
Associations végétales pour le contrôle des ravageurs : D'une synthèse des approches théoriques à l'application pratique

Auteur : Niyibizi Gakuru, Patient

Promoteur(s) : Francis, Frédéric

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master de spécialisation en production intégrée et préservation des ressources naturelles en milieu urbain et péri-urbain

Année académique : 2019-2020

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/10897>

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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

Associations végétales pour le contrôle des ravageurs : d'une synthèse des approches théoriques à l'application pratique

NIYIBIZI GAKURU Patient

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLOME DE MASTER DE SPECIALISATION EN PRODUCTION INTEGREE ET
PRESERVATION DES RESSOURCES NATURELLES EN MILIEU URBAIN ET
PERI-URBAIN**

ANNEE ACADEMIQUE 2019-2020

PROMOTEUR : FREDERIC FRANCIS

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

« Le présent document n'engage que son auteur. »

Associations végétales pour le contrôle des ravageurs : d'une synthèse des approches théoriques à l'application pratique

NIYIBIZI GAKURU Patient

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLOME DE MASTER DE SPECIALISATION EN PRODUCTION INTEGREE ET
PRESERVATION DES RESSOURCES NATURELLES EN MILIEU URBAIN ET
PERI-URBAIN**

ANNEE ACADEMIQUE 2019-2020

PROMOTEUR : FREDERIC FRANCIS

DEDICACE

A mes parents Egide Gakuru et Madeleine Manabi ;

A maman Béatrice Boshwenda ;

Aux Professeurs François Muhashy et Jean-Paul Segihobe ;

Au Chef de Travaux Me Lebon Kalera,

A la Faculté des Sciences Agronomiques de l'UNIGOM.

REMERCIEMENTS

Cette œuvre est la fin d'un long périple et le fruit de nombreux efforts consentis par différentes personnes aux quelles je tiens à adresser mes remerciements les plus sincères.

De prime abord, j'adresse ma gratitude à l'ARES pour ma sélection à la formation, le soutien financier et tout l'accompagnement reçus au cours de l'année académique.

A mon promoteur le Professeur Frédéric Francis, pour sa disponibilité, ses orientations et conseils pour l'aboutissement de ce TFE ;

Aux membres du jury qui ont volontairement accepté d'évaluer ce travail, je présente mes sentiments de reconnaissance ;

A toute l'équipe de l'unité d'Entomologie fonctionnelle et évolutive, particulièrement à Monsieur Grégoire Noël, pour l'accueil, l'accompagnement et la bonne collaboration pendant toutes mes recherches ;

Aux corps administratif et enseignant de la Faculté de Gembloux Agro-Bio Tech de l'Université de Liège et de la Haute Ecole Charlemagne pour leur appui technique et enseignement de qualité ;

Mes vifs et cordiaux remerciements à mon épouse, Rita Salama, pour son affection, ses précieux conseils et sa présence sous toutes les formes pour l'accomplissement de ce travail.

A tous mes camarades des cours et de terrain, je reste reconnaissant pour tous les bons moments passés ensemble et l'esprit de collaboration qui a prévalu ;

Merci à toute ma famille et à tous mes amis pour les encouragements et bons vœux tout au long de mes études ;

Sans prétendre être exhaustif, que tous ceux qui ont de près ou de loin contribué à la bonne réalisation de ce travail trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

RESUME

Au cours des dernières décennies, des méthodes alternatives tentent de remplacer ces approches utilisant la lutte chimique intensive et non sélective pour leurs effets négatifs avérés sur l'homme, l'environnement et sur les organismes utiles. C'est ainsi que la gestion de paysages agricoles à travers la diversification végétale pour optimiser le service écosystémique de lutte biologique est un domaine scientifique de plus en plus envisagé. L'objectif de la présente étude était d'évaluer les effets de la diversité végétale à l'échelle de la parcelle sur le contrôle des ravageurs des cultures. Pour y arriver, une synthèse bibliographique des recherches orientées vers la diversification des plantes en cultures maraîchères a dans un premier temps été effectuée. Les résultats des publications scientifiques indiquent les effets positifs traduits par une réduction des populations des ravageurs par rapport aux monocultures. Deux mécanismes accompagnent cette réduction; il s'agit de l'effet bottom-up c'est-à-dire les cultures associées interfèrent visuellement et chimiquement dans la recherche de plantes hôtes et la colonisation par les phytophages, et de l'effet top-down, entendu comme le contrôle des ravageurs à travers le recrutement d'ennemis naturels tels que les prédateurs ou les parasitoïdes. Dans un second temps, un essai de plein champ associant des bandes fleuries de *Fagopyrum esculentum* et *Camelina sativa* à la culture de blé *Triticum aestivum* a été réalisé à Gembloux (Belgique). Afin d'évaluer l'attractivité des bandes fleuries aux auxiliaires, les observations et récoltes de ceux-ci ont été réalisées grâce à la capture au filet et au système de piégeage par pan-traps. La famille des Syrphidae a été la plus représentée avec deux espèces dominantes : *Sphaerophoria scripta* et *Eristalis tenax*. D'autres auxiliaires observés sont *Coccinella septempunctata* et *Chrysoperla carnea*. Considérant les analyses statistiques, il n'y a pas de différences significatives entre le sarrasin et la cameline pour la colonisation de communautés d'auxiliaires des cultures. En améliorant les services écosystémiques de la lutte biologique contre les ravageurs, cette étude montre que l'augmentation de la diversité des plantes est une méthode agroécologique à envisager pour une gestion durable des ravageurs.

Mots clés : diversification végétale, lutte biologique, auxiliaires, coccinelles, syrphes, chrysopes, bandes fleuries, blé, sarrasin, cameline.

ABSTRACT

In recent decades, alternative methods have attempted to replace these approaches using intensive and non-selective chemical control for their negative effects on humans, environment and on beneficial organisms. Thus, the management of agricultural landscapes through plant diversification to optimize the ecosystem service of biological control is a scientific field increasingly considered. The objective of the present study was to assess the effects of plant diversity at the plot level on crop pest control. To achieve this, a bibliographical synthesis of research oriented towards plant diversification in market gardening was first carried out. The results of scientific publications assess the positive effects observed by a reduction in pest populations compared to monocultures. Two mechanisms explain this reduction; there is bottom-up effect, i.e. the associated cultures interfere visually and chemically in the search for host plants and the colonization by phytophagous insects, and the top-down effect, understood as pest control through the recruitment of natural enemies such as predators or parasitoids. Secondly, a field trial associating flowering strips of *Fagopyrum esculentum* and *Camelina sativa* with the wheat crop *Triticum aestivum* was carried out in Gembloux (Belgium). In order to assess the attractiveness of flowering strips to the auxiliaries, observations and capture of these were made using the net trap and the pan-trap systems. The Syrphidae family was the most represented with two dominant species: *Sphaerophoria scripta* and *Eristalis tenax*. Other auxiliaries found are *Coccinella septempunctata* and *Chrysoperla carnea*. Considering the statistical analyzes, there are no significant differences between buckwheat and camelina for the colonization of crop auxiliaries. By improving the ecosystem services of biological pest control, this study shows that improving plant diversity is an agroecological method to consider for sustainable pest management.

Key words: plant diversification, biological control, auxiliaries, ladybirds, hoverflies, lacewing, flower strips, wheat, buckwheat, camelina.

LISTE DES ABREVIATIONS

A & K	: Attract and Kill
ARES	: Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur
CE	: Conseil de l'Europe
CEE	: Communauté Économique Européenne
COV	: Composé Organique Volatile
DDT	: Dichloro-diphényle-trichloro-éthane
FAO	: Food and Agriculture Organization
ICIPE	: International Centre of Insect Physiology and Ecology
LMR	: Limite Maximale des Résidus
OCDE	: Organisation de Coopération et de Développement Economiques
OMS	: Organisation Mondiale de la Santé
PNUE	: Programme de Nations Unies pour l'Environnement
RDC	: République Démocratique du Congo
TFE	: Travail de Fin d'Etudes
UNIGOM	: Université de Goma

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION GENERALE	1
2. LE MARAICHAGE ET LA GESTION DES RAVAGEURS ASSOCIES	4
2.1. Contexte et importance des cultures maraîchères	4
2.2. Cultures maraîchères et entomofaune associée	5
2.2.1. Concepts sur le maraichage	5
2.2.2. Filière maraîchère en agriculture urbaine	5
2.2.3. Diversité de cultures maraîchères en Afrique et ailleurs	6
2.2.4. Ravageurs des cultures maraîchères	7
2.2.5. Principaux groupes d'insectes prédateurs.....	8
2.2.5.1. Les coccinelles [Coleoptera : Coccinellidae].....	8
2.2.5.2. Les syrphes [Diptera: Syrphidae]	9
2.2.5.3. Les chrysopes [Neuroptera: Chrysopidae].....	9
2.3. Usage des pesticides dans le contrôle des ravageurs des cultures maraichères	10
2.3.1. Impact des pesticides sur les organismes utiles	10
2.3.2. Impact des pesticides sur la santé humaine et Environnement.....	11
2.3.3. Réglementations sur les pesticides.....	12
2.4. Diversification des cultures comme alternative aux pesticides de synthèse	13
2.4.1. Définition des concepts.....	13
2.4.2. Choix des espèces dans les associations végétales	14
2.4.3. Synchronisation temporelle et spatiale des associations culturales	15
2.4.4. Effets de la diversification sur les arthropodes ravageurs	16
2.4.4.1. Effet de dilution	17
2.4.4.2. Réduction de la colonisation et perturbation du cycle.....	18
2.4.4.3. Effet sur l'oviposition	18
2.4.5. Attraction des ennemis naturels	19
2.4.6. Interactions négatives dans les cultures associées	21

2.4.7.	Composés sémiochimiques et contrôle des ravageurs dans les associations végétales	22
2.4.7.1.	Définition du concept et modes d'action des composés sémiochimiques	22
2.4.7.2.	Cultures pièges et la stratégie « Attract-and-kill »	24
2.4.7.3.	Approche « push-pull » dans les associations végétales.....	25
2.5.	Conclusion sur la gestion des ravageurs dans les cultures maraichères.....	27
3.	ESSAI DE CULTURES ASSOCIEES EN CEREALES	30
3.1.	Introduction	30
3.2.	Matériels et méthodes.....	31
3.2.1.	Description expérimentations de terrain	31
3.2.2.	Surveillance des auxiliaires et ravageurs	32
3.2.3.	Analyses statistiques	34
3.3.	Résultats	35
3.4.	Discussion et conclusion	40
4.	CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES	44
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	45
	ANNEXES	55

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Principales voies pour réduire l'impact des ravageurs via l'introduction de la diversité des espèces végétales dans les agroécosystèmes	14
Figure 2 : Différentes substances sémiochimiques	23
Figure 3 : Illustration des composantes de la stratégie push-pull et leurs modes d'action.....	26
Figure 4 : Représentation schématique du dispositif expérimental.....	31
Figure 5 : Piège jaune installé dans une bande de sarrasin	32
Figure 6 : Présentation schématique des zones de piégeage aux pan-traps	33
Figure 7 : Abondances des familles d'auxiliaires capturés par type de bande fleurie	36
Figure 8 : Abondances d'espèces auxiliaires capturées par type de bande fleurie.....	37
Figure 9 : Abondance moyenne d'auxiliaires piégés à différentes distances.....	38
Figure 10 : Représentation de la structure des communautés entomologiques en fonction des bandes fleuries cultivées (cameline et sarrasin).....	39

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Quelques principales espèces de cultures maraichères produites en Afrique et ailleurs dans le monde	6
Tableau 2 : Quelques principaux ravageurs des cultures maraichères	7
Tableau 3 : Exemples des études portant sur les cultures associées en maraîchage	17
Tableau 4 : Abondance et diversité d'auxiliaires piégés sur l'ensemble du site expérimental.	35

1. INTRODUCTION GENERALE

Avec plus de 1,3 milliards de personnes travaillant dans le secteur agricole à travers le monde, soit près de 40 % de la population mondiale active, l'agriculture est le premier fournisseur d'emplois et grand contributeur au développement des populations (Momagri, 2012).

L'agriculture dans le monde est confrontée à de nombreux défis, notamment le changement climatique, la perte de biodiversité (Amoabeng et al., 2019), la non maîtrise des techniques de production, des maladies et des ravageurs qui affectent directement la production déjà insuffisante dans beaucoup de pays en voie de développement (Gnago et al, 2010 ; Ratnadass et al., 2012). Pour contenir la pression exercée par les ravageurs, de nombreux producteurs recourent à l'usage des pesticides chimiques de synthèse (Poveda et al, 2008 ; Gallo et al., 2013). Malheureusement, l'utilisation de ces pesticides, acquis à des prix prohibitifs fragilisent des végétaux et polluent l'environnement (Fillatre et al., 2014), tout en exposant aussi les agriculteurs et les consommateurs à des risques sanitaires importants (Ahouangninou et al., 2011, Malézieux et al., 2009 ; FAO & PNUE, 2017).

L'Organisation Mondiale de la Santé estime que 200 000 personnes sont tuées chaque année dans le monde en conséquence directe de l'empoisonnement par les pesticides (Belmain et al., 2013). Bien qu'en Afrique l'utilisation de pesticides synthétiques ne compte que 2 à 4 % du marché mondial des pesticides (qui s'élève à US\$ 31 milliards), C'est ce continent qui continue à avoir le plus haut risque de mortalité humaine (Anjarwalla et al., 2016) du fait de l'utilisation des pesticides de synthèse. Ce risque élevé provient du fait que de nombreux agriculteurs du Sud ne sont pas spécialement formé au choix et à l'application des pesticides de synthèse (Latheef & Ortiz, 1983 ; Chevalier et al., 2014).

Comme alternative à l'utilisation des pesticides de synthèse, appliqués principalement sur des monocultures, des modèles d'agricultures fondés sur une gestion plus efficiente des écosystèmes et de leur biodiversité sont actuellement promus sous le vocable de modèles agro-écologiques (Song et al., 2012 ; Ratnadass et al., 2012). L'approche agroécologique, prônée dans la plupart de modèles alternatifs d'agriculture, favorise la diversité biologique dans les écosystèmes (Saldanha et al., 2019 ; Raseduzzaman et Jensen, 2017 ; Jacquota et al. 2019), optimise les interactions biologiques et améliore les services écosystémiques tels que la protection des cultures (Ratnadass et al., 2012). Dans les systèmes agro-écologiques, le

producteur par son action diversifie et enrichit le milieu qu'il nourrit tout en s'y nourrissant. L'association des entités biologiques diversifiées crée des synergies dans le milieu, ce qui le renforce et le rend moins vulnérable (Landis et al., 2000).

Dès 1915, les fermiers russes avaient remarqué que le chou cultivé près de la tomate subissait moins d'attaques de plusieurs espèces d'insectes (Hooks et Johnson, 2003). L'augmentation de la diversité végétale à l'échelle locale réduit l'abondance des insectes ravageurs et leurs dommages aux cultures tout en accroissant la présence des populations de leurs ennemis naturels (Hatt et al., 2019 ; Gontijo, 2019). Cette constatation est à la base de l'approche « top-down » en protection des cultures, qui consiste à favoriser des auxiliaires des cultures pouvant agir comme facteur limitant des populations de ravageurs (Kedebé et al., 2018). Le paysage agricole ainsi créé offre des ressources et abris aux prédateurs et aux parasitoïdes (Pickett et al., 2014 ; Gontijo, 2019). Les ressources fournies peuvent comprendre de la nourriture, des proies, du nectar ou des hôtes alternatifs (Cai et al., 2010 ; Song et al., 2012 ; Scholle, 2015).

Intégrer dans le système de production diversifié des plantes pouvant émettre d'agents chimiques aux effets insecticides et/ou répulsifs sur certains groupes d'insectes peut amplifier l'effet protecteur recherché dans l'approche « top-down » de protection des cultures (Song et al., 2010 ; Hatt et al., 2019 ; Khan et al., 2008). Lorsque ces plantes sont choisies et combinées de façon optimale, elles peuvent produire des mélanges de composés qui repoussent et arrêtent l'alimentation des phytophages (He et al., 2019). En grande quantité, ces composés peuvent s'avérer toxiques (Anjarwalla et al, 2016 ; Lamy et al, 2016) et affecter l'oviposition des phytophages (Hilker et Meiners, 2011). Les différentes associations culturales promues pouvant présenter des réponses variables en fonction des espèces végétales promues, de leurs modalités de distribution à l'échelle des parcelles culturales, et même de leur synchronisation dans le calendrier cultural (Chari et al., 2015), il importe que des données factuelles sur le comportement de ces associations soient acquises et que leurs performances soient analysées à la lumière des résultats d'expériences.

Ce travail présente, dans sa première partie, une synthèse bibliographique des approches agro-écologiques de protection des cultures et évalue les effets de la diversification végétale à l'échelle de la parcelle sur le contrôle des ravageurs des cultures. Elle considère comme base de réflexion des associations culturales pratiquées en cultures maraichères.

La deuxième partie de ce travail est une étude expérimentale réalisée en conditions réelles de champ. Dans cette étude, les effets de deux bandes monospécifiques fleuries (*Fagopyrum esculentum* et *Camelina sativa*) sur les abondances et diversités des auxiliaires dans un champ de blé sont analysés. .

2. LE MARAICHAGE ET LA GESTION DES RAVAGEURS ASSOCIES

2.1. Contexte et importance des cultures maraîchères

Le maraîchage est une composante clé de l'agriculture qui prend ses dimensions en milieu rural comme en milieu urbain ou périurbain. Loin de constituer une partie condimentaire ou de grignotage dans l'alimentation, un certain nombre de légumes font partie de la base végétale de l'alimentation des populations en particulier africaines (Moustier et David, 1996). Les produits maraîchers sont vendus frais sur les marchés locaux, mais aussi dans le monde entier au moyen de chaînes de valeur modernes et sophistiquées (OCDE et FAO, 2019).

Les cultures maraîchères répondent particulièrement au besoin de diversification et permettent de valoriser les efforts d'intensification des moyens de production. Elles apportent les éléments minéraux et les vitamines qui font défaut dans le régime alimentaire, procurent de l'emploi aux agriculteurs, permettent une meilleure valorisation des ressources en eau et en terre et enfin assurent un meilleur rendement financier du travail de production (FAO, 2004). Avec la chute de cultures traditionnelles (vivrières et pérennes), les cultures maraîchères deviennent de plus en plus une source importante des revenus. A titre illustratif, le développement du maraîchage dans les départements français d'outremer (La Réunion, Martinique, Guadeloupe) correspond aux difficultés de commercialisation de la banane et de la canne à sucre, cultures pivots de ces îles (Malézieux & Moustier, 2005b).

L'utilisation des pesticides en agriculture est devenue systématique pour optimiser les rendements des cultures de rente et particulièrement maraîchères. L'enjeu commercial peut expliquer le fait que les producteurs maraîchers pratiquent une protection intensive des cultures pour lutter contre les ravageurs et accroître la productivité de leurs exploitations (Ahouangninou et al., 2011).

De par la fragilité des organes produits et leurs finalités commerciales, les cultures maraîchères requièrent et consomment d'importantes quantités de pesticides de synthèse (Hummel et al., 2002). Réduire les apports de ces agents chimiques sur ces cultures, qui très souvent présentent des cycles végétatifs courts, ne permettant pas d'éviter la rémanence des pesticides dans les organes récoltés, est devenu une nécessité.

