

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

EFFET DE L'AMÉNAGEMENT EN BANDES ALTERNÉES
SUR L'ABONDANCE ET LA DYNAMIQUE DES INSECTES RAVAGEURS
ET DES ENNEMIS NATURELS DANS LE BLÉ

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN BIOLOGIE

PAR MARILOU GOYER

JUIN 2014

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, j'aimerais remercier ma co-directrice Geneviève Labrie, qui a su croire en moi dès le départ en laissant germer l'idée d'effectuer une maîtrise. Merci de m'avoir donné l'élan pour me dépasser. Merci également pour ta patience et ton talent naturel à si bien enseigner les choses.

Ensuite, j'aimerais remercier mon directeur Éric Lucas, avec qui j'ai eu l'opportunité de développer mon sens de la critique, par les rencontres et les échanges que nous avons eu en partageant entre étudiants nos projets de recherche. Cette expérience était également une façon inconsciente de sortir de l'isolement que peut occasionner certaines périodes de la maîtrise. Je me souviendrai toujours avec nostalgie l'ambiance festive du laboratoire, avec ses blagues affichées au mur, ses photos d'Halloween et ses repas de Noël. Merci également pour toutes les fois où j'ai reçu des encouragements accompagné d'humour lors des moments plus difficiles.

J'aimerais également remercier mon père Louis Goyer, et ma mère Diane Amyot, pour m'avoir toujours soutenu durant mes études et dans mes choix de carrière. Peu importe mes difficultés, vous m'avez toujours encouragé à atteindre mes objectifs et à terminer un travail entamé. Merci de m'avoir montré l'importance de la valeur qu'on appelle persévérance.

Finalement, j'aimerais remercier mon conjoint Sébastien Turbide, qui a été présent du début à la fin de mon parcours, m'a appuyée dans mon désir d'effectuer une maîtrise et l'a pratiquement vécu émotivement avec moi. Merci pour ta patience, tes encouragements et ton soutien moral. Tu as joué un rôle très important dans cette étape de ma vie et je t'en remercie.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
RÉSUMÉ.....	viii
CHAPITRE I	
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
1.1 Problématique.....	1
1.1.1 La culture du blé canadien.....	1
1.1.2 Les insectes ravageurs dans le blé et le classement des grains.....	1
1.1.3 Les bandes alternées	2
1.1.4 Objectifs de l'étude.....	3
1.2 État des connaissances.....	3
1.2.1 De la lutte chimique à la lutte culturelle.....	3
1.2.2 La diversité des systèmes et le contrôle des insectes ravageurs	4
1.2.3 Hypothèses pour expliquer la diminution des populations de ravageurs.....	5
1.2.4 Autres facteurs cultureux influençant le choix d'un insecte pour une plante hôte	7
1.2.5 Persistance des ennemis naturels en champ : concept de source et de puits	7
1.2.6 Bandes alternées et autres types de bandes culturelles	8
1.2.7 Avantages des bandes alternées.....	9
1.2.8 Mise en pratique de la culture en bandes alternées.....	10
1.2.9 Quelques exemples de l'utilisation de l'aménagement en bandes.....	11
1.2.10 Le potentiel des bandes alternées pour le contrôle des insectes ravageurs du blé.....	12
1.2.11 Les insectes ravageurs du blé au Québec	13
1.3 Description des systèmes étudiés	18
1.3.1 Site d'étude	18
1.3.2 Organisation des parcelles	19
1.4 Objectifs et hypothèses.....	20
CHAPITRE II	
EFFET D'UN SYSTÈME CULTURAL EN BANDES ALTERNÉES DE 18 M ET 36 M DE LARGE SUR LA DYNAMIQUE DE LA CÉCIDOMYIE ORANGÉE DU BLÉ <i>SITODIPLOSI MOSCELLANA</i> (GEHIN) (DIPTERA : CECIDOMYIIDAE)	23
2.1 Résumé	24

2.2 Introduction	25	
2.3 Matériel et méthode.....	28	
2.4 Résultats	32	
2.5 Discussion.....	35	
CHAPITRE III		
EFFET DES BANDES ALTERNÉES DE 18 M ET 36 M SUR L'ABONDANCE ET LA DYNAMIQUE DES INSECTES RAVAGEURS ET ENNEMIS NATURELS DANS LE BLÉ		45
3.1 Résumé	46	
3.2 Introduction	47	
3.3 Matériel et méthode.....	49	
3.4 Résultats	51	
3.5 Discussion.....	56	
CONCLUSION GÉNÉRALE	71	
BIBLIOGRAPHIE	77	

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
1.1 Larve de <i>Sitodiplosis mosellana</i> dans un épi de blé	13
1.2 Représentation schématique du dispositif spatial des différents traitements	19
1.3 Système en bandes alternées. Chaque année, chacune des cultures prend la place d'une autre. Dans ce schéma, la rotation est effectuée de gauche à droite. La vesce est le précédent cultural du maïs alors que le soya est le précédent cultural du blé Chaque culture reprend sa place initiale durant la 5 ^e année. Il est à noter que le nombre de rangées présentes dans cette figure n'est illustré que pour faciliter sa compréhension. Le nombre de rangées dépend de la largeur des bandes, soit 18 m ou 36 m de large	20
2.1 Abondance absolue de cécidomyies adultes selon le type d'aménagement durant l'émergence des adultes pour l'année 2009 (moyenne ± erreur type). Données 2010 non disponibles	40
-	
2.2 Proportion des larves de <i>Sitodiplosis mosellana</i> pour 2009 (A,C,E) et 2010 (B,D,F) selon le traitement. A, B. Proportion d'épis infestés, C, D. Proportion de grains infestés/épi, E, F. Proportion de grains infestés/épi infesté. Grains infestés/cécidomyiés et cécidomyiés/fusariés pour l'année 2009 et 2010 (données cécidomyiés/fusariés 2009 non disponibles). Lignes pointillées=seuil économique.....	41
2.3 Rendements (quantité de blé récoltée sur une surface donnée en tonnes/ha) selon le traitement pour l'année 2009 et 2010	42
2.4 Corrélation du rendement et de la proportion de grains infestés et grains cécidomyiés (avec dommages de cécidomyies) pour l'année 2009 et 2010.....	43
2.5 Abondance de Platygastriidae capturés par filet entomologique selon le traitement pour l'année 2009 et 2010 (moyenne ± erreur type)	44
3.1 Abondance de ravageurs et prédateurs selon le type d'aménagement pour l'été 2009 et 2010 (moyenne ± erreur type).....	65
3.2 Abondance (nombre moyen/station) des différents groupes de ravageurs selon le type d'aménagement pour l'année 2009 et 2010	66

3.3	Abondance (nombre moyen/station) des différents groupes d'ennemis naturels selon le type d'aménagement pour l'année 2009 et 2010 (moyenne \pm erreur type).....	67
3.4	Indice de diversité (Shannon) selon le traitement pour l'année 2009 et l'année 2010 (moyenne \pm erreur type).....	68
3.5	Temps de résidence des ennemis naturels prédateurs selon le traitement (moyenne \pm erreur type)	68
3.6	Nombre de ravageurs disponibles par ennemi naturel (obtenu par le ratio ravageurs/ennemi) pour l'ensemble des ennemis naturel et pour chacun des groupes (moyenne \pm erreur type).	69
3.7	Rendements (quantité de blé récoltée sur une surface donnée en tonnes/ha) selon le traitement pour l'année 2009 et 2010 (moyenne \pm erreur type).....	70

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
3.1 Abondance totale des différents groupes de ravageurs et ennemis naturels pour l'année 2009 et 2010.....	64

RÉSUMÉ

L'aménagement en bandes alternées implique la croissance en alternance d'une ou de plusieurs cultures, espacées de manière à permettre une certaine indépendance entre les plants, sans toutefois compromettre les interactions agronomiques possibles. Certaines études ont démontré que l'aménagement en bandes alternées augmentait le rendement. D'autres ont montré une diminution du nombre d'insectes ravageurs, ainsi qu'une augmentation d'ennemis naturels et du taux de parasitisme, comparativement à un aménagement en monoculture. L'objectif de cette étude était d'évaluer l'effet des bandes alternées de grandes tailles sur l'abondance et la dynamique des insectes ravageurs et des ennemis naturels dans le blé. Notre hypothèse de travail est qu'il y ait moins de ravageurs et plus d'ennemis naturels dans un système en bandes alternées que dans un système de monoculture.

Pour vérifier ces hypothèses, trois traitements ont été installés. Ces traitements consistaient en 2 largeurs de bandes alternées (blé, soya, maïs et vesce) correspondant aux largeurs de la machinerie agricole. La largeur des bandes était de 18 m x 1 km et 36 m x 1 km. Le troisième traitement agissant comme témoin consistait en un bloc de monoculture de 180 m x 1 km. La rotation complète des cultures s'étalait sur 4 années pour les trois types d'aménagement. Chaque système a été répété deux fois sur la ferme.

La récolte des données a été effectuée dans le blé uniquement, par l'utilisation du filet entomologique pour l'ensemble des insectes. Des pièges à phéromones ont été utilisés pour récolter les adultes de la cécidomyie orangée du blé (notre ravageur principal), alors que le décorticage d'épis a été effectué afin de récolter les larves. Des boîtes d'émergence ont également été utilisées afin d'observer de potentiels parasitoïdes de la COB.

En premier lieu, les résultats ont montré que l'abondance de la cécidomyie orangée du blé n'était pas influencée par les bandes alternées (deuxième chapitre). Cependant, l'abondance des parasitoïdes de la famille des Platygastriidae était plus grande dans les bandes alternées que dans les blocs durant les deux années. En second lieu, les résultats ont démontré que les pucerons étaient plus abondants dans les bandes de 18 m durant les deux années (troisième chapitre). L'abondance des coccinelles était plus importante dans les bandes de 18 m une semaine après le pic d'abondance des pucerons. Les thrips étaient moins abondants dans les bandes de alternées en 2010. Malgré la faible abondance d'ennemis naturels dans les bandes, les ratios thrips/*Orius*, et pucerons/coccinelle étaient plus faibles dans les bandes alternées.

Ces résultats auront permis d'observer que les ennemis naturels peuvent jouer un rôle important dans le contrôle des ravageurs, mais que l'abondance seule de ces ennemis ne peut permettre de valider l'efficacité d'un système. Les résultats sur les ratios ont démontré que malgré une abondance faible d'ennemis naturels, le contrôle des ravageurs peut être exercé. Ces résultats permettront dans le futur de mieux adapter le système en bandes alternées aux grandes cultures, dans un contexte de lutte culturale.

Mots clés : Bandes alternées, blé, grandes cultures, cécidomyie orangée du blé, ravageurs, ennemis naturels.

CHAPITRE I – INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 PROBLÉMATIQUE

1.1.1 La culture du blé canadien

Au Canada, le blé est la première grande culture en importance pour ce qui est de sa production (Statistiques Canada, 2013a). Au Québec, la culture du blé est au 5^e rang (après le maïs-grain, le soya, l'orge et l'avoine) (Statistiques Canada, 2013a). En 2012, les recettes dépassaient 5 M\$ pour le Canada (Statistiques Canada, 2013b). En 2013, plus de 10 M d'hectares ont été ensemencés au Canada, dont près de 60 000 hectares au Québec, avec 50 000 hectares destinés au blé de printemps et 9500 hectares au blé d'hiver (semé à l'automne) (Statistiques Canada, 2013a).

1.1.2 Les insectes ravageurs dans le blé et le classement des grains

Plusieurs ravageurs présents au Québec peuvent causer des pertes de rendement considérables dans le blé. Par exemple, la légionnaire uniponctué peut détruire des champs entiers et effectuer des migrations massives vers les champs avoisinants (Légaré *et al.*, 2013). La cécidomyie orangée du blé est également considérée comme un ravageur pouvant exercer de fortes pressions dans les champs (Agriculture Agroalimentaire Canada, 2005). Il y a environ 150 ans, les dommages importants de ce ravageur ont causés une baisse considérable de la production du blé au Québec, qui était alors la province avec la plus grande production de blé au Canada, causant l'arrêt presque total de la production de cette culture dans la province (Dupont, 1857). En 2010, on estimait les dommages moyens sur les grains au Québec à 1,2% (Duval *et al.*, 2011). Par contre, un pourcentage de 2% des grains destinés à l'alimentation humaine endommagés par la cécidomyie suffisent pour déclasser les grains de la classe 1 à 2 (Munger *et al.*, 2011).

