8.9	22.1 ± 12.8	0.5 ± 0.9	0 ± 0	2.8 ± 3.6
		M	11.8 ± 10.5	29.7 ± 28.0	40.5 ± 35.7	1.9 ± 3.8	0 ± 0	0 ± 0
2024	SC	WM	170.4 ± 100.0	5.6 ± 4.1	13.7 ± 17.3	0 ± 0	7.5 ± 15.1	11.8 ± 14.0
		M	109.7 ± 45.2	22.1 ± 28.3	9.4 ± 12.6	2.4 ± 4.7	0 ± 0	2.8 ± 5.6
	IC	WM	97.9 ± 91.2	11.8 ± 14.3	3.8 ± 5.3	0 ± 0	39.1 ± 78.2	0.5 ± 0.9
		M	118.2 ± 59.0	14.6 ± 26.7	5.6 ± 4.9	0 ± 0	0 ± 0	4.2 ± 6.2

Values are means ± standard deviation (n=8 at flowering and n=4 at grain-filling).

Table A7-3: Weed species abundance (plants m^{-2}) found in the sole chickpea (SC) and in the chickpea-oat intercrop (IC) in 2023 and 2024. The inter-rows were either not mowed (WM) or mowed once at the beginning of chickpea flowering (M).

			SOLNI	CHEAL	1COVF	AMARE	DIGSA	SONAS	SENVU	STEME
Beginning of flowering										
2023	SC	WM	7.8 ± 4.3	2.1 ± 4.2	4.9 ± 5.8	1.9 ± 2.0	1.6 ± 2.1	0.5 ± 0.5	0.2 ± 0.5	0 ± 0
	IC	WM	5.9 ± 7.4	0 ± 0	2.4 ± 2.8	1.4 ± 2.2	0.5 ± 0.9	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
2024	SC	WM	0.2 ± 0.5	11.5 ± 5.1	5.9 ± 11.8	0.7 ± 0.9	0.7 ± 0.9	2.1 ± 1.8	1.9 ± 1.9	0.9 ± 0.8
	IC	WM	0.5 ± 0.9	6.1 ± 3.5	0 ± 0	0 ± 0	0.2 ± 0.5	2.4 ± 1.2	0 ± 0	0 ± 0
Grain-filling										
2023	SC	WM	2.4 ± 2.8	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	6.1 ± 12.2	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
		M	5.2 ± 8.0	0 ± 0	3.3 ± 6.6	7.5 ± 10.7	0 ± 0	0.5 ± 0.9	0 ± 0	0 ± 0
	IC	WM	5.2 ± 3.9	0 ± 0	0.9 ± 1.9	0.5 ± 0.9	0.9 ± 1.1	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
		M	3.8 ± 4.1	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	1.4 ± 2.8	0 ± 0	0.5 ± 0.9	0 ± 0
2024	SC	WM	0 ± 0	4.2 ± 5.0	0.5 ± 0.9	0 ± 0	0 ± 0	0.5 ± 0.9	0 ± 0	0 ± 0
		M	0 ± 0	0 ± 0	0.9 ± 1.9	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0.9 ± 1.9
	IC	WM	0.5 ± 0.9	1.4 ± 1.8	0.5 ± 0.9	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
		M	0 ± 0	0.9 ± 1.9	0 ± 0	0.5 ± 0.9	0 ± 0	0.5 ± 0.9	0 ± 0	0.5 ± 0.9

Values are means ± standard deviation (n=8 at flowering and n=4 at grain-filling).

Table A7-4: Weed species abundance (plants m^{-2}) found in the sole chickpea (SC) and in the chickpea-oat intercrop (IC) in 2023 and 2024. The inter-rows were either not mowed (WM) or mowed once at the beginning of chickpea flowering (M).

			POLAV	LOLMU	ANGAR	POLCO	POROL	1RUMG	VERPE
Beginning of flowering									
2023	SC	WM	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
	IC	WM	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
2024	SC	WM	0.7 ± 0.9	0.7 ± 0.9	1.2 ± 0.9	0 ± 0	0.2 ± 0.5	0.2 ± 0.5	0.2 ± 0.5
	IC	WM	0 ± 0	0.2 ± 0.5	0.2 ± 0.5	0 ± 0	0 ± 0	0.5 ± 0.9	0.5 ± 0.5
Grain-filling									
2023	SC	WM	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
		M	0.5 ± 0.9	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
	IC	WM	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
		M	0.5 ± 0.9	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
2024	SC	WM	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
		M	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0.5 ± 0.9	0 ± 0	0 ± 0
	IC	WM	0 ± 0	0.5 ± 0.9	0 ± 0	0.9 ± 1.9	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
		M	0.5 ± 0.9	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0

Values are means ± standard deviation (n=8 at flowering and n=4 at grain-filling).

Table A7-5: Weed species abundance (plants m^{-2}) found in the sole chickpea (SC) and in the chickpea-oat intercrop (IC) in 2023 and 2024. The inter-rows were either not mowed (WM) or mowed once at the beginning of chickpea flowering (M).

			ATHOR	DATST	KICSP	MERAN
Beginning of flowering						
2023	SC	WM	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
	IC	WM	0 ± 0	0.2 ± 0.5	0 ± 0	0 ± 0
2024	SC	WM	0.2 ± 0.5	0 ± 0	0.2 ± 0.5	0.2 ± 0.5
	IC	WM	0.2 ± 0.5	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
Grain-filling						
2023	SC	WM	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
		M	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
	IC	WM	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
		M	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
2024	SC	WM	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
		M	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
	IC	WM	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
		M	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0

Values are means ± standard deviation (n=8 at flowering and n=4 at grain-filling).

Bibliographie

Adeux, G., Vieren, E., Carlesi, S., Bàrberi, P., Munier-Jolain, N., Cordeau, S., 2019. Mitigating crop yield losses through weed diversity. Nat. Sustain. 2, 1018–1026. https://doi.org/10.1038/s41893-019-0415-y

Agreste, 2025a. Recensements agricoles [WWW Document]. VizAgreste. URL https://vizagreste.agriculture.gouv.fr/ (accessed 8.6.25).

Agreste, 2025b. RA2020 - Cultures détaillées par département [WWW Document]. Agreste. URL https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/RA2020_1013/detail/ (accessed 8.8.25).

Alonso-Ayuso, M., Gabriel, J.L., Hontoria, C., Ibáñez, M.Á., Quemada, M., 2020. The cover crop termination choice to designing sustainable cropping systems. Eur. J. Agron. 114, 126000. https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126000

Altieri, M.A., 1999. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. Agric. Ecosyst. Environ. 74, 19–31. https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00028-6

Altieri, M.A., 1996. Agroecology: The Science Of Sustainable Agriculture, 2nd ed. CRC Press, Boca Raton. https://doi.org/10.1201/9780429495465

Altieri, M.A., Lana, M.A., Bittencourt, H.V., Kieling, A.S., Comin, J.J., Lovato, P.E., 2011. Enhancing Crop Productivity via Weed Suppression in Organic No-Till Cropping Systems in Santa Catarina, Brazil. J. Sustain. Agric. 35, 855–869. https://doi.org/10.1080/10440046.2011.588998

Altieri, M.A., Nicholls, C.I., Henao, A., Lana, M.A., 2015. Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. Agron. Sustain. Dev. 35, 869–890. https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2

Ambika, Hegde, V., Nimmy, M.S., Bharadwaj, C., Tripathi, S., Singh, R.K., Kumar, R., 2021. Unraveling genetics of semi-determinacy and identification of markers for indeterminate stem growth habit in chickpea (*Cicer arietinum* L.). Sci. Rep. 11, 21837. https://doi.org/10.1038/s41598-021-01464-3

Amossé, C., Jeuffroy, M.-H., Mary, B., David, C., 2014. Contribution of relay intercropping with legume cover crops on nitrogen dynamics in organic grain systems. Nutr. Cycl. Agroecosyst. 98, 1–14. https://doi.org/10.1007/s10705-013-9591-8

Anbessa, Y., Warkentin, T., Bueckert, R., Vandenberg, A., 2007. Short internode, double podding and early flowering effects on maturity and other agronomic characters in chickpea. Field Crops Res. 102, 43–50. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.01.004

Andreasen, C., Hansen, C.H., Møller, C., Kjær-Pedersen, N., 2002. Regrowth of Weed Species after Cutting. Weed Technol. 16, 873–879. https://doi.org/10.1614/0890-037X(2002)016%255B0873:ROWSAC%255D2.0.CO;2

Angus, J.F., Kirkegaard, J.A., Hunt, J.R., Ryan, M.H., Ohlander, L., Peoples, M.B., 2015. Break crops and rotations for wheat. Crop Pasture Sci. 66, 523–552. https://doi.org/10.1071/CP14252

ARVALIS, 2021. GRAAL - Gestion d'un couvert permanent de légumineuse par fauchage en inter-rangs d'une culture principale [WWW Document]. ARVALIS. URL https://www.arvalis.fr/recherche-innovation/nos-travaux-de-recherche/graal (accessed 10.19.25).

Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R.P., Lobell, D.B., Cammarano, D., Kimball, B.A., Ottman, M.J., Wall, G.W., White, J.W., Reynolds, M.P., Alderman, P.D., Prasad, P.V.V., Aggarwal, P.K., Anothai, J., Basso, B., Biernath, C., Challinor, A.J., De Sanctis, G., Doltra, J., Fereres, E., Garcia-Vila, M., Gayler, S., Hoogenboom, G., Hunt, L.A., Izaurralde, R.C., Jabloun, M., Jones, C.D., Kersebaum, K.C., Koehler, A.-K., Müller, C., Naresh Kumar, S., Nendel, C., O'Leary, G., Olesen, J.E., Palosuo, T., Priesack, E., Eyshi Rezaei, E., Ruane, A.C., Semenov, M.A., Shcherbak, I., Stöckle, C., Stratonovitch, P., Streck, T., Supit, I., Tao, F., Thorburn, P.J., Waha, K., Wang, E., Wallach, D., Wolf, J., Zhao, Z., Zhu, Y., 2015. Rising temperatures reduce global wheat production. Nat. Clim. Change 5, 143–147. https://doi.org/10.1038/nclimate2470

Atik, O., Ahmed, S., Abang, M.M., Imtiaz, M., Hamwieh, A., Baum, M., El-Ahmed, A., Murad, S., Yabrak, M.M., 2013. Pathogenic and genetic diversity of *Didymella rabiei* affecting chickpea in Syria. Crop Prot. 46, 70–79. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2012.12.012

Avola, G., Tuttobene, R., Gresta, F., Abbate, V., 2008. Weed control strategies for grain legumes. Agron. Sustain. Dev. 28, 389–395. https://doi.org/10.1051/agro:2008019

Ballaré, C.L., Pierik, R., 2017. The shade-avoidance syndrome: multiple signals and ecological consequences. Plant Cell. Environ. 40, 2530–2543. https://doi.org/10.1111/pce.12914

Banik, P., Midya, A., Sarkar, B.K., Ghose, S.S., 2006. Wheat and chickpea intercropping systems in an additive series experiment: Advantages and weed smothering. Eur. J. Agron. 24, 325–332. https://doi.org/10.1016/j.eja.2005.10.010

Bar, I., Sambasivam, P.T., Davidson, J., Farfan-Caceres, L.M., Lee, R.C., Hobson, K., Moore, K., Ford, R., 2021. Current population structure and pathogenicity patterns of *Ascochyta rabiei* in Australia. Microb. Genom. 7, 000627. https://doi.org/10.1099/mgen.0.000627

Bàrberi, P., Bocci, G., Carlesi, S., Armengot, L., Blanco-Moreno, J.M., Sans, F.X., 2018. Linking species traits to agroecosystem services: a functional analysis of weed communities. Weed Res. 58, 76–88. https://doi.org/10.1111/wre.12283