Cette première partie entièrement bibliographique présente les méthodes impliquant l'utilisation des pesticides de synthèse dans le contrôle des ravageurs dans la production maraîchère, ainsi que les conséquences liées à l'utilisation de ces composés sur l'environnement et sur la santé humaine. En plus, elle présente les résultats de quelques recherches qui ont évalué la diversification végétale comme méthode alternative dans la gestion durable des ravageurs des cultures maraîchères.

2.2. Cultures maraîchères et entomofaune associée

2.2.1. Concepts sur le maraichage

Par son origine, le maraichage était une activité de production légumière pratiquée dans des bas-fonds et marais. Plus tard, le concept s'élargît à d'autres zones pour signifier les espaces affectés à la production des légumes et fruits. Le maraichage, ou culture maraîchère, se distingue de la culture potagère en ce sens qu'il consiste à produire des légumes à des fins commerciales (Bastin & Fromageot, 2007). Moustier et David (1996) décrivent les productions maraîchères comme étant les feuilles, fruits et racines des plantes cultivées utilisées comme crudités ou dans les sauces protéiques et vitaminiques qui accompagnent la base calorique (manioc, riz, mil, maïs, ...). Les cultures maraîchères sont constituées d'une part, des cultures traditionnelles tropicales de plein champ telles que la tomate, le piment, l'oignon, le gombo et les légumes feuilles et d'autre part, des cultures tempérées notamment les choux, la laitue, le concombre, le poireau, etc. (Kpadenou et al., 2020).

2.2.2. Filière maraîchère en agriculture urbaine

La croissance démographique mondiale galopante (7,7 milliards d'habitants en 2020), qui s'accompagne d'une augmentation de la demande en produits légumiers, dans le contexte de limitation des ressources foncières et de l'urbanisation des espaces des vies ont conduit à l'augmentation des parts des productions légumière en milieu urbain.

Le maraichage dans les grandes agglomérations et leurs environs est un apport à la sécurité alimentaire et à la nutrition urbaines, car il permet d'accroître l'offre de produits frais, riches en vitamines et en minéraux essentiels (FAO, 2010). Dans les pays sous-développés où la grande partie de la population urbaine vit de l'économie de subsistance, le maraichage s'affiche comme une activité économique importante (Masiala et al., 2018). Du fait que les coûts de démarrage sont faibles et la valeur des produits élevée, l'agriculture urbaine et périurbaine assure des moyens d'existence aux maraîchers, et en particulier aux citoyens

pauvres. Elle crée d'autres emplois dans l'approvisionnement en intrants et de la valeur ajoutée du producteur au consommateur (FAO, 2010). Au-delà du rôle économique du maraîchage urbain, son rôle évolue, au Sud comme au Nord, où il retrouve une fonction sociale et culturelle (Malézieux & Moustier, 2005a).

2.2.3. Diversité de cultures maraîchères en Afrique et ailleurs

Les légumes occupent une place importante dans l'alimentation des populations urbaines et rurales. Une diversité d'espèces est cultivée à travers le monde pour répondre à la demande du marché (Tableau 1).

Tableau 1 : Quelques principales espèces de cultures maraichères produites en Afrique et ailleurs dans le monde

Groupe	Famille	Nom scientifique	Nom commun	Organes consommés
Légumes d'origine tempérée	Apiaceae	<i>Daucus carota</i> L.	Carotte	Racines
	Asteraceae	<i>Lactuca sativa</i> L.	Laitue	Feuilles
	Brassicaceae	<i>Brassica oleracea</i> ssp L.	Les choux	Feuilles
	Cucurbitaceae	<i>Cucumis sativus</i> L.	Concombre	Fruits
	Fabaceae	<i>Phaseolus vulgaris</i> L.	Haricot vert	Fruits
	Liliaceae	<i>Allium cepa</i> L.	Oignon	Bulbes
	Solanaceae	<i>Capsicum annuum</i> L.	Poivron	Bulbes
<i>Solanum melongena</i> L.		Aubergine	Fruits	
Légumes traditionnels africains	Amaranthaceae	<i>Amaranthus cruentus</i> L.	Amarante	Feuilles
		<i>Amaranthus viridis</i> L.	Amarante	Feuilles
		<i>Celosia argentea</i> L.	Célosie	Feuilles
	Asteraceae	<i>Acmella oleracea</i> L.	Brède mafane	Feuilles/fleurs
		<i>Vernonia amygdalina</i> Delile	Vernonie	Feuilles
	Basellaceae	<i>Basella alba</i> L.	Baselle	Feuilles
	Capparaceae	<i>Cleome gynandra</i> L.	Caya blanc	Feuilles
	Fabaceae	<i>Vigna unguiculata</i> L.	Niébé	Feuilles
	Malvaceae	<i>Abelmoschus esculentus</i> L.	Gombo	Feuilles / fruits
		<i>Hibiscus sabdariffa</i> L.	Oseille de Guinée	Feuilles / fruits
	Pedaliaceae	<i>Ceratotheca sesamoides</i> Endl.	Faux sésame	Feuilles
	Portulacaceae	<i>Portulaca oleracera</i> L.	pourpier	Feuilles
	Solanaceae	<i>Capsicum frutescens</i> L.	Piment	Fruits
		<i>Solanum aethiopicum</i> L.	Aubergine africaine	Feuilles / fruits
<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill		Tomate	Fruits	
	<i>Solanum macrocarpon</i> L.	Aubergine africaine/ gboma	Feuilles / fruits	

Adapté de Yarou et al. (2017b) et Ryckewaert & Rhino (2017)

2.2.4. Ravageurs des cultures maraîchères

Suivant leurs capacités de production, les insectes phytophages peuvent appartenir à un continuum de classe allant de strictement monophages, capables de se développer sur une seule plante hôte, à extrêmement polyphages, capables de se développer sur des centaines d'espèces de plantes appartenant à différentes familles (Hafsi, 2016).

Tableau 2 : Quelques principaux ravageurs des cultures maraîchères

Catégorie	Nom scientifique	Familles de plantes hôtes	Organes attaqués/ type de dégâts	Caractères
Insectes	<i>Bactrocera cucurbitae</i> Coquillet	Cucurbitaceae	Fruits	Polyphage
	<i>Ceratis capitata</i> Wiedemann	Solanaceae	Fruits	Polyphage
	<i>Dacus</i> spp.	Cucurbitaceae	Fruits	Polyphage
	<i>Liriomyza</i> spp.	Cucurbitaceae	Feuilles	Polyphage
	<i>Aphis gossypii</i> Glover	Cucurbitaceae, Fabaceae, Solanaceae	Recroquevillement des feuilles	Polyphage, vecteur de virus
	<i>Myzus persicae</i> sulzer	Brassicaceae, Solanaceae	Recroquevillement des feuilles	Polyphage, vecteur de virus
	<i>Lipaphis erysimi</i> Kaltenbach	Brassicaceae	Recroquevillement des feuilles	Oligophage, vecteur de virus
	<i>Bemisia tabaci</i> Gennadius	Cucurbitaceae, Fabaceae, Solanaceae	Déformation des feuilles	Polyphage, vecteur de virus
	<i>Thrips</i> sp.	Cucurbitaceae, Fabaceae, Solanaceae	Déformation des feuilles	Polyphage, vecteur de virus
	<i>Hellula undalis</i> Fabricius	Brassicaceae	Feuilles	Oligophage
	<i>Crocidolomia binotalis</i> Zeller	Brassicaceae	Feuilles	Oligophage
	<i>Plutella xylostella</i> L.	Brassicaceae	Feuilles rongées	Oligophage
	Acarie	<i>Helicoverpa armigera</i> Hubner	Brassicaceae, Malvaceae, Solanaceae	Fleurs, boutons floraux, fruits
<i>Spodoptera littoralis</i> Boisduval		Brassicaceae, solanaceae	Défoliation	Polyphage
<i>Aculops lycopersici</i> Massée		Solanaceae	Recroquevillement des feuilles	Oligophage
<i>Polyphagotarsonemus latus</i> Banks		Cucurbitaceae, solanaceae	Feuilles, fruits, boutons floraux	Polyphage
<i>Tetranychus urticae</i> Koch		Cucurbitaceae, Fabaceae, solanaceae	Feuilles, tiges, fruits	Polyphage

Adapté de Yarou et al. (2017b)

Selon qu'ils peuvent ou non se développer ou se nourrir au dépend d'une variété d'espèces végétales, les associations culturales peuvent affecter différemment leurs effets. Ces effets peuvent également provenir des facilités octroyées aux ravageurs et autres auxiliaires de cycle de reproduction, pouvant influencer la répartition et l'abondance. La majorité des insectes

phytophages sont très spécialistes se nourrissant sur une petite fraction de plantes par rapport à l'ensemble des plantes disponibles dans l'habitat (Hafsi, 2016) (Tableau 2).

Parmi ces ravageurs des cultures, certains causent des dégâts d'importance économique sur une large gamme de cultures. Les chenilles ravageurs comme *Plutella xylostella* (Lepidoptera : Plutellidae), *Hellula undalis* (Lepidoptera : Crambidea), *Tuta absoluta* (Lepidoptera : Gelechiidae) sont capables d'engendrer d'énormes pertes de rendement (38 à 100 %) sur leurs cultures hôtes respectives (Yarou et al., 2017b). D'autres ravageurs tels que les nématodes peuvent également causer de sérieuses pertes aux cultures maraîchères.

2.2.5. Principaux groupes d'insectes prédateurs

Différents groupes d'insectes connus et d'autres parfois mal connus interviennent dans la régulation des ravageurs comme prédateurs entomophages. Parmi les plus connus, on peut citer les coccinelles, les syrphes, les araignées, les carabes, les guêpes, les punaises prédatrices, les acariens prédateurs, les fourmis, ... (Ryckewaert & Rhino, 2017). Les prédateurs sont souvent des chasseurs qui capturent leurs proies à vue, soit directement grâce à leur déplacement rapide. D'autres utilisent des pièges comme les araignées avec leur toile. La plupart ont des mandibules qui permettent de découper leurs proies pour les consommer (par exemple les coccinelles), mais d'autres groupes possèdent des stylets qui leur permettent d'aspirer le contenu liquide des proies (par exemple, les punaises prédatrices). Selon les groupes de prédateurs, les larves et/ou adultes sont entomophages (Ryckewaert & Rhino, 2017).

2.2.5.1. Les coccinelles [Coleoptera : Coccinellidae]

Les Coccinellidae prédateurs sont le plus souvent liés à la lutte biologique que tout autre taxon d'organismes prédateurs. Le statut bénéfique de ces organismes a une riche histoire qui est reconnue par le grand public et les praticiens de la lutte biologique. Ils sont d'importants ennemis naturels de nombreuses espèces de ravageurs, en particulier les aleurodes, les pucerons, les cochenilles et les acariens. (Obrycki & Kring, 1998). Chez les adultes, la recherche de proies sur de longues distances est influencée par la perception de molécules volatiles émises par les plantes infestées de pucerons et donc soumis à un stress. Sur de courtes distances, les coccinelles perçoivent les molécules volatiles émises par leurs proies, et s'en servent pour les localiser (Heit et al., 2005 cités par Lopez, 2011). Il a été constaté que la présence de pucerons indique la ponte chez *Coccinella septempunctata* et réduit les

déplacements des femelles, ce qui augmente la probabilité qu'elles placent des œufs à proximité des proies. (Obrycki & Kring, 1998).

En tant que groupe, les coccinellidés sont extrêmement polyphages; et il est de plus en plus évident que les espèces et les individus ont dans de nombreux cas une large diversité de proies. Le simple fait est qu'il n'y a pas une seule espèce pour laquelle on connaisse toute l'étendue du régime alimentaire (Weber & Lundgre, 2009).

2.2.5.2. Les syrphes [Diptera: Syrphidae]

Les syrphes sont des diptères dont les modes de vie adultes et larvaires sont bien différents (Sarhou, 2011). Les stades immatures des syrphes présentent une grande adaptabilité. Ceci est révélé par la gamme exceptionnelle de formes, d'habitudes et de comportements de leurs larves avec notamment des espèces très diversifiées de phytophages, saprophages et zoophages qui existent dans la famille (Miranda & Rotheray, 2018). Chez les syrphes, seule la larve est aphidiphage, l'adulte étant floricole (polliniphage et nectariphage) (Chaubet, 1992). Ces caractéristiques les rendent intéressants pour la production agricole ; ils servent à l'état larvaire à lutter contre les ravageurs de cultures principalement pucerons, et servent comme pollinisateurs à l'état adulte (Sarhou, 2011). Sur les végétaux spontanés se trouve une nourriture alternative nécessaire sous forme d'acides aminés et d'hydrates de carbone contenus dans le pollen, le nectar ou le miellat d'insectes. Ces éléments présentent une grande importance pour la maturation des œufs de Syrphes (Chaubet, 1992).

2.2.5.3. Les chrysope [Neuroptera: Chrysopidae]

Les chrysope appartiennent au groupe des insectes aphidiphages et présentent de ce fait un intérêt certain pour les agriculteurs et les gestionnaires des espaces verts. Le régime alimentaire des larves ne se limite pourtant pas aux pucerons ; en effet, de nombreuses espèces présentent des régimes alimentaires variés : des homoptères (Psyllidae, Aleyrodidae); des œufs et des jeunes larves de lépidoptères (Noctuidae, Tortricidae), d'hyménoptères (Tenthredinidae), de coléoptères (Chrysomelidae), de diptères, de thysanoptères et d'acariens (Mignon et al., 2003). Ce régime de polyphagie constitue un atout certain dans la recherche de méthodes d'élevage ainsi que dans le maintien des populations en cas de disette. Elle s'accompagne pourtant d'effets pervers tels le cannibalisme et la consommation d'autres insectes aphidiphages (coccinelles et syrphes). De même, le manque de spécificité au niveau

des proies limite parfois le synchronisme entre les chrysopes prédatrices et le développement des populations d'homoptères (Mignon et al., 2003).

2.3. Usage des pesticides dans le contrôle des ravageurs des cultures maraichères

Les pesticides sont des substances actives et des produits capables d'éliminer ou de combattre des organismes nuisibles ou indésirables tels que les ravageurs (Commission européenne, 2007). Ces produits chimiques font l'objet d'une utilisation massive pour leurs multiples avantages dont la contribution à la hausse très significative des rendements agricoles observée depuis la seconde guerre mondiale. (Belmain et al., 2013 ; Parlement européen, 2017).

2.3.1. Impact des pesticides sur les organismes utiles

Outre leurs effets contre les ennemis des cultures, de nombreux pesticides de synthèse étendent leurs actions néfastes sur les prédateurs et parasitoïdes des ravageurs et provoquent la disparition de nombreuses populations d'insectes utiles notamment les pollinisateurs (Ryckewaert & Rhino, 2017). Leur application sur les cultures entraîne une réduction des populations de ces organismes qui sont bénéfiques pour les cultures. Il a par exemple été observé des effets néfastes sur les populations de coccinelles, de syrphes et d'araignées prédatrices après traitement des parcelles de chou avec un insecticide à base d'émamectine benzoate (Yarou et al., 2017b).

Des études menées par Munyulia et al. (2007) ont montré que le facteur le plus important qui perturbe la lutte biologique contre les arthropodes nuisibles dans le système de culture du niébé en Uganda et en RDC est l'utilisation d'insecticides chimiques. En appliquant la cyperméthrine et le diméthoate, ils ont trouvé que les densités des populations des prédateurs les plus faibles sont observées dans les parcelles où des doses complètes ont été appliquées. Il a été observé qu'en moyenne, l'application de la moitié de la dose recommandée d'insecticide (5ml de cyperméthrine + 12,5 ml de diméthoate dans 10 litres d'eau) a entraîné une réduction de plus de 50 à 60% de la densité de population des prédateurs.

Aussi, réduire la charge des ravageurs des cultures, sans recourir à un usage intensif des pesticides de synthèse est devenu l'un des objectifs majeurs dans la mise en œuvre des modèles alternatifs de production végétale. Parmi les stratégies les plus citées dans ces

initiatives figurent la diversification spécifique à l'échelle des parcelles de culture et le recours à des inter-bandes attracteurs, repousseurs ou à effet insecticides dans les parcelles des cultures.

2.3.2. Impact des pesticides sur la santé humaine et Environnement

L'utilisation des pesticides dans la lutte contre les ravageurs n'est pas sans conséquences sur la santé des agriculteurs et des consommateurs, ainsi que sur l'environnement (Commission européenne, 2007 ; Xu et al., 2018). L'intense utilisation des pesticides en agriculture est aussi la cause directe de l'apparition des résistances (Karabo et al., 2019). Un des exemples les plus marquants de ces dangers dans le monde a été celui du DDT (Dichloro-diphényle-trichloro-éthane), qui, outre sa toxicité, s'est avéré très persistant dans l'environnement et les réseaux trophiques (Ryckewaert & Rhino, 2017).

L'Organisation Mondiale de la Santé estime qu'en moyenne 200 000 personnes sont tuées chaque année dans le monde, en conséquence directe de l'empoisonnement par les pesticides (Belmain et al., 2013).

L'utilisation incontrôlée et inappropriée de pesticides chimiques, y compris de nombreux produits et formulations à haut risque, est une grave préoccupation pour la santé humaine et l'environnement (Harrison et al., 2019). Les études montrent que dans les pays en développement, les agriculteurs, principalement en raison de leur faible niveau d'instruction, connaissent mal la toxicité réelle des pesticides utilisés et leur mode d'utilisation. L'information écrite sur les bouteilles, le plus souvent en langues étrangères (français, anglais) et les pictogrammes aux normes internationales sont mal compris (Ahouangninou et al., 2011).

Une grande variété de problèmes tels que les troubles de la reproduction, les problèmes génotoxiques, immunotoxiques, dermatologiques, neurotoxiques, les maladies métaboliques comme le diabète, la perturbation du système endocrinien et une dizaine de types de cancer, semblent découler de l'exposition aux pesticides synthétiques (Ahouangninou et al., 2011 ; Anjarwalla et al., 2016). L'irritation cutanée, les maux de tête, la toux, le vertige, les troubles respiratoires, la fatigue, la diarrhée, etc. sont autant de symptômes d'intoxication dus à l'usage de ces pesticides (Yarou et al., 2017b).

Beaucoup d'études ont montré que les produits agricoles destinés à la consommation sont parfois contaminés par les pesticides. Des teneurs de résidus dépassant 0,5 mg/g pour les organochlorés (DDT, endrine, heptachlore) ont été trouvées dans les légumes au Sud-Bénin. La forte présence de ces agents chimiques est due au fait que ces cultures, qui très souvent présentent des cycles végétatifs courts, ne permettent pas d'éviter la rémanence des pesticides dans les organes récoltés (Hummel et al., 2002).

Il s'est également constaté une présence des résidus de métamidophos, de l'endosulfan et du diméthoate dans les eaux de puits en zone agricole au Sénégal (Yarou et al., 2017b). En Côte d'Ivoire, une contamination de l'eau souterraine par les pesticides organophosphorés et organochlorés a été montrée dans les régions agricoles où sont cultivés le cacao, le café, la banane mais aussi les légumes (Ahouangninou et al., 2011).