Certains insectes ravageurs peuvent également être vecteurs de maladies. C'est le cas des pucerons *Rhopalosiphum padi* et *Sitobion avenae* qui peuvent transmettre le virus de la jaunisse nanisante de l'orge (BYDV) (Buntin *et al.*, 2007) et de la cécidomyie orangée du blé

qui peut transmettre la fusariose (Langevin *et al.*, 2007; Mongrain *et al.*, 1997; Mongrain *et al.*, 2000). Un pourcentage de 1% de grains fusariés entraîne un classement de deuxième ordre, alors qu'un pourcentage de 2% et 5% entraîne un classement de troisième ordre et un classement destiné au fourrage (Commission canadienne des grains, 2008).

L'abondance, la distribution et le nombre de générations par année des ravageurs dans un champ est influencé par le climat (Auzel *et al.*, 2012; Huffaker *et al.*, 1999). Les changements climatiques peuvent favoriser l'arrivée de nouveaux insectes ravageurs en plus d'augmenter la pression exercée par ceux-ci (par un plus grand nombre de générations par année, une survie plus élevée durant l'hiver et une arrivée plus hâtive dans les cultures) (Gagnon *et al.*, 2012; Gagnon *et al.*, 2013; Roy, 2002). Les changements climatiques pourraient également favoriser un changement de statut pour certains ravageurs, qui à l'heure actuelle sont sans conséquences importantes dans les cultures. Ces derniers pourraient devenir des ravageurs importants en faveur de ces changements climatiques (Auzel *et al.*, 2012; Roy, 2002).

1.1.3 Les bandes alternées

L'aménagement en bandes alternées implique la croissance en alternance d'une ou de plusieurs cultures, permettant l'indépendance de ces cultures tout en permettant la présence d'une interaction agronomique (ou biologique) (Vandermeer, 1989). Plusieurs avantages y sont rattachés, soit une diminution de l'érosion, une meilleure humidité et qualité du sol, qui protègent mieux les cultures (Carman, 2005; Francis *et al.*, 1986). Selon certaines études, l'aménagement en bandes alternées pourrait également exercer un certain contrôle sur les ravageurs par l'augmentation des populations d'ennemis naturels (Wang et Ba, 1998) et l'augmentation du taux de parasitisme (Ma *et al.*, 2007; Robert *et al.*, 2002).

Un aménagement en bandes alternées est donc une alternative intéressante, autant en agriculture biologique qu'en agriculture conventionnelle. Ce type d'aménagement implique plusieurs avantages et bénéfices en plus des avantages physico-chimiques, dont la prévention contre les infestations possibles de ravageurs, un risque moins élevé de pertes de rendements, la protection des ennemis naturels contre les épandages chimiques, une diminution des coûts reliés à l'épandage des insecticides, de la main-d'œuvre pour effectuer le travail, de l'essence

pour la machinerie en plus de diminuer la contamination des cours d'eaux. Ce type d'aménagement pourrait aider à combattre les insectes ravageurs dans d'autres cultures et même être intégré à une lutte intégrée par de meilleures connaissances dans ce domaine. Finalement, la largeur des bandes pourraient permettre de pratiquer cet aménagement à grande échelle puisqu'elle peut s'adapter à la largeur de la machinerie agricole.

1.1.4 Objectifs de l'étude

L'objectif du projet était de mesurer l'effet de l'aménagement en bandes alternées sur l'abondance et la dynamique des insectes ravageurs du blé et des ennemis naturels. Jusqu'à présent, peu d'études ont été effectuées en grandes cultures. On sait par contre que l'aménagement en bandes alternées peut exercer un certain contrôle sur les ravageurs comme le puceron du soya dans le soya (Labrie, 2008; Wang et Ba, 1998) ou sur d'autres espèces de pucerons dans la culture du blé (Ma *et al.*, 2007; Robert *et al.*, 2002). Mais qu'en est-il de l'impact sur cet aménagement sur les ravageurs et ennemis naturels du blé, ainsi que sur leur persistance durant toute une saison? Est-ce que les ennemis naturels restent dans le système ou quittent le champ pour aller ailleurs? Cette étude permettra de répondre à plusieurs de ces questions.

1.2 ÉTAT DES CONNAISSANCES

1.2.1 De la lutte chimique à la lutte culturale

L'utilisation des pesticides fait partie intégrante de l'agriculture conventionnelle. Pour ne nommer qu'un exemple, il y avait 72 produits actifs différents autorisés destinés uniquement à la culture du blé de printemps en 2011. Ces produits incluent principalement la famille des organophosphorés et celle des pyréthrinoïdes de synthèse (AAC, 2012). De ce nombre, on y retrouve 33 herbicides, 26 fongicides/bactéricides réservés à un peu plus d'une dizaine de maladies, et 13 acarides/insecticides destinés principalement à une autre dizaine d'acariens et insectes ravageurs présents au Québec (AAC, 2012). Au cours d'une saison, plusieurs

applications de pesticides peuvent être effectuées. Plus précisément, quatre applications pourraient être effectuées pour les herbicides, deux pour les fongicides et une pour les acaricides/insecticides (AAC, 2012). Pourtant, certains ingrédients actifs utilisés dans les pesticides sont néfastes pour d'autres organismes tels les abeilles, les poissons ou parfois même les oiseaux (SAGÉ Pesticides, 2014).

Heureusement, d'autres méthodes de lutte ont été développées depuis la deuxième guerre mondiale, dont la stratégie de L'IPM, ou lutte intégrée, élaborée par Stern *et al.* (1959). Cette stratégie a pour optique de maintenir les populations de ravageurs en dessous du seuil économique tout en permettant de concilier les volets économiques, écologiques et toxicologiques (Koul *et al.*, 2004; MAPAQ, 2004). Plusieurs méthodes de lutte y sont utilisées dont la lutte biologique, physique ou culturale.

La lutte culturale consiste à utiliser différentes techniques de culture afin d'exercer un certain contrôle sur les ravageurs (Pintureau, 2009). À titre d'exemples, on peut mentionner la date de semis en fonction de la présence du ravageur, la pratique d'une agriculture non intensive, l'enfouissement des résidus contenant des ravageurs, la culture-piège, l'utilisation de variétés résistantes, l'hétérogénéité des parcelles végétales et la rotation des cultures (Boisclair et Estevez, 2006; Pintureau, 2009).

1.2.2 La diversité des systèmes et le contrôle des insectes ravageurs

Les systèmes naturels complexes sont souvent des systèmes plus stables, c'est-à-dire composés de plusieurs organismes vivants de plusieurs règnes et ordres différents (Yves et Carpenter, 2007). Ces systèmes causent rarement des augmentations incontrôlables de ravageurs par leur plus grande stabilité, ce qui n'est pas le cas dans un système de monoculture. Un écosystème dont la diversité est plus élevée est plus stable, à cause de sa plus grande résistance aux perturbations et sa plus grande résilience, c'est-à-dire une plus grande facilité à retrouver son niveau d'équilibre (Altieri et Nicholls, 2004). Cette diversité a un rôle important à jouer dans le contrôle des insectes ravageurs. En effet, une grande diversité permet de fournir des proies et/ou nourriture alternatives (pollen, nectar) pour les adultes parasitoïdes et les prédateurs, des refuges pour l'hiver et des sites pour la reproduction (Altieri et Letourneau, 1982; Altieri et Nicholls, 2004; van Emden, 1965).

Toutefois, la taille des populations de ravageurs doit rester à un niveau acceptable durant une période déterminée afin d'assurer la continuité de la survie des insectes bénéfiques (Altieri et Letourneau, 1982; Powell, 1986). Un aménagement en bandes alternées permet d'augmenter la diversité végétale en y incorporant plusieurs cultures différentes en bandes.

Une étude a été menée par Tonhasca (1993) sur différents systèmes d'aménagement avec et sans labour : monoculture de maïs avec et sans labour, monoculture de soya avec et sans labour et bandes alternées (de 3 fois 4 rangées) de soya et maïs avec et sans labour. Chaque parcelle mesurait 289 m². L'étude a révélé que l'aménagement en bandes alternées de 4 rangées de maïs et 4 rangées de soya alternée 3 fois par parcelle (peu importe le travail ou non du sol) possédait beaucoup plus d'ennemis naturels (*Orius sp.*, Miridae, Coccinellidae, araignées et guêpes parasitoïdes) que dans la monoculture. Cependant, une plus grande diversité n'implique pas systématiquement une plus grande abondance d'ennemis naturels. C'est le cas notamment de l'étude réalisée dans le soya par Labrie (2008), démontrant la similarité dans l'abondance des prédateurs entre les bandes alternées de blé, soya, maïs et vesce et la monoculture de soya. Dans cette étude, la réponse des ennemis naturels face à l'augmentation du nombre de ravageurs était toutefois plus rapide dans les bandes alternées.

1.2.3 Hypothèses pour expliquer la diminution des populations de ravageurs

La diversité est un élément clé dans l'aménagement des systèmes contre les insectes ravageurs en agriculture (Altieri et Nicholls, 2004; Andow, 1991; Barbosa, 1998; Cromatie, 1981; Ratnadass *et al.*, 2012). Différentes hypothèses ont été émises en lien avec la diversité végétale. Ces hypothèses pourraient se distinguer par la diversité de la flore, la taille des parcelles, la réponse aux stimuli lors des déplacements sur de longues distances et la présence d'ennemis naturels.

Hypothèse de la résistance par association

Selon l'hypothèse de la résistance par association, la présence d'une plus grande diversité de la flore crée un environnement chimique distinct qui « camoufle » la présence de plantes hôtes (par la présence de composés chimiques volatiles neutres ou répulsifs). Il en résulterait une confusion du ravageur qui aurait normalement été tenté de se nourrir dans des

circonstances où il y aurait présence d'un environnement plutôt homogène, en plus d'avoir une plus grande difficulté à trouver des plantes hôtes (Tahvanainen et Root, 1972), un phénomène que l'on appelle « l'effet de dilution » (Ratnadass *et al.*, 2012; Root, 1973).

Hypothèse de la concentration de la ressource

Selon l'hypothèse de la concentration de la ressource, la taille des parcelles est également un facteur influant. En effet, lors de la recherche d'une plante hôte, les herbivores spécialistes sont en mesure de trouver plus facilement une grosse parcelle plus dense et moins diversifiée (Ratnadass *et al.*, 2012; Root, 1973) plutôt qu'une petite parcelle hétérogène.

Hypothèse de l'atterrissage approprié

Selon cette hypothèse, lorsque les ravageurs se déplacent sur de grandes distances, ils ne font pas la différence entre une plante hôte et non hôte, mais seraient plutôt guidés par certains stimuli (Finch et Collier, 2000). Ces stimuli, captés par des organes spécifiques leur permettent de détecter leur environnement, de l'analyser et de prendre des décisions (Giraldeau et Dubois, 2009). Par exemple, chez les pucerons, le choix d'atterrissage serait provoqué par la présence d'une certaine longueur d'onde (ou couleur) dégagée par les feuilles des plantes (Kennedy *et al.*, 1961). Dans de telles circonstances, le choix d'atterrissage serait plutôt orienté vers les parcelles homogènes que les parcelles hétérogènes.

Hypothèse des ennemis naturels

Cette hypothèse stipule que lorsque la diversité des cultures est plus importante, (ou la végétation à proximité), il y a plus de nourriture disponible (pollen, nectar), de refuges pour les prédateurs et parasitoïdes et de sites de reproduction (Altieri et Nicholls, 2004). Tous ces avantages favoriseraient l'établissement à long terme des ennemis naturels (Root, 1973), ce qui permettrait d'exercer un contrôle sur certains ravageurs.