Basso, M.F., Girardin, G., Vergata, C., Buti, M., Martinelli, F., 2024. Genome-wide transcript expression analysis reveals major chickpea and lentil genes associated with plant branching. Front. Plant Sci. 15. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1384237

Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., Walker, S., 2015. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. J. Stat. Softw. 67, 1–48. https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01

Batlla, D., Benech-Arnold, R.L., 2014. Weed seed germination and the light environment: Implications for weed management. Weed Biol. Manag. 14, 77–87. https://doi.org/10.1111/wbm.12039

Bedoussac, L., Journet, E.-P., Hauggaard-Nielsen, H., Naudin, C., Corre-Hellou, G., Jensen, E.S., Prieur, L., Justes, E., 2015. Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review. Agron. Sustain. Dev. 35, 911–935. https://doi.org/10.1007/s13593-014-0277-7

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

Bedoussac, L., Justes, E., 2010b. 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 Soil. 330, 19–35. https://doi.org/10.1007/s11104-009-0082-2

Benjamin, J.G., Nielsen, D.C., 2006. Water deficit effects on root distribution of soybean, field pea and chickpea. Field Crops Res. 97, 248–253. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.10.005

Betencourt, E., Duputel, M., Colomb, B., Desclaux, D., Hinsinger, P., 2012. Intercropping promotes the ability of durum wheat and chickpea to increase rhizosphere phosphorus availability in a low P soil. Soil Biol. Biochem. 46, 181–190. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.11.015

Bopp, M.-C., Kazakou, E., Metay, A., Fried, G., 2022. Relative importance of region, seasonality and weed management practice effects on the functional structure of weed communities in French vineyards. Agric. Ecosyst. Environ. 330, 107892. https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.107892

Boudreau, M.A., 2013. Diseases in Intercropping Systems. Annu. Rev. Phytopathol. 51, 499–519. https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082712-102246

Bousselin, X., Baux, A., Lorin, M., Fustec, J., Cassagne, N., Valantin-Morison, M., 2024. Winter oilseed rape intercropped with complex service plant mixtures: Do all species matter? Eur. J. Agron. 154, 127097. https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127097

Bousselin, X., Cassagne, N., Baux, A., Valantin-Morison, M., Herrera, J.M., Lorin, M., Hédan, M., Fustec, J., 2021. Interactions between Plants and Plant-Soil in Functionally Complex Mixtures including Grass Pea, Faba Bean and Niger, Intercropped with Oilseed Rape. Agronomy 11, 1493. https://doi.org/10.3390/agronomy11081493

Brooker, R.W., Bennett, A.E., Cong, W.-F., Daniell, T.J., George, T.S., Hallett, P.D., Hawes, C., Iannetta, P.P.M., Jones, H.G., Karley, A.J., Li, L., McKenzie, B.M., Pakeman, R.J., Paterson, E., Schöb, C., Shen, J., Squire, G., Watson, C.A., Zhang, C., Zhang, F., Zhang, J., White, P.J., 2015. Improving intercropping: a synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology. New Phytol. 206, 107–117. https://doi.org/10.1111/nph.13132

Brunetto, G., Ventura, M., Scandellari, F., Ceretta, C.A., Kaminski, J., de Melo, G.W., Tagliavini, M., 2011. Nutrient release during the decomposition of mowed perennial ryegrass and white clover and its contribution to nitrogen nutrition of grapevine. Nutr. Cycl. Agroecosyst. 90, 299–308. https://doi.org/10.1007/s10705-011-9430-8

Büchi, L., Gebhard, C.-A., Liebisch, F., Sinaj, S., Ramseier, H., Charles, R., 2015. Accumulation of biologically fixed nitrogen by legumes cultivated as cover crops in Switzerland. Plant Soil 393, 163–175. https://doi.org/10.1007/s11104-015-2476-7

Butler, R.A., Brouder, S.M., Johnson, W.G., Gibson, K.D., 2013. Response of Four Summer Annual Weed Species to Mowing Frequency and Height. Weed Technol. 27, 798–802. https://doi.org/10.1614/WT-D-12-00112.1

Bybee-Finley, K.A., Cordeau, S., Yvoz, S., Mirsky, S.B., Ryan, M.R., 2022. Finding the right mix: a framework for selecting seeding rates for cover crop mixtures. Ecol. Appl. 32, e02484. https://doi.org/10.1002/eap.2484

Campbell, B.M., Beare, D.J., Bennett, E.M., Hall-Spencer, J.M., Ingram, J.S.I., Jaramillo, F., Ortiz, R., Ramankutty, N., Sayer, J.A., Shindell, D., 2017. Agriculture production as a major driver of the Earth system exceeding planetary boundaries. Ecol. Soc. 22, 8. https://doi.org/10.5751/ES-09595-220408

Campiglia, E., Caporali, F., Radicetti, E., Mancinelli, R., 2010a. Hairy vetch (*Vicia villosa* Roth.) cover crop residue management for improving weed control and yield in no-tillage tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) production. Eur. J. Agron. 33, 94–102. https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.04.001

Campiglia, E., Mancinelli, R., Radicetti, E., Caporali, F., 2010b. Effect of cover crops and mulches on weed control and nitrogen fertilization in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). Crop Prot. 29, 354–363. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2009.12.001

Canali, S., Campanelli, G., Ciaccia, C., Leteo, F., Testani, E., Montemurro, F., 2013. Conservation tillage strategy based on the roller crimper technology for weed control in Mediterranean

vegetable organic cropping systems. Eur. J. Agron. 50, 11–18. https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.05.001

Carton, N., Naudin, C., Piva, G., Corre-Hellou, G., 2020. Intercropping Winter Lupin and Triticale Increases Weed Suppression and Total Yield. Agriculture 10, 316. https://doi.org/10.3390/agriculture10080316

Cernay, C., Ben-Ari, T., Pelzer, E., Meynard, J.-M., Makowski, D., 2015. Estimating variability in grain legume yields across Europe and the Americas. Sci. Rep. 5. https://doi.org/10.1038/srep11171

Chalk, P.M., Alves, B.J.R., Boddey, R.M., Urquiaga, S., 2010. Integrated effects of abiotic stresses on inoculant performance, legume growth and symbiotic dependence estimated by 15N dilution. Plant Soil. 328, 1–16. https://doi.org/10.1007/s11104-009-0187-7

Cheriere, T., 2020. Approche fonctionnelle du choix de l'espèce associée au soja et arrangement spatial dans les associations de cultures : impact sur les services obtenus pendant et après la culture. (thesis). Angers.

Cheriere, T., Lorin, M., Corre-Hellou, G., 2023. Choosing the right associated crop species in soybean-based intercropping systems: Using a functional approach to understand crop growth dynamics. Field Crops Res. 298, 108964. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108964

Cheriere, T., Lorin, M., Corre-Hellou, G., 2020. Species choice and spatial arrangement in soybean-based intercropping: Levers that drive yield and weed control. Field Crops Res. 256. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107923

Chongo, G., Gossen, B.D., 2001. Effect of plant age on resistance to *Ascochyta rabiei* in chickpea. Can. J. Plant Pathol. 23, 358–363. https://doi.org/10.1080/07060660109506956

Colas, T., Boudour, D., 2024. Statistique agricole annuelle 2023 - Chiffres définitifs (No. 2024–16), Chiffres et données. Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire - Service de la statistique et de la prospective.

Connell, J.H., 1978. Diversity in Tropical Rain Forests and Coral Reefs. Science 199, 1302–1310. https://doi.org/10.1126/science.199.4335.1302

Corre-Hellou, G., Brisson, N., Launay, M., Fustec, J., Crozat, Y., 2007. Effect of root depth penetration on soil nitrogen competitive interactions and dry matter production in pea–barley intercrops given different soil nitrogen supplies. Field Crops Res. 103, 76–85. https://doi.org/10.1614/WS-D-09-00040.1

Corre-Hellou, G., Dibet, A., Hauggaard-Nielsen, H., Crozat, Y., Gooding, M., Ambus, P., Dahlmann, C., von Fragstein, P., Pristeri, A., Monti, M., Jensen, E.S., 2011. The competitive ability of

pea–barley intercrops against weeds and the interactions with crop productivity and soil N availability. Field Crops Res. 122, 264–272. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.04.004

Couëdel, A., Kirkegaard, J., Alletto, L., Justes, É., 2019. Crucifer-legume cover crop mixtures for biocontrol: Toward a new multi-service paradigm, in: Advances in Agronomy. Academic Press, pp. 55–139.

Cowie, A.L., Jessop, R.S., MacLeod, D.A., 1996. Effects of waterlogging on chickpeas I. Influence of timing of waterlogging. Plant Soil. 183, 97–103. https://doi.org/10.1007/BF02185569

Croser, J.S., Clarke, H.J., Siddique, K.H.M., Khan, T.N., 2003. Low-Temperature Stress: Implications for Chickpea (*Cicer arietinum* L.) Improvement. Crit. Rev. Plant Sci. 22. https://doi.org/10.1080/713610855

Cu, S.T.T., Hutson, J., Schuller, K.A., 2005. Mixed culture of wheat (*Triticum aestivum* L.) with white lupin (*Lupinus albus* L.) improves the growth and phosphorus nutrition of the wheat. Plant Soil. 272, 143–151. https://doi.org/10.1007/s11104-004-4336-8

Curran, J., 2012. The nutritional value and health benefits of pulses in relation to obesity, diabetes, heart disease and cancer. Br. J. Nutr. 108, S1–S2. https://doi.org/10.1017/S0007114512003534

Damour, G., Dorel, M., Quoc, H.T., Meynard, C., Risède, J.-M., 2014. A trait-based characterization of cover plants to assess their potential to provide a set of ecological services in banana cropping systems. Eur. J. Agron. 52, 218–228. https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.09.004

Darby, H., Krezinski, I., 2024. Inter-row Mowing in Organic No-till Black Beans, Northwest Crops & Soils Program. University of Vermont Extension.

Daryanto, S., Wang, L., Jacinthe, P.-A., 2017. Global synthesis of drought effects on cereal, legume, tuber and root crops production: A review. Agric. Water Manag., Special Issue on Improving Agricultural Water Productivity to Ensure Food Security under Changing Environments Overseen by: Brent Clothier 179, 18–33. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.04.022

Davis, A.S., 2010. Cover-Crop Roller–Crimper Contributes to Weed Management in No-Till Soybean. Weed Sci. 58, 300–309. https://doi.org/10.1614/WS-D-09-00040.1

Dayoub, E., Piva, G., Shirtliffe, S.J., Fustec, J., Corre-Hellou, G., Naudin, C., 2022. Species Choice Influences Weed Suppression, N Sharing and Crop Productivity in Oilseed Rape–Legume Intercrops. Agronomy 12, 2187. https://doi.org/10.3390/agronomy12092187

Depeyrot, J.-N., Hugonnet, M., 2024. Concentration et spécialisation en agriculture, à l'aune des recensements agricoles de 1970 à 2020 (No. 199), Analyse. Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire - Service de la statistique et de la prospective.

Devasirvatham, V., Gaur, P.M., Raju, T.N., Trethowan, R.M., Tan, D.K.Y., 2015. Field response of chickpea (*Cicer arietinum* L.) to high temperature. Field Crops Res. 172, 59–71. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.11.017

Dijan-Caporalino, C., Lavoir, A.-V., 2024. Les plantes de services : Vers de nouveaux agroécosystèmes, 1re édition. ed. Quae, Versailles.