2.3.3. Réglementations sur les pesticides

La croissance spectaculaire de la production et du commerce de produits chimiques, au cours des dernières décennies, a suscité l'inquiétude tant de la population que des pouvoirs publics en ce qui concerne les risques qu'ils posent.

Pour réduire les risques découlant de l'utilisation de pesticides et réguler leurs usages des nombreux accords et réglementations au niveau international (Convention de Stockholm, Convention de Rotterdam, ...) ont été émis, et intégrés par la suite dans les législations de différents pays (FAO & PNUE, 2017 ; FAO & OMS, 2018 ; directive 91/414/CEE, directive 98/8/CE, directive 2009/128/CE, Règlement (CE) n°1107/2009, etc.). La Commission internationale du Codex Alimentarius a mis en place des indicateurs des limites maximales de résidus (LMR). La LMR est une concentration maximale d'un résidu qui est légalement autorisée ou considérée comme acceptable dans ou sur une denrée alimentaire, un produit agricole ou un produit destiné à l'alimentation animale (FAO & OMS, 2014).

Malheureusement, en dépit des restrictions réglementaires existantes et du coût de la procédure d'autorisation, la consommation et l'utilisation de pesticides dans le monde n'ont pas diminué et le pourcentage des échantillons de denrées alimentaires et d'aliments pour

animaux dans lesquels les résidus de pesticides dépassent les limites réglementaires n'a pas enregistré de baisse ; il avoisine les 5 % (Parlement européen, 2017).

2.4. Diversification des cultures comme alternative aux pesticides de synthèse

2.4.1. Définition des concepts

L'association des cultures consiste en une culture simultanée de deux espèces cultivées ou plus dans le même champ (Malézieux et al., 2009 ; Raseduzzaman & Jensen, 2017 ; He et al., 2019). La croissance simultanée de ces espèces dans le même milieu pendant une période significative, sans qu'elles soient nécessairement semées ou récoltées en même temps, (Xu et al., 2018) facilite des interactions biologiques et culturelles qui concourent à la santé des cultures (**Figure 1**).

Les avantages de la culture intercalaire comprennent la réduction des mauvaises herbes, l'utilisation plus efficace des ressources disponibles, l'augmentation des rendements et, surtout, la stabilité biologique et économique (He et al., 2019). La diversité des cultures est une pratique agricole traditionnelle observée dans de nombreux pays asiatiques et certaines régions tropicales. À l'échelle mondiale, la superficie totale couverte est estimée à 1 milliard d'hectares. Les terres cultivées utilisées pour les associations végétales varient de 17% en Inde à 94% au Malawi (He et al., 2019). Une autre forme de diversification des cultures est l'utilisation des plantes compagnes. Elles sont définies comme des plantes qui, lorsqu'elles sont cultivées en compagnie d'une autre, améliorent ses performances. Les plantes répulsives contre les insectes sont un exemple de plante compagne. De nombreuses informations anecdotiques existent sur la compatibilité des différentes espèces végétales. A titre d'exemple, les espèces suivantes sont énumérées comme insectifuges pour les choux : romarin (*Rosemarinus officinalis L.*), thym (*Thymus vulgaris L.*), aneth (*Anethum graveolens L.*), menthe (*Mentha spp.*), camomille (plusieurs espèces), capucines oranges (*Tropaeolum minus L.*) et bien d'autres espèces (Endersby & Morgan, 1991).

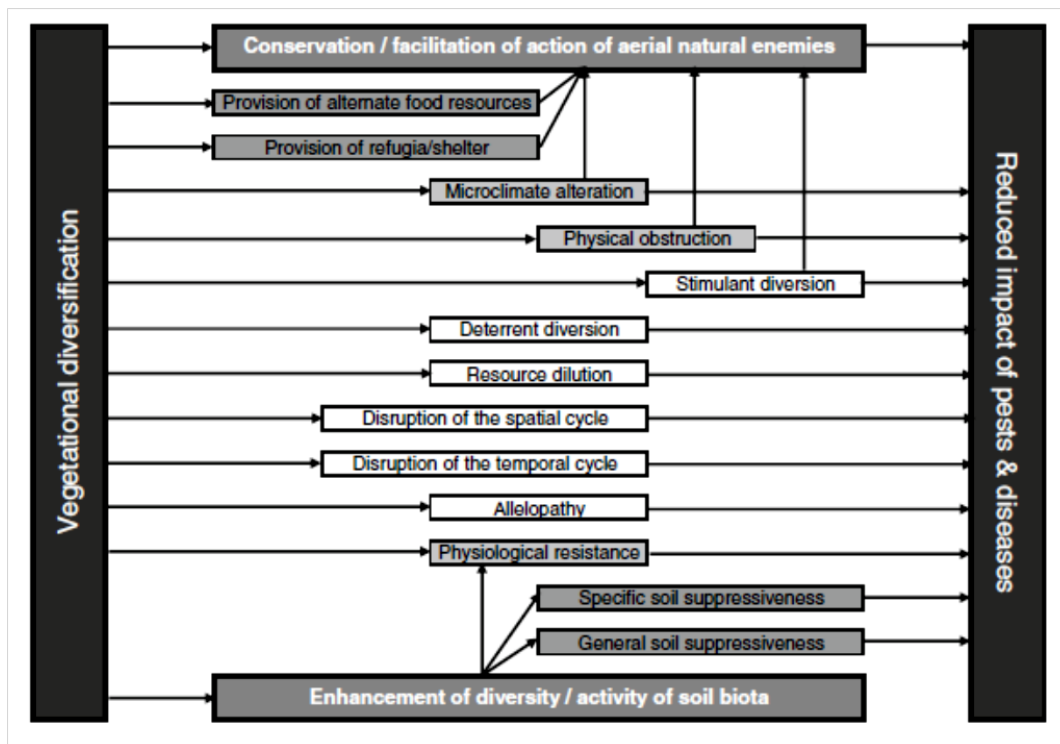


Figure 1: Principales voies pour réduire l'impact des ravageurs via l'introduction de la diversité des espèces végétales dans les agroécosystèmes

(Ratnadass et al., 2012)

2.4.2. Choix des espèces dans les associations végétales

Les associations végétales sont des combinaisons de cultivars compatibles sur le plan agronomique mais qui n'ont pas de sélection supplémentaire pour l'uniformité phénotypique. Ils sont mis en œuvre pour réduire les populations de pathogènes. Par conséquent, le choix des composantes de l'association doit être pertinent. Il est essentiel de sélectionner les espèces qui peuvent réduire les agents pathogènes des cultures cibles (He et al., 2019). En plus, le choix sera porté sur les espèces qui peuvent être cultivées et se développer dans le cadre de pratiques normales de gestion des cultures, et qui ne sont pas en concurrence avec les cultures (pour les nutriments, la lumière ou l'eau) ou abritent des insectes nuisibles (Gontijo, 2019).

L'utilisation des plantes pesticides est de plus en plus envisagée. On appelle plante pesticide toute plante dont les propriétés chimiques des organes, des sécrétions ou des émissions peuvent être exploitées pour lutter contre les organismes considérés comme nuisibles (Yarou et al., 2017b).

Dans d'autres associations, les combinaisons d'espèces produisent de bons résultats lorsqu'une espèce assure la protection de l'autre ou s'il se constate une protection mutuelle contre les ravageurs. Par exemple, des composés chimiques (rutine) trouvés dans la tomate dissuadent la ponte de *Artogeia Rapae* et de *P. xylostella*, tous ravageurs du chou (Hooks et Johnson, 2003).

Parmi les plantes pouvant être exploitées dans la protection des cultures associées figurent les plantes dites aromatiques, qui ne forment pas un groupe de plantes clairement défini d'un point de vue botanique, mais sont souvent cultivées pour leurs propriétés chimiques de leurs organes ou leurs émissions (les acides phénoliques, les flavonoïdes et les composés aromatiques comme les terpénoïdes, les stéroïdes, les alcaloïdes et les cyanures organiques), leur conférant des usages dans l'alimentation, la médecine et la protection des cultures (Xu et al., 2019).

L'utilisation des plantes à fleurs est aussi encouragée pour favoriser les ennemis naturels (Gontijo, 2019). En grandes cultures, les plantes sélectionnées pour la manipulation de l'habitat sont généralement retenues pour les caractéristiques florales (morphologiques) et/ou physiologiques qui procurent des avantages aux auxiliaires de production (Amoabeng et al., 2019). C'est ainsi que l'utilisation des bandes fleuries est de plus en plus adoptée pour leur attractivité et hébergement des populations diversifiées d'ennemis naturels (Gontijo, 2019).

2.4.3. Synchronisation temporelle et spatiale des associations culturales

L'une des tâches les plus difficiles de la diversification des cultures consiste à choisir le moment approprié pour intégrer les plantes compagnes aux côtés de la culture afin d'assurer un effet sur les populations de ravageurs et d'éviter les effets de la concurrence. Plusieurs études montrent l'importance du temps de plantation pour réduire les charges de ravageurs dans les habitats de diversité agricole (Hooks et Johnson, 2003). Fournir un abri aux ennemis naturels au début de la saison culturale, lorsque l'abondance des ravageurs est faible, est particulièrement important pour les prédateurs généralistes, qui sont plus susceptibles d'arriver plus tôt après l'infestation initiale des ravageurs (Gontijo, 2019).

Certaines associations culturales ne sont pas efficaces suite à la mauvaise période de la mise en place des plantes de service. A titre d'exemple, Andow et al. (1986) ont constaté que le

chou intercalé avec des plantes compagnes avait réduit la ponte de la deuxième génération du ravageur *A. Rapae* mais pas des larves de première génération (Hooks et Johnson, 2003).

Aussi, il est reconnu que les relations spatiales entre les cultures associées affectent le mouvement et la colonisation de certains ravageurs. La dispersion des insectes dans le champ peut être modifiée par le positionnement des plantes compagnes, influençant ainsi leur ponte et leur établissement dans un habitat. Certaines plantes peuvent être rangées en lignes alternées à la culture principale ou en cultures associées mixtes ou en bordure de celle-ci selon l'effet des composés volatiles des plantes (Shelton et Badenes-Perez, 2006 ; Khan et al., 2008 ; Poveda et al., 2019 ; He et al., 2019). Par exemple, l'utilisation des plantes de bordure pour fournir du nectar, du pollen ou d'autres proies à des organismes utiles fait l'objet de beaucoup d'attention dans la lutte biologique (Hooks et Johnson, 2003).

2.4.4. Effets de la diversification sur les arthropodes ravageurs

Bien qu'il n'y ait aucune preuve actuelle que le comportement des insectes ravageurs change dans différents contextes paysagers, il est connu que les changements dans la diversité à l'échelle locale peuvent impacter sur le comportement (Poveda et al., 2019), le développement et la capacité reproductive des insectes ravageurs grâce à de nombreux signaux visuels et olfactifs (composés organiques volatiles) qu'elles émettent.

Des signaux différents émis par les plantes présentes pourraient être perçus de façon confuse pour les insectes ravageurs contrairement à ce qui peut être observé en monoculture (Ratnadass et al., 2012). Ceci accroît l'effet « bottom-up » c'est-à-dire les cultures associées interfèrent visuellement et chimiquement dans la recherche de plantes hôtes par les phytophages et donc la réduction de leur colonisation (Brévault et al., 2019).

En plus, la diversité est un élément essentiel, car différents ennemis naturels peuvent être plus efficaces pour contrôler différents ravageurs à différents stades de développement ou à différentes saisons (Harrison et al., 2019). Les polycultures supportent généralement des charges des phytophages spécialisées plus faibles que les monocultures (Ratnadass et al., 2012). Quelques études qui ont évalué les effets des plantes compagnes au sein des cultures maraîchères sont présentées (tableau 3).

Tableau 3 : Exemples des études portant sur les cultures associées en maraîchage

Culture principale	Cultures associées	Ravageurs	Effets observés	Références
<i>Brassica chinensis</i>	<i>Brassica oleracea</i> , <i>Allium sativum</i> , <i>Lactuca sativa</i> .	Abondance totale	Augmentation des auxiliaires (prédateurs)	Cai et al., 2010
<i>Vigna unguiculata</i>	<i>Sorghum bicolor</i> , <i>Vigna radiata</i> .	<i>Megalurothrips sjostedti</i> , <i>Maruca vitrata</i> .	Augmentation des prédateurs et de la production	Munyulia et al., 2007
<i>Brassica oleracea</i> var <i>capitata</i>	<i>Ocimum gratissimum</i> .	<i>Hellula undalis</i> , <i>Plutella xylostella</i> , <i>Spodoptera littoralis</i>	Réduction de l'abondance des ravageurs	Yarou et al., 2017a
<i>Brassica oleracea</i> var <i>viridis</i>	<i>Petroselinum sativum</i>	<i>Brevicoryne brassicae</i> , <i>Myzus persicae</i>	Présence élevée des prédateurs, réduction des parasitoïdes	Saldanha et al., 2019
<i>Brassica oleracea</i> var <i>capitata</i>	<i>Solanum lycopersicum</i> , <i>Capsicum annum</i> , <i>Allium cepa</i>	<i>Plutella xylostella</i>	Augmentation de la production	Asare-Bediako et al., 2010
<i>Brassica oleracea</i> var <i>capitata</i>	<i>Allium cepa</i>	<i>Plutella xylostella</i> <i>Bemisia tabaci</i> , <i>Hellula undalis</i> , <i>Brevicoryne brassicae</i> .	Réduction des ravageurs, augmentation de la production.	Baidoo et al., 2012

2.4.4.1. Effet de dilution

En considérant que les paysages plus complexes contiennent une plus grande diversité de plantes, on peut s'attendre à ce que les ravageurs ne soient pas capables d'identifier facilement leur plante hôte de prédilection et qu'ils soient désorientés par des stimuli répulsifs ou attractifs émis dans les paysages (Poveda et al., 2019 ; Ratnadass et al., 2012).

Les plantes évoluant en monoculture sont ainsi plus vite perçues qu'elles ne le seraient dans les écosystèmes naturels hétérogènes ou dans les systèmes basés sur les cultures associées. Les insectes phytophages sont donc plus susceptibles de trouver et de rester sur des plantes hôtes qui poussent dans des peuplements purs.

L'association de plusieurs espèces perturbe la capacité des insectes à attaquer leur hôte cible. Cela est particulièrement vrai pour les ravageurs aériens. A'Brook (1968) a montré que, dans les situations de biomasses diversifiées, les pucerons *Aphis craccivora*, *A. gossypii* et

Longiunguis sacchari sont parfois incapables d'identifier leur hôte (*Arachis hypogea*). Dans le même angle, Follett et collègues (2020) ont montré qu'en associant une culture hôte avec une plante non hôte des pucerons, ces insectes pouvaient arriver en ordre dispersé car ils prenaient plus de temps pour localiser leurs plantes hôtes, et leurs densités restaient inférieures à celles des parcelles témoins.

Dans les cultures des Brassicacées, la densité de *Phyllotreta cruciferae* était inférieure dans tout mélange de plantes par rapport à la monoculture en raison de leurs mouvements et de leurs comportements de recherche d'hôte (Hooks et Johnson, 2003).

2.4.4.2. Réduction de la colonisation et perturbation du cycle

L'association des cultures réduit l'abondance des ravageurs des cultures en maraîchage. Des parcelles de chou en association avec des plants d'*Ocimum gratissimum* étaient moins infestées par les chenilles de *Spodoptera littoralis*, *P. xylostella* et *H. undalis* que celles de choux cultivés seuls. Cette réduction des ravageurs entraîne une réduction des dégâts et une augmentation des rendements (Yarou et al., 2017a).

Une étude comparant l'abondance des populations d'adultes et le taux de ponte chez *Plutella xylostella* dans un champ de chou et dans un champ où le chou et la tomate sont intercalés a révélé que ces deux facteurs étaient plus faibles dans le champ associant ces deux cultures. Il a été suggéré que les composés volatils émis par les tomates agissaient sur le développement des larves et repoussaient les papillons adultes (Endersby & Morgan, 1991).

Aussi, des perturbations dues aux plantes pesticides ont été rapportées même chez les nématodes. Certaines plantes nématicides libèrent des composés toxiques qui affectent directement la mobilité ou l'éclosion des nématodes et d'autres processus vitaux. C'est le cas cité par Ratnadass et collègues (2012) avec l'utilisation de *Avena strigosa* (Poaceae) contre le nématode *Pratylenchus penetrans*.

2.4.4.3. Effet sur l'oviposition

Dans les milieux où les plantes hôtes sont plus rares (cultures mixtes), les conditions physiologiques de la ponte sont plus difficiles. Dans ces conditions, les signaux répulsifs et/ou attractifs pourraient être plus efficaces car les papillons femelles adultes évitent la ponte sur les plantes qui n'émettent pas la bonne combinaison d'indices pour minimiser le risque de faire

un mauvais choix (Poveda et al., 2019). D'autres études ont montré que les substances volatiles provenant de *Melinis minutiflora* inhibaient la ponte des foreurs des tiges particulièrement sur le maïs cultivé (Ratnadass et al., 2012). Latheef et Ortiz (1983) ont constaté que la présence de la tanaïsie diminuait le nombre d'œufs sur les plantes cultivées déposés par la fausse arpeuteuse du chou, *Trichoplusia ni*.

Dans le même ordre d'idées, l'abondance d'œufs de *P. xylostella* sur les choux de Bruxelles a été réduite de manière significative en présence de la sauge *Salvia officinalis L.* et du thym *Thymus vulgaris L.* (Dover (1986) dans Hooks et Johnson, 2003). L'auteur suggère que la sauge agit comme une barrière physique en étendant ainsi la zone de recherche de *P. xylostella*. Le trèfle blanc, *Trifolium repens* et la laitue *Lactuca sativa* associés avec du chou diminuaient aussi le nombre d'œufs de *Delia brassicae* sur des plants de chou par rapport à sa croissance en monoculture (Ryan et al., 1980 dans Hooks et Johnson, 2003).

En cultures mixtes, les substances volatiles libérées par des plantes non hôtes affectent remarquablement le comportement de ponte des insectes phytophages. Il a été constaté que la ponte de certains papillons spécialistes sur les plantes de Brassicacées (par exemple *Pieris spp.*) est stimulée par des composés végétaux typiques de ce taxon, les glucosinolates et les isothiocyanates (Hilker & Meiners, 2011), mais ces composés agissent comme dissuasifs alimentaires pour les ravageurs polyphages (Hooks et Johnson, 2003). Ainsi, une espèce des Brassicaceae peut être utilisée comme plante compagne pour manipuler le comportement et l'oviposition des ravageurs d'une autre espèce de la même famille.