1.2.4 Autres facteurs cultureux influençant le choix d'un insecte pour une plante hôte

D'autres facteurs, autres que la diversité végétale peuvent affecter l'abondance des insectes ravageurs. Parmi ces facteurs, on peut nommer l'arrangement de la culture dans

l'espace et le temps (par exemple, par la rotation) (Lashomb et Ng, 1984; Stern, 1981), la composition et l'abondance de la végétation à l'intérieur et à proximité du champ, le type de sol et le type d'aménagement (Altieri et Nicholls, 2004). Les facteurs peuvent également être classés selon différents niveaux d'échelles. Par exemple, dans une étude portant sur les prédateurs terricoles (espèces de Carabidae et Cicindelidae), Maisonhaute (2010) a démontré que l'effet du paysage (présence d'un champ de maïs, fourrage ou autre culture, terre en jachère, boisé ou route) était le facteur le plus important expliquant l'abondance et la diversité des carabes observés en bordure de fossé longeant les champs de maïs. Bref, pour qu'un aménagement fonctionne, il faudrait qu'il y ait présence d'abris ou de nourriture alternative pour les ennemis naturels (Altieri et Letourneau, 1982; Altieri et Nicholls, 2004) afin de permettre l'établissement permanent des insectes. Ensuite, il faudrait qu'il y ait une dominance de cultures vivaces (Altieri et Schmidt, 1985) afin de diminuer les perturbations de l'environnement. Finalement, il faudrait qu'il y ait une densité accrue de la culture (Andow, 1983) et une grande diversité génétique (Gould, 1986; Perrin, 1977) (par l'implantation de variétés mixtes) (Altieri et Schmidt, 1984; Gould, 1986) en cas de perturbations de l'environnement ou d'invasions d'insectes. La réalité fait en sorte qu'il est pratiquement impossible ou presque d'appliquer toutes ces conditions à la fois. Par contre, avec les connaissances actuelles, il est possible d'envisager un aménagement avec quelques-unes de ces conditions, notamment par l'installation d'un système en bandes alternées.

1.2.5 Persistance des ennemis naturels en champ: concept de source et de puits

Un aménagement doit tenir compte de l'environnement et de la biologie des insectes pour être efficace. En effet, la culture peut être une source ou un puits pour les ennemis naturels. Une source représente un habitat de haute qualité. Dans cet habitat, la densité de la population a tendance à augmenter. Par contre, le puits représente un habitat de basse qualité, c'est-à-dire un milieu incapable de supporter une population et où le taux de survie et/ou reproduction est faible (Pulliam, 1988). La colonisation par rapport à d'autres cultures (Corbett et Plant, 1993) peut résulter en une culture source ou une culture puits. Par exemple, le modèle mathématique de Corbett et Plant (1993) permet de prédire que la végétation entre les rangs agit comme une source d'ennemis naturels quand ceux-ci colonisent la bande avant la germination de la culture, mais comme un puits lorsque les deux cultures germent

simultanément, dans une situation où l'aménagement est en bandes alternées. Cependant, dans le contexte où il y a plus d'une culture dans un champ, si le surplus d'ennemis naturels présent à l'intérieur de la culture source se déplace souvent dans le puits, la population d'ennemis naturels du puits peut persister et vice-versa.

Selon plusieurs auteurs, le plus grand défi est la conservation des ennemis naturels en champ, soit la conservation d'une abondance viable permanente (Bianchi *et al.*, 2006; Thies et Tschardtke, 1999). Cette permanence dépend entre autres de l'âge de la plante, de la nourriture disponible et de la distance entre les plants (ou densité), qui augmente le temps de recherche (Wetzler et Risch, 1984).

1.2.6 Bandes alternées et autres types de bandes culturales

Vandermeer (1989) suggère quelques définitions pour expliquer différents types d'aménagements. Par exemple, un aménagement en cultures intercalaires mixtes consiste en des rangs de deux cultures ou plus dans un même champ, sans arrangement spécifique. Il n'implique pas de préparation du sol et est utilisé par exemple par les peuples indigènes où l'on pratique la culture sur brulis. Les rangs intercalaires consistent à aménager 2 cultures ou plus en rangs alternés. Ce type d'aménagement a été étudié par certains chercheurs comme Thorsted *et al.* (2006b) (au Danemark) qui ont combiné le trèfle comme culture intercalaire avec le blé. Les bandes alternées (ou intercalaires) comprenant plusieurs rangs consistent à aménager plusieurs bandes en alternance de différentes cultures, de manière à permettre une relation physique des plants entre eux et avec l'environnement, tout en laissant suffisamment d'espace vital pour ne pas compromettre la survie des plants (Vandermeer, 1989). C'est cette dernière définition (bandes alternées) qui est considérée dans ce document.

1.2.7 Avantages des bandes alternées

L'aménagement en bandes alternées possède la capacité de réduire l'érosion du sol causé entre autre par le lessivage (Carman, 2005). En effet, certaines cultures sont plus favorables à la rétention de l'eau, de sorte que l'ensemble du champ subit une érosion moindre par la présence d'autres cultures (Klajj, 1994). Dans des conditions où les cultures

sont en pente, la présence de bandes alternées réduit également le ruissellement, en jouant un rôle de bandes tampons (Klajj, 1994). La rétention de l'eau favorise par le fait même la conservation de l'humidité du sol (Gao *et al.*, 2009; Kaij, 1994), en plus de diminuer la perte des éléments nutritifs (Li *et al.*, 2001), de la matière organique et des microorganismes (Klajj, 1994). Cette diminution de l'érosion permet de diminuer l'application d'intrants chimiques tels les engrais. Il en résulte un meilleur rendement dans les bandes alternées par rapport à une monoculture (Gao *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2001; Thorsted *et al.*, 2006a), en plus de diminuer le nombre de passages au champ qui crée la compaction des sols (Dubuc, 2011). La présence de bandes alternées peut également favoriser le contrôle de la mauvaise herbe sur l'ensemble du champ par la rotation des cultures et la présence de certaines cultures plus densément semées (Francis *et al.*, 1986). Cependant, certains types d'aménagement peuvent nuire au rendement de certaines bandes lorsque les plants poussant en premier et ayant une taille plus grande bloquent la lumière de la culture adjacente, en plus de créer une compétition pour l'eau et les nutriments (Fortin *et al.*, 1994; Francis *et al.*, 1986; Iragavarapu et Randall, 1996). Une expérience menée sur des bandes alternées de maïs, soya et avoine montre toutefois que lorsque le nombre de rangs de soya dans les bandes est plus nombreux que quatre, l'effet de brise-vent dû à la présence de bandes de maïs compense pour les effets négatifs subis dans le soya par l'ombrage du maïs et de la compétition pour les nutriments (espacement pour le soya le plus utilisé est d'environ 76,2 cm par espace entre deux rangs donc > 228,6 cm de large selon Iowa State University, 2008). L'effet de brise vent rend également l'avoine moins susceptible à la verse (Ghaffarzadeh, 1999). Lorsque l'eau n'est pas une ressource limitée, la production totale nette et les revenus sont plus élevés dans les bandes de maïs et soya de plus de 6 rangs que dans la monoculture, par la création d'une largeur optimale (381 cm pour le soya et plus de 500 cm pour le maïs) (DEKALB, 2009).

1.2.8 Mise en pratique de la culture en bandes alternées

Plusieurs points sont à considérer pour la mise en place du système en bandes alternées. Tout d'abord il y a le choix des cultures, qui doivent être adaptées au climat et aux conditions du sol. Une culture fixant l'azote est également recommandée afin de maintenir une certaine fertilité et structure du sol. La densité (le taux de grains en poids/acre) des plants est un autre élément à considérer et dépend de la culture (Sullivan, 2003). Idéalement, les différentes

cultures doivent atteindre leur maturité à des moments différents dans la saison afin de ne pas se nuire lorsque les demandes en eau, nutriments et lumière seront à leur maximum. La hauteur et la largeur des plants sont aussi à considérer pour éviter qu'il y ait nuisance entre les plants. Par contre, pour que la technique fonctionne bien, il est suggéré d'aménager 3 ou 4 cultures en bandes alternées de différentes espèces dans un même champ (Ghaffarzadeh *et al.*, 1997). De plus, pour retirer au maximum des bénéfices du soleil durant toute la journée, les rangs doivent être semés dans l'orientation nord-sud (Iragavarapu *et al.*, 1996) alors qu'une rotation des cultures dans le temps est recommandée (Ghaffarzadeh *et al.*, 1997), puisqu'elle diminue l'épandage d'engrais et d'herbicides (Gao *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2001; Thorsted *et al.*, 2006a) ainsi que l'abondance de certains insectes ravageurs dans les cultures cibles (Ma *et al.*, 2007; Robert *et al.*, 2002; Wang et Ba, 1998). Finalement, puisque l'aménagement en bandes peut exercer un certain contrôle sur les maladies, entre autres par un précédent cultural non hôte (Schaafsma *et al.*, 2005), il est suggéré de ne pas cultiver deux années de suite une culture susceptible à la même maladie ou pouvant constituer un réservoir de la maladie. Par exemple, il est fortement déconseillé d'ensemencer du blé ou de l'orge une année suivant l'ensemencement de céréales ou de graminées fourragères (Lauzon *et al.*, 2008).

La mise en pratique de la culture en bandes alternées pose un défi énorme pour la production en grandes cultures telle le maïs, le soya et le blé. Puisque les études se font la plupart du temps sur de petites surfaces, il est difficile de mettre un tel système en place, lorsque l'aide de la machinerie moderne est indispensable. Le meilleur exemple est probablement celui de l'étude réalisée en Chine par Zhang *et al.* (2007), où l'on expérimente l'aménagement de bandes alternées de blé en alternance avec le coton, en comptabilisant le nombre de rangs (3 : 1, 3 : 2, 4 : 2 et 6 : 2). Une révision de plusieurs études sur le sujet a démontré une certaine amélioration dans les rendements pour un nombre de rangs variant de 4 à 8 principalement (Francis *et al.*, 1986). Au niveau des insectes, Capinera *et al.* (1985) ont démontré dans une étude que sur un système en bandes alternées de différentes largeurs (1, 2, 4, 8 ou 16 rangs) de maïs en alternance avec le haricot, certains insectes étaient affectés par la largeur des bandes de plus de 8 rangs, ce qui serait compatible avec l'utilisation de la machinerie agricole.

1.2.9 Quelques exemples de l'utilisation de l'aménagement en bandes

Les aménagements en bandes incluent souvent les avantages sur le rendement des terres et l'érosion des sols, mais oublient trop souvent l'aspect écologique de la dynamique des insectes. Pourtant, plusieurs études démontrent la pertinence de l'aménagement en bandes alternées pour le contrôle de certains insectes ravageurs (Ma *et al.*, 2007; Robert *et al.*, 2002; Wang et Ba, 1998). Par exemple, une étude réalisée à petite échelle (6 m²) dans le but de choisir la meilleure stratégie de gestion du puceron du soya (*Aphis glycines* Matsumura) a testé plusieurs combinaisons de facteurs de contrôle dont le type d'aménagement, le type de cultivar, la date d'ensemencement, le type et la quantité d'engrais, les applications chimiques, etc. Les résultats ont démontré que la meilleure stratégie était d'aménager des bandes de 9 rangées de soya (Wang et Ba, 1998) (environ 6 m de large) (Iowa State University, 2008) pour 2 rangs de maïs (environ 1 m de large) (DEKALB, 2009). Ces auteurs montrent qu'en plus d'augmenter le rendement des cultures de 16%, l'aménagement de soya avec du maïs doublait la présence d'ennemis naturels par rapport à un champ en monoculture, en plus de permettre le contrôle à plus de 80% du puceron du soya. Les ennemis naturels les plus importants étaient des coccinelles, soit *Propylaea japonica* (Thunberg) et *Harmonia axyridis* (Pallas) (Wang et Ba, 1998). Une autre étude menée sur un système en bandes de 3 m x 4 m de haricot et de poireau a montré que ce type d'aménagement avait un effet négatif sur l'abondance des adultes de la mouche du haricot *Ophiomyia phaseoli* (Tryon) (Diptera : Agromysidae) et permettait de diminuer la mortalité des plants de haricots de façon plus importante que dans une monoculture de haricot (Bandara *et al.*, 2009).