Ditzler, L., van Apeldoorn, D.F., Pellegrini, F., Antichi, D., Bàrberi, P., Rossing, W.A.H., 2021. Current research on the ecosystem service potential of legume inclusive cropping systems in Europe. A review. Agron. Sustain. Dev. 41, 26. https://doi.org/10.1007/s13593-021-00678-z

Donald, W.W., 2007. Control of Both Winter Annual and Summer Annual Weeds in No-till Corn with Between-row Mowing Systems. Weed Technol. 21, 591–601. https://doi.org/10.1614/WT-05-141.1

Dong, N., Tang, M.-M., Zhang, W.-P., Bao, X.-G., Wang, Y., Christie, P., Li, L., 2018. Temporal Differentiation of Crop Growth as One of the Drivers of Intercropping Yield Advantage. Sci. Rep. 8. https://doi.org/10.1038/s41598-018-21414-w

Dowling, A., Roberts, P., Doolette, A., Zhou, Y., Denton, M.D., 2023. Oilseed-legume intercropping is productive and profitable in low input scenarios. Agric. Syst. 204. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103551

Duru, M., Aubert, P.-M., Couturier, C., Doublet, S., 2021. Scénarios de systèmes alimentaires à l'horizon 2050 au niveau européen et français : quels éclairages pour les politiques publiques ? AE&S 11. https://doi.org/10.54800/ssa050

Eker, T., Sari, D., Sari, H., Tosun, H.S., Toker, C., 2022. A kabuli chickpea ideotype. Sci. Rep. 12, 1611. https://doi.org/10.1038/s41598-022-05559-3

Elhakeem, A., van der Werf, W., Bastiaans, L., 2021. Radiation interception and radiation use efficiency in mixtures of winter cover crops. Field Crops Res. 264, 108034. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108034

Elkin, L.A., Kay, M., Higgins, J.J., Wobbrock, J.O., 2021. An Aligned Rank Transform Procedure for Multifactor Contrast Tests, in: The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '21. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 754–768. https://doi.org/10.1145/3472749.3474784

EPPO, 2025. EPPO Global Database [WWW Document]. URL https://gd.eppo.int/ (accessed 9.24.25).

Fan, Y., Chen, J., Cheng, Y., Raza, M.A., Wu, X., Wang, Z., Liu, Q., Wang, R., Wang, X., Yong, T., Liu, W., Liu, J., Du, J., Shu, K., Yang, W., Yang, F., 2018. Effect of shading and light recovery on

the growth, leaf structure, and photosynthetic performance of soybean in a maize-soybean relay-strip intercropping system. PLOS ONE 13, e0198159. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198159

Fang, X., Turner, N.C., Yan, G., Li, F., Siddique, K.H.M., 2010. Flower numbers, pod production, pollen viability, and pistil function are reduced and flower and pod abortion increased in chickpea (*Cicer arietinum* L.) under terminal drought. J. Exp. Bot. 61, 335–345. https://doi.org/10.1093/jxb/erp307

FAO, 2025. Crops and livestock products - Production quantity [WWW Document]. FAOSTAT. URL https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL (accessed 8.8.25).

Farooq, M., Gogoi, N., Barthakur, S., Baroowa, B., Bharadwaj, N., Alghamdi, S.S., Siddique, K.H.M., 2017. Drought Stress in Grain Legumes during Reproduction and Grain Filling. J. Agron. Crop Sci. 203, 81–102. https://doi.org/10.1111/jac.12169

Fernández-Aparicio, M., Amri, M., Kharrat, M., Rubiales, D., 2010. Intercropping reduces *Mycosphaerella pinodes* severity and delays upward progress on the pea plant. Crop Prot. 29, 744–750. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2010.02.013

Fernández-Aparicio, M., Shtaya, M.J.Y., Emeran, A.A., Allagui, M.B., Kharrat, M., Rubiales, D., 2011. Effects of crop mixtures on chocolate spot development on faba bean grown in mediterranean climates. Crop Prot. 30, 1015–1023. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2011.03.016

Firquet, S., Montcoudiol, N., 2025. Enquête Pratiques culturales en grandes cultures 2021 - IFT et nombre de traitements (No. 2024–7), Chiffres et données. Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire - Service de la statistique et de la prospective.

Firquet, S., Montcoudiol, N., 2024. Enquête Pratiques culturales en grandes cultures 2021 - Principaux résultats (No. 2024–13), Chiffres et données. Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire - Service de la statistique et de la prospective.

Franklin, K.A., 2008. Shade avoidance. New Phytol. 179, 930–944. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02507.x

Fried, G., Blanchet, C., Cazenave, L., Bopp, M.-C., Kazakou, E., Metay, A., Christen, M., Alard, D., Cordeau, S., 2022. Consistent response of weeds according to Grime's CSR strategies along disturbance and resource gradients in Bordeaux vineyards. Weed Res. 62, 347–359. https://doi.org/10.1111/wre.12549

Fried, G., Cordeau, S., Metay, A., Kazakou, E., 2019. Relative importance of environmental factors and farming practices in shaping weed communities structure and composition in French vineyards. Agric. Ecosyst. Environ. 275, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.01.006

Fustec, J., Lesuffleur, F., Mahieu, S., Cliquet, J.-B., 2010. Nitrogen rhizodeposition of legumes. A review. Agron. Sustain. Dev. 30, 57–66. https://doi.org/10.1051/agro/2009003

Gaba, S., Caneill, J., Nicolardot, B., Perronne, R., Bretagnolle, V., 2018. Crop competition in winter wheat has a higher potential than farming practices to regulate weeds. Ecosphere 9, e02413. https://doi.org/10.1002/ecs2.2413

Gaba, S., Fried, G., Kazakou, E., Chauvel, B., Navas, M.-L., 2014. Agroecological weed control using a functional approach: a review of cropping systems diversity. Agron. Sustain. Dev. 34, 103–119. https://doi.org/10.1007/s13593-013-0166-5

Gaba, S., Perronne, R., Fried, G., Gardarin, A., Bretagnolle, F., Biju-Duval, L., Colbach, N., Cordeau, S., Fernández-Aparicio, M., Gauvrit, C., Gibot-Leclerc, S., Guillemin, J.-P., Moreau, D., Munier-Jolain, N., Strbik, F., Reboud, X., 2017. Response and effect traits of arable weeds in agro-ecosystems: a review of current knowledge. Weed Res. 57, 123–147. https://doi.org/10.1111/wre.12245

Gage, J.L., Jarquin, D., Romay, C., Lorenz, A., Buckler, E.S., Kaeppler, S., Alkhalifah, N., Bohn, M., Campbell, D.A., Edwards, J., Ertl, D., Flint-Garcia, S., Gardiner, J., Good, B., Hirsch, C.N., Holland, J., Hooker, D.C., Knoll, J., Kolkman, J., Kruger, G., Lauter, N., Lawrence-Dill, C.J., Lee, E., Lynch, J., Murray, S.C., Nelson, R., Petzoldt, J., Rocheford, T., Schnable, J., Schnable, P.S., Scully, B., Smith, M., Springer, N.M., Srinivasan, S., Walton, R., Weldekidan, T., Wisser, R.J., Xu, W., Yu, J., de Leon, N., 2017. The effect of artificial selection on phenotypic plasticity in maize. Nat. Commun. 8, 1348. https://doi.org/10.1038/s41467-017-01450-2

Gamliel-Atinsky, E., Shtienberg, D., Vintal, H., Nitzni, Y., Dinoor, A., 2005. Production of *Didymella rabiei* Pseudothecia and Dispersal of Ascospores in a Mediterranean Climate. Phytopathology 95, 1279–1286. https://doi.org/10.1094/PHYTO-95-1279

Gan, Y., Gossen, B.D., Li, L., Ford, G., Banniza, S., 2007. Cultivar Type, Plant Population, and Ascochyta Blight in Chickpea. Agron. J. 99, 1463–1470. https://doi.org/10.2134/agronj2007.0105

Gan, Y.T., Liu, P.H., Stevenson, F.C., McDonald, C.L., 2003. Interrelationships among yield components of chickpea in semiarid environments. Can. J. Plant Sci. 83, 759–767. https://doi.org/10.4141/P02-145

Gan, Y.T., Siddique, K.H.M., MacLeod, W.J., Jayakumar, P., 2006. Management options for minimizing the damage by ascochyta blight (*Ascochyta rabiei*) in chickpea (*Cicer arietinum* L.). Field Crops Res. 97, 121–134. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.10.002

Gao, H., Zhang, C., Zhang, L., Guo, F., Cross, P., Zhang, Z., Wan, S., Zhang, F., 2023. Morphological responses in peanut pod development to intercropping and nitrogen application rates. Field Crops Res. 302. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109101

Garcia, L., Krafft, G., Enard, C., Bouisson, Y., Metay, A., 2024. Adapting service crop termination strategy in viticulture to increase soil ecosystem functions and limit competition with grapevine. Eur. J. Agron. 156, 127161. https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127161

Garcia, L., Metay, A., Kazakou, E., Storkey, J., Gary, C., Damour, G., 2020. Optimizing the choice of service crops in vineyards to achieve both runoff mitigation and water provisioning for grapevine: a trait-based approach. Plant Soil. 452, 87–104. https://doi.org/10.1007/s11104-020-04543-y

Gardarin, A., Celette, F., Naudin, C., Piva, G., Valantin-Morison, M., Vrignon-Brenas, S., Verret, V., Médiène, S., 2022. Intercropping with service crops provides multiple services in temperate arable systems: a review. Agron. Sustain. Dev. 42. https://doi.org/10.1007/s13593-022-00771-x

Garnier, E., Navas, M.-L., 2012. A trait-based approach to comparative functional plant ecology: concepts, methods and applications for agroecology. A review. Agron. Sustain. Dev. 32, 365–399. https://doi.org/10.1007/s13593-011-0036-y

Garry, G., Jeuffroy, M.H., Ney, B., Tivoli, B., 1998. Effects of Ascochyta blight (*Mycosphaerella pinodes*) on the photosynthesizing leaf area and the photosynthetic efficiency of the green leaf area of dried-pea (*Pisum sativum*). Plant Pathol. 47, 473–479. https://doi.org/10.1046/j.1365-3059.1998.00259.x

Gaur, P.M., Gour, V.K., Srinivasan, S., 2008. An induced brachytic mutant of chickpea and its possible use in ideotype breeding. Euphytica 159, 35–41. https://doi.org/10.1007/s10681-007-9454-y

GEVES, 2025a. Le Catalogue officiel des espèces et variétés de plantes cultivées en France [WWW Document]. GEVES. URL https://www.geves.fr/catalogue/ (accessed 1.4.23).

GEVES, 2025b. The Offical Catalogue of Species and Varieties of Cultivated Crops in France [WWW Document]. GEVES. URL https://www.geves.fr/catalogue-france/ (accessed 8.28.25).