2.4.5. Attraction des ennemis naturels

Certains groupes d'insectes servent en agriculture comme ennemis naturels des insectes nuisibles (Follett et al., 2020). La diversité végétale est reconnue comme un des moyens pour attirer les ennemis naturels prédateurs (Hatt et al., 2019) et parasitoïdes que la monoculture, devenant l'un des mécanismes pour réduire l'infestation de ravageurs (Karabo et al., 2019) et accroissant ainsi l'effet « top-down » (via les auxiliaires) (Simon et al., 2015) : influence du niveau trophique supérieur sur le niveau trophique inférieur. Il s'agit de la régulation des insectes phytophages par la prédation, le parasitisme, etc. influencée par la présence de la culture associée (Brévault et al., 2019). En effet, la culture associée peut-être un habitat pour les auxiliaires de ravageurs ou pour les proies. Il est reconnu que la régulation naturelle par le

parasitisme, la prédation, etc. est plus efficace dans les systèmes complexes que dans les systèmes simples (Gontijo, 2019). Cela rejoint l'hypothèse dite des ennemis naturels repris par Lopes (2012) qui stipule que les ennemis naturels devraient être plus abondants dans les environnements complexes et donc supprimer les ravageurs plus efficacement dans les polycultures que dans les monocultures. Ceci est dû au fait que le paysage agricole complexe créé, offre des ressources et des abris aux ennemis naturels des insectes nuisibles. Les plantes cultivées en association et leur litière qui forment l'abri, peuvent souvent servir de source de nourriture pour les petits arthropodes phytophages ou saprophages, qui à leur tour serviront d'aliment de remplacement ou d'espèces hôtes pour les prédateurs et les parasitoïdes (Gontijo, 2019).

En général, une diversité végétale accrue peut être atteinte par la conservation de la végétation naturelle non cultivée et / ou par la culture de plantes compagnes aux côtés d'une culture cible. On s'attend à ce que les plantes compagnes dans les systèmes de cultures associées améliorent le contrôle biologique en fournissant aux ennemis naturels des aliments alternatifs, tels que le nectar et le pollen, ainsi que des proies / hôtes alternatifs et un abri ou refuge naturel (Saldanha et al., 2019). Par exemple, des plantes à fleurs ouvertes, comme de nombreuses Apiacées, peuvent fournir du nectar aux parasitoïdes et aux guêpes (Harrison et al., 2019). Il a par ailleurs été prouvé que la longévité et la fécondité des parasitoïdes augmentent considérablement lorsque le nectar est disponible (Ratnadass et al., 2012). De plus, la couleur, la morphologie et la période de floraison des fleurs de différentes espèces peuvent influencer considérablement sur l'attraction des ennemis naturels (Gontijo, 2019).

La diversité des ressources primaires augmente la diversité des consommateurs primaires (phytophages) et secondaires (prédateurs) (Jacquota et al. 2019). Dans l'étude menée par Karabo et al. (2019), les courbes de réponse ont montré qu'à mesure que la densité des pucerons augmentait, la densité des Coccinellidae augmentait également, et une baisse de la densité des pucerons provoquait une baisse des Coccinellidae. Les prédateurs avaient ainsi répondu plus intensément à une densité élevée des pucerons.

L'intégration des plantes compagnes aux cotés de la culture cible est particulièrement importante pour les ennemis naturels généralistes, qui constituent souvent la première ligne de défense contre les ravageurs au début de la saison, avant l'arrivée des spécialistes (Saldanha et al., 2019). Les essais menés au Chili par Grez et Prado (2000) ont évalué les effets de la

culture du chou entouré avec la luzerne *Medicago sativa* et le poireau *Allium porrum*, sur les pucerons *Brevicoryne brassica* et plusieurs coccinellidés prédateurs. Ces cultures associées ont présenté un nombre élevé des coccinellidés car la luzerne offre à ces ennemis naturels des ressources abondantes telles que le pollen et des pucerons supplémentaires (Hooks et Johnson, 2003).

Les mécanismes sous-jacents entre les plantes et les consommateurs primaires, ou entre les consommateurs primaires et les consommateurs secondaires, sont modulés par le degré de spécialisation des consommateurs, la productivité et / ou la densité des ressources. Comme l'explique l'hypothèse de spécialisation des ressources, lorsque les espèces consommatrices sont des spécialistes, l'augmentation de la diversité des ressources peut conduire à une plus grande diversité des consommateurs (Jacquota et al., 2019).

2.4.6. Interactions négatives dans les cultures associées

S'il est communément admis que les associations des cultures sont favorables au contrôle des ravageurs des cultures, certaines études ont montré que si le choix d'espèces et /ou des cultivars n'est pas bien fait, les certaines associations culturales peuvent conduire à une prolifération des ravageurs et, par conséquence, à une aggravation des dégâts sur les plantes cultivées (He et al., 2018).

Une compréhension approfondie du comportement du ravageur et de la façon dont il est affecté par l'attractivité relative de la culture-piège par rapport à la culture principale, le rapport de la culture principale à la culture-piège et son emplacement (en périmètre ou culture intercalaire) est essentielle au succès de cette stratégie (Ratnadass et al., 2012). Certains abris peuvent interagir négativement avec les ennemis naturels dans certains cas en gênant leur mouvement, en détournant leur attaque et/ou en favorisant des interactions intraguilides antagonistes (phénomènes où une espèce prédatrice se nourrit d'un autre prédateur) (Gontijo, 2019).

Dans tous les cas, comme les plantes à fleurs (établies dans les associations) fournissent de la nourriture supplémentaire non seulement aux ennemis naturels mais également aux ravageurs des cultures eux-mêmes, la composition de la flore dans les habitats est essentielle pour déterminer le type d'effet à prévoir (favoriser les ravageurs des cultures ou leurs ennemis naturels). Prenons l'exemple révélé par Ratnadass et al., (2012) dont le constat est que dans certains jardins potagers mixtes, les parcelles avec les plus fortes densités d'hôtes alternatifs (à

savoir les détritivores) et les plus fortes densités de prédateurs associés n'avaient pas de plus faibles densités de ravageurs. Dans ce cas, les prédateurs préfèrent se nourrir de détritivores, qui protègent ainsi les ravageurs de leurs ennemis.

2.4.7. Composés sémiochimiques et contrôle des ravageurs dans les associations végétales

2.4.7.1. Définition du concept et modes d'action des composés sémiochimiques

Law et Regnier (1971) cités par Lopes (2011) ont été les premiers scientifiques à proposer le terme « sémiochimique » pour décrire les substances chimiques, odorantes, qui interviennent dans les interactions entre les organismes. Les composés sémiochimiques sont des molécules informatives (ou actives) utilisées dans les interactions insectes-insectes ou plantes-insectes (Xu et al., 2018). Ainsi, pour localiser leurs proies dans des habitats naturels, les agents bénéfiques entomophages utilisent de nombreux signaux chimiques émis par les proies et les plantes hôtes, individuellement ou en association (Francis et al., 2005).

Les composés sémio-chimiques peuvent être classés en deux catégories à savoir les phéromones et les substances allélochimiques (Figure 2) (Durieux et al., 2010). Les phéromones sont des substances sémiochimiques utilisées dans la communication intraspécifique, et peuvent être classées selon leur fonction, comme l'attraction sexuelle, l'agrégation, l'alarme, le marquage, etc. Les substances allélochimiques sont des substances sémiochimiques qui facilitent la communication interspécifique. Elles comprennent un plus grand nombre de produits chimiques que les phéromones et peuvent être regroupés en trois catégories: les « allomones » qui sont des substances qui, une fois émises, provoquent une modification de comportement bénéfique à l'organisme émetteur et préjudiciables au récepteur. Les « kairomones » qui sont des substances qui profitent au récepteur et sont préjudiciables à l'émetteur et les « synomones » qui profitent à la fois à l'organisme émetteur et à l'organisme récepteur (Rodriguez-Saona & Stelinski, 2008).

Les plantes colonisées par les insectes phytophages produisent un groupe de substances dites composés organiques volatils (COV) (Khan et al., 2008) qui peuvent inclure des substances sémiochimiques qui agissent comme répulsifs pour les phytophages et comme attractifs pour les organismes antagonistes de ces ravageurs, tels que les prédateurs et les parasitoïdes (Khan et al., 2008). Selon le contexte, les COV sont des allomones s'ils repoussent les phytophages,

des kairomones s'ils attirent les phytophages ou des synomones s'ils attirent les ennemis naturels des ravageurs (Rodriguez-Saona & Stelinski, 2008).

Il existe aussi des plantes saines qui produisent naturellement des COV sans l'attaque des ravageurs, ces signaux sont utilisés par les ennemis naturels pour localiser leur proie. Par exemple, le méthyl salicylate et le (Z)-jasmone sont des COV qui agissent comme des répulsifs contre les pucerons lorsqu'ils sont diffusés dans le champ (Cook et al., 2007).

Les substances sémiachimiques présentent des possibilités de lutte contre les ravageurs et de nombreuses voies de biosynthèse ont été élucidées. Pour ces composés, il existe un autre avantage en ce que les organismes utiles peuvent être avantageusement manipulés. Francis et al. (2005) ont montré que le composé (E)-E-farnesene agit efficacement comme un répulsif pour les insectes phytophages et attire les prédateurs tels que les coccinelles.

Ainsi, les composés sémiachimiques qui recrutent des prédateurs et des parasitoïdes (parasites qui tuent leurs hôtes), ou qui gèrent d'autres organismes utiles, peuvent être libérés par les cultures ou les plantes compagnes, offrant ainsi de nouvelles approches de lutte biologique contre les ravageurs (Pickett et al., 2014).

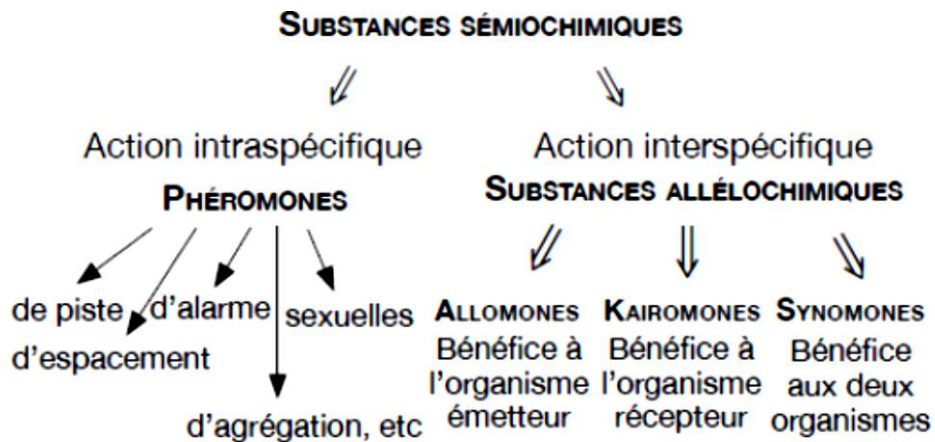


Figure 2 : Diversité de substances sémiachimiques

(D'après Brossut, 1996 cité par Durieux et al., 2010).

Dans une culture de carotte mélangée à l'oignon, il s'est avéré que les attaques dues à la mouche des carottes *Psila rosae* étaient réduites grâce aux substances dissuasives volatiles émises par les plants d'oignons (Ratnadasset al., 2012).

2.4.7.2. Cultures pièges et la stratégie « Attract-and-kill »

On entend par cultures pièges ou « trap crops », les plantes mises en place (préférences liées au stade de croissance, cultivars ou espèces) qui détournent la pression des ravageurs de la culture principale parce qu'elles sont plus attrayantes (Ratnadass et al., 2012). Shelton et Badenes-Perez (2006) ont passé en revue la culture piège et ont proposé une définition large des cultures pièges comme des peuplements qui sont, de nature ou par manipulation, déployés pour attirer, détourner, intercepter et/ou retenir les insectes ciblés ou les agents pathogènes qu'ils véhiculent afin de réduire les dommages à la culture principale.

Une culture piège peut être constituée d'une seule espèce ou d'une combinaison de plusieurs espèces végétales (Ben-Issa et al., 2017). Des rapports sur le potentiel élevé de la culture piège incluent le papillon *P. xylostella* dont les infestations dans les champs de chou ont été réduites en utilisant une autre espèce de Brassicaceae *Barbarea vulgaris* comme piège (Endersby & Morgan, 1991). Un autre cas est l'installation du maïs tout autour de la parcelle maraîchère comme culture piège pour les mouches de légumes, de la famille des *Tephritidae*, telles que *Bactrocera cucurbitae*, *Dacus ciliatus* ou *Dacus demmerezi* (Scholle, 2015).

Toutefois, la culture piège n'est pas trop développée pour les pucerons car leur sélection d'hôtes est souvent considérée comme un processus passif qui dépend principalement du vent (Ben-Issa et al., 2017). Bien qu'il soit risqué de généraliser, les recherches de Potting et al. (2005) ont conclu que les petits insectes tels que les aleurodes, les acariens et les pucerons ont une capacité limitée à détecter leurs hôtes. Il est cependant possible que les cultures pièges agissent comme une barrière lorsqu'elles sont plus hautes que la culture principale et plantées dans les bordures.

La stratégie « attract-and-kill » (A&K) sous entend l'application des méthodes qui consistent à intercepter et à tuer les ravageurs ; en d'autres termes, les organismes cibles sont attirés vers un attractif (généralement un signal sémi chimique et/ou visuel) et sont ensuite tués par un agent insecticide associé (Vernon et al., 2015). En cultures associées, la stratégie est utilisée grâce aux cultures pièges dites « dead-end trap crops » (Cook et al., 2007) ; elles sont à la fois très attrayantes pour la ponte des ravageurs femelles adultes et impropres au développement de leur progéniture. Ces cultures pièges sont plus intéressantes que les autres plantes pièges (effets attractifs sans propriétés biocides), ces dernières peuvent agir en premier lieu comme « puits » pour les populations de ravageurs et devenir des sources de ravageurs pour le même champ plus tard dans la saison ou pour les champs voisins (Ratnadass et al., 2012).

L'efficacité des cultures pièges peut être encore améliorée par l'application de produits sémiocchimiques attractifs supplémentaires. Des stimulants gustatifs, tels que des solutions de saccharose, peuvent être appliqués au niveau des cultures-pièges pour favoriser l'ingestion d'appâts insecticides (Cook et al., 2007). Par ailleurs, la stratégie A&K peut être mise en place avec combinaison d'un diffuseur des composés sémiocchimiques attractifs et une substance toxique aux ravageurs (Rodriguez-Saona & Stelinski, 2009). D'autres applications de l'approche A&K consistent à attirer les ennemis naturels d'un ravageur vers une plante compagne, et lorsque le ravageur est présent, l'ennemi naturel les tue pour éviter d'endommager la culture principale (Nathaniel, 2020).

2.4.7.3. Approche « push-pull » dans les associations végétales

Le terme « push-pull » a d'abord été conçu comme une stratégie de lutte contre les insectes par Pyke et al. (1987) en Australie. Ils ont étudié l'utilisation de stimuli répulsifs et attractifs, déployés, pour manipuler la distribution de *Helicoverpa spp* dans le coton, réduisant ainsi la dépendance aux insecticides, auxquels les mites étaient devenues résistantes (Cook et al., 2007 ; Khan et al., 2008). Le principe de l'approche push-pull est la protection de la culture principale par des signaux négatifs qui réduisent la colonisation et le développement des ravageurs (Figure 3), c'est-à-dire l'effet «push» (Poveda et al., 2019). La fonction de la composante « push » de la stratégie push-pull est de rendre la ressource protégée difficile à localiser, peu attrayante ou inadaptée au ravageur (Cook et al., 2007). Ceci est réalisé soit directement, en modifiant la culture, soit par des cultures compagnes cultivées entre les rangées ou réparties à travers la culture principale. Idéalement, la culture modifiée, ou la culture associée, crée également un moyen d'exploiter les populations d'organismes bénéfiques en libérant des substances volatiles qui les attirent (Khan et al., 2008). La composante « pull » implique l'utilisation des stimuli attractifs pour détourner les ravageurs de la ressource protégée vers un piège (Cook et al., 2007). C'est le cas des plantes pièges cultivées, par exemple, dans les bordures de la culture principale et qui sont attrayantes pour le ravageur, par exemple en favorisant la ponte. Idéalement, un effet réducteur de population sera généré par les plantes pièges, comme l'incorporation d'un pesticide naturel ou une défense innée des plantes (Pickett et al., 2014 ; Kebede et al., 2018).

Une de grandes réussites de la technologie « push-pull » est celle développée par le « International Centre of Insect Physiology and Ecology (ICIPE) » et ses partenaires pour la lutte intégrée contre les ravageurs et les mauvaises herbes dans les céréales (Khan et al.,

2011). Les premiers essais menés au Kenya consistaient à lutter contre les lépidoptères foreurs des céréales *Chilo partellus*, *Busseola fusca*, *Eldana saccharina* et *Sesamia calamistis* qui entraînent des pertes de rendement de 10 à 50% (Cook et al., 2007). Il s'agissait d'attirer ces ravageurs avec les espèces telles que *Pennisetum purpureum* ou *Sorghum vulgare sudanense* (poacées), plantées à la lisière du champ comme plantes pièges, tout en les éloignant de la culture principale à l'aide d'une culture compagne répulsive : *Desmodium uncinatum* ou *Desmodium intortum* (légumineuses) (Cook et al., 2007 ; Midega et al., 2018). D'après Midega et al. (2018), les essais de push-pull menés en Afrique de l'Est ont montré que les plantes pièges émettent des composés sémiocimiques qui attirent les papillons femelles gravides tandis que les cultures intercalaires émettent des composés qui dissuadent la ponte sur le maïs mais attirent les ennemis naturels des ravageurs. Cependant, les plantes pièges ne conviennent pas à la survie des stades larvaires des ravageurs, ce qui entraîne des taux de mortalité élevés et un développement retardé des larves. Du fait que les dernières avancées scientifiques ont permis de mieux comprendre le comportement des insectes ravageurs, notamment des pucerons, et des insectes auxiliaires, de plus en plus de substances sémiocimiques deviennent potentiellement exploitables dans le futur. La mise en place de stratégies de « push-pull » visant à manipuler le comportement et la distribution des insectes auxiliaires, afin de favoriser le contrôle biologique des insectes ravageurs par ces derniers, est un domaine d'avenir, qui mérite certainement d'être étudié plus en profondeur (Cook et al., 2007).

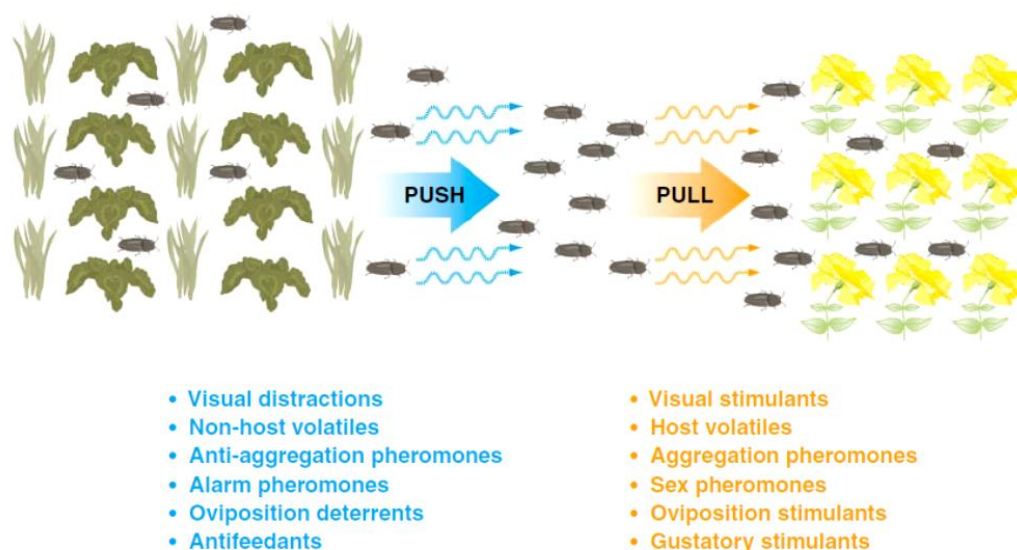


Figure 3 : Illustration des composantes de la stratégie push-pull et leurs modes d'action (Cook et al., 2007).