À plus grande échelle, une étude réalisée sur le blé durant une période de 3 années a permis d'observer une abondance moindre de ravageurs dans un système en bandes alternées (Ma *et al.*, 2007). Cette étude comparait des bandes alternées de blé et luzerne, une monoculture de blé et une monoculture de luzerne. Les résultats ont permis de voir que la présence de bandes alternées (alternance de 10 bandes d'un mètre de large x 65 m de long) augmentait de manière significative le taux de prédation de l'acarien *Allothrombium ovatum* Zhang et Xin (Acari; Trombidiidae) sur le puceron *Macrosiphum avenae* (F.) (Hemiptera; Aphididae), comparativement à la monoculture de blé. Une autre étude portant sur la culture

du riz en Chine a démontré qu'il y avait significativement moins de cercopes dans les bandes alternées de 5 m x 22 m de riz et maïs par rapport à une monoculture de riz (Yao *et al.*, 2012).

Certaines études montrent cependant une abondance générale d'ennemis naturels plus grande dans la monoculture mais une abondance plus importante d'ennemis naturels lors du pic d'infestation du ravageur. C'est le cas notamment de l'étude réalisée au Québec par Labrie (2008). L'étude portait sur des bandes alternées de 18 m et 36 m en comparaison d'une culture de soya en monoculture (180 m). Les ennemis naturels ayant été retrouvés en champ étaient des coccinelles (coccinelles convergentes, coccinelles à 14 points, coccinelles à 7 points, coccinelles asiatiques et coccinelles maculées), des diptères, des cécidomyies du puceron, des syrphes, des punaises (*Podisus sp.*, *Nabis sp.* et *Orius sp.*) et des neuroptères. Dans cette étude, la réponse face à l'augmentation du nombre de ravageurs était également plus rapide dans les bandes alternées par rapport à la monoculture.

1.2.10 Le potentiel des bandes alternées pour le contrôle des insectes ravageurs du blé

La culture du blé aménagée en bandes alternées pourrait être envisageable comme alternative à la monoculture pour plusieurs raisons. Tout d'abord, elle est praticable avec les grandes cultures, parce que la largeur des bandes peut s'adapter à la machinerie de la ferme. De plus, les cultures annuelles peuvent aider à contrôler les insectes ravageurs si le milieu est plus diversifié (Altieri et Nicholls, 2004). Les bandes alternées procurent une plus grande variété d'hôtes et ou proies, en plus de donner accès à plus de nourriture alternative (pollen et nectar), ce qui pourrait être favorable à la présence de prédateurs (Altieri et Letourneau, 1982; Altieri et Nicholls, 2004). La présence de plus d'une culture en champ pourrait favoriser la présence constante des ennemis naturels en champ et assurer un contrôle plus efficace des ravageurs (Corbett et Plant, 1993). L'existence de bandes alternées pourrait également favoriser la présence de parasitoïdes. En effet, le milieu diversifié créerait plus d'ombre, d'humidité, de sites de reproduction, ainsi qu'une température moins élevée (entre autres par la présence des bandes de maïs), propice à l'établissement de ces parasitoïdes (Tonhasca, 1993).

1.2.11 Les insectes ravageurs du blé au Québec

Les ravageurs les plus importants dans le blé au Québec sont la cécidomyie orangée du blé, les thrips, quatre espèces de pucerons et la légionnaire uniponctuée. Cette dernière arrive cependant encore que très occasionnellement et de manière sporadique (MAAARO, 2013a).

*La cécidomyie orangée du blé *Sitodiplosis mosellana* Gehin (Diptera : Cécidomyiidae)*

La cécidomyie orangée du blé (ou COB) est un diptère s'attaquant au blé et triticale qui est présent au Canada depuis les années 1800 (Barral et Sagnier, 1888; Knodel et Ganehiarachchi, 2008). Mesurant de 1,5 à 3 mm de long, ce petit insecte orangé fait des ravages considérables dans la culture du blé, en se nourrissant directement sur les grains. Étant un insecte univoltin, la femelle pond généralement ses œufs à l'intérieur des épis



Figure 1.1- Larve de *Sitodiplosis mosellana*

(Lamb *et al.*, 2004). Celle-ci pond en moyenne 80 œufs lorsque la température se situe au-dessus de 10-11°C et lorsque le vent est de moins de 10 km/h. Les larves émergent de la troisième à la septième journée après la ponte (Roy *et al.*, 2008). Durant environ 3 semaines, ces larves se déplacent à travers les glumes et se nourrissent du grain en sécrétant des enzymes digestives (Roy *et al.*, 2008). Lorsque la larve arrive à maturité, elle se forge un cocon et passe l'hiver en diapause dans le sol jusqu'au printemps suivant. Le cocon peut survivre ainsi durant plusieurs hivers si les conditions d'émergence ne sont pas favorables (Barnes, 1956). La plus longue diapause observée est de 12 années (Hu et Zhang 1995). Lorsque l'humidité du sol est optimale et la température à environ 13°C, les larves remontent à la surface du sol et forment une puppe (Doane et Olfert, 2008). Ces pupes émergent en adulte entre la fin du mois de juin et le début du mois de juillet, au même moment que le stade de formation des épis.

Dans la province de la Saskatchewan, la cécidomyie orangée du blé a causé des pertes économiques de 30 M \$ en 1983 (Olfert *et al.*, 1985). En 1995, elle causait en moyenne au

Québec 6,3% de pertes de rendement (Mongrain *et al.*, 1997). Le seuil d'intervention (c'est-à-dire le moment où l'évaluation des dommages ou pertes économiques causées par l'insecte est plus grand que s'il n'y a pas d'intervention par les insecticides), varie entre 4 et 7% de grains infestés. La variation du pourcentage est due à la variété de blé, à l'alimentation des animaux d'élevage ou à l'alimentation humaine (Ding *et al.*, 2000). La cécidomyie orangée du blé serait également vectrice de spores de fusariose. Trois études majeures ont été faites à ce sujet (Langevin *et al.*, 2007; Mongrain *et al.*, 1997; Mongrain *et al.*, 2000). En 2002, Langevin *et al.* (2007) ont testé 6 cultivars en champ et séparé les grains en santé des grains endommagés par la cécidomyie ou par la fusariose. Les résultats ont montré qu'il y avait 3 fois plus de fusariose ou toxines de fusariose dans les grains où il y avait des dommages causés par la cécidomyie.

Peu de moyens de lutte chimique efficaces sont disponibles pour combattre cet insecte. Les insecticides contenant du chlorpyrifos ou diméthoate (deux organophosphates) sont des possibilités, mais leur utilisation au Québec n'est pas justifiée (ils sont souvent très peu rentables) (Roy, *et al.*, 2008), en plus d'être hautement toxique pour les poissons, les oiseaux, et les abeilles (SAGÉ pesticides, 2013). Une autre méthode possible est l'utilisation de cultivars résistants. Certains ont déjà été répertoriés et peuvent être une option intéressante (Barker et McKenzie, 1996; Ding *et al.*, 2000). Le gène Sm1 a été identifié comme étant un gène de résistance contre cet insecte (McKenzie *et al.*, 2002). Lorsque la larve attaque le grain, le plant libère des substances (l'acide férulique et l'acide p-coumarique) (Ding *et al.*, 2000). Il en résulte éventuellement la mort de la larve. Ce qui est intéressant avec cette solution c'est qu'elle n'affecte pas la qualité du grain. Ce gène est présent sous forme de variétés (n'est pas un OGM) (McKenzie *et al.*, 2002). L'importance de ce gène va au-delà de cet insecte, c'est-à-dire qu'il pourrait aider à combattre entre autre la mouche de Hesse qui possède plusieurs gènes en commun avec la cécidomyie orangée du blé et qui a surpassé la résistance intégrée aux cultivars du blé (Mittapalli *et al.*, 2006). Une troisième solution consiste à utiliser des semis hâtifs pour diminuer les chances de coïncider avec l'émergence des adultes et le stade critique du blé (formation des épis). Une autre solution est l'utilisation de guêpes venant d'Europe qui ont déjà été introduites dans l'Ouest Canadien. La première est *Macroglenes penetrans* Kirby (Hymenoptera : Pteromalidae). Celle-ci semble bien établie

dans l'Ouest Canadien et exerce un certain contrôle sur l'abondance de la cécidomyie orangée du blé. La présence de cet insecte a été détectée dans les champs dans la région de la Saskatchewan une année après les ravages importants de 1983 (Doane et Olfert, 2008). Ce parasitoïde peut réduire la population de la cécidomyie orangée du blé de 30 à 40% (Lamb *et al.*, 2004). Par contre, *M. penetrans* n'est efficace que lorsque les populations ne sont pas trop élevées. Quant à *Platygaster tuberulosa* Kieffer (Hymenoptera : Platygastriidae), l'espèce n'est pas encore assez abondante pour exercer un contrôle efficace (Shanower, 2005). Cet insecte a fait l'objet de lâchers en 1993 et 1994 par Agriculture et Agroalimentaire Canada et l'Institut international pour la lutte biologique. Elle est par contre toujours présente en petit nombre. En Saskatchewan en 2001, la population était cinq fois plus élevée et avait tendance à se disperser vers d'autres régions (Olfert *et al.*, 2003). Par contre, on ne sait pas si ces deux parasitoïdes sont présents au Québec (Roy, *et al.*, 2008). Finalement, une autre méthode consiste à créer un aménagement défavorable à la cécidomyie. Par exemple, la rotation des cultures peut rendre l'établissement d'un insecte plus difficile. Par contre, cette rotation doit se faire sans qu'il y ait de production de céréales durant au moins 2 ans, à cause de la longue diapause de l'insecte (Roy *et al.*, 2008).

Les thrips (Thysanoptera)

En Amérique du nord, les thrips ont généralement une longueur de 1-2 mm. Ceux-ci sont en grande partie des ravageurs s'attaquant au contenu cellulaire des tissus des plantes, ce qui provoque l'assèchement et la chute prématurée des feuilles. Ils peuvent également être vecteurs de maladies (Lewis, 1973). Il est à noter que les espèces présentes dans le blé au Québec ne sont pas tous connues, ce qui explique en partie pourquoi les thrips sont généralement tous considérés comme des ravageurs, même si certaines espèces peuvent jouer le rôle de prédateur (Lewis, 1973). Présentement, les prédateurs que l'on connaît bien sont identifiables par l'observation de bandes et des roussissures sur les ailes (Duval, 1993).

De manière plus générale, la reproduction des thrips est à la fois sexuée et asexuée (par parthénogenèse). Lorsque la reproduction sexuée est présente, la pré-pupe contient déjà les spermatozoïdes et ceux-ci sont stockés dans la spermathèque jusqu'au printemps suivant,

où les œufs seront fertilisés par la femelle. Ces œufs sont cachés dans les tissus cellulaires de la plante. De 30 à 300 œufs sont pondus par individu, dépendamment de l'espèce, des variations entre les individus et de la qualité de la nourriture (Lewis, 1973). Plusieurs moyens peuvent être utilisés pour contrôler les thrips, mais il est toutefois difficile de les contrôler par la lutte chimique, à cause du développement de résistance (Robb, 1988. Par contre, les ennemis naturels des thrips sont nombreux. On peut mentionner les punaises anthocorides, les myrides et les guêpes parasitoïdes (Lewis, 1973).

Les pucerons (Hemiptera : Aphididae)

Les pucerons sont des ravageurs qui se nourrissent de la sève des plantes. On retrouve principalement 4 espèces de pucerons dans le blé au Québec, soit le puceron du maïs (*Rhopalosiphum maidis* Fitch), le puceron bicolore des céréales (*Rhopalosiphum padi* (L.)), le puceron des céréales et du rosier (*Methopolophium dirhodum* (Walker) et le puceron des céréales (*Sitobion avenae* (F.)). Les pucerons sont également des vecteurs de plusieurs virus et autres pathogènes. La maladie la plus importante est le virus de la jaunisse nanisante de l'orge (BYDV). Cette maladie rend les plants chétifs et réduit les rendements. Les pucerons vecteurs de cette maladie sont *R. padi* et *S. avenae* (Buntin *et al.*, 2007).