Ghaley, B.B., Hauggaard-Nielsen, H., Høgh-Jensen, H., Jensen, E.S., 2005. Intercropping of Wheat and Pea as Influenced by Nitrogen Fertilization. Nutr. Cycl. Agroecosyst. 73, 201–212. https://doi.org/10.1007/s10705-005-2475-9

Gimenez, R., Lake, L., Cossani, C.M., Ortega Martinez, R., Hayes, J.E., Dreccer, M.F., French, R., Weller, J.L., Sadras, V.O., 2025. Linking phenology, harvest index, and genetics to improve chickpea grain yield. J. Exp. Bot. 76, 1658–1677. https://doi.org/10.1093/jxb/erae487

Gong, W.Z., Jiang, C.D., Wu, Y.S., Chen, H.H., Liu, W.Y., Yang, W.Y., 2015. Tolerance vs. avoidance: two strategies of soybean (Glycine max) seedlings in response to shade in intercropping. Photosynthetica 53, 259–268. https://doi.org/10.1007/s11099-015-0103-8

Gould, F., Brown, Z.S., Kuzma, J., 2018. Wicked evolution: Can we address the sociobiological dilemma of pesticide resistance? Science 360, 728–732. https://doi.org/10.1126/science.aar3780

Grime, J.P., 1974. Vegetation classification by reference to strategies. Nature 250, 26–31. https://doi.org/10.1038/250026a0

Gu, C., Bastiaans, L., Anten, N.P.R., Makowski, D., van der Werf, W., 2021. Annual intercropping suppresses weeds: A meta-analysis. Agric. Ecosyst. Environ. 322. https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107658

Guerra, J.G., Cabello, F., Fernández-Quintanilla, C., Dorado, J., 2021. A trait-based approach in a Mediterranean vineyard: Effects of agricultural management on the functional structure of plant communities. Agric. Ecosyst. Environ. 316, 107465. https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107465

Guerra, J.G., Cabello, F., Fernández-Quintanilla, C., Peña, J.M., Dorado, J., 2022. How weed management influence plant community composition, taxonomic diversity and crop yield: A long-term study in a Mediterranean vineyard. Agric. Ecosyst. Environ. 326, 107816. https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107816

Guinet, M., Adeux, G., Cordeau, S., Courson, E., Nandillon, R., Zhang, Y., Munier-Jolain, N., 2023. Fostering temporal crop diversification to reduce pesticide use. Nat. Commun. 14, 7416. https://doi.org/10.1038/s41467-023-43234-x

Guinet, M., Nicolardot, B., Revellin, C., Durey, V., Carlsson, G., Voisin, A.-S., 2018. Comparative effect of inorganic N on plant growth and N_2 fixation of ten legume crops: towards a better understanding of the differential response among species. Plant Soil. 432, 207–227. https://doi.org/10.1007/s11104-018-3788-1

Guinet, M., Nicolardot, B., Voisin, A.-S., 2020. Provision of contrasted nitrogen-related ecosystem services among grain legumes. Agron. Sustain. Dev. 40, 33. https://doi.org/10.1007/s13593-020-00637-0

Güler, M., Sait Adak, M., Ulukan, H., 2001. Determining relationships among yield and some yield components using path coefficient analysis in chickpea (*Cicer arietinum* L.). Eur. J. Agron. 14, 161–166. https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00086-1

Gunes, A., Inal, A., Adak, M.S., Alpaslan, M., Bagci, E.G., Erol, T., Pilbeam, D.J., 2007. Mineral nutrition of wheat, chickpea and lentil as affected by mixed cropping and soil moisture. Nutr. Cycl. Agroecosyst. 78, 83–96. https://doi.org/10.1007/s10705-006-9075-1

Guy, M., Lorin, M., Bousselin, X., Corre-Hellou, G., 2025. Intercropping Chickpea with a Competitive Service Plant and Mowing the Inter-rows Controls Weeds and Ascochyta

Blight while Mitigating Interspecific Competition. SSRN [Preprint]. https://doi.org/10.2139/ssrn.5436278

Hamza, M.A., Anderson, W.K., 2005. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. Soil Tillage Res. 82, 121–145. https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009

Hartig, F., 2024. DHARMa: Residual Diagnostics for Hierarchical (Multi-Level / Mixed) Regression Models.

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

Hauggaard-Nielsen, H., Andersen, M.K., Jørnsgaard, B., Jensen, E.S., 2006. Density and relative frequency effects on competitive interactions and resource use in pea–barley intercrops. Field Crops Res. 95, 256–267. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.03.003

Hauggaard-Nielsen, H., Gooding, M., Ambus, P., Corre-Hellou, G., Crozat, Y., Dahlmann, C., Dibet, A., von Fragstein, P., Pristeri, A., Monti, M., Jensen, E.S., 2009. Pea–barley intercropping for efficient symbiotic N_2-fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems. Field Crops Res. 113, 64–71. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.04.009

Hauggaard-Nielsen, H., Jørnsgaard, B., Kinane, J., Jensen, E.S., 2008. Grain legume–cereal intercropping: The practical application of diversity, competition and facilitation in arable and organic cropping systems. Renew. Agric. Food Syst. 23, 3–12. https://doi.org/10.1017/S1742170507002025

Hauggaard-Nielsen, H., Mundus, S., Jensen, E.S., 2012. Grass-clover undersowing affects nitrogen dynamics in a grain legume–cereal arable cropping system. Field Crops Res. 136, 23–31. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.07.001

Hegewald, H., Wensch-Dorendorf, M., Sieling, K., Christen, O., 2018. Impacts of break crops and crop rotations on oilseed rape productivity: A review. Eur. J. Agron. 101, 63–77. https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.08.003

Heineck, G.C., Smith, K.L., Neely, H.L., Casanova, J., Salguero, D., Gonzalez-Tapia, F., Peery, S.R., Carpenter-Boggs, L.A., Reganold, J.P., Huggins, D.R., 2025. Yield and water use of grain legumes intercropped with spring canola in Eastern Washington. Agrosyst. Geosci. Environ. 8, e70167. https://doi.org/10.1002/agg2.70167

Hernandez-Bello, M.A., Chilvers, M.I., Akamatsu, H., Peever, T.L., 2006. Host Specificity of *Ascochyta* spp. Infecting Legumes of the Viciae and Cicerae Tribes and Pathogenicity of an

Interspecific Hybrid. Phytopathology 96, 1148–1156. https://doi.org/10.1094/PHYTO-96-1148

Hickman, D.T., MacLaren, C., Menegat, A., 2025. The effect of agronomic filters on arable plant communities: What weeds are we selecting for? Agric. Ecosyst. Environ. 386, 109604. https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109604

Hiltbrunner, J., Liedgens, M., Bloch, L., Stamp, P., Streit, B., 2007. Legume cover crops as living mulches for winter wheat: Components of biomass and the control of weeds. Eur. J. Agron. 26, 21–29. https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.08.002

Hinsinger, P., Betencourt, E., Bernard, L., Brauman, A., Plassard, C., Shen, J., Tang, X., Zhang, F., 2011. P for Two, Sharing a Scarce Resource: Soil Phosphorus Acquisition in the Rhizosphere of Intercropped Species. Plant Physiol. 156, 1078–1086. https://doi.org/10.1104/pp.111.175331

Huyghe, C., 1998. Genetics and genetic modifications of plant architecture in grain legumes: a review. Agronomie 18, 383–411. https://doi.org/10.1051/agro:19980505

INRAE, 2025. PPR Cultiver protéger autrement [WWW Document]. URL https://www.cultiver-proteger-autrement.fr/ (accessed 10.21.25).

IPCC, 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.

Jamont, M., Piva, G., Fustec, J., 2013. Sharing N resources in the early growth of rapeseed intercropped with faba bean: does N transfer matter? Plant Soil. 371, 641–653. https://doi.org/10.1007/s11104-013-1712-2

Jarvis, B.D.W., Van Berkum, P., Chen, W.X., Nour, S.M., Fernandez, M.P., Cleyet-Marel, J.C., Gillis, M., 1997. Transfer of *Rhizobium loti*, *Rhizobium huakuii*, *Rhizobium ciceri*, *Rhizobium mediterraneum*, and *Rhizobium tianshanense* to *Mesorhizobium* gen. nov. Int. J. Syst. Evol. Microbiol. 47, 895–898. https://doi.org/10.1099/00207713-47-3-895

Jensen, E.S., Carlsson, G., Hauggaard-Nielsen, H., 2020. Intercropping of grain legumes and cereals improves the use of soil N resources and reduces the requirement for synthetic fertilizer N: A global-scale analysis. Agron. Sustain. Dev. 40, 5. https://doi.org/10.1007/s13593-020-0607-x

Jiménez-Díaz, R.M., Castillo, P., Jiménez-Gasco, M. del M., Landa, B.B., Navas-Cortés, J.A., 2015. Fusarium wilt of chickpeas: Biology, ecology and management. Crop Prot., Ecology and management of Fusarium diseases 73, 16–27. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.02.023

Johnson, W.G., Davis, V.M., Kruger, G.R., Weller, S.C., 2009. Influence of glyphosate-resistant cropping systems on weed species shifts and glyphosate-resistant weed populations. Eur. J. Agron., Glyphosate Interactions with Physiology, Nutrition, and Diseases of Plants: Threat to Agricultural Sustainability? 31, 162–172. https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.03.008

Jukanti, A.K., Gaur, P.M., Gowda, C.L.L., Chibbar, R.N., 2012. Nutritional quality and health benefits of chickpea (Cicer arietinum L.): a review. Br. J. Nutr. 108, S11–S26. https://doi.org/10.1017/S0007114512000797

Juroszek, P., Gerhards, R., 2004. Photocontrol of Weeds. J. Agron. Crop Sci. 190, 402–415. https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2004.00118.x

Kaiser, W.J., 1997. Inter- and intranational spread of ascochyta pathogens of chickpea, faba bean, and lentil. Can. J. Plant Pathol. 19, 215–224. https://doi.org/10.1080/07060669709500556

Kato-Noguchi, H., Mizutani, J., Hasegawa, K., 1994. Allelopathy of oats. II. Allelochemical effect ofl-Tryptophan and its concentration in oat root exudates. J. Chem. Ecol. 20, 315–319. https://doi.org/10.1007/BF02064440

Kazakou, E., Fried, G., Richarte, J., Gimenez, O., Violle, C., Metay, A., 2016. A plant trait-based response-and-effect framework to assess vineyard inter-row soil management. Bot. Lett. 163, 373–388. https://doi.org/10.1080/23818107.2016.1232205

Keneni, G., Bekele, E., Getu, E., Imtiaz, M., Damte, T., Mulatu, B., Dagne, K., 2011. Breeding Food Legumes for Resistance to Storage Insect Pests: Potential and Limitations. Sustainability 3, 1399–1415. https://doi.org/10.3390/su3091399

Khan, M.S.A., Ramsey, M.D., Scott, E.S., 1999. Host range studies with an Australian isolate of *Ascochyta rabiei*. Australas. Plant Pathol. 28, 170–173. https://doi.org/10.1071/AP99028

Kirina, T., Supit, I., Groot, A., Ludwig, F., Demissie, T., 2025. Projected climate change impacts on Potato yield in East Africa. Eur. J. Agron. 166, 127560. https://doi.org/10.1016/j.eja.2025.127560

Kurdali, F., 1996. Nitrogen and phosphorus assimilation, mobilization and partitioning in rainfed chickpea (*Cicer arietinum* L.). Field Crops Res. 47, 81–92. https://doi.org/10.1016/0378-4290(96)00034-2

Kurdali, F., Al-Ain, F., Al-Shamma, M., 2002. Nodulation, Dry Matter Production, and N_2 Fixation by Fababean and Chickpea as Affected by Soil Moisture and Potassium Fertilizer. J. Plant. Nutr. 25, 355–368. https://doi.org/10.1081/PLN-100108841

Kurstjens, D. a G., Kropff, M.J., 2001. The impact of uprooting and soil-covering on the effectiveness of weed harrowing. Weed Res. 41, 211–228. https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2001.00233.x

Lagerquist, E., Bergkvist, G., Menegat, A., 2025. Management-induced micro-habitats in crop fields alter the trait composition of arable plant communities. Basic Appl. Ecol. 87, 66–73. https://doi.org/10.1016/j.baae.2025.06.004

Lake, L., Li, Y., Casal, J.J., Sadras, V.O., 2016. Negative association between chickpea response to competition and crop yield: Phenotypic and genetic analysis. Field Crops Res. 196, 409–417. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.07.021

Lake, L., Sadras, V.O., 2016. Screening chickpea for adaptation to water stress: Associations between yield and crop growth rate. Eur. J. Agron. 81, 86–91. https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.09.003

Lambert, Q., 2023. Guide de culture - Pois chiche 2023.

Lambert, Q., Pinochet, X., 2025. Symbiose et inoculum en pois chiche, point sur les nouveautés 2025 [WWW Document]. Terres Inovia. URL https://www.terresinovia.fr/web/guest/-/nouveautes-symbiose-et-inoculum-poischiche?inheritRedirect=true&redirect=%2Fweb%2Fguest%2Frecherche%3Fq%3Dinoculant (accessed 8.11.25).