2.5. Conclusions sur la gestion des ravageurs dans les cultures maraîchères.

Au cours des dernières années, des méthodes alternatives tentent de remplacer ces approches utilisant la lutte chimique intensive et non sélective (protection agrochimique) (Chari et al., 2015). En maraîchage notamment, l'enjeu actuel est de produire des légumes de qualité tout en préservant l'environnement et en utilisant le moins possible de pesticides (Ryckewaert et Rhino & 2017). La finalité n'est plus d'éliminer totalement les ravageurs, ce qui est quasiment impossible, mais d'éviter qu'ils soient trop nombreux afin de ne pas provoquer de dégâts. En effet, la présence de quelques individus ne se traduit pas par des dégâts d'importance économique, à l'exception toutefois des espèces capables de transmettre des maladies comme les aleurodes et les pucerons (Ryckewaert et Rhino & 2017). Le maintien de la diversité entomologique ne doit pas forcément être considéré comme un réservoir de ravageurs potentiels de cultures mais plutôt comme un allié composé d'une panoplie d'auxiliaires, économiquement intéressant pour les agriculteurs (Francis et al., 2003).

La restauration de la diversification végétale dans le paysage agricole, une méthode alternative de contrôle des ravageurs développée dans ce travail, est une stratégie clé de l'agriculture durable. La diversité peut être améliorée dans le temps grâce aux rotations et séquences des cultures, et dans l'espace sous la forme de cultures de couverture, de cultures associées, de mélanges agroforestiers / élevage, etc. (Altieri, 1992).

Nous avons passé en revue différents résultats des études qui ont montré que l'augmentation de la diversité de la végétation dans le champ réduit souvent les populations d'insectes ravageurs, ce qui réduit considérablement les dégâts causés par les insectes par rapport aux monocultures (Karabo et al., 2019). Ainsi, différentes actions accompagnent cette réduction des dégâts. Il s'agit d'une part de l'effet de dilution pouvant se résumer par le fait que les insectes ravageurs prennent plus de temps pour localiser leurs plantes hôtes dans un paysage agricole diversifiée (Follett et al., 2020). D'autre part, les cultures associées ont un impact sur le comportement (Poveda et al., 2019), le développement et la capacité reproductive des insectes ravageurs grâce à de nombreux signaux visuels et olfactifs (composés organiques volatiles) qu'elles émettent (Xu et al., 2018). En plus, la diversité est un élément essentiel (Harrison et al., 2019) car de nombreuses études suggèrent que les cultures associées encouragent la biodiversité ou l'abondance d'ennemis naturels, tels que les prédateurs ou les parasitoïdes (Cai et al., 2010 ; Hatt et al., 2019 ; Gontijo, 2019) car elles leur offrent des

ressources et abris (Gontijo, 2019). Plusieurs approches ont, à cet effet, été développées pour faire face à ce grand déficit qui est le contrôle des arthropodes phytophages. Parmi elles, la stratégie «attract-and-kill » (Ratnadass et al., 2012 ; Vernon et al., 2015) et la stratégie « push-pull » (Cook et al., 2007 ; Midega et al., 2018 ; Poveda et al., 2019).

Il s'est avéré cependant que dans certains cas, les associations végétales mal faites peuvent aboutir au non contrôle des ravageurs voire à leur aggravation (He et al., 2018).

Par conséquent, certains préalables doivent être pris en compte :

- une compréhension approfondie de la biologie et du comportement du ravageur et de la façon dont il est affecté par l'attractivité relative de la culture de service par rapport à la culture principale, et son emplacement (en périmètre ou culture intercalaire) est essentielle au succès des stratégies de contrôle des ravageurs en cultures associées (Ratnadass et al., 2012) ;
- Comprendre l'écosystème des cultures et adopter des systèmes de culture et des pratiques de production végétale appropriés. Le type de ravageurs et leur comportement diffèrent selon l'écosystème des cultures. De même, la composition des ennemis naturels varie également avec les systèmes de culture (Chari et al., 2015).

Par ailleurs, le complexe de ravageurs et le complexe d'ennemis naturels sont basés sur l'écosystème des cultures (Chari et al., 2015) mais aussi les rapports spécifiques de leurs produits sémiocchimiques (COV) (Khan et al., 2008). Afin de renforcer le potentiel de gestion efficace des ravageurs, nombreuses recherches suggèrent les mesures couplées aux méthodes qui prônent les processus naturels. Ainsi l'utilisation des substances allélochimiques (Rodriguez-Saona & Stelinski, 2008) de synthèse telle que le composé (E)-E-farnesene (Francis et al., 2005) ou l'usage des versions synthétiques des COV (Khan et al., 2008) peuvent contribuer à optimiser le contrôle des phytophages. Dans les études récentes, des versions synthétiques des COV ont été utilisées soit pour attirer les prédateurs et les parasitoïdes, soit pour inciter les plantes à produire leurs propres COV dans des expériences sur le terrain (Khan et al., 2008). Par exemple, l'application de l'acide jasmonique synthétique sur les plantes cultivées a provoqué la production de COV (Xiu et al., 2018), et une augmentation du parasitisme chez les chenilles nuisibles (Khan et al., 2008).

En conclusion, la production commerciale de légumes implique des systèmes dans lesquels des méthodes de lutte adéquates contre les bio-agresseurs sont appliquées pour répondre aux normes légales (FAO & OMS, 2014) et strictes exigées par les consommateurs (Hummel et

al., 2002). L'association des cultures est une méthode écologique de régulation des ravageurs, néanmoins les études montrent bien souvent qu'augmenter la biodiversité fonctionnelle ne résout pas seule toutes les attaques de ravageurs (Morel & Brun, 2019); d'où plusieurs stratégies doivent être combinées selon le contexte.

3. ESSAI DE CULTURES ASSOCIEES EN CEREALES

3.1. Introduction

La deuxième partie de ce travail est expérimentale, elle a été réalisée en conditions réelles de champ. L'essai a porté sur les associations végétales en culture de blé (*Triticum aestivum* L.). Il s'inscrit dans la même vision d'optimisation des services écosystémiques dans la protection des cultures afin de limiter au maximum possible la dépendance aux pesticides chimiques dans la production agricole. Ces produits agrochimiques, sont aujourd'hui contestées pour leur impact négatif sur l'environnement et la santé humaine (Lopes et al., 2016).

Le blé est la troisième céréale la plus produite après le maïs et le riz avec une production mondiale de plus de 700 millions de tonnes (FAOSTAT 2018 ; <http://www.fao.org/faostat/fr/#data/QC>). Il fournit à lui seul plus de protéines que les viandes de volaille, de porc et de bovin réunies (FAO, 2016). La culture de blé fait face à nombreux ravageurs destructeurs parmi lesquels on trouve les pucerons (Hemiptera: Aphididae) (Van Rijn et al., 2013). Les dégâts qu'ils provoquent peuvent être très importants et poser de réels problèmes économiques aux producteurs car les cultures deviennent impropres à la consommation (Ben-Issa, 2017).

Parmi les stratégies alternatives de protection de la culture de blé, deux approches présentent un intérêt particulier : rendre difficile la recherche de plantes hôtes par des phytophages, et fournir des habitats supportant les ennemis naturels des ravageurs qui peuvent exercer la prédation et le parasitisme (Hatt et al., 2017 ; Lopes et al., 2017).

Dans ce cadre, les plantes à fleurs notamment la cameline (Herz, 2017) et le sarrasin (Simon et al., 2015) sont connues pour être des habitats favorables pour les auxiliaires des cultures (Lopes et al., 2017). En effet, les camélines fournissent du nectar et du pollen tôt dans la saison, parfois bien avant que la plupart des cultures courantes des régions tempérées ne commencent à fleurir (Berti et al., 2016). Quant au sarrasin, c'est une espèce à fleurs couramment installée dans l'inter-rang d'autres cultures en vue de fournir des ressources florales et des proies aux auxiliaires (Simon et al., 2015).

L'expérimentation réalisée avait pour objectif d'évaluer les effets de bandes fleuries monospécifiques de sarrasin *Fagopyrum esculentum* et de cameline *Camelina sativa* dans l'attractivité (pendant la floraison) des auxiliaires dans une culture de blé.

En dehors du fait que le sarrasin et la cameline sont attractifs aux auxiliaires, les deux espèces ont été sélectionnées pour leur intérêt économique. Considéré comme une pseudocéréale, le sarrasin est une plante annuelle de la famille des polygonacées cultivé pour ses graines (sans gluten) nutritives et riches en protéines utilisées principalement dans l'alimentation humaine. Il sert aussi d'engrais vert et de plante de couverture pour étouffer les mauvaises herbes (Strahm et al., 2019). L'adaptation de la cameline (Brassicaceae) à de vastes régions du monde, combinée à ses propriétés utiles pour la production de biocarburants, d'aliments pour animaux et de denrées alimentaires, a ravivé l'intérêt pour cette culture (Berti et al., 2016).

3.2. Matériels et méthodes

3.2.1. Description expérimentations de terrain

L'essai a été réalisé pendant l'été 2020 dans la région wallonne en Province de Namur non loin de la Route d'Eghezée (Belgique ; latitude 50,499720 & longitude 4,736917).

Les bandes de sarrasin *Fagopyrum esculentum* et de cameline *Camelina sativa* ont été installées dans un champ de blé *Triticum aestivum*. Chaque espèce à fleurs comprenait quatre bandes réparties sur deux rangées. Toutes les bandes fleuries mesuraient 12mètres de long et 4mètres de large tandis que la distance entre elles était de 10mètres. Les deux rangées des bandes fleuries alternées dans le champ de blé sont séparées de 250 mètres (Figure 4).

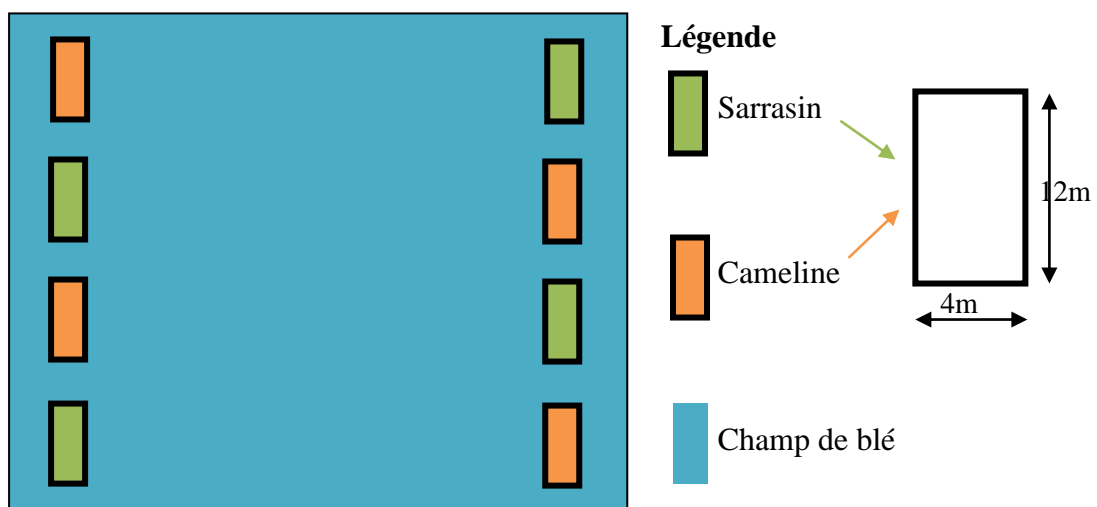


Figure 4 : Représentation schématique du dispositif expérimental

3.2.2. Surveillance des auxiliaires et ravageurs

Les échantillonnages des insectes auxiliaires se faisaient deux fois par semaine par piégeage aux pan-traps et par capture au filet, tout cela pendant trois semaines. Pour chaque journée, deux parcelles de cameline et deux de sarrasin étaient échantillonnées avec les pan-traps et les quatre autres au filet. Afin que chaque parcelle soit échantillonnée au pan-traps et au filet, des permutations étaient faites pour chaque journée d'observations. A propos de l'échantillonnage au filet, il était fait pendant une heure par journée d'observations en raison de 30 minutes au matin (avant 9h 00) et 30 minutes au soir (après 16h).

Concernant les pan-traps, ce sont des pièges constitués des récipients en plastique de 27 centimètres de diamètre et de 10 centimètres de profondeur. Les pièges coulissaient sur des tiges verticales et étaient fixés à la hauteur des cultures (Figure 5). Ils contenaient une solution aqueuse avec détergent afin de réduire la tension superficielle de l'eau et d'augmenter la rétention des insectes piégés. La solution était renouvelée pour chaque journée d'observations. Ce type de piège est un des modèles les plus fréquemment utilisés en faunistique entomologique des milieux agricoles. Ils sont faciles à utiliser, efficaces et se prêtent à des échantillonnages de grande envergure (Mignon et al., 2003).



Figure 5 : Piège jaune installé dans une bande de sarrasin

L'installation des pan-traps était toujours faite au matin suivant quatre zones de piégeage : au sein de la bande fleurie, à 3 mètres de la bande, à 12 mètres de la bande et enfin à 50 mètres de la bande. (Figure 6). Pour chaque zone de piégeage, il y avait trois pièges de trois couleurs différentes (jaune, blanc, bleu) avec une distance de 1mètre entre eux. Cette distance

d'un mètre permet d'éviter toute interaction entre les pièges (Roth & Couturier, 1966 cités par Francis et al., 2003). Au total, il y avait 16 zones de piégeage d'insectes aux pan-traps.

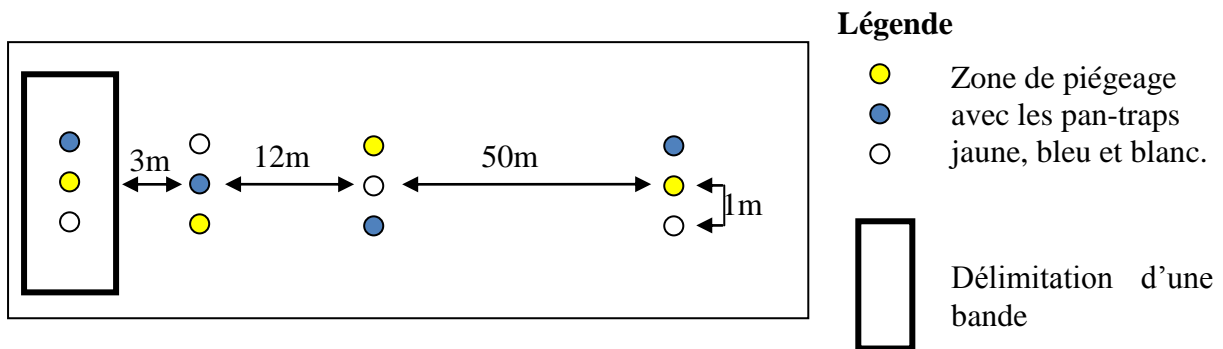


Figure 6 : Présentation schématique des zones de piégeage à l'aide de pan-traps

Les insectes piégés étaient récoltés au soir à l'aide d'un tamis et d'un pinceau afin de préserver leur état. Ils étaient conservés dans une solution à 70% d'éthanol puis rapportés au laboratoire pour leur identification. Les insectes non ciblés par les différents traitements ont été séparés des auxiliaires, afin de procéder à l'identification et au comptage de ces derniers, le plus souvent à l'aide d'une loupe binoculaire. Seules les principales familles d'auxiliaires ont été prises en compte, à savoir les Coccinellidae, les Syrphidae et les Chrysopidae.

Les ravageurs principalement les pucerons n'ont pas été observés étant donné que les cultures à fleurs avaient été installées plus tard que prévu dans le champ de blé c'est-à-dire lorsque le blé était déjà en cours de végétation. En outre, les bandes attractives étaient arrivées à la floraison lorsque le blé était en fin de végétation et il n'y avait presque plus de pucerons. En effet, les pucerons se nourrissent principalement de la sève grâce à leurs stylets qu'ils insèrent dans les tissus végétaux vivants et cela constitue un facteur fondamental dans le choix de leurs hôtes (Giordanengo et al., 2007).

Tous les insectes collectés ont été identifiés au genre /ou à l'espèce à l'aide des clés suivantes :

- Syrphes : Speight & Sarthou (2013) ; Schulten (2017)
- Coccinelles : Derolez (2014) ; Bagnée & Branquart (2006)
- Chrysopes : San Martin (2004)

3.2.3. Analyses statistiques

Le test de Wilcoxon a été effectué afin de déterminer s'il existe de différences statistiques entre les cultures pour le nombre moyen d'insectes capturées par famille (Syrphidae, Coconellidae, Chrysopidae). Le test de Kruskal-Wallis a été utilisé pour déterminer s'il existe une différence significative entre différentes distances pour les captures moyennes des familles d'insectes.

Lorsqu'une différence significative entre les traitements est révélée, les tests post-hoc de Dunn ont été appliqués au seuil de signification de 5% ($p < 0.05$) afin de procéder aux comparaisons multiples des moyennes de différentes distances.

Le test de Kruskal-Wallis a aussi servi à déterminer s'il existe une différence significative entre les espèces d'insectes retrouvées au niveau de différentes cultures. Tous ces tests ont été réalisés avec le logiciel R Version 4.0.0.

Les packages utilisés ont été :

- « Ggplot2 », « dplyr », « tidyr » pour la manipulation et description graphique des jeux de données ;
- « ggpubr » pour la comparaison des moyennes au niveau des graphes ;

Pour réaliser une analyse des communautés entomologiques, une PCoA (Principal Coordinate Analysis) a été réalisée. Cette visualisation des données permet de détecter des patterns de structure (Dufour & Chessel, 2012) parmi les données étudiées (ici, les communautés d'auxiliaires appartenant aux bandes de caméline et de sarrasin). La PCoA effectuée était basée sur la distance Bray-Curtis (fonctions "cmdscale", "ordiplot" et "ordiellipse") du package "Vegan". Les relevés des insectes capturés au filet et ceux capturés aux pan-traps à la distance zéro ont été analysés ensemble. La base de données des communautés a été normalisée en utilisant la méthode Hellinger pour une analyse des similarités (ANOSIM) également basé sur la distance de Bray-Curtis.

3.3. Résultats

Tableau 4 : Abondance et diversité d'auxiliaires piégés sur l'ensemble du site expérimental.