La reproduction des pucerons est à la fois sexuée et asexuée. Une seule femelle fondatrice (aptère) sur un hôte d'hiver (ou primaire) peut former par parthénogenèse plusieurs colonies aptères. La première colonie d'ailés permet le déplacement des pucerons d'un hôte primaire à un hôte secondaire (le blé dans ce cas-ci). *R. padi* et *M. dirhodum* font des migrations alors que *R. maidis* et *S. avenae* semblent plutôt rester à proximité des champs (Buntin *et al.*, 2007). La dispersion à travers un champ se poursuit durant tout l'été, par la création à la fois de pucerons aptères et ailés (il n'y a que des femelles durant tout l'été) (Fraval, 2006). À l'automne, les œufs sont pondus sur la plante hôte d'hiver qui varie d'une espèce à l'autre. De la lutte chimique contre les pucerons peut se faire par l'utilisation du malathion (organophosphate) (AAC, 2012) mais on doit considérer que plusieurs ennemis naturels peuvent s'attaquer aux pucerons dont des guêpes parasitoïdes, des champignons entomopathogènes et des prédateurs (Buntin *et al.*, 2007).

La légionnaire unipunctuée *Mythimna unipuncta* Haworth (Lepidoptera : Noctuidae)

En Amérique du Nord, la légionnaire unipunctuée est un insecte s'attaquant aux cultures fourragères et céréalières. L'espèce migre temporairement vers le nord chaque été en provenance des États-Unis (Deslisle et McNeil, 1987). Cependant, des épisodes de ravages importants se produisent à tous les 5 à 20 ans (Beirne, 1971; Guppy, 1961). Les femelles adultes pondent leurs œufs sur une végétation choisie pour ses qualités nutritives (Clément *et al.*, 2008). Environ 500 à 1500 œufs sont pondus par femelle. Les larves émergent après 3 à 24 jours, dépendamment de la température (Capinera, 2009). La larve possède généralement 6 stades, où la maturité est atteinte à une longueur de 35 mm. La larve se transforme ensuite en pupes pour s'enfoncer dans le sol à une profondeur allant de 2 à 5cm (Capinera, 2009). Par contre, l'espèce est incapable de survivre aux hivers québécois (Légaré *et al.*, 2013). La femelle attire les mâles par des phéromones sexuelles (Delisle et McNeil, 1987; Turgeon et McNeil, 1983). L'intervention avec des insecticides peut se faire par l'utilisation de plusieurs familles de pesticides (AAC, 2012) mais l'utilisation n'est pas utile si la chenille est malade, est à un stade trop avancée, ou que les céréales sont à maturité (Gouvernement du Nouveau Brunswick, 2002; MAAARO, 2013a). Le contrôle peut se faire par plusieurs insectes, virus, champignons et bactéries (Capinera, 2009).

1.3 DESCRIPTION DES SYSTÈMES ÉTUDIÉS

1.3.1 Site d'étude :

L'expérience a été effectuée à la ferme Longprès à Les Cèdres, en Montérégie. L'agriculture est de type biologique depuis environ une dizaine d'années. Le sol est de type argileux Ste-Rosalie. Lors de l'étude, les bandes alternées étaient en fonction depuis trois ans et étaient situées toujours dans les mêmes sections du champ, en rotation. Des rotations de quatre ans ont toujours été effectuées dans le même ordre et les cultures en question étaient (dans l'ordre) : vesce, maïs, soya et blé. La vesce, précédent cultural du maïs agit en tant qu'engrais vert pour cette culture alors que le soya est le précédent cultural du blé. Les rangs ont été orientés dans le sens nord-sud, ce qui permet aux plants de bénéficier du soleil durant toute la journée. Les blocs de monoculture étaient dans le même sens. Le travail du sol était

minimal, soit en surface et la culture a été réalisée sur billons (petites buttes) pour toutes les cultures, à l'exception du blé.

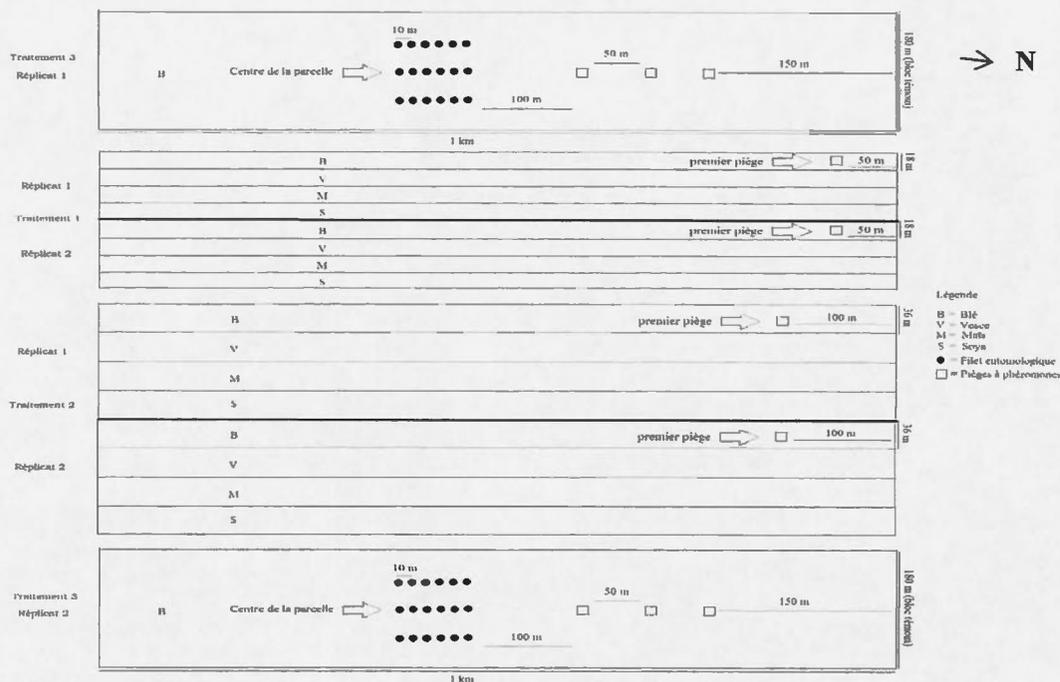


Figure 1.2. Représentation schématique du dispositif spatial des différents traitements. Trois traitements ont été aménagés à l'intérieur d'un champ, soit des bandes alternées de 18 m, des bandes alternées de 36 m et des blocs témoins de 180 m par 1 km de long. Chaque traitement a été répliqué deux fois. Les bandes alternées étaient composées de blé, vesce, maïs et soya en rotation (dans cet ordre). Le bloc témoin est également en rotation de quatre années avec les mêmes cultures (le bloc de blé change donc 4 fois de place à l'intérieur du champ pour une rotation complète). Dans chaque traitement, l'échantillonnage a été effectué dans le blé seulement selon l'exemple montré dans la figure.

1.3.2 Organisation des parcelles :

Pour l'étude, trois traitements différents ont été pris en compte. Deux largeurs de bandes alternées ont été utilisées, soit des bandes alternées de 18 mètres de large par 1 km de long et des bandes alternées de 36 mètres de large par 1 km de long. Les largeurs de bandes ont été choisies en fonction de deux largeurs de machinerie agricole utilisées en champ. Ces différentes largeurs servaient également à savoir si la taille des parcelles avait une influence différente ou plus marquée sur les résultats. Le traitement servant à titre de monoculture était de 180 mètres de large par 1 km de long. Ces blocs ont été utilisés à des fins de

comparaisons. Pour chaque traitement, il y avait deux répétitions. Les coûts alloués au projet ainsi que la surface de la ferme ont été des facteurs déterminants quant au choix du nombre de répétitions.

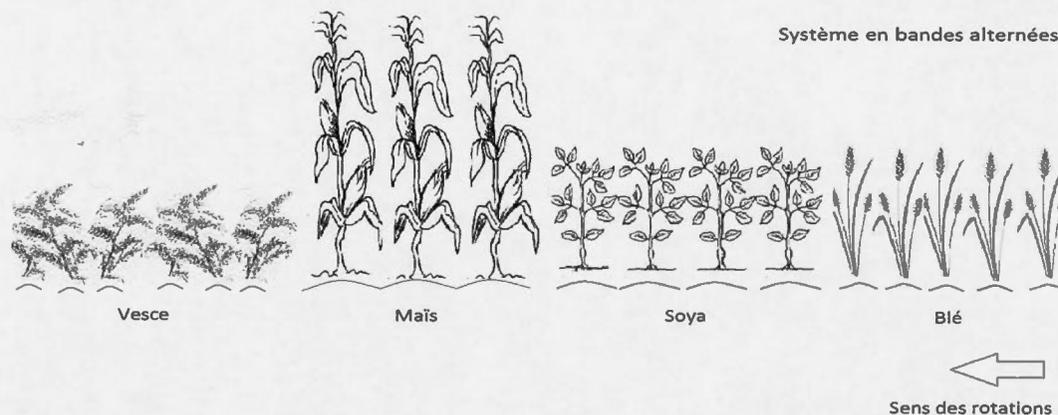


Figure 1.3- Système en bandes alternées. Il est à noter que le nombre de rangées présentes dans cette figure n'est illustré que pour faciliter sa compréhension. Le nombre de rangées dépend de la largeur des bandes, soit 18 m ou 36 m de large, déterminé par la largeur de la machinerie.

1.4 OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES

Peu d'études réalisées dans des parcelles de grande taille ont été publiées sur l'aménagement en bandes alternées en grandes cultures. On sait par contre que l'aménagement en bandes alternées peut exercer un certain contrôle sur les ravageurs comme le puceron du soya dans le soya (Labrie, 2008; Wang et Ba, 1998) ou sur d'autres espèces de pucerons dans la culture du blé (Ma *et al.*, 2007; Robert *et al.*, 2002). L'objectif du projet était de mesurer l'effet de l'aménagement en bandes alternées sur l'abondance et la dynamique des insectes ravageurs du blé et des ennemis naturels. Pour atteindre cet objectif, des sous-objectifs ont été créés et sont divisés par chapitre. Dans le chapitre II, l'abondance et la dynamique de la cécidomyie orangée dans le blé (ravageur principal), les dommages causés par les infestations, la fusariose ainsi que la présence possible de parasitoïdes de la COB sont considérés. Le troisième chapitre est consacré aux ravageurs secondaires présents dans cette culture. De plus, on y aborde l'abondance, la diversité et la persistance des

ennemis naturels dans le blé. Les rendements sont considérés dans les chapitres II et III afin de savoir si le système en bandes alternées affecte la rentabilité agricole.

Dans le chapitre II, la première hypothèse est que l'abondance des COB (ravageur principal du blé) sera moindre dans les bandes alternées que dans les blocs témoins. La deuxième hypothèse est qu'il y aura un rendement plus important dans les bandes alternées que dans un système de monoculture. Selon les connaissances de départ, malgré la présence d'ennemis naturels de la cécidomyie orangée du blé (Floate *et al.*, 1990; Holland et Thomas, 2000), il n'y avait pas d'article concernant la capacité des ennemis naturels à contrôler la COB de manière efficace (Ellsbury *et al.*, 1998, Floate *et al.*, 1990; Holland et Thomas, 2000) à l'exception de deux espèces de guêpes parasitoïdes (Olfert *et al.*, 2003). Toutefois, la présence de ces deux espèces au Québec était inconnue (Roy *et al.*, 2008). L'hypothèse s'est donc penchée sur la théorie de la concentration de la ressource. Cette hypothèse stipule que lors de la recherche d'une plante hôte, les herbivores spécialistes ont plus de facilité à trouver une grosse parcelle homogène qu'une petite parcelle hétérogène. La présence de plantes non hôtes dans une parcelle hétérogène provoquerait de la confusion chez ces ravageurs. Ceux-ci auraient également tendance à moins se disperser (Root, 1973). Il a été démontré que certains composés volatiles dégagés par les plantes avaient un effet répulsif sur certains ravageurs. Par exemple, il a été démontré que le poireau en bandes alternées avec le haricot avait un effet négatif sur l'abondance des adultes de la mouche du haricot *Ophiomyia phaseoli* (Tryon) (Diptera : Agromysidae) en bandes alternées et moins de mortalité des plants de haricots que dans une monoculture (Bandara *et al.*, 2009). Les cécidomyies orangées du blé devraient donc avoir plus de difficultés à trouver une parcelle de blé en présence de bandes alternées d'autres cultures. Au niveau des rendements, puisque les dommages et la fusariose associés à l'abondance de la cécidomyie peuvent affecter les rendements de blé (Munger *et al.*, 2011), on suppose qu'une abondance moindre de COB dans les bandes alternées sera favorable à un meilleur rendement dans les bandes alternées.