Le May, C., Ney, B., Lemarchand, E., Schoeny, A., Tivoli, B., 2009. Effect of pea plant architecture on spatiotemporal epidemic development of ascochyta blight (*Mycosphaerella pinodes*) in the field. Plant Pathol. 58, 332–343. https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2008.01947.x

Le Roux, R., Furusho-Percot, C., Deswarte, J.-C., Bancal, M.-O., Chenu, K., de Noblet-Ducoudré, N., de Cortázar-Atauri, I.G., Durand, A., Bulut, B., Maury, O., Décome, J., Launay, M., 2024. Mapping the race between crop phenology and climate risks for wheat in France under climate change. Sci. Rep. 14, 8184. https://doi.org/10.1038/s41598-024-58826-w

Lemoine, T., Violle, C., Gonzalez, E.A., Gaubert, M., Rocher, A., Fréville, H., Fort, F., 2025. Unravelling the impact of domestication on competitive ability in durum wheat: a phenotypic plasticity perspective. J. Exp. Bot. 76, 1300–1313. https://doi.org/10.1093/jxb/erae480

Lenth, R.V., 2023. emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means.

Leport, L., Turner, N.C., Davies, S.L., Siddique, K.H.M., 2006. Variation in pod production and abortion among chickpea cultivars under terminal drought. Eur. J. Agron. 24, 236–246. https://doi.org/10.1016/j.eja.2005.08.005

Li, L., Tang, C., Rengel, Z., Zhang, F., 2003. Chickpea facilitates phosphorus uptake by intercropped wheat from an organic phosphorus source. Plant Soil. 248, 297–303. https://doi.org/10.1023/A:1022389707051

Li, L., Tilman, D., Lambers, H., Zhang, F.-S., 2014. Plant diversity and overyielding: insights from belowground facilitation of intercropping in agriculture. New Phytol. 203, 63–69. https://doi.org/10.1111/nph.12778

Li, S., Evers, J.B., van der Werf, W., Wang, R., Xu, Z., Guo, Y., Li, B., Ma, Y., 2020. Plant architectural responses in simultaneous maize/soybean strip intercropping do not lead to a yield advantage. Ann. Appl. Biol. 177, 195–210. https://doi.org/10.1111/aab.12610

Li, S.M., Li, L., Zhang, F.S., Tang, C., 2004. Acid Phosphatase Role in Chickpea/Maize Intercropping. Ann. Bot. 94, 297–303. https://doi.org/10.1093/aob/mch140

Liu, B., Asseng, S., Müller, C., Ewert, F., Elliott, J., Lobell, D.B., Martre, P., Ruane, A.C., Wallach, D., Jones, J.W., Rosenzweig, C., Aggarwal, P.K., Alderman, P.D., Anothai, J., Basso, B., Biernath, C., Cammarano, D., Challinor, A., Deryng, D., Sanctis, G.D., Doltra, J., Fereres, E., Folberth, C., Garcia-Vila, M., Gayler, S., Hoogenboom, G., Hunt, L.A., Izaurralde, R.C., Jabloun, M., Jones, C.D., Kersebaum, K.C., Kimball, B.A., Koehler, A.-K., Kumar, S.N., Nendel, C., O'Leary, G.J., Olesen, J.E., Ottman, M.J., Palosuo, T., Prasad, P.V.V., Priesack, E., Pugh, T.A.M., Reynolds, M., Rezaei, E.E., Rötter, R.P., Schmid, E., Semenov, M.A., Shcherbak, I., Stehfest, E., Stöckle, C.O., Stratonovitch, P., Streck, T., Supit, I., Tao, F., Thorburn, P., Waha, K., Wall, G.W., Wang, E., White, J.W., Wolf, J., Zhao, Z., Zhu, Y., 2016. Similar estimates of temperature impacts on global wheat yield by three independent methods. Nature Clim. Change 6, 1130–1136. https://doi.org/10.1038/nclimate3115

Liu, K., Khakbazan, M., Bandara, M., Liang, C., Machado, P.V.F., 2025. Diversifying wheat-based cropping systems with pulse crops enhances ecosystem services. Agron. Sustain. Dev. 45, 17. https://doi.org/10.1007/s13593-025-01009-2

Liu, X., Rahman, T., Song, C., Su, B., Yang, F., Yong, T., Wu, Y., Zhang, C., Yang, W., 2017. Changes in light environment, morphology, growth and yield of soybean in maize-soybean intercropping systems. Field Crops Res. 200, 38–46. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.10.003

Lobell, D.B., Schlenker, W., Costa-Roberts, J., 2011. Climate Trends and Global Crop Production Since 1980. Science 333, 616–620. https://doi.org/10.1126/science.1204531

Lorin, M., Butier, A., Jeuffroy, M.-H., Valantin-Morison, M., 2017. Choisir et gérer des légumineuses gélives associées au colza d'hiver pour le contrôle des adventices et la fourniture d'azote. Innov. Agron. 60, 77. https://doi.org/10.15454/1.5138519019473975E12

Lorin, M., Jeuffroy, M.-H., Butier, A., Valantin-Morison, M., 2016. Undersowing winter oilseed rape with frost-sensitive legume living mulch: Consequences for cash crop nitrogen nutrition. Field Crops Res. 193, 24–33. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.03.002

Lorin, M., Jeuffroy, M.-H., Butier, A., Valantin-Morison, M., 2015. Undersowing winter oilseed rape with frost-sensitive legume living mulches to improve weed control. Eur. J. Agron. 71, 96–105. https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.09.001

Lundkvist, A., 2009. Effects of pre- and post-emergence weed harrowing on annual weeds in peas and spring cereals. Weed Res. 49, 409–416. https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2009.00718.x

Luo, K., Yuan, X., Zuo, J., Xue, Y., Zhang, K., Chen, P., Li, Y., Lin, P., Wang, X., Yang, W., Flexas, J., Yong, T., 2024. Light recovery after maize harvesting promotes soybean flowering in a maize–soybean relay strip intercropping system. Plant J. 118, 2188–2201. https://doi.org/10.1111/tpj.16738

Luo, Q., Bellotti, W., Williams, M., Bryan, B., 2005. Potential impact of climate change on wheat yield in South Australia. Agric. For. Meteorol. 132, 273–285. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.08.003

MacLaren, C., Bennett, J., Dehnen-Schmutz, K., 2019. Management practices influence the competitive potential of weed communities and their value to biodiversity in South African vineyards. Weed Res. 59, 93–106. https://doi.org/10.1111/wre.12347

MacLaren, C., Storkey, J., Menegat, A., Metcalfe, H., Dehnen-Schmutz, K., 2020. An ecological future for weed science to sustain crop production and the environment. A review. Agron. Sustain. Dev. 40, 24. https://doi.org/10.1007/s13593-020-00631-6

MacLaren, C., Waswa, W., Aliyu, K.T., Claessens, L., Mead, A., Schöb, C., Vanlauwe, B., Storkey, J., 2023. Predicting intercrop competition, facilitation, and productivity from simple functional traits. Field Crops Res. 297, 108926. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108926

Magrini, M.-B., Anton, M., Cholez, C., Corre-Hellou, G., Duc, G., Jeuffroy, M.-H., Meynard, J.-M., Pelzer, E., Voisin, A.-S., 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. Ecol. Econ. 126, 152–162. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.03.024

Magurran, A.E., 1988. Ecological Diversity and Its Measurement, 1st edition. ed. Springer Netherlands, Dordrecht.

Malézieux, E., Crozat, Y., Dupraz, C., Laurans, M., Makowski, D., Ozier-Lafontaine, H., Rapidel, B., Tourdonnet, S., Valantin-Morison, M., 2009. Mixing plant species in cropping systems:

concepts, tools and models. A review. Agron. Sustain. Dev. 29, 43–62. https://doi.org/10.1051/agro:2007057

Mamy, L., Pesce, S., Sanchez, W., Amichot, M., Artigas, J., Aviron, S., Barthélémy, C., Beaudouin, R., Bedos, C., Bérard, A., Berny, P., Bertrand, Cédric, Bertrand, Colette, Betoulle, S., Bureau-Point, È., Charles, S., Chaumot, A., Chauvel, B., Coeurdassier, M., Corio-Costet, M.-F., Coutellec, M.-A., Crouzet, O., Doussan, I., Douzals, J.P., Fabure, J., Fritsch, C., Gallai, N., Gonzalez, P., Gouy, V., Hedde, M., Langlais, A., Bellec, F.L., Leboulanger, C., Margoum, C., Martin-Laurent, F., Mongruel, R., Morin, S., Mougin, C., Munaron, D., Nelieu, S., Pélosi, C., Rault, M., Ris, N., Sabater, S., Stachowski-Haberkorn, S., Sucré, E., Thomas, M., Tournebize, J., Achard, A.L., Gall, M.L., Perchec, S.L., Delebarre, E., Larras, F., Leenhardt, S., 2022. Impacts des produits phytopharmaceutiques sur la biodiversité et les services écosystémiques. Rapport de l'expertise scientifique collective (Rapport de recherche). INRAE ; IFREMER.

McAuley, W.P., Bourgault, M., Congreves, K.A., 2025. Productivity, soil fertility and soil health benefits associated with intercropping small grains and oilseeds with legumes in the semi-arid environment of the Canadian Prairies. Agric. Ecosyst. Environ. 389, 109694. https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109694

McDonald, G.K., 2003. Competitiveness against grass weeds in field pea genotypes. Weed Res. 43, 48–58. https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2003.00316.x

McGillycuddy, M., Popovic, G., Bolker, B.M., Warton, D.I., 2025. Parsimoniously Fitting Large Multivariate Random Effects in glmmTMB. J. Stat. Softw. 112, 1–19. https://doi.org/10.18637/jss.v112.i01

Mehmood, Y., Sambasivam, P., Kaur, S., Davidson, J., Leo, A.E., Hobson, K., Linde, C.C., Moore, K., Brownlie, J., Ford, R., 2017. Evidence and Consequence of a Highly Adapted Clonal Haplotype within the Australian *Ascochyta rabiei* Population. Front. Plant Sci. 8. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01029

Meiss, H., Munier-Jolain, N., Henriot, F., Caneill, J., 2008. Effects of biomass, age and functional traits on regrowth of arable weeds after cutting. J. Plant Dis. Prot. 21, 493–499.

Météo France, 2024. Données climatologiques de base - quotidiennes [WWW Document]. URL https://meteo.data.gouv.fr/datasets/donnees-climatologiques-de-base-quotidiennes/ (accessed 10.9.24).

Meynard, J.-M., Charrier, F., Fares, M., Le Bail, M., Magrini, M.-B., Charlier, A., Messéan, A., 2018. Socio-technical lock-in hinders crop diversification in France. Agron. Sustain. Dev. 38, 54. https://doi.org/10.1007/s13593-018-0535-1

Mignolet, C.C., Schott, C., Benoît, M., Meynard, J.-M., 2012. Transformations des systèmes de production et des systèmes de culture du bassin de la Seine depuis les années 1970 : une spécialisation des territoires aux conséquences environnementales majeures. Innov. Agron. 22, 1–16. https://doi.org/10.17180/bpnj-j332

Millennium Ecosystem Assessment (Ed.), 2005. Ecosystems and human well-being: synthesis. Island Press, Washington, DC.

Mirsky, S.B., Curran, W.S., Mortenseny, D.M., Ryany, M.R., Shumway, D.L., 2011. Timing of Cover-Crop Management Effects on Weed Suppression in No-Till Planted Soybean using a Roller-Crimper. Weed Sci. 59, 380–389. https://doi.org/10.1614/WS-D-10-00101.1

Mohler, C.L., Teasdale, J.R., DiTommaso, A., 2021. Manage Weeds On Your Farm - A Guide to Ecological Strategies, SARE handbook series 16. Sustainable Agriculture Research & Education (SARE).