Famille	Pourcentage par famille	Espèce	Abondance	Pourcentage au sein de la famille
Syrphidae	95,26	<i>Eristalis tenax</i>	313	15,54
		<i>Eristalis arbustorum</i>	65	3,22
		<i>Episyrphus balteatus</i>	14	0,69
		<i>Sphaerophoria scripta</i>	1265	62,84
		<i>Metasyrphus sp.</i>	21	1,04
		<i>Helophilus pendulus</i>	1	0,05
		<i>Eumerus sp.</i>	110	5,46
		<i>Melanostoma sp.</i>	62	3,07
		<i>Syritta pipiens</i>	86	4,27
		<i>Chrysogaster sp.</i>	4	0,19
		<i>Syrphus sp.</i>	12	0,59
		<i>Platycheirus sp.</i>	58	2,88
		<i>Neoascia sp.</i>	2	0,10
Coccinellidae	3,97	<i>Coccinella septempunctata</i>	60	71,42
		<i>Harmonia axyridis</i>	9	10,71
		<i>Propylea quatuordecimpunctata</i>	7	8,33
		<i>Hippodamia sp.</i>	6	7,14
		<i>Adalia bipunctata</i>	2	2,38
Chrysopidae	0,75	<i>Chrysoperla carnea</i>	16	100,00
Total			2113	

La famille des Syrphidae a largement été dominante sur le plan de l'abondance et la plus grande diversité d'espèces. Une seule espèce *Sphaerophoria scripta* présente plus de la moitié de l'ensemble d'auxiliaires capturés.

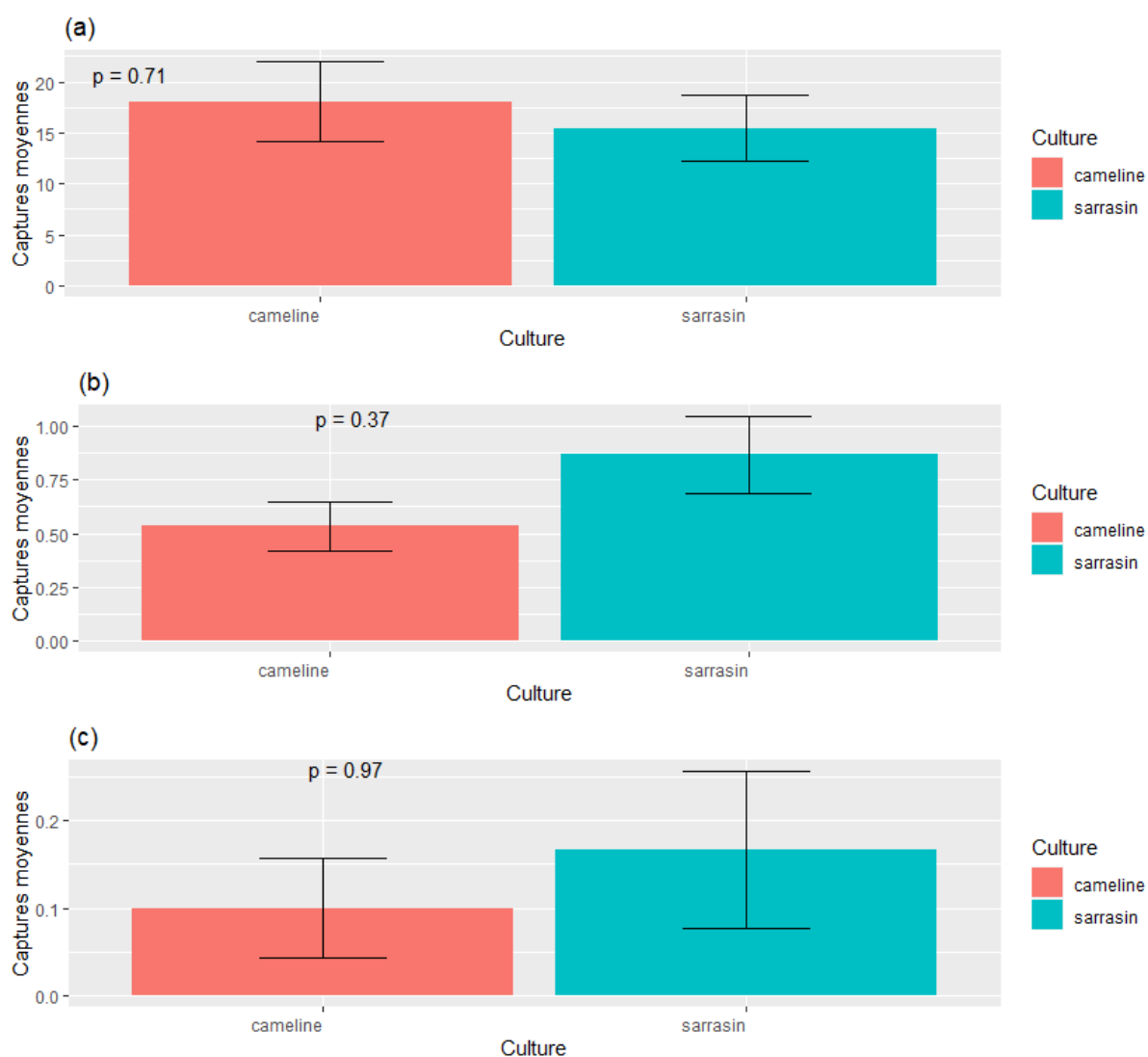


Figure 7 : Abondances (moyenne \pm écart-type) des familles d'auxiliaires capturés par type de bande fleurie : abondances (a) des Syrphidae ; (b) des Coccinellidae ; (c) des Syrphidae.

Il n'y a pas de différence significative entre les abondances de différentes familles d'auxiliaires capturés dans les différentes bandes fleuries. Les tests de Wilcoxon rapportent des similarités d'abondances au niveau des Syrphidae (p -value=0,71), des Coccinellidae (p -value=0,37) et des Chrysopidae (p -value=0,97) entre la cameline et le sarrasin (Figure 7).

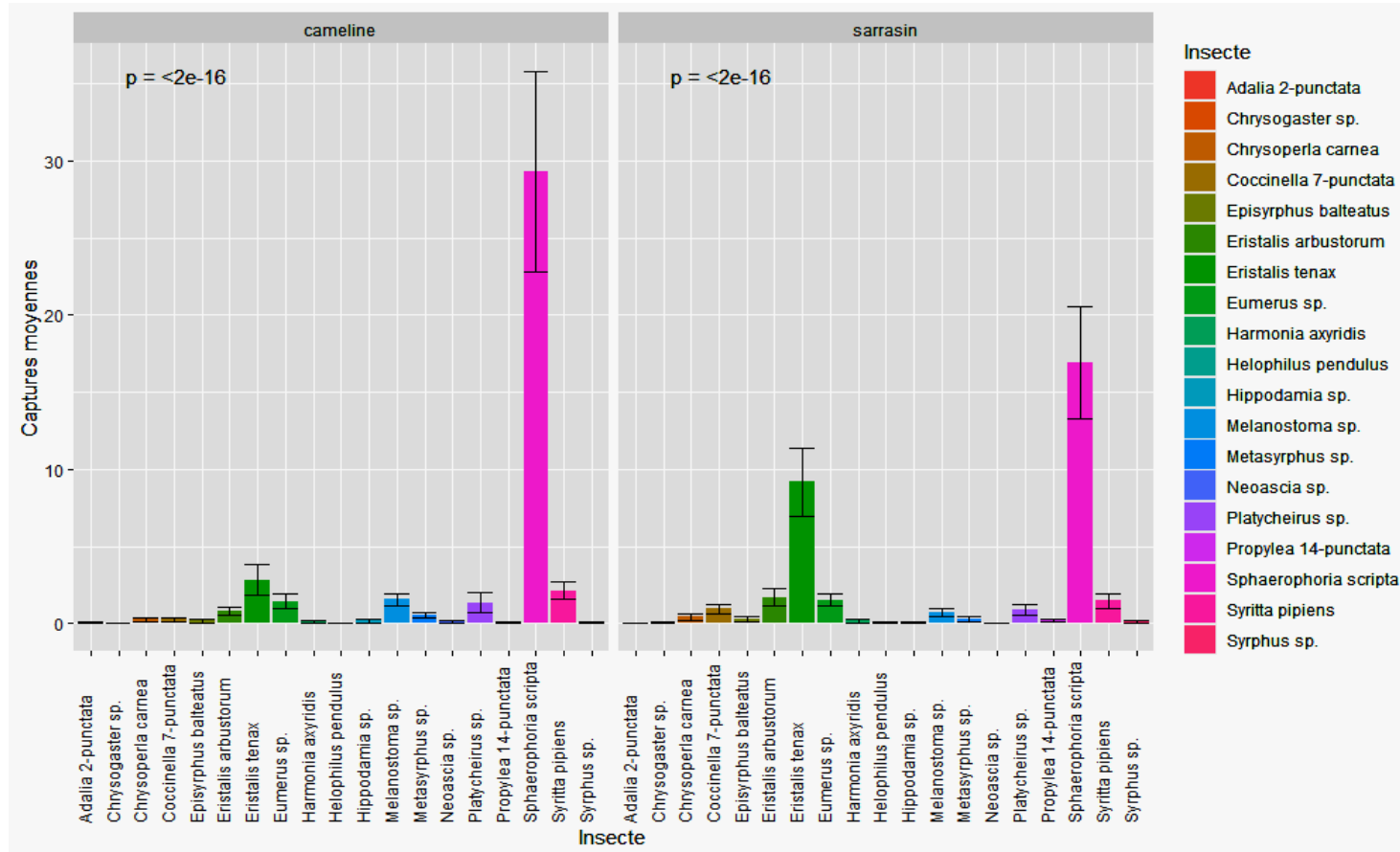


Figure 8 : Abondances (moyenne ± écart-type) d'espèces auxiliaires capturées par type de bande fleurie

Des différences significatives ($p < 0,05\%$) ont été observées au niveau des abondances d'auxiliaires capturés dans les bandes fleuries de cameline et de sarrasin (Figure 8). Dans les deux cas, *S. scripta* a été le plus abondant avec une présence plus remarquée au niveau de la cameline. En deuxième position se classe *E. tenax* avec, à l'opposé de la première, une abondance plus élevée dans le sarrasin.

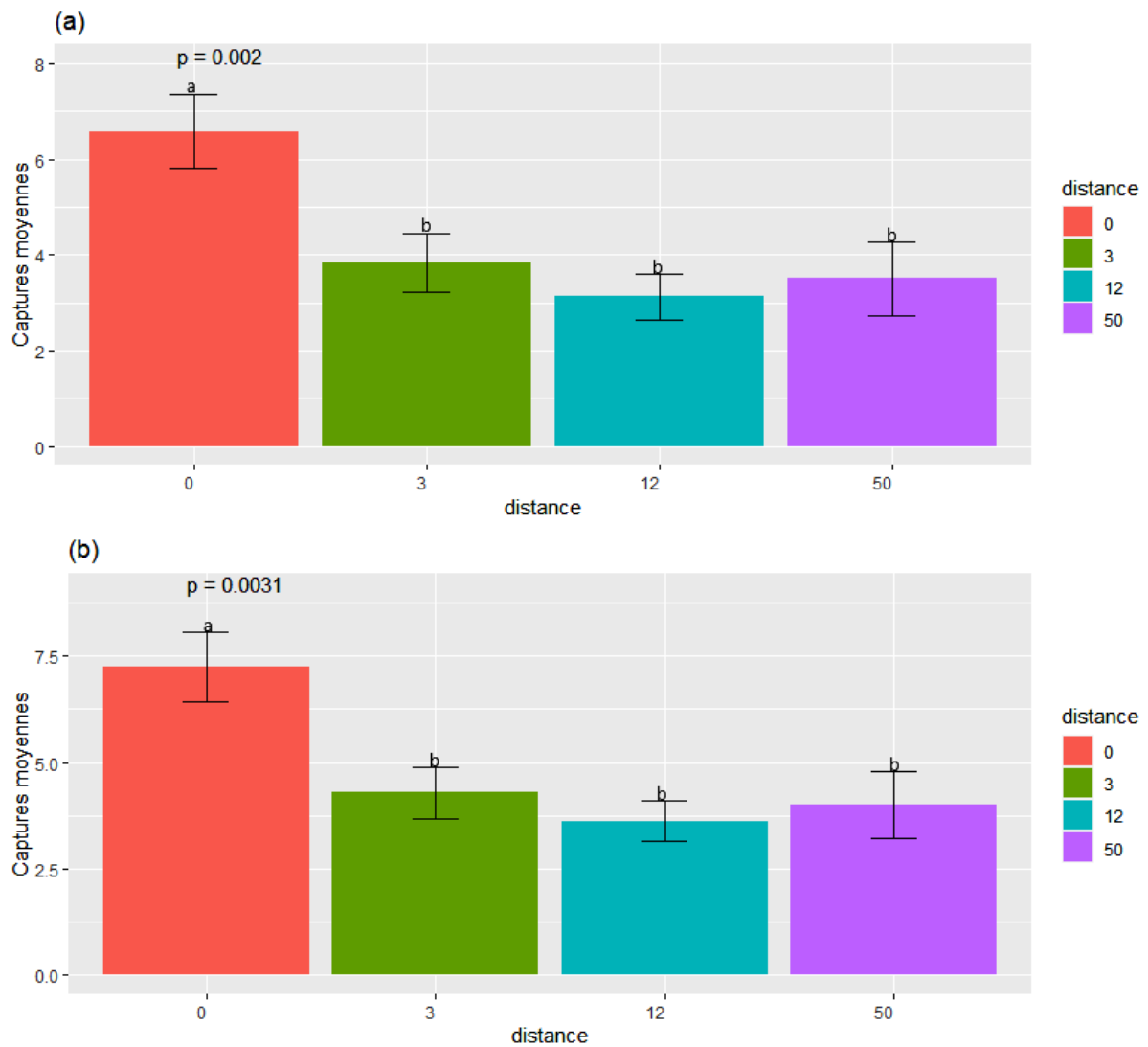


Figure 9 : Abondance moyenne (\pm écart-type) d’auxiliaires piégés à différentes distances (0, 3, 12 et 50 mètres) des bandes fleuries. Les familles représentées sont : (a) les Syrphidae ; (b) les Coccinellidae. Les lettres indiquent les différences significatives ($p < 0,05$) des moyennes avec des tests de Dunn

Des différences significatives ($p < 0,05\%$) entre les captures d’auxiliaires (par pan-traps) ont été observées au sein des bandes fleuries entre la distance 0 et 3, 12 et 50 mètres de celles-ci. Les Syrphidae ($p = 0,002$) et Coccinellidae ($p = 0,0031$) ont tous été plus capturés dans les pièges dans les bandes (Figure 9). Les analyses n’ont pas été réalisées pour les Chrysopidae au vu de l’absence totale d’individus au niveau des pan-traps.

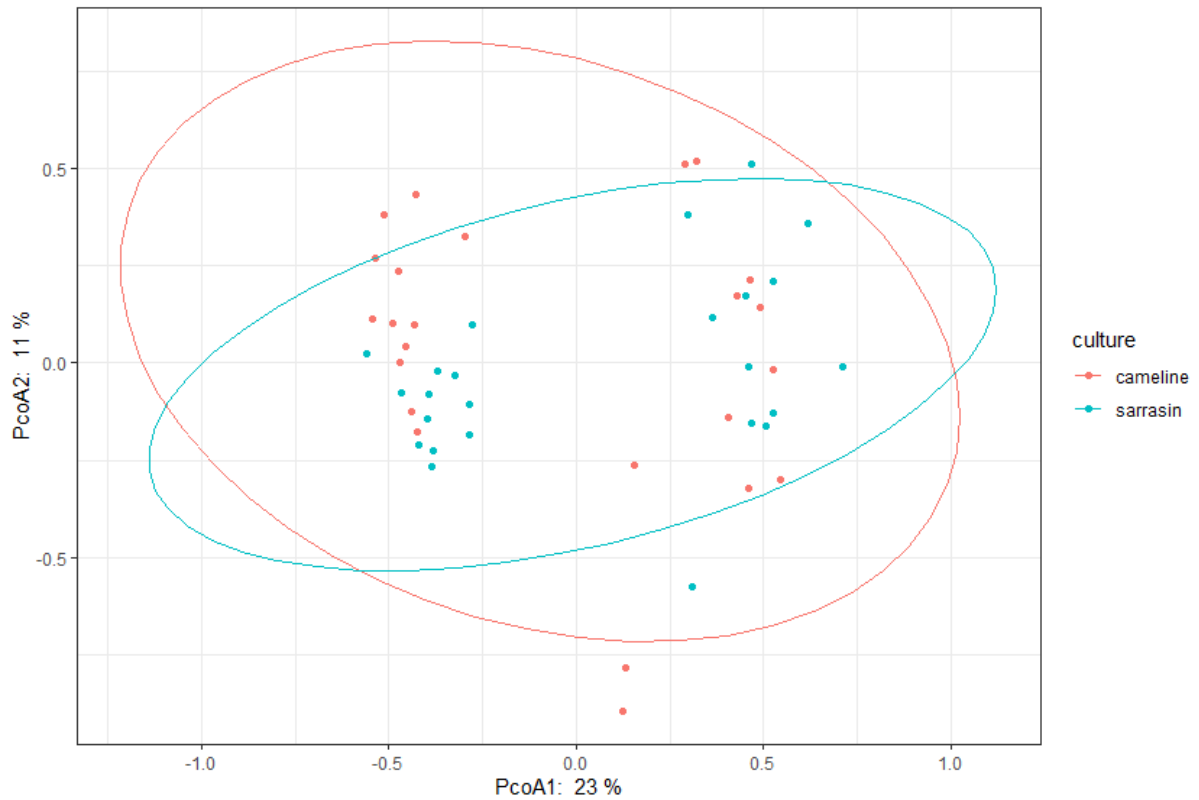


Figure 10 : Représentation de la structure des communautés entomologiques en fonction des bandes fleuries cultivées (cameline et sarrasin).

Les communautés d'auxiliaires de la cameline et du sarrasin sont confondues sur les deux axes de la PCoA ($R_{\text{global}} = 0,001654$; $p\text{-value} = 0,405$). Les communautés observées au niveau du sarrasin sont encore regroupées au niveau de la cameline. Dans l'ensemble, les communautés de deux habitats apparaissent similaires (Figure 10).

3.4. Discussion et conclusion

▪ Abondance d'auxiliaires capturés selon les cultures

L'augmentation de la diversité végétale à l'échelle de la parcelle en semant des bandes des plantes à fleurs dans les champs de blé est encouragée pour accroître l'abondance et la diversité d'auxiliaires des cultures. Les résultats montrent de grandes similarités entre les communautés entomologiques des bandes de sarrasin et celles de cameline (Figure 10). En outre, il a été constaté qu'il n'y a pas de différences significatives entre ces bandes du point de vue présence de chaque famille d'auxiliaires observée (Syrphidae, Coccinellidae, Chrysopidae) (Figure 7). En effet, le sarrasin et la caméline sont toutes des plantes à fleurs classées comme des recruteurs d'auxiliaires. Des fleurs jaunes et blanches qui caractérisent les parties florales de ces plantes sont réputées comme attractives et pouvant faciliter l'alimentation chez les auxiliaires particulièrement les syrphes (Colley & Luna, 2000).

Les résultats sur la cameline s'expliquent par son attractivité reconnue tant pour les pollinisateurs (Berti et al., 2016) que pour les ennemis naturels des ravageurs. En effet, cette espèce de Brassicaceae fournit du nectar et du pollen tôt dans la saison et le sucre de nectar produit par ses fleurs est une source intéressante de nourriture pour ces organismes utiles surtout les petits insectes. Dans les conditions de croissance optimale, le sucre de nectar total produit tout au long de la floraison est estimé à 100kg / ha (Berti et al., 2016). Cette richesse en ressources explique les abondances d'auxiliaires retrouvés au cours de notre essai.