Dans le chapitre III, notre première hypothèse de travail est que l'abondance des ravageurs secondaires sera moins importante dans les bandes alternées. La seconde hypothèse est que l'abondance des ennemis naturels sera plus importante dans un aménagement en

bandes alternées. La troisième hypothèse est que le rendement sera plus élevé dans les bandes alternées que dans les blocs de monoculture. Selon la théorie des ennemis naturels, la présence de plusieurs types de cultures pourrait permettre l'établissement durant toute la saison des ennemis naturels, par la présence de ressources alternatives (Altieri et Letourneau, 1982; Altieri et Nicholls, 2004). Par exemple, un ennemi naturel qui se nourrit de pollen pourrait rester temporairement dans une autre bande si le blé n'offre pas suffisamment de ressources. Une abondance plus importante d'ennemis naturels devrait donc résulter en une abondance moins importante de ravageurs dans le blé. En effet, Labrie (2008) a démontré dans le soya que l'augmentation des populations d'ennemis naturels était plus rapide et plus forte durant le pic d'infestation des ravageurs (Labrie, 2008). Finalement, les insectes peuvent affecter le classement des grains (Munger *et al.*, 2011), ce qui risque de faire diminuer les rendements. Une abondance moins importante de ravageurs devrait résulter en un rendement plus important dans le blé.

CHAPITRE II

EFFET D'UN SYSTÈME CULTURAL EN BANDES ALTERNÉES DE 18 M ET 36 M DE
LARGE SUR LA DYNAMIQUE DE LA CÉCIDOMYIE ORANGÉE DU BLÉ
SITODIPLOSI MOSCELLANA (GEHIN) (DIPTERA : CECIDOMYIIDAE)

GOYER Marilou, LABRIE Geneviève et LUCAS Éric

2.1 RÉSUMÉ

La cécidomyie orangée du blé *Sitodiplosis mosellana* (Gehin) (Diptera : Cecidomyiidae) (COB) est un insecte ravageur pouvant causer des dommages dans le blé, le triticale et l'orge. L'espèce pourrait également être vectrice de spores de fusariose. Peu de moyens de lutte chimique efficaces sont disponibles pour combattre cet insecte. L'objectif de la présente étude était d'évaluer l'effet d'un système cultural en bandes alternées de grande taille (18 m et 36 m de large) sur l'abondance et la dynamique de *S. mosellana* dans le blé ainsi que la présence potentielle de guêpes parasitoïdes de la COB. Pour ce faire, deux largeurs de bandes alternées de blé, soya, maïs et vesce en rotation ont été comparées à des blocs de monoculture (180 m x 1 km). Le suivi entomologique s'est fait via le décorticage d'épis pour évaluer l'abondance des larves de cécidomyie, des pièges à phéromones et boîtes d'émergences pour évaluer l'abondance des adultes, et finalement des boîtes d'émergence et le filet entomologique pour identifier d'éventuels parasitoïdes. Les résultats démontrent que les bandes alternées n'ont pas d'influence significative sur l'abondance de la cécidomyie orangée du blé ni sur les rendements. Par contre, les guêpes parasitoïdes de la famille des Platygastriidae étaient plus abondantes dans les bandes de 18 m que dans les blocs, ce qui est prometteur pour le contrôle des cécidomyies orangées du blé. De plus, l'espèce de parasitoïde *Platygaster tuberosa* a été identifiée dans nos parcelles. D'autres études devront être effectuées sur cette espèce en relation avec l'hôte et en présence de bandes alternées, afin de comprendre la dynamique de ce parasitoïde dans ce type d'aménagement ainsi que la possibilité de contrôle de cet insecte sur *S. mosellana*.

MOTS CLÉS : Bandes alternées, *Sitodiplosis mosellana*, Platygastriidae, *Platygaster tuberosa*

2.2 INTRODUCTION

La cécidomyie orangée du blé *Sitodiplosis mosellana* (Gehin) (Diptera : Cecidomyiidae) (ou COB) est un insecte originaire d'Europe identifié pour la première fois au Canada en 1819 (Buntin *et al.*, 2007). C'est en 1983 qu'elle a causé le plus de pertes économiques au Canada dans la province de la Saskatchewan, soit 30 M \$ (Olfert *et al.*, 1985). Une étude réalisée sur 6 sites au Québec dans les années 1990 a montré que de 38 à 88% des épis étaient infestés par la COB, causant en moyenne au Québec 6,3% de pertes de rendement (Mongrain, *et al.*, 1997). Durant l'année 2009, Duval *et al.* (2010) ont montré que la proportion d'épis infestés variait en moyenne de 30 à 86%, dépendamment des régions. Cependant, la saison de croissance n'était pas favorable au développement des larves puisqu'elles étaient sous-développées (Duval *et al.*, 2010), ce qui a pu expliquer que les dommages étaient situés à 0,4% en moyenne. La COB cause particulièrement plus de dommages dans le blé et le triticales mais peut également être présente dans l'orge (Wise *et al.*, 2002). L'espèce serait vectrice de spores de fusariose. En 2002, Langevin *et al.* (2007) ont testé 6 cultivars en champ et séparés les grains en santé des grains endommagés par la cécidomyie et des grains attaqués par la fusariose. Les résultats ont montré qu'il y avait 3 fois plus de fusariose et de toxines de fusariose (DON) dans les grains où il y avait des dommages causés par la cécidomyie.

La COB est une espèce univoltine. La femelle pond 80 œufs en moyenne sur les épis ou à l'intérieur des glumes, où se forment les grains (Lamb *et al.*, 2004), lorsque la température se situe au-dessus de 10-11°C et que le vent est inférieur à 10 km/h (Olfert *et al.*, 2009; Pivnick et Labbé, 1993). Les larves émergent de la 3^e à la 7^e journée après la ponte (Olfert *et al.*, 2009), puis se déplacent à travers les glumes en se nourrissant du grain durant environ 3 semaines. Lorsque la larve arrive à maturité, elle se laisse tomber au sol et passe l'hiver en diapause jusqu'au printemps suivant. La pupe peut toutefois survivre durant plusieurs hivers (jusqu'à 13 ans) dans le sol si les conditions d'émergence ne sont pas favorables (Barnes, 1956). Lorsque l'humidité du sol est optimale et la température à environ 13°C, les larves remontent à la surface et effectuent leur nymphose (Doane et Olfert, 2008). Les adultes émergent entre la fin du mois de juin et le début du mois de juillet, au moment de la formation des épis.

Peu de moyens de lutte chimique efficaces sont disponibles pour combattre cet insecte. Le chlorpyrifos (un organophosphoré), produit le plus utilisé au Canada (AAC, 2005; Agriculture and rural development, 2012; Elliot *et al.*, 2011; Manitoba agriculture, food and rural initiatives, 2011), est reconnu pour être toxique sur plusieurs organismes vivants dont les poissons, oiseaux et abeilles (SAGÉ pesticides, 2013). À titre d'exemple, une étude a montré que l'application du chlorpyrifos pouvait tuer jusqu'à 100% des carabes, une famille d'insectes prédateurs pouvant s'attaquer à la COB (Floate *et al.*, 1989). Au niveau biologique, la cécidomyie peut être attaquée par plusieurs prédateurs, dont les araignées, les Staphylinidae (Holland et Thomas, 2000) et les Carabidae (Ellsbury *et al.*, 1998). Pour assurer un contrôle efficace, il faut toutefois réduire les populations de ravageurs à des densités en-dessous du seuil économique (non déterminé pour le Québec) (Munger *et al.*, 2011). Selon une étude réalisée par Holland et Thomas (2000), le contrôle par les araignées et les Staphylinidae restent incertain. Une étude menée par Floate *et al.*, (1990) montre que sur sur 14 espèces de Carabidae, moins d'un carabe sur 86 larves/m² avait attaqué la COB en champ. Par contre, une autre étude montre que la présence des carabes pourrait être efficace de par leur richesse dans les conditions où il y aurait moins d'intrants chimiques (Ellsbury *et al.*, 1998). Deux parasitoïdes de la COB, d'origine européenne, peuvent contrôler les populations de la cécidomyie, soit un endoparasitoïde oophage *Macroglènes penetrans* Kirby (Hymenoptera : Pteromalidae) et un endoparasitoïde oophage *Platygaster tuberosa* Kieffer (Hymenoptera : Platygastriidae) (Olfert *et al.*, 2003). *Macroglènes penetrans* a été observé en 1984 en Saskatchewan parasitant en moyenne 33% des COB (Olfert *et al.*, 2003). La famille des Platygastriidae peut déposer un ou plusieurs œufs dans celui de son hôte (Kim *et al.*, 2011). *Platygaster tuberosa* a été introduit en Saskatchewan en 1993 et 1994. En 2001, les populations étaient cinq fois plus nombreuses et avaient tendance à migrer dans les régions voisines (Olfert *et al.*, 2003). Cependant, aucune mention n'a été faite de ces deux espèces au Québec (Roy *et al.*, 2008).

D'autres moyens de lutte peuvent être utilisés pour combattre cet insecte, comme les semis hâtifs, les variétés résistantes et la création d'aménagements défavorables aux ravageurs et/ou favorables aux ennemis naturels (Ding *et al.*, 2000; McKenzie *et al.*, 2002; Mittapalli *et al.*, 2006). L'aménagement en bandes alternées est un exemple d'aménagement

cultural qui implique la croissance en alternance d'une ou plusieurs cultures permettant à la fois l'indépendance et l'interaction biologique entre celles-ci (Vandermeer, 1989). Il existe plusieurs avantages à cultiver en bandes alternées, dont la diminution de l'érosion et la protection des cultures (par la conservation de la qualité et de l'humidité du sol), ainsi que l'augmentation des rendements (Carman, 2005; Francis *et al.*, 1986; Li *et al.*, 2001). Selon certaines études, l'aménagement en bandes alternées pourrait également exercer un certain contrôle sur les ravageurs (Bandara *et al.*, 2009; Finch et Collier, 2011; Yao *et al.*, 2012). Par exemple, une étude menée par un système en bandes alternées de 3 m x 4 m de haricots et poireaux a démontré que ce système permettait de diminuer l'abondance de la mouche du haricot *Ophiomyia phaseoli* et la mortalité des plants de haricots, comparativement à une monoculture (Bandara *et al.*, 2009). Cependant, nombre d'études réalisées sur l'abondance des ravageurs se font sur des parcelles de petites tailles (quelques mètres) (Ma *et al.*, 2007; Yao *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2007).

Le but de la présente étude est de déterminer si l'aménagement en bandes alternées, dont la largeur satisfait aux besoins de la machinerie agricole nord-américaine (18 et 36 m), peut permettre de contrôler les populations de *S. mosellana*. La première hypothèse, basée sur la théorie de la concentration de la ressource, est que l'abondance des COB (ravageur principal du blé), ainsi que les infestations seront plus importantes dans les blocs témoins que dans les bandes alternées. La deuxième hypothèse, basée aussi sur la théorie de la concentration de la ressource, est que les rendements seront plus élevés dans les bandes alternées. Lors de la recherche d'une plante hôte, les herbivores spécialistes auront plus de facilité à trouver une grosse parcelle homogène qu'une petite parcelle hétérogène (Ratnadass *et al.*, 2012; Root, 1973), ce qui se fera sentir sur les dommages et les rendements. La troisième hypothèse, basée sur la théorie des ennemis naturels, suggère que les parasitoïdes seront plus abondants en présence d'un système diversifié (Altieri et Nicholls, 2004), soit les bandes alternées. Les résultats qui en découlent devraient donc être une diminution de l'abondance de cécidomyies.

2.3 MATÉRIEL ET MÉTHODE

Description du site

L'échantillonnage a été effectué à la ferme Longprés à Les Cèdres, en Montérégie (45°19'N et 74°06 O). L'agriculture est de type biologique depuis une dizaine d'années. Le sol est de type argileux Ste-Rosalie. Les bandes alternées ont été mises en place en 2006. L'ensemble des parcelles à l'étude sont en rotation avec du blé, de la vesce, du maïs et du soya. À noter que les blocs témoins subissent aussi une rotation dans le même ordre, de sorte que le précédent cultural est le même peu importe le type d'aménagement. La vesce agit en tant qu'engrais vert l'année précédant le maïs. Le soya est le précédent cultural du blé. Les rangs sont orientés nord-sud, les plants bénéficient du soleil durant toute la journée. Le travail du sol est minimal (en surface).