Moreau, D., Ballini, E., Chave, M., Cordeau, S., Djian-Caporalino, C., Lavoir, A.-V., Suffert, F., Cortesero, A.-M., 2025. Potential of service plants for regulating multiple pests while limiting disservices in agroecosystems. A review. Agron. Sustain. Dev. 45, 38. https://doi.org/10.1007/s13593-025-01031-4

Moussart, A., Even, M.N., Tivoli, B., 2008. Reaction of genotypes from several species of grain and forage legumes to infection with a French pea isolate of the oomycete Aphanomyces euteiches. Eur. J. Plant. Pathol. 122, 321–333. https://doi.org/10.1007/s10658-008-9297-y

Namatsheve, T., Cardinael, R., Chikowo, R., Corbeels, M., Rugare, J.T., Mabasa, S., Ripoche, A., 2024. Do intercropping and mineral nitrogen fertilizer affect weed community structures in low-input maize-based cropping systems? Crop Prot. 176, 106486. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106486

Naudin, C., Corre-Hellou, G., Pineau, S., Crozat, Y., Jeuffroy, M.-H., 2012. The effect of various dynamics of N availability on winter pea–wheat intercrops: Crop growth, N partitioning and symbiotic N_2 fixation. Field Crops Res. 119, 2–11. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.06.002

Naudin, C., Corre-Hellou, G., Voisin, A.-S., Oury, V., Salon, C., Crozat, Y., Jeuffroy, M.-H., 2011. Inhibition and recovery of symbiotic N_2 fixation by peas (*Pisum sativum* L.) in response to short-term nitrate exposure. Plant Soil. 346. https://doi.org/10.1007/s11104-011-0817-8

Navarro-Miró, D., Blanco-Moreno, J.M., Ciaccia, C., Chamorro, L., Testani, E., Kristensen, H.L., Hefner, M., Tamm, K., Bender, I., Jakop, M., Bavec, M., Védie, H., Lepse, L., Canali, S., Sans, F.X., 2019. Agroecological service crops managed with roller crimper reduce weed density

and weed species richness in organic vegetable systems across Europe. Agron. Sustain. Dev. 39, 55. https://doi.org/10.1007/s13593-019-0597-8

Nour, S.M., Cleyet-Marel, J.-C., Normand, P., Fernandez, M.P., 1995. Genomic Heterogeneity of Strains Nodulating Chickpeas (*Cicer arietinum* L.) and Description of *Rhizobium mediterraneum* sp. nov. Int. J. Syst. Bacteriol. 45, 640–648. https://doi.org/10.1099/00207713-45-4-640

Nour, S.M., Fernandez, M.P., Normand, P., Cleyet-Marel, J.-C., 1994. *Rhizobium ciceri* sp. nov., Consisting of Strains That Nodulate Chickpeas (*Cicer arietinum* L.). Int. J. Syst. Bacteriol. 44, 511–522. https://doi.org/10.1099/00207713-44-3-511

Oksanen, J., Simpson, G.L., Blanchet, F.G., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P.R., O'Hara, R.B., Solymos, P., Stevens, M.H.H., Szoecs, E., Wagner, H., Barbour, M., Bedward, M., Bolker, B., Borcard, D., Borman, T., Carvalho, G., Chirico, M., Caceres, M.D., Durand, S., Evangelista, H.B.A., FitzJohn, R., Friendly, M., Furneaux, B., Hannigan, G., Hill, M.O., Lahti, L., Martino, C., McGlinn, D., Ouellette, M.-H., Cunha, E.R., Smith, T., Stier, A., Braak, C.J.F.T., Weedon, J., 2025. vegan: Community Ecology Package.

Ouattara, M.S., Paut, R., Prost, L., Valantin-Morison, M., Médiène, S., 2025. A functional ecology approach to define a conceptual and participatory method for designing species mixtures: a case study on nitrogen cycling and weed control. Agron. Sustain. Dev. 45, 48. https://doi.org/10.1007/s13593-025-01040-3

Ouattara, M.S., Paut, R., Valantin-Morison, M., Verret, V., Médiène, S., 2023. Hierarchical modeling highlights how ecosystem service provisioning by service crops intercropped with oilseed rape depends on their functional trait values. Agric. Ecosyst. Environ. 357, 108690. https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108690

Pande, S., Siddique, K.H.M., Kishore, G.K., Bayaa, B., Gaur, P.M., Gowda, C.L.L., Bretag, T.W., Crouch, J.H., 2005. Ascochyta blight of chickpea (*Cicer arietinum* L.): a review of biology, pathogenicity, and disease management. Aust. J. Agric. Res. 56. https://doi.org/10.1071/AR04143

Paolini, R., Faustini, F., Saccardo, F., Crinò, P., 2006. Competitive interactions between chick-pea genotypes and weeds. Weed Res. 46, 335–344. https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2006.00513.x

Patil, S.B., Goyal, A., Chitgupekar, S.S., Kumar, S., El-Bouhssini, M., 2017. Sustainable management of chickpea pod borer. A review. Agron. Sustain. Dev. 37, 20. https://doi.org/10.1007/s13593-017-0428-8

Patrignani, A., Ochsner, T.E., 2015. Canopeo: A Powerful New Tool for Measuring Fractional Green Canopy Cover. Agron. J. 107, 2312–2320. https://doi.org/10.2134/agronj15.0150

Peoples, M.B., Brockwell, J., Herridge, D.F., Rochester, I.J., Alves, B.J.R., Urquiaga, S., Boddey, R.M., Dakora, F.D., Bhattarai, S., Maskey, S.L., Sampet, C., Rerkasem, B., Khan, D.F., Hauggaard-Nielsen, H., Jensen, E.S., 2009. The contributions of nitrogen-fixing crop legumes to the productivity of agricultural systems. Symbiosis 48, 1–17. https://doi.org/10.1007/BF03179980

Persson, T., Bergkvist, G., Kätterer, T., 2008. Long-term effects of crop rotations with and without perennial leys on soil carbon stocks and grain yields of winter wheat. Nutr. Cycl. Agroecosyst. 81, 193–202. https://doi.org/10.1007/s10705-007-9144-0

Poggio, S.L., 2005. Structure of weed communities occurring in monoculture and intercropping of field pea and barley. Agric. Ecosyst. Environ. 109, 48–58. https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.02.019

R Core Team, 2025. R: A Language and Environment for Statistical Computing.

Radicetti, E., Mancinelli, R., Campiglia, E., 2012. Combined effect of genotype and inter-row tillage on yield and weed control of chickpea (*Cicer arietinum* L.) in a rainfed Mediterranean environment. Field Crops Res. 127, 161–169. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.11.013

Rao, S., Silva-Perez, V., Armstrong, R., Tefera, A.T., Brand, J., Riffkin, P., Rosewarne, G., 2023. Pulse ideotypes for abiotic constraint alleviation in Australia. Plant Soil. 492, 1–30. https://doi.org/10.1007/s11104-023-06159-4

Raseduzzaman, Md., Jensen, E.S., 2017. Does intercropping enhance yield stability in arable crop production? A meta-analysis. Eur. J. Agron. 91, 25–33. https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.09.009

Rasmussen, J., Bibby, B.M., Schou, A.P., 2008. Investigating the selectivity of weed harrowing with new methods. Weed Res. 48, 523–532. https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2008.00661.x

Rasmussen, J., Mathiasen, H., Bibby, B.M., 2010. Timing of post-emergence weed harrowing. Weed Res. 50, 436–446. https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2010.00799.x

Raza, M.A., Zhiqi, W., Yasin, H.S., Gul, H., Qin, R., Rehman, S.U., Mahmood, A., Iqbal, Z., Ahmed, Z., Luo, S., Juan, C., Liang, X., Gitari, H., Bin Khalid, M.H., Feng, Y., Zhongming, M., 2023. Effect of crop combination on yield performance, nutrient uptake, and land use advantage of cereal/legume intercropping systems. Field Crops Res. 304, 109144. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109144

Reckling, M., Albertsson, J., Vermue, A., Carlsson, G., Watson, C.A., Justes, E., Bergkvist, G., Jensen, E.S., Topp, C.F.E., 2022. Diversification improves the performance of cereals in European cropping systems. Agron. Sustain. Dev. 42, 118. https://doi.org/10.1007/s13593-022-00850-z

Richard, B., Bussière, F., Langrume, C., Rouault, F., Jumel, S., Faivre, R., Tivoli, B., 2013. Effect of pea canopy architecture on microclimate and consequences on ascochyta blight infection under field conditions. Eur. J. Plant Pathol. 135, 509–524. https://doi.org/10.1007/s10658-012-0132-0

Richard, D., Leimbrock-Rosch, L., Keßler, S., Stoll, E., Zimmer, S., 2023. Soybean yield response to different mechanical weed control methods in organic agriculture in Luxembourg. Eur. J. Agron. 147, 126842. https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126842

Riemens, M., Sønderskov, M., Moonen, A.-C., Storkey, J., Kudsk, P., 2022. An Integrated Weed Management framework: A pan-European perspective. Eur. J. Agron. 133, 126443. https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126443

Ritz, C., Streibig, J.C. (Eds.), 2009. Nonlinear Regression with R, Use R! Springer New York, New York, NY.

Rivas, R., Laranjo, M., Mateos, P. f., Oliveira, S., Martínez-Molina, E., Velázquez, E., 2007. Strains of *Mesorhizobium amorphae* and *Mesorhizobium tianshanense*, carrying symbiotic genes of common chickpea endosymbiotic species, constitute a novel biovar (ciceri) capable of nodulating *Cicer arietinum*. Lett. Appl. Microbiol. 44, 412–418. https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.2006.02086.x

Romeis, J., Shanower, T., Zebitz, C., 1999. Why *Trichogramma* (Hymenoptera: Trichogrammatidae) egg parasitoids of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) fail on chickpea. Bull. Entomol. Res. 89, 89–95. https://doi.org/10.1017/S0007485399000115

Rowland, A.V., Menalled, U.D., Pelzer, C.J., Sosnoskie, L.M., DiTommaso, A., Ryan, M.R., 2023. High seeding rates, interrow mowing, and electrocution for weed management in organic no-till planted soybean. Weed Sci. 71, 478–492. https://doi.org/10.1017/wsc.2023.45

Roxburgh, S.H., Shea, K., Wilson, J.B., 2004. The Intermediate Disturbance Hypothesis: Patch Dynamics and Mechanisms of Species Coexistence. Ecology 85, 359–371. https://doi.org/10.1890/03-0266

Rubiales, D., Fondevilla, S., Chen, W., Gentzbittel, L., Higgins, T.J.V., Castillejo, M.A., Singh, K.B., Rispail, N., 2015. Achievements and Challenges in Legume Breeding for Pest and Disease Resistance. Crit. Rev. Plant Sci. 34, 195–236. https://doi.org/10.1080/07352689.2014.898445

Rubio, J., Flores, F., Moreno, M.T., Cubero, J.I., Gil, J., 2004. Effects of the erect/bushy habit, single/double pod and late/early flowering genes on yield and seed size and their stability in chickpea. Field Crops Res. 90, 255–262. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.03.005

Salon, C., Avice, J.-C., Larmure, A., Ourry, A., Prudent, M., Voisin, A.-S., 2011. Plant N Fluxes and Modulation by Nitrogen, Heat and Water Stresses: A Review Based on Comparison of

Legumes and Non Legume Plants, in: Shanker, A., Venkateswarlu, B. (Eds.), Abiotic Stress in Plants - Mechanisms and Adaptations. InTech, pp. 79–118. https://doi.org/10.5772/23474

Schoeny, A., Jumel, S., Rouault, F., Lemarchand, E., Tivoli, B., 2010. Effect and underlying mechanisms of pea-cereal intercropping on the epidemic development of ascochyta blight. Eur. J. Plant Pathol. 126, 317–331. https://doi.org/10.1007/s10658-009-9548-6

Schoeny, A., Menat, J., Darsonval, A., Rouault, F., Jumel, S., Tivoli, B., 2008. Effect of pea canopy architecture on splash dispersal of Mycosphaerella pinodes conidia. Plant Pathol. 57, 1073–1085. https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2008.01888.x

Schott, C., Puech, T., Mignolet, C., 2018. Dynamiques passées des systèmes agricoles en France : une spécialisation des exploitations et des territoires depuis les années 1970. Fourrages 153–161.