Des abondances similaires ont été trouvées dans les bandes de sarrasin car il constitue un puits des ressources florales pour beaucoup d'organismes utiles (Simon et al., 2015). La culture du sarrasin fournit du nectar, du pollen et les abris pour les auxiliaires (Salas, 2019). Sur terrain, il a été observé une abondante floraison du sarrasin et ses bandes étaient visitées par une multitude d'autres organismes utiles dont les pollinisateurs *Apis mellifera* qui sont largement dépendants des ressources florales. Les observations ont été réalisées en saison d'été, une période favorable pour eux car ils sont plus actifs pendant les journées chaudes et ensoleillées (Cawoy et al., 2009). Il pourrait y avoir eu compétition pour les ressources florales, ce qui aurait fait que le sarrasin a légèrement eu moins d'auxiliaires que la cameline. Dans tous les cas, il n'y a pas eu de différences significatives entre les différentes bandes cultivées.

▪ Diversité d'auxiliaires capturés

Dans l'ensemble des captures, la famille des Syrphidae a considérablement été dominante. Les autres familles d'auxiliaires trouvées sont les Coccinellidae et les Chrysopidae avec respectivement les abondances de 3,97 et 0,75%. La seule espèce *Sphaerophoria scripta* présente plus de la moitié de l'ensemble d'auxiliaires capturés suivie d'*E. tenax* et de *Eumerus sp.* La préférence écologique de *S. scripta* explique sa forte abondance au cours de l'essai. En effet, elle colonise des paysages ouverts et parfois des zones aux sols nus mais aussi sa fréquentation dans la végétation pionnière en fait une espèce caractéristique des milieux agricoles (Branquart & Hemptinne, 2000). L'abondance de *E. tenax* est quant à elle justifiée par son pouvoir de migration à grande échelle sur de longues distances en été (Mueller & Dauber, 2016). Par ailleurs, la polyphagie de ces espèces de syrphes est considéré comme un facteur capital pour la colonisation d'habitats ouverts et éphémères (Branquart & Hemptinne, 2000).

La diversité des Syrphidae capturés est cohérente avec les résultats trouvés par Amy et al., (2018) ; à l'issue d'un grand essai où ils avaient associé le blé aux bandes monoflorales de *Dimorphoteca pluvialis* (Asteraceae) et de *C. sativa*, et à une bande multiflorale, ils avaient trouvé la plus grande abondance avec les mêmes espèces : *S. scripta* et *E. tenax*. Selon Cawoy et al., (2009), ces auxiliaires ont une haute fréquence et activité pendant toute la période floraison. Van Rijn et al., (2013) expliquent que les plantes à fleurs, fournissant en permanence du nectar et du pollen, augmentent encore la longévité des adultes et soutiennent également la production d'œufs des syrphes.

S'agissant de la famille des coccinellidae, L'espèce *Coccinella septempunctata* a été la plus présente au niveau de deux bandes fleuries (Tableau 4 ; Figure 8) suivie de la coccinelle asiatique *H. axyridis* (Xiu et al., 2018). Les deux Coccinellidae sont des composants fonctionnels importants de nombreux écosystèmes terrestres. Ils ont été rapportés par Cheng et al., (2020) comme faisant parties des Coléoptères bénéfiques dominants et prédateurs en particulier dans les régions tempérées. De même, Alhmedi et al., (2006) avaient associé les orties aux cultures de blé, colza et pois, et avaient trouvé que la diversité végétale avait de l'influence positive sur la diversité d'auxiliaires des cultures. Les principaux aphidiphages observés par Alhmedi et al., (2006) étaient les coccinelles *C. septempunctata* et *H. axyridis*

ainsi que les syrphes *E. balteatus*. Ces derniers font partis des espèces de syrphes courantes autour des champs agricoles en Europe (Tinkeu & Hance, 2001).

Les auxiliaires des cultures observés au cours de notre étude se retrouvent parmi les plus importants aphidiphages en Europe. Une longue étude menée entre 1989 et 2006 en Serbie a permis d'établir *C. septempunctata* comme étant la coccinellidae la plus abondante en milieu agricole. Les observations ont aussi montré une grande représentativité de deux espèces des Syrphidae *S. scripta* et *E. balteatus* et d'une seule espèce de Chrysopidae *Chrysoperla carnea* (Tomanovic et al., 2008). Cette espèce, l'unique chrysope retrouvé dans nos observations, est la principale espèce piégée en milieu agricole en Belgique (Hatt et al., 2017a). La faible présence de *C. carnea* dans certains champs pourrait être due au manque de spécificité au niveau des proies ; ceci limite parfois le synchronisme entre les chrysopes prédateurs et le développement des cultures et de populations d'homoptères (Mignon et al., 2003).

- **Potentiel des bandes fleuries pour faire déborder les auxiliaires pour le champ de blé et leur intérêt pour la protection des cultures.**

Une forte présence des auxiliaires a été plus observée au sein des bandes fleuries que dans le reste de pièges installés dans le blé, ce qui confirme l'hypothèse d'attractivité et d'hébergement d'auxiliaires par les plantes nectarifères. Yang et al. (2018) ont soutenu que les effets positifs issus de la diversification des cultures varient dans le temps mais aussi en fonction de la distance des plantes cultivées par rapport aux plantes de service.

L'augmentation des approvisionnements alimentaires en multipliant les habitats dans les champs (proche des cultures), et pas à une grande distance des cultures (exemple le long des marges), peut aider à soutenir une forte présence des auxiliaires dans les cultures (Hatt et al., 2017a). Ces derniers ont trouvé que l'abondance des auxiliaires était positivement corrélée avec l'augmentation des provisions alimentaires issues de l'augmentation des habitats dans les champs. Il est par exemple évident que les syrphes adultes sont fortement dépendants des ressources florales car ils se nourrissent tous de nectar et de pollen (Chaubet, 1992). Le nectar est leur source d'énergie tandis que le pollen constitue pour eux une source des protéines (Van Rijn et al., 2013).

Dans cette étude, les échantillonnages des populations de ravageurs (Aphididae) n'ont pas été réalisés. La période d'observations n'était pas favorable suite à l'installation tardive des cultures à fleurs. En dehors de quelques individus isolés observés, il n'y avait pas de colonie apparente de pucerons dans l'ensemble de l'essai. D'une manière générale, la présence de quelques pucerons sur les fleurs pourrait attirer les aphidiphages notamment les syrphes gravides de *S. scripta* dont les larves sont de précieux prédateurs de petits homoptères (Colley & Luna, 2000). Cet atout aurait d'avantage favorisé l'établissement de cette espèce dans notre essai. Ce régime zoophage, aussi reconnu pour *E. balteatus*, fait de *S. scripta* un excellent auxiliaire dans le contrôle biologique des pucerons des plantes cultivées (Sarhou & Speight, 2005). *E. tenax* a également été trouvé en abondance mais ses larves sont principalement microphages (*i.e.* dont l'alimentation se compose de petites proies), d'où elles ne se classent pas parmi les auxiliaires aphidiphages (Sarhou & Speight, 2005).

Concernant les Coccinellidae, ils sont connus en tant que groupe polyphage (Weber & Lundgre, 2009), mais beaucoup d'espèces notamment *C. septempunctata* et *H. axyridis* ont déjà démontré leur potentiel aphidiphage important (Cheng et al., 2020). La présence des bandes fleuries constitue une voie exploitable pour les attirer dans les cultures.

L'expérimentation de terrain a conforté l'hypothèse selon laquelle les espèces florales attirent les insectes auxiliaires. Le sarrasin et la cameline ont tous deux une valeur financière après la récolte, ce qui leur donne encore un avantage d'être utilisés en cultures associées pour exploiter les services écosystémiques de contrôle biologique des ravageurs.

4. CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

L'objectif général de ce travail était d'évaluer les effets de la diversification végétale sur le contrôle des insectes phytophages. L'évaluation a commencé par une synthèse des approches théoriques pour analyser les modèles associant différentes cultures maraîchères vis-à-vis des ravageurs associées ; et s'est terminé par un essai pratique où le sarrasin et la caméline étaient associés au blé afin d'évaluer leurs attractivités respectives pour les auxiliaires des cultures.

Il ressort de l'analyse des résultats scientifiques que l'augmentation de la diversité végétale et la gestion des habitats naturels favorise le maintien de la diversité entomologique. Cette dernière ne doit pas forcément être considérée comme un réservoir de ravageurs potentiels de cultures mais plutôt comme un allié composé d'une panoplie d'auxiliaires, économiquement intéressant pour les agriculteurs. Ainsi l'association des cultures et/ou la promotion des habitats secondaires dans les champs améliorent la lutte biologique contre les ravageurs en créant simultanément des barrières aux ravageurs tout en fournissant des ressources alimentaires et des sites vivants favorables aux auxiliaires.

S'agissant des résultats de l'expérimentation, les bandes fleuries ont montré une forte présence des auxiliaires à leur sein que dans les témoins (dans le blé), ce qui confirme l'hypothèse d'attractivité et d'hébergement d'auxiliaires par les plantes nectarifères. Les bandes aux plantes à fleurs constituent l'un des nombreux types d'habitats utilisés par les insectes auxiliaires dans les paysages agricoles. Les principales familles représentées étaient respectivement les Syrphidae, les Coccinellidae et les Chrysopidae.

Des recherches sont encore nécessaires pour identifier plus des plantes qui ont un potentiel en tant que plantes d'insectes bénéfiques, ceci pour maximiser les services écosystémiques de contrôle biologique des ravageurs. Par ailleurs, faire coïncider la phénologie des fleurs (la date et la période de floraison) avec celle des insectes est essentiel afin que les ressources florales soient disponibles lorsque les insectes ciblés en ont besoin. Il serait intéressant de réaliser des études supplémentaires testant une diversité de mélanges afin de comprendre davantage les interactions entre parties florales des plantes et auxiliaires. Il est possible que le mélange fleuri avec sa diversité de signaux visuels et olfactifs du fait de sa composition diversifiée puisse agir efficacement dans le recrutement des auxiliaires.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- A'Brook J., 1968. The effects of plant spacing on the number of aphids trapped over the groundnut crop. *Ann Appl Biol* 61 : 289–294
- Ahouangninou C, Fayomi B., Martin T, 2011. Évaluation des risques sanitaires et environnementaux des pratiques phytosanitaires des producteurs maraîchers dans la commune rurale de Tori-Bossito (Sud-Bénin). *Cah. Agric.* 20, 3 : 216-222.
- Alhmedi A., Francis F., Bodson B., Haubruge E., 2006. Etude de la diversité des pucerons et des auxiliaires aphidiphages relative à la présence d'orties en bordures de champs. *Notes faun. Gblx* 59 (2), 121-124.
- Altieri M.A., 1992. Agroecological foundations of alternative agriculture in California. *Agric, Ecosyst. Envir*, 39 : 23-53
- Amoabeng B.W., Johnson A.C., Gurr G.M., 2019. Natural enemy enhancement and botanical insecticide source: a review of dual use companion plants. *Appl. Entom. Zool.* 54:1–19
- Amoatey C.A. & Acquah E., 2010. Basil (*Ocimum basilicum*) intercrop as a pest management tool in okra cultivation in the Accra plains. *Ghana J. Hortic.* 8, 65-70.
- Amy C., Noël G., Hatt S., Uyttenbroeck R., Van de Meutter F., Genoud D., & Francis F., 2018. Flower strips in wheat intercropping system: Effect on pollinator abundance and diversity in Belgium. *Insects* 9 (3), 114.
- Anjarwalla P., Belmain S., Sola P., Jamnadass R. & Stevenson P.C., 2016. *Guide des plantes pesticides*. World Agroforestry Centre (ICRAF), Nairobi, Kenya.
- Asare-Bediako E., Addo-Quaye A.A. & Mohammed A., 2010. Control of diamondback moth (*Plutella xylostella*) on cabbage (*Brassica oleracea* var *capitata*) using intercropping with non-host crops. *Am. J. Food Technol.*, 5(4), 269-274.
- Baidoo P.K., Mochiah M.B. & Apusiga K., 2012. Onion as a pest control intercrop in organic cabbage (*Brassica oleracea*) production system in Ghana. *Sust Agr. Res.*, 1(1), 36-41.
- Bastin S. & Fromageot A., 2007. Le maraîchage : révélateur du dynamisme des campagnes sahélo-soudaniennes, *Belgeo*, 4| 2007, <http://journals.openedition.org/belgeo/10106>
- Baugnée J.Y. & Branquart, E., 2006. Illustration de la clé de terrain pour la reconnaissance des principales coccinelles de wallonie. CNB – Section Les Sources
- Belmain S., Haggart, J., Holt, J. & Stevenson P.C., 2013. *Managing legume pests in sub-Saharan Africa: Challenges and prospects for improving food security and nutrition through agro-ecological intensification*. Chatham Maritime (United Kingdom): Natural Resources Institute, University of Greenwich.

- Ben-Issa R., Gomez L. & Gautier H., 2017. Companion Plants for Aphid Pest Management. *Insects* 8, 112
- Berti M., Gesch R., Eynck C., Anderson J. & Cermak S., 2016. Camelina uses, genetics, genomics, production, and management. *Indus. Crop Prod.* 94 : 690–710
- Branquart E. & Hemptinne J-L., 2000. Selectivity in the exploitation of floral resources by hoverflies (Diptera: Syrphinae). *Ecography* 23: 732–742.
- Brévault T., Badiane D., Goebel R., Renou A., Téréta I. & Clouvel P., 2019. Repenser la gestion des ravageurs du cotonnier en Afrique de l’Ouest. *Cah. Agric.* 28, 25. <https://doi.org/10.1051/cagri/2019024>
- Brossut R., 1996. Phéromones. La communication chimique chez les animaux. CNRS, Paris
- Cai H., You M. & Lin C., 2010. Effects of intercropping systems on community composition and diversity of predatory arthropods in vegetable fields. *Acta Ecol Sin* 30 : 190–195. <https://doi:10.1016/j.chnaes.2010.06.001>
- Cawoy V., Ledent J-F., Kinet J-M. & Jacquemart A-L., 2009. Floral biology of common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench). *Eur. J. plant Sc. Biotech* 3(1), 1-9.
- Chari M.S., Ramanjaneyulu G. V., Hussain Z., Chandra Sekhar G., & Rajashekar G., 2015. Managing pests without using pesticides. In *In Memory of Dr. N. K. Sanghi: Knowledge for Change* (pp. 94-108). Wassan foundation & Permanent Green.
- Chaubet B., 1992. Diversité écologique, aménagement des agro-écosystèmes et favorisation des ennemis naturels des ravageurs : cas des aphidiphages. *Courrier Cel. Envir. INRA* N° 18
- Chenga J., Li P., Zhang Y., Zhan Y., Liu Y., 2020. Quantitative assessment of the contribution of environmental factors to divergent population trends in two lady beetles. *Biol. Control* 145 : 104259
- Chevalier A., Marinova E. & Peña-Chocarro L., 2014. *Plants and People: Choices and Diversity Through Time*. Oxbow ; Oxford.
- Colley M.R. & Luna J.M., 2000. Relative Attractiveness of Potential Beneficial Insectary Plants to Aphidophagous Hoverflies (Diptera: Syrphidae). *Envir. Entom.*, 29 (5), 1054–1059
- Commission européenne, 2007. Politique de l’UE pour une utilisation durable des pesticides, Historique de la stratégie. Bruxelles
- Cook S.M., Khan Z.R. & Pickett J.A., 2007. The use of push-pull strategies in integrated pest management. *An. Rev. Entom.* 52 : 375-400

- Derolez B., Orczyk N., Declercq S., 2014. Clé d'identification des coccinelles du Nord-Pas de Calais, version 4.2.
- Dover J.W., 1986. The effect of labiate herbs and white clover on *Plutella xylostella* oviposition. *Entom. Exp. Appl.* 42, 243-247.
- Dufour A.B. & Chessel D., 2012. Analyse en coordonnées principales. Fiches TD avec le logiciel R., <http://134.214.32.76/R/pdf/tdr82.pdf> ; consulté le 28/08/2020 à 15h
- Durieux D., Verheggen F.J., Vandereycken A., Joie E., Haubruge E., 2010. Synthèse bibliographique : l'écologie chimique des coccinelles. *Biotech. Agron. Soc. Envir.* 14(2), 351-367
- Endersby N. M. & Morgan W.C., 1991. Alternatives to Synthetic Chemical Insecticides for Use in Crucifer Crops. *Biol Agric and Horti*, Vol. 8, 33-52.
- FAO & OMS, 2014. Code de conduite international sur la gestion des pesticides. Rome
- FAO & OMS, 2018. Code de conduite international sur la gestion des pesticides, Directives sur les pesticides extrêmement dangereux. Rome
- FAO & PNUE, 2017. Convention de Rotterdam (...) applicable à certains produits chimiques et pesticides dangereux qui font l'objet d'un commerce international, édition révisée, Nations Unies. <http://www.pic.int/Accueil/tabid/1731/language/fr-CH/Default.aspx>
- FAO, 2004. Distribution et perspectives pour les produits maraîchers au Niger. Rome. <http://www.fao.org/3/a-az839f.pdf>
- FAO, 2010. Développer des villes plus vertes en République Démocratique du Congo, Programme de la FAO pour l'horticulture urbaine et périurbain, Rome.
- FAO, 2016. Produire plus avec moins en pratique le maïs - le riz - le blé, guide pour une production céréalière durable. Rome
- Fillatre Y., Baudry J. & Alignier A., 2014, Effet de l'hétérogénéité des paysages agricoles sur les communautés végétales, INRA, *Unité SAD-Paysage*, Rennes
- Follett P.A., Bruin J. & Desneux N., 2020. Insects in agroecosystems – an introduction. *Entom Exper Appl* 168: 3–6
- Francis F., Colignon P. & Haubruge E., 2003. Evaluation de la présence des syrphidae (Diptera) en cultures maraîchères et relation avec les populations aphidiennes. *Parasitica* 59 (3-4) 129-139
- Francis F., Martin T., Lognay G. & Haubruge E., 2005. Role of (E)-E-farnesene in systematic aphid prey location by *Episyrphus balteatus* larvae (Diptera: Syrphidae). *Eur. J. Entom.* 102: 431–436