Pour l'étude, trois types d'aménagements ont été mis en place, soit deux largeurs de bandes alternées de 18 mètres de large et 36 mètres de large. Les blocs témoins étaient de 180 mètres de large. Tous ces traitements font 1 km de long. La largeur des bandes a été choisie en fonction de la largeur de la machinerie, ce qui facilite l'implantation du système sur de grandes surfaces. L'utilisation d'un système de guidage par GPS facilite aussi la mise en place des parcelles. Pour chaque type d'aménagement, il y avait deux répétitions.

Échantillonnage entomologique

Deux stades ont été pris en compte pour échantillonner la cécidomyie orangée du blé, soit l'adulte et la larve. Le stade adulte a été échantillonné par des pièges à phéromone et des boîtes d'émergence (en laboratoire) alors que le stade larvaire a été échantillonné par le décorticage d'épis. Des boîtes d'émergence ainsi que le filet entomologique ont également été utilisés pour détecter la présence potentielle de parasitoïdes et d'en connaître la dynamique.

Pièges à phéromone

Ce type de piège a été utilisé afin de mesurer l'abondance des populations adultes selon le type d'aménagement, ainsi que la dynamique des populations durant l'émergence.

Pour cette partie, trois pièges à phéromones (PHERO TECH®) ont été installés dans le blé pour chaque type d'aménagement de la mi-juin jusqu'à la mi-juillet 2009. Pour chaque type d'aménagement, un espacement minimum de 50 m a été prévu du bout du champ de la parcelle de blé afin d'éviter l'effet de bordure. À l'intérieur de ces mêmes parcelles, un espacement minimum de 50 m a également été prévu entre chaque piège afin d'empêcher l'interférence entre les phéromones (figure 1.2). Le premier piège a été décalé de 50 m par rapport à l'autre traitement afin d'éviter toute interférence possible. Les languettes collantes sur les pièges ont été relevées à chaque semaine. Les données considérées étaient le nombre de cécidomyies adultes selon l'aménagement et le temps. À noter que l'échantillonnage 2010 n'a pu être effectué en raison de problème en approvisionnement de phéromones.

Décorticage d'épis

Le but du décorticage était d'évaluer les taux d'infestations et de dommages causés par la cécidomyie orangée du blé à l'état larvaire ainsi que la présence de dommages causés par la fusariose. La récolte des épis a été effectuée au stade pâteux mou du grain (moment où le grain est formé mais encore vert) et a été réalisée le 15 juillet 2009 et le 10 juillet 2010. L'échantillonnage a été effectué à 30 m du bout du champ afin d'éviter l'effet de bordure. Pour chaque type d'aménagement, 20 épis par parcelle ont été récoltés au hasard en marchant en diagonale afin de couvrir toute la superficie des bandes de blé (sur une distance d'environ 200 m) (Roy *et al.*, 2008). Par la suite, les épis ont été coupés, placés dans des sacs de plastique et déposés au congélateur jusqu'au décorticage. Les épis étaient ensuite décortiqués afin de noter le nombre de larves sur chaque grain, le taux d'infestation des épis et des grains ainsi que la présence de fusariose et de dégâts causés par l'insecte selon le type d'aménagement.

Boîtes d'émergence

Des boîtes d'émergence ont été utilisées afin d'évaluer la possible présence de parasitoïdes de la cécidomyie orangée du blé. Les boîtes ont été construites selon le même modèle que celui utilisé pour le charançon de la silique (Doddall *et al.*, 2006). Durant l'été 2010, pour chaque type d'aménagement, 100 épis de blé ont été récoltés au hasard en marchant dans le champ. L'échantillonnage a été réalisé trois fois, soit le 7, 17 et 22 juillet

durant le développement des larves afin d'augmenter les chances d'observation de parasitoïdes. Les épis ont été récoltés dans des sacs de coton afin de garder les insectes vivants. Ils ont ensuite été déposés dans des boîtes d'émergence. Les épis ont été placés dans un mélange au fond de terre, sphaigne et vermiculite, pour permettre la conservation de l'humidité (Shanower, 2005). Les boîtes d'émergence ont été placées à $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ avec humidité à 40% jusqu'à la fin du mois d'août afin de permettre aux insectes de se laisser tomber dans le substrat (Buntin *et al*, 2007). La température a été diminuée progressivement de 17°C à $4^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ en date du 15 novembre à raison de 2-3 degrés à toutes les semaines, avec humidité à 60%. Le 8 mars, ces boîtes ont été progressivement placées à $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ avec humidité à 40% suivant la même procédure. L'arrosage des plants et l'ensemencement de grains de blé dans les boîtes a été effectué afin de favoriser l'émergence des adultes. Environ 50 ml d'eau a été mis dans les boîtes à chaque semaine afin d'assurer une humidité constante et permettre la germination des grains dans les boîtes. Le nombre de cécidomyies et d'hyménoptères parasitoïdes ont été notés à toutes les semaines, durant 2 mois.

Filet entomologique

Ce type d'échantillonnage nous a permis de vérifier si des parasitoïdes de la COB étaient présents dans les champs au cours de l'été et d'en connaître la dynamique. Ainsi, trois coups de filet entomologique étaient effectués chaque semaine à 6 stations par transects, sur 3 transects par parcelles. L'échantillonnage a été réalisé une fois par semaine, de la mi-juin à la fin du mois de juillet 2009 et 2010. Les données considérées étaient le nombre d'individus selon l'aménagement et le temps.

Rendement

Le rendement (quantité de blé récoltée sur une surface donnée) a été mesuré afin de voir s'il y avait une corrélation avec l'abondance ou les dommages de cécidomyies. Pour ce faire, 3 mesures ont été prises par parcelle à l'aide d'un capteur de rendement intégré à la machinerie agricole, en 2009 et 2010. Les rendements ont été standardisés selon le taux d'humidité du capteur de rendement de la batteuse à 14%. Les données de rendement ont été analysées selon les taux d'infestations de la cécidomyie et la proportion de dommages.

Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel Jump 10. Puisque l'abondance des insectes est dépendant du temps, des tests ANOVA à un critère ont été réalisés pour l'ensemble des semaines et à chaque semaine pour l'abondance des cécidomyies adultes, les infestations de larves, les dommages et les rendements du blé selon le traitement. À noter que pour les infestations de larves de COB (évalués par le décorticage d'épis), les résultats des 20 épis par type d'aménagement ont été mis sur une seule moyenne afin de satisfaire aux méthodes d'analyses utilisées en agriculture. De plus, les données sur les proportions d'infestations ont été transformées en arcsine√proportion dans le but de satisfaire l'hypothèse d'homogénéité des variances. Afin de comparer les infestations des deux années, des tests de t ont été effectués.

Pour savoir s'il y avait une corrélation entre les grains infestés et cécidomyiés, les grains cécidomyiés et fusariés, les grains infestés et les rendements ainsi que les grains cécidomyiés et les rendements, des tests de corrélation de Spearman ont été effectués.

Des tests ANOVA à un critère ont également été réalisés pour évaluer l'abondance des guêpes parasitoïdes selon le traitement. Lorsque les données étaient significatives, des tests posthoc de type HSD ont été réalisés.

2.4 RÉSULTATS

Stade adulte - Pièges à phéromones (figure 2.1)

Les données ont été récoltées chaque semaine entre le 30 juin et le 21 juillet 2009. Les résultats ont montré que le nombre de cécidomyies adultes était semblable d'un type d'aménagement à l'autre pour l'ensemble de l'été ($F_{2,5}=0,77$; $P=0,5366$). Les pièges à phéromones n'ont pas pu être installés durant l'année 2010 à cause d'un problème d'approvisionnement en phéromone au moment de l'expérience.

Stade larvaire - Décorticage d'épis

Proportion d'épis infestés (figure 2.2) :

Le type d'aménagement n'a pas affecté la proportion d'épis infestés, ni en 2009, ($F_{2,5}=4,78$; $P=0,1167$), ni en 2010 ($F_{2,5}=4,44$; $P=0,1267$). Par contre, en ne considérant que les années, le test de t révèle que la proportion d'épis infestée est moins importante durant l'été 2009 (Test $t=0,0375$; $ddl=10$). Cette même année est caractérisée par un mois de juillet plus froid et pluvieux en moyenne (19,4°C en 2009 contre 21,9°C 2010 et 192,4 mm de pluie en 2009 contre 85,2 mm en 2010) (Environnement Canada, 2009 et 2010).

Proportion de grains infestés par épi (figure 2.2) :

Les résultats ont montré que le type d'aménagement n'affecte pas de manière significative la proportion de grains infestés par épi pour les deux années ($F_{2,5}=6,46$; $P=0,0818$ pour 2009 et $F_{2,5}=1,96$; $P=0,2848$ pour 2010). Cependant, pour l'année 2009, on peut noter une tendance à une proportion de grains infestés par épi plus importante dans les blocs de monoculture que dans les bandes. En 2009, le seuil d'intervention situé à 4% pour le blé panifiable est atteint dans les blocs alors que le taux d'infestation moyen est de 0,4% et 0,5% respectivement dans les bandes de 18 m et de 36 m. En 2010, au contraire, ce sont les bandes alternées qui dépassent largement ce seuil avec 6,5% dans les bandes de 18 m et 7,2% dans les bandes de 36 m, alors que ce n'est pas le cas pour les blocs avec un taux d'infestation de 2,5%. Globalement, il y a plus de grains infestés/épi durant l'année 2010 que durant l'année 2009 ($F_{2,5}=6,95$; $P=0,0249$).

Proportion de grains infestés par épi infesté (figure 2.2) :

La proportion de grains infestés par épi infesté est similaire d'un traitement à l'autre pour l'année 2009 ($F_{2,5}=2,75$; $P=0,2089$) et l'année 2010 ($F_{2,5}=0,75$; $P=0,5421$). Globalement, il y a une tendance à avoir une proportion de grains infestés par épi infesté plus élevé en 2010 qu'en 2009 ($F_{2,5}=3,55$; $P=0,0888$).

Dommages (figure 2.3) :

En 2009, la proportion de dommages de cécidomyie n'est pas différente d'un aménagement à l'autre ($F_{2,5}=1,5924$; $P=0,3378$). De la même manière, en 2010 on n'enregistre aucune différence entre les types d'aménagement ($F_{2,5}=2,5219$; $P=0,2278$). En 2010 la fusariose a été notée. Les résultats montrent une incidence similaire dans tous les traitements ($F_{2,5}=1,2245$; $P=0,4085$).

En 2009, les résultats n'ont montré aucune corrélation significative entre la proportion de grains infestés et la proportion de dommages de cécidomyies ($Rho=0,6571$; $P=0,1562$). Cependant, en 2010, on retrouve une forte corrélation significative entre la proportion de grains infestés et les dommages de l'insecte ($Rho=0,8857$; $P=0,0188$). La proportion de fusariose était de 0,0099 en moyenne et aucune corrélation entre la proportion de grains avec dommages de cécidomyie et de grains avec dommages de fusariose n'a été observée ($Rho=0,0857$; $P=0,8717$) (pas de données en 2009).

Rendements (figure 2.4) :

En 2009, il n'y avait pas de différences de rendement entre les types d'aménagements ($F_{2,5}=2,55$; $P=0,2249$) (figure 2.4). Le rendement moyen variait entre 3,64, 3,53 et 3,32 t/ha pour les bandes de 18 m, 36 m et les blocs respectivement. Une forte corrélation négative entre les rendements et proportion de grains infestés ($Rho=-0,8286$; $P=0,0416$) a été observée, mais pas entre les rendements et la proportion de grains cécidomyiés ($Rho=-0,7143$; $P=0,1108$). En 2010, comme en 2009, il n'y avait pas de différences de rendement entre les différents traitements ($F_{2,5}=1,05$; $P=0,4501$). Le rendement moyen variait entre 2,9; 3,19 et 3,16 t/ha pour les bandes de 18 m, 36 m et les blocs respectivement. Les tests de

corrélations portant sur la proportion de grains infestés et cécidomyiés ont montré des résultats non significatifs pour l'année 2009 ($Rho=0,4286$; $P=0,3965$) et 2010 ($Rho=0,3143$; $P=0,5441$).