Schutte, B.J., Tomasek, B.J., Davis, A.S., Andersson, L., Benoit, D.L., Cirujeda, A., Dekker, J., Forcella, F., Gonzalez-Andujar, J.L., Graziani, F., Murdoch, A.J., Neve, P., Rasmussen, I.A., Sera, B., Salonen, J., Tei, F., Tørresen, K.S., Urbano, J.M., 2014. An investigation to enhance understanding of the stimulation of weed seedling emergence by soil disturbance. Weed Res. 54, 1–12. https://doi.org/10.1111/wre.12054

Semchenko, M., Zobel, K., 2005. The effect of breeding on allometry and phenotypic plasticity in four varieties of oat (*Avena sativa* L.). Field Crops Res. 93, 151–168. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.09.019

Shabbir, A., Chauhan, B.S., Walsh, M.J., 2019. Biology and management of *Echinochloa colona* and *E. crus-galli* in the northern grain regions of Australia. Crop Pasture Sci. 70, 917. https://doi.org/10.1071/CP19261

Shamsuzzaman, K.M., Gibson, A.H., Oram, R.N., Shaikh, M.A.Q., 2002. Assimilation and partitioning of dry matter and nitrogen in Hyprosola, a more determinate mutant of chickpea, and in its parental cultivar. Field Crops Res. 77, 51–59. https://doi.org/10.1016/S0378-4290(02)00049-7

Siddique, K.H.M., Sedgley, R.H., 1985. The effect of reduced branching on yield and water use of chickpea (*Cicer arietinum* L.) in a Mediterranean type environment. Field Crops Res. 12, 251–269. https://doi.org/10.1016/0378-4290(85)90073-5

Siddique, K.H.M., Sedgley, R.H., Marshall, C., 1984. Effect of plant density on growth and harvest index of branches in chickpea (*Cicer arietinum* L.). Field Crops Res. 9, 193–203. https://doi.org/10.1016/0378-4290(84)90025-X

Singh, K.B., 1997. Chickpea (*Cicer arietinum* L.). Field Crops Res. 53, 161–170. https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00029-4

Singh, R., Kumar, K., Purayannur, S., Chen, W., Verma, P.K., 2022. *Ascochyta rabiei*: A threat to global chickpea production. Mol. Plant Pathol. 23, 1241–1261. https://doi.org/10.1111/mpp.13235

Singh, U., Gaur, P.M., Chaturvedi, S.K., Hazra, K.K., Singh, G., 2019. Changing Plant Architecture and Density can Increase Chickpea Productivity and Facilitate for Mechanical Harvesting. Int. J. Plant Prod. 13, 193–202. https://doi.org/10.1007/s42106-019-00047-7

Soltani, A., Robertson, M.J., Mohammad-Nejad, Y., Rahemi-Karizaki, A., 2006. Modeling chickpea growth and development: Leaf production and senescence. Field Crops Res. 99, 14–23. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.02.005

Srinivasan, A., Johansen, C., Saxena, N.P., 1998. Cold tolerance during early reproductive growth of chickpea (*Cicer arietinum* L.): Characterization of stress and genetic variation in pod set. Field Crops Res. 57, 181–193. https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00118-4

Stoffel, M.A., Nakagawa, S., Schielzeth, H., 2021. partR2: partitioning R^2 in generalized linear mixed models. PeerJ 9, e11414. https://doi.org/10.7717/peerj.11414

Storkey, J., Neve, P., 2018. What good is weed diversity? Weed Res. 58, 239–243. https://doi.org/10.1111/wre.12310

Streeter, J.G., 2003. Effects of drought on nitrogen fixation in soybean root nodules. Plant Cell. Environ. 26, 1199–1204. https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2003.01041.x

Taab, A., Khazaie, M., Andersson, L., Bergkvist, G., Radicetti, E., 2023. Ecological intensification using Persian clover to support weed management in winter wheat under semiarid conditions. Crop Prot. 164, 106142. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2022.106142

Tamburini, G., Bommarco, R., Wanger, T.C., Kremen, C., van der Heijden, M.G.A., Liebman, M., Hallin, S., 2020. Agricultural diversification promotes multiple ecosystem services without compromising yield. Sci. Adv. 6, eaba1715. https://doi.org/10.1126/sciadv.aba1715

Tardy, F., Moreau, D., Dorel, M., Damour, G., 2015. Trait-based characterisation of cover plants' light competition strategies for weed control in banana cropping systems in the French West Indies. Eur. J. Agron. 71, 10–18. https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.08.002

Teasdale, J.R., Mohler, C.L., 2000. The quantitative relationship between weed emergence and the physical properties of mulches. Weed Sci. 48, 385–392. https://doi.org/10.1614/0043-1745(2000)048%255B0385:TQRBWE%255D2.0.CO;2

Terres Inovia, 2025. Guide de culture - Soja 2025.

Terres Univia, 2025. Pois chiche [WWW Document]. URL https://www.terresunivia.fr/cultures-et-utilisations/cultures/plantes-riches-en-proteines/pois-chiche (accessed 10.21.25).

Thorsted, M.D., Olesen, J.E., Weiner, J., 2006. Mechanical control of clover improves nitrogen supply and growth of wheat in winter wheat/white clover intercropping. Eur. J. Agron. 24, 149–155. https://doi.org/10.1016/j.eja.2005.07.004

Tidemann, B.D., Harker, K.N., Johnson, E.N., Willenborg, C.J., Shirtliffe, S.J., 2020. Time of wild oat (*Avena fatua*) panicle clipping influences seed viability. Weed Sci. 68, 260–267. https://doi.org/10.1017/wsc.2020.19

Tilman, D., 2020. Benefits of intensive agricultural intercropping. Nat. Plants 6, 604–605. https://doi.org/10.1038/s41477-020-0677-4

Tilman, D., Cassman, K.G., Matson, P.A., Naylor, R., Polasky, S., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. Nature 418, 671–677. https://doi.org/10.1038/nature01014

Tipping, P.W., 2008. Mowing-Induced Changes in Soil Seed Banks and Populations of Plumeless Thistle (*Carduus acanthoides*) and Musk Thistle (*Carduus nutans*). Weed Technol. 22, 49–55. https://doi.org/10.1614/WT-07-087.1

Tivoli, B., Banniza, S., 2007. Comparison of the epidemiology of ascochyta blights on grain legumes. Eur. J. Plant Pathol. 119, 59–76. https://doi.org/10.1007/s10658-007-9117-9

Tivoli, B., Calonnec, A., Richard, B., Ney, B., Andrivon, D., 2013. Current knowledge on plant/canopy architectural traits that reduce the expression and development of epidemics. Eur. J. Plant Pathol. 135, 471–478. https://doi.org/10.1007/s10658-012-0066-6

Tosti, G., Benincasa, P., Farneselli, M., Tei, F., Guiducci, M., 2014. Barley–hairy vetch mixture as cover crop for green manuring and the mitigation of N leaching risk. Eur. J. Agron. 54, 34–39. https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.11.012

Trapero-Casas, A., Kaiser, W.J., 2009. Alternative hosts and plant tissues for the survival, sporulation and spread of the Ascochyta blight pathogen of chickpea. Eur. J. Plant Pathol. 125, 573–587. https://doi.org/10.1007/s10658-009-9507-2

Trapero-Casas, A., Kaiser, W.J., 2007. Differences Between Ascospores and Conidia of *Didymella rabiei* in Spore Germination and Infection of Chickpea. Phytopathology 97, 1600–1607. https://doi.org/10.1094/PHYTO-97-12-1600

Trapero-Casas, A., Kaiser, W.J., 1992. Influence of temperature, wetness period, plant age, and inoculum concentration on infection and development of Ascochyta blight of chickpea. Phytopathology 82, 589–596. https://doi.org/10.1094/Phyto-82-589

Trapero-Casas, A., Navas-Cortés, J.A., Jiménez-Díaz, R.M., 1996. Airborne ascospores of *Didymella rabiei* as a major primary inoculum for Ascochyta blight epidemics in chickpea crops in southern Spain. Eur. J. Plant Pathol. 102, 237–245. https://doi.org/10.1007/BF01877962

Tribouillois, H., Fort, F., Cruz, P., Charles, R., Flores, O., Garnier, E., Justes, E., 2015. A Functional Characterisation of a Wide Range of Cover Crop Species: Growth and Nitrogen Acquisition Rates, Leaf Traits and Ecological Strategies. PLOS ONE 10, e0122156. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122156

Turner, N.C., Davies, S.L., Plummer, J.A., Siddique, K.H.M., 2005. Seed Filling in Grain Legumes Under Water Deficits, with Emphasis on Chickpeas, in: Advances in Agronomy. Academic Press, pp. 211–250. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)87005-1

Turpin, J.E., Herridge, D.F., Robertson, M.J., 2002. Nitrogen fixation and soil nitrate interactions in field-grown chickpea (*Cicer arietinum*) and fababean (*Vicia faba*). Aust. J. Agric. Res. 53, 599–608. https://doi.org/10.1071/ar01136

Unkovich, M., Herridge, D., Peoples, M., Cadisch, G., Boddey, B., Giller, K., Alves, B., Chalk, P., 2008. Measuring plant-associated nitrogen fixation in agricultural systems, ACIAR Monograph. ACIAR, Canberra.

van Loon, M.P., Alimagham, S., Pronk, A., Fodor, N., Ion, V., Kryvoshein, O., Kryvobok, O., Marrou, H., Mihail, R., Mínguez, M.I., Pulina, A., Reckling, M., Rittler, L., Roggero, P.P., Stoddard, F.L., Topp, C.F.E., van der Wel, J., Watson, C., van Ittersum, M.K., 2023. Grain legume production in Europe for food, feed and meat-substitution. Glob. Food Sec. 39. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2023.100723

Vandermeer, J.H., 1989. The Ecology of Intercropping. Cambridge University Press, Cambridge.

Verret, V., Gardarin, A., Makowski, D., Lorin, M., Cadoux, S., Butier, A., Valantin-Morison, M., 2017a. Assessment of the benefits of frost-sensitive companion plants in winter rapeseed. Eur. J. Agron. 91, 93–103. https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.09.006

Verret, V., Gardarin, A., Pelzer, E., Médiène, S., Makowski, D., Valantin-Morison, M., 2017b. Can legume companion plants control weeds without decreasing crop yield? A meta-analysis. Field Crops Res. 204, 158–168. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.01.010

Vialatte, A., Tibi, A., Alignier, A., Angeon, V., Bedoussac, L., Bohan, D., Bougherara, D., Cordeau, S., Courtois, P., Deguine, J.-P., Enjalbert, J., Fabre, F., Fréville, H., Grimonprez, B., Gross, N., Hannachi, M., Launay, M., Lemarié, S., Martel, G., Navarrete, M., Plantegenest, M., Ravigné, V., Rusch, A., Suffert, F., Thoyer, S., Martinet, V., 2025. Protecting crops with plant diversity: Agroecological promises, socioeconomic lock-in, and political levers. One Earth 101309. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2025.101309

Vidal, T., Boixel, A.-L., Durand, B., de Vallavieille-Pope, C., Huber, L., Saint-Jean, S., 2017. Reduction of fungal disease spread in cultivar mixtures: Impact of canopy architecture on rain-splash dispersal and on crop microclimate. Agric. For. Meteorol. 246, 154–161. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.06.014

Viguier, L., Bedoussac, L., Journet, E.-P., Justes, E., 2018. Yield gap analysis extended to marketable grain reveals the profitability of organic lentil-spring wheat intercrops. Agron. Sustain. Dev. 38. https://doi.org/10.1007/s13593-018-0515-5