- Gallo S., Karamoko D., Laurence A. & Bordat D., 2013. The relationship between the diamondback moth, climatic factors, cabbage crops and natural enemies in a tropical area, *Folia Horti*, 25: 3-12
- Giordanengo P., Febvay G., & Rahbé Y., 2007. Comment les pucerons manipulent les plantes. *Biofuture* 279, 35–38.
- Gnago J.A., Danho M., Atcham Agneroh T., Fofana I.K. & Kohou A.G., 2010. Efficacité des extraits de neem (*Azadirachta indica*) et de papayer (*Carica papaya*) dans la lutte contre les insectes ravageurs du gombo (*Abelmoschus esculentus*) et du chou (*Brassica oleracea*) en Côte d'Ivoire, *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 4(4): 953-966
- Gontijo L.M., 2019. Engineering natural enemy shelters to enhance conservation biological control in field crops. *Biol. Control* 130: 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2018.10.014>
- Grez A.A. & Prado E., 2000. Effect of plant patch shape and surrounding vegetation on the dynamics of predatory coccinellids and their prey *Brevicoryne brassicae* (Hemiptera, Aphididae). *Environ. Entom.* 29, 1244-1250.
- Hafsi A., 2016. Gestion des populations par piégeage de masse en vergers et étude de la spécialisation d'hôte chez les diptères Tephritidae. Thèse de doctorat, Cotutelle Université de Sousse et Université de la Réunion.
- Harrison R.D., Thierfelder C., Baudron F., Chinwada P., Midega C., Schaffner U. & Berg J., 2019. Agro-ecological options for fall armyworm (*Spodoptera frugiperda* JE Smith) management: Providing low-cost, smallholder friendly solutions to an invasive pest. *J. Env Manag* 243, 318–330
- Hatt S., Lopes T., Boeraeve F., Chen J. & Francis F., 2017a. Pest regulation and support of natural enemies in agriculture: Experimental evidence of within field wildflower strips. *Ecol Engin.* 98, 240-245.
- Hatt S., Uyttenbroeck R., Lopes T., Mouchon Pi., Chen J., Piqueray J., Monty A., Francis F., 2017b. Do flower mixtures with high functional diversity enhance aphid predators in wildflower strips? *Eur. J. Entom.*, 114, 66–76.
- Hatt S., Xu Q., Francis F. & Osawa N., 2019. Aromatic plants of East Asia to enhance natural enemies towards biological control of insect pests. A review. *Entom. Gener.*, 38(4), 275–315. DOI: 10.1127/entomologia/2019/0625
- He H-M., Liu L., Shahzad M., Nawaz H.B., Wang Y., Yang J. & Li C., 2019. Crop diversity and pest management in sustainable agriculture. *Jour of Integ Agric*, 18 (9): 1945–1952

- Herz A., 2017. Alternative flowering crops as potential food sources for beneficial arthropods. *J. für Kultur.* 69 (3) 89-100
- Hilker M. & Meiners T., 2011. Plants and insect eggs: How do they affect each other? *Phytochemistry* 72 : 1612–1623
- Hooks C.R.R. & Johnson M.W., 2003. Impact of agricultural diversification on the insect community of cruciferous crops. *Crop Protec* 22 : 223–238
- Hummel R.L., Walgenbach J.F., Hoyta G.D., Kennedy G.G., 2002. Effects of production system on vegetable arthropods and their natural enemies. *Agric. Ecosyst. Envir.* 93 : 165–176
- Jacquota M., Massolc F., Murua D., Derepasa B., Tixierd P. & Degueina J.P, 2019. Arthropod diversity is governed by bottom-up and top-down forces in a tropical agroecosystem. *Agric, Ecosyst. Envir* 285, 106623
- Ju Q., Ouyanga F., Gua S., Qiaoa F., Yanga Q., Qub M. & Gea F., 2019. Strip intercropping peanut with maize for peanut aphid biological control and yield enhancement. *Agric. Ecosyst. Envir.* 286, 106682. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106682>
- Karabo O., Obopile M. & Tiroesele B., 2019. Insect diversity and population dynamics of natural enemies under sorghum–legume intercrops. *Trans. Royal Society of Sou. Afr.*, Vol. 74, N° 3, 258–267. <https://doi.org/10.1080/0035919X.2019.1658654>
- Kebede Y., Baudron F., Bianchi F. & Tiftonella P., 2018. Unpacking the push-pull system: Assessing the contribution of companion crops along a gradient of landscape complexity. *Agric. Ecosyst. Envir.* 268 : 115–123
- Khan Z., James D.G., Midega C. & Pickett J.A., 2008. Chemical ecology and conservation biological control. *Biological Control* 45 : 210–224. <http://doi:10.1016/j.biocontrol.2007.11.009>
- Khan Z., Midega C., Pittchar J., Pickett J.A. & Bruce T., 2011. Push-pull technology: a conservation agriculture approach for integrated management of insect pests, weeds and soil health in Africa, *Inter. J. of Agric Sustain*, 9:1, 162-170
- Kpadenou C.C., Tama C., Tossou B.D. & Yabi J., 2020. Facteurs D'adoption de la Gestion Intégrée des Ravageurs en Production Maraîchère dans la Vallée du Niger au Bénin. *Euro Sci J.* 16, 3 : 101-120. <http://dx.doi.org/10.19044/esj.2020.v16n3p101>
- Lamy F.C., Poinot D., Cortesero A.M. & Dugravot S., 2016. Artificially applied plant Volatile Organic Compounds modify the behavior of a pest with no adverse effect on its natural enemies in the field, *J. Pest Sci.* DOI 10.1007/s10340-016-0792-1

- Landis A., Wratten S.D. & Geoff M.G., 2000. Habitat management to conserve natural enemies of arthropod pests in agriculture, *An. Rev. Entom.* 45:175–201
- Latheef M.A. & Ortiz J.H., 1983. Influence of companion plants on oviposition of imported cabbage worm, *Pieris rapae* (Lepidoptera: Pieridae), and cabbage looper, *Trichoplusia ni* (Lepidoptera/ Noctuidae), on collard plants. *Canad Entom.* 115, 11: 1529–1531
- Lopes T., 2011. Mise en place de différentes stratégies visant à favoriser l’approche « push-pull » pour le contrôle des pucerons en cultures maraîchères dans l’Est de le Chine. TFE, Gbx ABT, ULiège
- Lopes T., Hatt S., Xu Q., Chen J., Liu Y. & Francis F., 2016. Wheat (*Triticum aestivum* L.)-based intercropping systems for biological pest control. *Pest Manag Sci* 72: 2193–2202
- Malézieux E. & Moustier P., 2005a. La diversification dans les agricultures du Sud : à la croisée de logiques d’environnement et de marché, I. Un contexte nouveau. *Cah Agric* 14, 3 : 277-281
- Malézieux E. & Moustier P., 2005b. La diversification dans les agricultures du Sud : à la croisée de logiques d’environnement et de marché, II. Niveaux d’organisation, méthodes d’analyse et outils de recherche. *Cah Agric* 14, 4 : 375-382
- Malézieux E., Crozat Y., Dupraz C., Laurans M., & Makowski D., 2009. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. Springer Verlag/EDP Sciences/INRA. *Agron Sustain Dev*, 29 (1), 43-62.
- Masiala B., Kinkela S.C. & Lebailly P., 2018 Fragilisation des revenus maraîchers par la progression des zones urbaines en périphérie de Kinshasa (R.D.C.). *Mondes Dévelop.* 46, 1 : 181
- Midega C.A, Pittchara J.O., Pickett J.A., Hailua G.W. & Khan Z.R., 2018. A climate-adapted push-pull system effectively controls fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J E Smith), in maize in East Africa. *Crop Protect.* 105 : 10-15
- Mignon J., Colignon P., Haubruge E. & Francis F., 2003. Effet des bordures de champs sur les populations de chrysopes [Neuroptera : Chrysopidae] en cultures maraîchères. *Phytoprotection*, 84 (2), 121–128. <https://doi.org/10.7202/007815ar>
- Miranda G.F.G. & Rotheray G., 2018. Family Syrphidae. In *Thorp and Covich's Freshwater Invertebrates* (pp 779-783). Academic Press.
- Momagri, 2012. <https://www.terre-net.fr/actualite-agricole/economie-social/article/avec-pres-de-40-de-la-population-active-mondiale-l-agriculture-est-le-premier-pourvoyeur-d-emplois-202-78960.html> consulté le 25 août 2020 à 18h

- Morel E. et Brun L., 2019. Des bandes fleuries pour favoriser les auxiliaires. *Bulletin semences* 269 : 23-27
- Moustier P. & David O., 1996. Etudes de cas de la dynamique du maraichage péri-urbain en Afrique Sub-saharienne. Fao/Cirad. Montpellier
- Mueller A.L. & Dauber J., 2016. Hoverflies (Diptera: Syrphidae) benefit from a cultivation of the bioenergy crop *Silphium perfoliatum* L. (Asteraceae) depending on larval feeding type, landscape composition and crop management. *Agric. For. Entomol.* 18, 419-431
- Munyulia M.B.T., Luther G.C. & Kyamanywa S., 2007. Effects of cowpea cropping systems and insecticides on arthropod predators in Uganda and Democratic Republic of the Congo. *Crop Protection* 26 : 114-126. <https://doi:10.1016/j.cropro.2006.04.010>
- Nathaniel J.A., 2020. "Biology 4920G: Companion Planting in the Community". *Community Engaged Learning Final Projects*, 30.
- Nordlund D. A. & Lewis W. J., 1976. Terminology of chemical releasing stimuli in intraspecific and interspecific interactions. *J. Chem. Ecol.*, 2, 211-220
- Obrycki J.J. & Kring T.J., 1998. Predaceous coccinellidae in biological control. *An. Rev. Entom.* 43: 295–321.
- OCDE & FAO, 2019. Perspectives agricoles de l'OCDE et de la FAO 2019-2028, Éditions OCDE, Paris/ FAO, Rome, https://doi.org/10.1787/agr_outlook-2019-fr.
- Parlement européen, 2017. Politique et législation de l'UE sur les pesticides : Analyse approfondie. Service de recherche du Parlement européen. Bruxelles
- Pickett J.A., Woodcock C.M., Midega C.A. & Khan Z.R., 2014. Push–pull farming systems, *Cur Op Biotech*, 26:125-132
- Potting R.P.J., Perry J.N. & Powell W., 2005. Insect behavioural ecology and other factors affecting the control efficacy of agro-ecosystem diversification strategies. *Ecol. Model.* 182, 199–216
- Poveda K., Díaz M.F., Espinosa S., Obregon D. & Ramirez A., 2019. Landscape complexity and elevation affect the effectiveness of a local pest-management practice. *Global Ecol. Conserv.* 20 : e00763
- Poveda K., Gómez M.I. & Martínez E., 2008. Diversification practices: their effect on pest regulation and production, *Rev Col Entom* 34 (2) 131-144
- Pyke B., Rice M., Sabine B. & Zalucki M.P., 1987. The push-pull strategy-behavioural control of *Heliothis*. *Australian Cotton Growers*, 7-9.
- Raseduzzaman M. & Jensen E.S., 2017. Does intercropping enhance yield stability in arable crop production? A meta-analysis. *Euro J. Agron* 91 : 25–33

- Ratnadass, Fernandes, Avelino & Habib, 2012. Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: a review. Springer Verlag/EDP Sciences/INRA. *Agron Sustain Dev*, 32 (1) : 273-303.
- Rodriguez-Saona C. R., & Stelinski L. L., 2009. Behavior-modifying strategies in IPM: theory and practice. In *Integrated pest management: innovation-development process* (pp. 263-315). Springer, Dordrecht.
- Roth M. & Couturier G., 1966. Les plateaux colorés en entomologie. *Ann. Soc. Ent. Fr.* 2(2): 361-370
- Ryan J., Ryan M.F. & McNaeidhe F., 1980. The effect of interrow plant cover on populations of the cabbage rootfly, *Delia brassicae* (Wiedemann). *J. Appl. Ecol.* 17, 31-40.
- Ryckewaert P. & Rhino B., 2017. *Insectes et acariens des cultures maraîchères en milieu tropical humide: Reconnaissance, bioécologie et gestion agro-écologique : Guide pratique*. Ed. Quae.
- Salas C., 2019. Plants as Food for Adult Natural Enemies. In: Souza B., Vázquez L., Marucci R. (eds) *Natural Enemies of Insect Pests in Neotropical Agroecosystems*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24733-1_4
- Saldanha A.V., Gontijo L.M., Carvalho R., Vasconcelos C.J., Corrêa A.S. & Gandra L.R., 2019. Companion planting enhances pest suppression despite reducing parasitoid emergence. *Basic Appl Ecol.* 41 : 45–55
- San Martin G., 2004. Clé de détermination des Chrysopidae de Belgique, Jeunes & Nature, Wavre.
- Sarthou J.P. & Speight M.C.D., 2005. Les Diptères Syrphidés, peuple de tous les espaces. *Insectes*, 137 (2), 3-8.
- Sarthou V., 2011. Diversité des syrphidae en grandes cultures et intérêt entomologique. Colloque sur « Les entomophages en grandes cultures : diversité, service rendu et potentialités des habitats », Restitution du programme CASDAR. Paris
- Scholle J., 2015. Pratiques agroécologiques et agroforestières en zone tropicale humide, Ed. Gret. St Etienne. www.gret.org
- Schulten A., 2017. Syrphes de Belgique et des Pays-Bas. Eds. Natagora ; Conservatoire d'espaces naturels Nord et du Pas-de-Calais
- Shelton A.M. & Badenes-Perez F.R., 2006. Concepts and applications of trap cropping in pest management. *An. Rev. Entom.* 51: 285–308.

- Simon S., Marliac G. & Capowiez Y., 2015. Quelles pratiques agroécologiques pour contrôler les bioagresseurs dans un système pérenne, le verger de pommiers? *Innov. Agron.* 43 : 29-40.
- Song B.Z., Zhang J., Natasha L.W., Yao Y., Guangbo T. & Xusheng S., 2012. Intercropping with aromatic plants decreases herbivore abundance, species richness, and shifts arthropod community trophic structure, *Environ. Entom.* 41(4): 872-879; DOI: <http://dx.doi.org/10.1603/EN12053>
- Song, B.Z., Wu H. Y., Kong Y., Zhang J., Du Y. L., Hu J. H. & Yao Y. C., 2010. Effects of intercropping with aromatic plants on diversity and structure of an arthropod community in a pear orchard. *BioControl* 55: 741-751.
- Speight M.C.D. & Sarthou J.P., 2013. Clés StN pour la détermination des adultes des Syrphidae Européens (Diptères) 2013. *Syrph the Net, the database of European Syrphidae*, Vol. 74, 133pp, Syrph the Net publications, Dublin.
- Strahm S., Füglistaller D., Läderach C., Enggist A., Thuet A., Luginbühl C., Ramseier H. & Hiltbrunner J., 2019. Culture de sarrasin en Suisse: de nouvelles variétés pour une ancienne culture de niche. *Rech Agron. Suisse* 10 (5): 198–205
- Tinkeu L.S.N. & Hance T., 2001. Diversité faunique des Syrphidae (Insecta Diptera) en cultures de céréales dans le Brabant Wallon en Belgique. *Bulletin SRBE /K.B.V.E.* 137, 16-19.
- Tomanovic Z., Kavallieratos N.G., Starý P., Petrovic-Obradovic O., Athanassiou C.G. & Stanisavljevic L.Z., 2008. Cereal aphids (Hemiptera: Aphidoidea) in Serbia: Seasonal dynamics and natural enemies. *Eur. J. Entom.* 105(3), 495-501.
- Van Rijn P.C.J., Kooijman J. & Wäckers F.L., 2013. The contribution of floral resources and honeydew to the performance of predatory hoverflies (Diptera: Syrphidae). *Biol. Control* 67 : 32–38
- Vernon R.S., Van Herk W.G., Clodius M. & Tolman J., 2016. Companion planting attract-and-kill method for wireworm management in potatoes. *J. Pest Sci.* 89(2), 375-389.
- Weber D.C. & Lundgren J.G., 2009. Assessing the trophic ecology of the Coccinellidae: Their roles as predators and as prey. *Biol. Control* 51 : 199–214
- Xiu C., Zhang W., Xu B., Wyckhuys K.A.G., Cai X., Su H., Lu Y., 2018. Volatiles from aphid-infested plants attract adults of the multicolored Asian lady beetle *Harmonia axyridis*, *Biol. Control*, under submit doi: <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2018.11.008>

- Xu Q., Hatt S., Lopes T., Zhang Y., Bodson B., Chen J. & Francis F., 2018. A push–pull strategy to control aphids combines intercropping with semiochemical releases. *J Pest Sci* 91:93–103
- Yarou B.B., Komlan F.A., Tossou E., Mensah C. A., Simon S., Verheggen F. & Francis F., 2017a. Efficacy of Basil-Cabbage intercropping to control insect pests in Benin, West Africa. *Com. agric. appl. biol. sci*, 82 (2) 157-166.
- Yarou B.B., Silvie P., Komlan F.A., Mensah A., Alabi T., Verheggen F. & Francis F., 2017b. Plantes pesticides et protection des cultures maraichères en Afrique de l’Ouest (synthèse bibliographique). *Biotech. Agron. Soc. Envir.* 21(4), 288-304

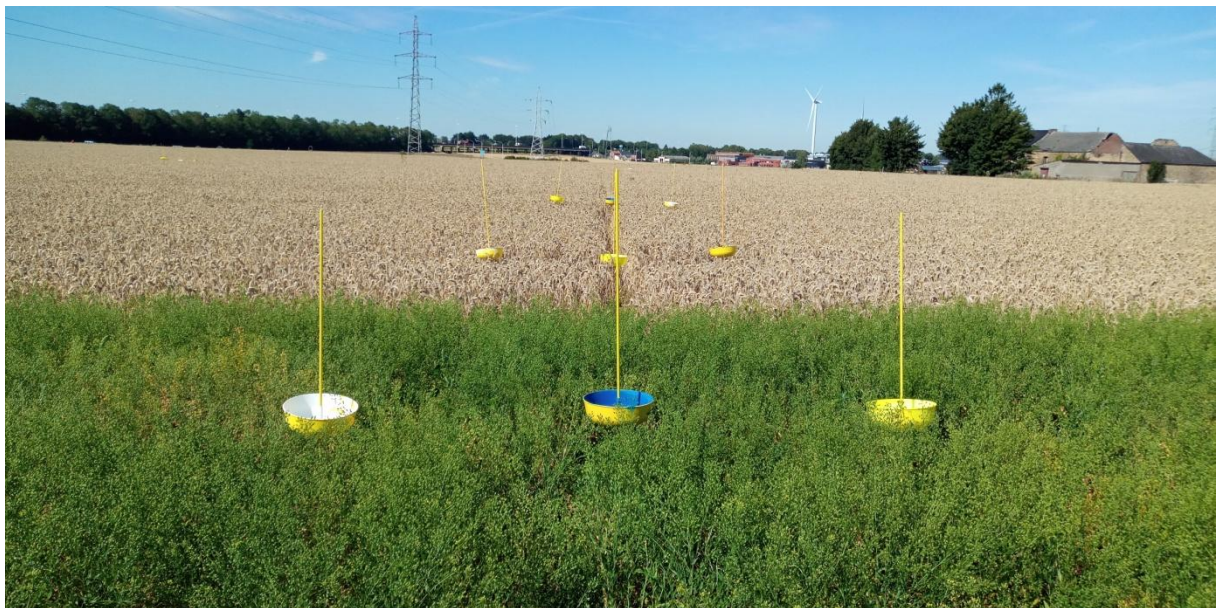
ANNEXES



Annexe 1 : Des syrphes sur les fleurs de sarrasin



Annexe 2 : Des pan-traps jaunes, bleus et blancs installés dans les bandes de sarrasin (à gauche) et de cameline (à droite)



Annexe 3 : Mise en place des pan-traps au sein d'une bande de caméline puis à 3, 12 et 50 mètres de celle-ci



Annexe 4 : Des pan-traps installés dans le champ de blé



Annexe 5 : Vues de dessus des pan-traps jaune, bleu et blanc contenant l'eau au détergeant



Annexe 6 : Succession des bandes de sarrasin et de cameline dans le champ de blé