Violle, C., Garnier, E., Lecoeur, J., Roumet, C., Podeur, C., Blanchard, A., Navas, M.-L., 2009. Competition, traits and resource depletion in plant communities. Oecologia 160, 747–755. https://doi.org/10.1007/s00442-009-1333-x

Violle, C., Navas, M.-L., Vile, D., Kazakou, E., Fortunel, C., Hummel, I., Garnier, E., 2007. Let the concept of trait be functional! Oikos 116, 882–892. https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2007.15559.x

Voisin, A.-S., Salon, C., Munier-Jolain, N.G., Ney, B., 2002. Quantitative effects of soil nitrate, growth potential and phenology on symbiotic nitrogen fixation of pea (*Pisum sativum* L.). Plant Soil. 243, 31–42. https://doi.org/10.1023/A:1019966207970

Wan, N.-F., Fu, L., Dainese, M., Kiær, L.P., Hu, Y.-Q., Xin, F., Goulson, D., Woodcock, B.A., Vanbergen, A.J., Spurgeon, D.J., Shen, S., Scherber, C., 2025. Pesticides have negative effects on non-target organisms. Nat .Commun. 16, 1360. https://doi.org/10.1038/s41467-025-56732-x

Wang, D., Marschner, P., Solaiman, Z., Rengel, Z., 2007. Growth, P uptake and rhizosphere properties of intercropped wheat and chickpea in soil amended with iron phosphate or phytate. Soil Biol. Biochem. 39, 249–256. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.07.013

Wang, J., Gan, Y.T., Clarke, F., McDonald, C.L., 2006. Response of Chickpea Yield to High Temperature Stress during Reproductive Development. Crop Sci. 46, 2171–2178. https://doi.org/10.2135/cropsci2006.02.0092

Watson, C.A., Reckling, M., Preissel, S., Bachinger, J., Bergkvist, G., Kuhlman, T., Lindström, K., Nemecek, T., Topp, C.F.E., Vanhatalo, A., Zander, P., Murphy-Bokern, D., Stoddard, F.L., 2017. Chapter Four - Grain Legume Production and Use in European Agricultural Systems, in: Sparks, D.L. (Ed.), Advances in Agronomy. Academic Press, pp. 235–303.

Wendling, M., Büchi, L., Amossé, C., Sinaj, S., Walter, A., Charles, R., 2016. Influence of root and leaf traits on the uptake of nutrients in cover crops. Plant Soil. 409, 419–434. https://doi.org/10.1007/s11104-016-2974-2

Wezel, A., Bellon, S., Doré, T., Francis, C., Vallod, D., David, C., 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. Agron. Sustain. Dev. 29, 503–515. https://doi.org/10.1051/agro/2009004

Wezel, A., Casagrande, M., Celette, F., Vian, J.-F., Ferrer, A., Peigné, J., 2014. Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. Agron. Sustain. Dev. 34, 1–20. https://doi.org/10.1007/s13593-013-0180-7

Whish, J., Sindel, B., Jessop, R., Felton, W., 2002. The effect of row spacing and weed density on yield loss of chickpea. Aust. J. Agric. Res. 53, 1335–1340. https://doi.org/10.1071/AR01168

Willey, R.W., 1990. Resource use in intercropping systems. Agric. Water Manag. 17, 215–231. https://doi.org/10.1016/0378-3774(90)90069-b

Wobbrock, J.O., Findlater, L., Gergle, D., Higgins, J.J., 2011. The aligned rank transform for nonparametric factorial analyses using only anova procedures, in: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Presented at the CHI '11: CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Association for Computing Machinery, Vancouver, BC, Canada, pp. 143–146. https://doi.org/10.1145/1978942.1978963

World Health Organization, 2023. Red and processed meat in the context of health and the environment: many shades of red and green (Information brief). Geneva, Switzerland.

Wu, X., Tjahyo, A.S., Volchanskaya, V.S.B., Wong, L.H., Lai, X., Yong, Y.N., Osman, F., Tay, S.L., Govindharajulu, P., Ponnalagu, S., Tso, R., Teo, H.S., Khoo, K., Fan, H., Goh, C.C., Yap, C.P.L., Leow, M.K.-S., Henry, C.J., Haldar, S., Lim, K.J., 2025. A legume-enriched diet improves metabolic health in prediabetes mediated through gut microbiome: a randomized controlled trial. Nat. Commun. 16, 942. https://doi.org/10.1038/s41467-025-56084-6

Wu, Y., Yang, F., Gong, W., Ahmed, S., Fan, Y., Wu, X., Yong, T., Liu, W., Shu, K., Liu, J., Du, J., Yang, W., 2017. Shade adaptive response and yield analysis of different soybean genotypes in relay intercropping systems. J. Integr. Agric. 16, 1331–1340. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61525-3

Xia, H.-Y., Wang, Z.-G., Zhao, J.-H., Sun, J.-H., Bao, X.-G., Christie, P., Zhang, F.-S., Li, L., 2013. Contribution of interspecific interactions and phosphorus application to sustainable and productive intercropping systems. Field Crops Res. 154, 53–64. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.07.011

Yadav, S.S., Redden, R.J., Chen, W., Sharma, B., 2007. Chickpea breeding and management. CABI, Wallingford.

Yang, F., Huang, S., Gao, R., Liu, W., Yong, T., Wang, X., Wu, X., Yang, W., 2014. Growth of soybean seedlings in relay strip intercropping systems in relation to light quantity and red:far-red ratio. Field Crops Res. 155, 245–253. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.08.011

Young, F.L., Matthews, J., Al-Menoufi, A., Sauerborn, J., Pieterse, A.H., Kharrat, M., 2000. Integrated weed management for food legumes and lupins, in: Knight, R. (Ed.), Linking Research and Marketing Opportunities for Pulses in the 21st Century, Current Plant Science and Biotechnology in Agriculture. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 481–490.

Yu, Y., Stomph, T.-J., Makowski, D., Zhang, L., van der Werf, W., 2016. A meta-analysis of relative crop yields in cereal/legume mixtures suggests options for management. Field Crops Res. 198, 269–279. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.08.001

Zaiter, H.Z., Barakat, S.G., 1995. Flower and pod abortion in chickpea as affected by sowing date and cultivar. Can. J. Plant Sci. 75, 321–327. https://doi.org/10.4141/cjps95-056

Zander, P., Amjath-Babu, T.S., Preissel, S., Reckling, M., Bues, A., Schläfke, N., Kuhlman, T., Bachinger, J., Uthes, S., Stoddard, F., Murphy-Bokern, D., Watson, C., 2016. Grain legume decline and potential recovery in European agriculture: a review. Agron. Sustain. Dev. 36, 26. https://doi.org/10.1007/s13593-016-0365-y

Zhang, J.J., Liu, T.Y., Chen, W.F., Wang, E.T., Sui, X.H., Zhang, X.X., Li, Yán, Li, Yàn, Chen, W.X., 2012. *Mesorhizobium muleiense* sp. nov., nodulating with *Cicer arietinum* L. Int. J. Syst. Evol. Microbiol. 62, 2737–2742. https://doi.org/10.1099/ijs.0.038265-0

Zhang, W.-P., Li, Z.-X., Gao, S.-N., Yang, H., Xu, H.-S., Yang, X., Fan, H.-X., Su, Y., Surigaoge, Weiner, J., Fornara, D., Li, L., 2023. Resistance vs. surrender: Different responses of functional traits of soybean and peanut to intercropping with maize. Field Crops Res. 291, 108779. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108779

Zhang, Z., Gu, T., Zhao, B., Yang, X., Peng, Q., Li, Y., Bai, L., 2017. Effects of common *Echinochloa* varieties on grain yield and grain quality of rice. Field Crops Res. 203, 163–172. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.12.003

Zhang, Z., Liu, Y., Yuan, L., Weber, E., van Kleunen, M., 2021. Effect of allelopathy on plant performance: a meta-analysis. Ecol. Lett. 24, 348–362. https://doi.org/10.1111/ele.13627

Zhao, J., Chen, J., Beillouin, D., Lambers, H., Yang, Y., Smith, P., Zeng, Z., Olesen, J.E., Zang, H., 2022. Global systematic review with meta-analysis reveals yield advantage of legume-based rotations and its drivers. Nat. Commun. 13, 4926. https://doi.org/10.1038/s41467-022-32464-0

Zhou, Y., Chen, C., Franck, W.L., Khan, Q., Franck, S., Crutcher, F.K., McVay, K., McPhee, K., 2022. Intercropping chickpea–flax for yield and disease management. Agron. J. 115, 726–743. https://doi.org/10.1002/agj2.21280

Zhu, J., van der Werf, W., Anten, N.P.R., Vos, J., Evers, J.B., 2015. The contribution of phenotypic plasticity to complementary light capture in plant mixtures. New Phytol. 207, 1213–1222. https://doi.org/10.1111/nph.13416

Titre : Cultiver du pois chiche dans un contexte de faible utilisation d'intrants en l'associant à une plante de services fauchée : gestion des adventices et de l'ascochytose

Mots clés : associations de cultures, plante de services, fauche de l'inter-rang, adventices, ascochytose, pois chiche

Résumé : Les légumineuses à graines sont des espèces clefs pour diversifier les systèmes de culture et diminuer l'usage d'intrants. Cependant, l'instabilité des rendements entrave leur adoption par les agriculteurs. Le pois chiche, peu cultivé en France, est une espèce candidate pertinente. Toutefois, la compétition des adventices et l'ascochytose (causée par *Ascochyta rabiei*) limitent la production.
Pour répondre à ces enjeux, cette thèse propose d'explorer la combinaison de deux leviers : i) l'insertion d'une plante de services, et ii) la fauche des inter-rangs. Une expérimentation plein champ a ainsi permis de comparer les effets du choix d'espèce de plante de services et de la fauche sur la gestion des adventices, la sévérité de l'ascochytose et la production de pois chiche.
Nos résultats montrent que seule l'introduction d'une espèce compétitive dès le début du cycle, ici l'avoine, peut améliorer la gestion des deux bioagresseurs par rapport au pois chiche pur. Faucher au début de la floraison a atténué la compétition, mais n'a pas permis d'éviter une chute du rendement en cas de conditions favorables à la culture. La présence de l'avoine a engendré des modifications de l'architecture aérienne du pois chiche, et a limité la sévérité de l'ascochytose dès la base de l'axe principale en cas de forte pression. Des changements de la structure de la communauté adventice ont aussi été observés en réponse à l'introduction de l'avoine, tandis que la fauche n'a pas eu d'effet. L'ajout d'une fauche précoce s'est révélé prometteur pour réorienter les rapports de dominance en faveur du pois chiche.

Title: Growing chickpea in low-input conditions by introducing a mowed service plant: weed and ascochyta blight management

Keywords: intercropping, service plant, inter-row mowing, weeds, ascochyta blight, chickpea

Abstract: Grain legumes are key species for diversifying cropping systems and reducing inputs. Yet, high yield variability hinders their adoption by farmers. Chickpea is a relevant candidate species, but remains a minor crop in France. Moreover, weed competition and ascochyta blight (caused by *Ascochyta rabiei*) are major constraints for its production.
To address these challenges, the combination of two levers was investigated in this thesis: i) the introduction of a service plant, and ii) inter-row mowing. The effects of species choice and inter-row mowing on weed management, ascochyta blight severity, and chickpea production were compared in a field experiment.
Our findings demonstrate that introducing a competitive service plant, such as oat, was the only way to improve the management of both biotic factors compared to the sole chickpea. Mowing the inter-rows at the beginning of chickpea flowering mitigated interspecific competition, but did not allow to avoid yield reductions under favourable growing conditions. The presence of oat led to alterations of the shoot architecture of chickpea, and reduced ascochyta blight severity from the first basal nodes on the main axis under high disease pressure. Introducing oat also changed the weed community structure, while inter-row mowing did not have any effect. Adding an earlier mowing date showed promising results for reshaping the dominance relationships in favour of chickpea early enough in the crop cycle, while ensuring weed and disease control.