Parasitoïdes (figure 2.5) :

Des parasitoïdes ont émergés des grains mis en boîte d'émergence. Deux individus se trouvaient dans les bandes de 18 m et un individu dans les blocs (nombre insuffisant pour analyses statistiques). Les données du filet entomologique ont permis d'identifier 831 *Platygastridae* en 2009 et 364 en 2010, dont deux morphotypes du genre *Platygaster* (données sur la proportion non disponibles. Les spécimens ont été envoyés au Laboratoire de diagnostic en phytoprotection du MAPAQ et au Dr. Masner, de la Collection nationale canadienne d'insectes, arachnides et nématodes pour confirmation du genre. La présence du parasitoïde de la cécidomyie orangée du blé, *Platygaster tuberosa*, a été confirmée par le Dr. Neerup Buhl au Danemark. La présence de *Macroglenes penetrans* n'a pas été observée. Une nouvelle espèce de *Platygaster* a également été identifiée, soit *Platygaster microsoma* (Buhl *et al.*, 2012). Ce parasitoïde pourrait potentiellement parasiter la cécidomyie orangée du blé. Par contre, d'autres études devront être effectuées afin de confirmer cette hypothèse. Pour les tests, puisque les individus avaient été identifiés à la famille en 2009 et que le genre n'avait pas été identifié et confirmé, nos analyses se sont donc tournées vers la famille des *Platygastridae*. Il est toutefois intéressant de noter que les deux morphotypes étaient présents en abondance durant l'année 2010 dans les parcelles de blé. Les résultats ont montré qu'il n'y avait pas de différence significative entre les traitements pour l'abondance de *Platygastridae* durant l'année 2009 ($F_{2,5}=6,41$; $P=0,0825$) pour l'ensemble de l'été, alors qu'en 2010, l'abondance était plus importante dans les bandes de 18 m que dans les blocs ($F_{2,5}=19,1334$; $P=0,0196$) (figure 2.5). Les analyses par semaine ont démontré que les *Platygastridae* étaient plus abondants dans les bandes de 18 m que les bandes de 36 m et les blocs le 30 juin ($F_{2,5}=75,90$; $P=0,0027$) et le 15 juillet ($F_{2,5}=624,07$; $P=0,0001$) en 2009. En 2010, ceux-ci étaient plus abondants dans les bandes de 18 m que dans les blocs témoins $F_{2,5}=12,6603$; $P=0,0345$) la semaine du 17 juin.

2.5 DISCUSSION

Contrairement à notre hypothèse de départ, nos résultats démontrent que le système cultural en bandes alternées de grande taille ne permet pas d'améliorer le contrôle de la cécidomyie orangé du blé. Les résultats très différents en 2009 et 2010 ne permettent pas de tirer des conclusions. De la même manière, la présence de bandes alternées n'améliore pas les rendements en blé.

Les abondances de larves et d'adultes de la COB ne sont pas affectées par le traitement en bandes alternées. De plus, les données montrent qu'il n'y avait aucune différence significative entre les traitements pour la proportion d'épis, de grains infestés/épi et de grains infestés/épi infesté. Pour ce qui est des adultes, les résultats obtenus à l'aide des pièges à phéromones ont montré que le nombre d'individus retrouvés était similaire dans tous les traitements. Il est fort probable que la zone de recrutement des pièges à phéromones soit trop grande pour évaluer ce genre de système en bandes alternées puisque les adultes peuvent provenir de plus loin. En effet, bien que l'adulte de COB ait une capacité de vol limitée (Elliot *et al.*, 2011), la cécidomyie peut voyager sur de longues distances par les vents ou courants d'airs chauds par transport passif (Jin *et al.*, 2011; Miao *et al.*, 2013; Olfert *et al.*, 2009).

Globalement, plusieurs facteurs pourraient expliquer cette absence d'effet des bandes alternées sur les populations de cécidomyie orangé du blé. En premier lieu, puisque la cécidomyie fait sa diapause dans le sol, la population qui émerge pourrait venir d'une autre culture que le blé. En effet, il est reconnu que ce sont les conditions abiotiques qui permettent d'activer le développement au stade de pupaison, soit la température, les précipitations, les vents et l'humidité du sol (Doane *et al.*, 2008; Elliott *et al.*, 2011; Roy *et al.*, 2008) et qu'il faut un certain temps avant que le développement se fasse. Cette différence entre la position de la bande alternée et la position de la population affectée peut masquer un potentiel effet. La présence de deux années contradictoires semble appuyer la thèse du décalage entre la

population affectée une année retrouvée dans le sol sous le blé et l'émergence d'une autre population provenant d'une autre culture précédente dans le blé de l'année. De plus, comme les conditions du sol sont meilleures dans un système en bandes alternées (Carman, 2005; Gao *et al.*, 2009; Klaij, 1994), il est possible que l'émergence des bandes adjacentes soit également meilleure, ce qui pourrait expliquer ces résultats. Si tel est le cas, les cultures en bandes alternées pourraient reproduire l'effet indésirable d'une monoculture sans rotation, puisque les COB adultes n'auraient qu'à parcourir par transport actif une très courte distance de vol pour atterrir dans la bonne culture et effectuer la ponte, malgré sa capacité de vol limitée (Elliot *et al.*, 2011). Un article récent montre d'ailleurs (selon un modèle théorique) que la distance parcourue par le transport actif de *Sitodiplosis mosellana* peut être de plus de 500 m dans plus de 50% des cas chez les individus femelles et d'environ 23% chez les individus mâles (à 1 jour d'âge, soit l'âge où la performance est à son meilleur) (Hao *et al.*, 2013).

En second lieu, la présence d'une diapause très longue chez la COB peut faire en sorte que les résultats d'un éventuel effet ne se feront sentir qu'à long terme, puisque l'émergence dépend des conditions du sol, comme la température et le taux d'humidité (Doane *et al.*, 2008; Elliott *et al.*, 2011; Roy *et al.*, 2008). Les cécidomyies déjà présentes sur place ayant fait leur diapause au sol peuvent survivre jusqu'à 13 ans dans les parcelles lorsque les conditions sont défavorables (Barnes, 1956). Il est possible que la présence de bandes alternées suivant des rotations de 4 ans n'ait aucun effet sur les populations, du moins à court terme. Selon une expérience réalisée en Suède sur *Contarinia vincetoxici* Kieffer (une autre espèce de cécidomyie), une longue diapause pourrait être une manière de se réfugier contre les ennemis naturels, les conditions environnementales imprévisibles et le manque de nourriture (Solbreck et Widenfalk, 2012). La possibilité d'allonger la diapause pourrait être une réponse à des conditions nuisibles à l'insecte.

Les bandes alternées peuvent affecter positivement les rendements (Gao *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2001; Thorsted *et al.*, 2006a). Premièrement la présence de bandes alternées permet de diminuer l'érosion des cultures (par la conservation de la qualité et de l'humidité du sol (Carman, 2005; Francis *et al.*, 1986; Gao *et al.*, 2009; Kaij, 1994; Li *et al.*, 2001;), ce qui permet par la même occasion, la diminution de la perte des éléments nutritifs (Li *et al.*, 2001), de la matière organique et des microorganismes (Klajj, 1994). Deuxièmement les bandes alternées peuvent permettre le contrôle des ravageurs (Polaszek et Delvare, 2000; Traore *et al.*, 2011). La présente étude montre cependant qu'il n'y avait aucune différence de rendement entre les traitements pour les deux années. Cette similarité pourrait être due à la présence de rotation dans les trois types d'aménagement qui permet de conserver la qualité du sol d'année en année. Au niveau de l'abondance des COB, les populations sont similaires dans les différents traitements à l'étude.

Des études précédentes ont montré que la cécidomyie pouvait être vectrice de spores de fusariose (Langevin *et al.*, 2007; Mongrain *et al.*, 1997; Mongrain *et al.*, 2000). Toutefois, aucune corrélation entre la proportion de grains cécidomyiés (endommagés par la cécidomyie) et de grains fusariés (endommagés par la fusariose) n'a été relevée. Il est néanmoins possible que la faible proportion de grains cécidomyiés (0,0084 en moyenne) et fusariés retrouvés (0,0099 en moyenne) explique ces résultats.

Bien que l'hypothèse de la concentration de la ressource ne puisse s'appliquer pour la cécidomyie orangée du blé, l'hypothèse des ennemis naturels pourrait se révéler plausible dans le cas de cette étude. En effet, deux morphotypes du genre *Platygaster* ont été abondamment observés dans les cultures de blé (proportion non disponible). Bien que ce soit la famille qui ait été analysée, les résultats ont toutefois pu montrer que les hyménoptères de la famille des Platygastridae, dont plusieurs espèces s'attaquent à des diptères de la famille des Cecidomyiidae (Buhl et Notton, 2009), étaient plus abondants dans les bandes de 18 m que dans les blocs témoins pour l'ensemble de l'année 2010. L'aménagement en bandes alternées semble donc favorable à l'augmentation des populations de parasitoïdes de la famille des Platygastridae. Plusieurs études notent également une augmentation dans

l'abondance et la diversité des ennemis naturels en présence de bandes alternées (Ellsbury *et al.*, 1998; Labrie 2008; Labrie *et al.*, 2010; Ma *et al.*, 2007; Wang et Ba, 1998). Une grande diversité permettrait de fournir plus de refuges et de sites pour la reproduction (Altieri et Nicholls, 2004). Les bordures de blé en présence de cultures adjacentes plus hautes pourraient également permettre une meilleure conservation de l'humidité et des températures moins élevées en créant de l'ombre à la culture de blé en bordure, ce qui serait favorable à l'établissement de parasitoïdes (Tonhasca, 1993). C'est peut-être pour cette raison d'ailleurs que l'abondance est plus importante dans les bandes de 18 m durant les semaines significatives par rapport aux bandes de 36 m et moins abondantes encore dans les blocs. La distance à parcourir pour ces insectes est moins grande dans les bandes de 18 m que dans les bandes de 36 m, ce qui pourrait également faciliter les déplacements d'une bande à l'autre. Toutefois, l'impact sur les populations de COB n'apparaît pas dans nos résultats, ce qui indique que ces parasitoïdes s'attaquent à d'autres espèces d'hôtes, ou bien sont présents au stade adulte mais ne parasitent pas dans nos parcelles. À cet effet, d'autres études sur l'espèce *Platygaster tuberosa* devront être réalisées en relation avec l'hôte, dans un contexte de bandes alternées.

Conclusion

Cette étude n'a pas permis de voir que les rendements étaient plus élevés en présence de bandes alternées. Elle n'a pas non plus permis d'observer un contrôle possible de la cécidomyie orangée du blé par l'aménagement en bandes alternées à elle seule. Selon certaines études, l'aménagement en bandes alternées peut contrôler certains ravageurs (Labrie *et al.*, 2010; Ma *et al.*, 2007; Robert *et al.*, 2002; Wang et Ba, 1998) et augmenter les rendements (Li *et al.*, 2001). Il est possible que l'aménagement en bandes alternées puisse influencer d'avantage l'abondance d'autres ravageurs non-résidents ou envahissants devant effectuer des migrations annuelles et donc ayant une plus grande capacité de vol actif. C'est ce qui pourrait expliquer pourquoi de nombreux exemples de systèmes en bandes alternées fonctionnent pour le contrôle de ce type de ravageurs tels les pucerons (Ma *et al.*, 2007; Robert *et al.*, 2002; Wang et Ba, 1998), la mouche du haricot (Bandara *et al.*, 2009) ou la

famille des cercopes (Yao *et al.*, 2012). Quoi qu'il en soit, le potentiel de contrôle par les ennemis naturels devrait par contre faire l'objet d'une attention particulière. Labrie *et al.* (2008) ont démontré entre autre qu'il y avait plus d'ennemis naturels dans les bandes alternées durant le pic d'infestation du puceron du soya. La présence de parasitoïdes de la cécidomyie orangée du blé pourrait également s'avérer une solution efficace à moyen terme (Olfert *et al.*, 2009). Cependant, d'autres études devront être effectuées sur l'espèce *Platygaster tuberosa* en relation avec l'hôte dans un contexte de bandes alternées puisque nos résultats n'indiquent pas qu'il y ait une baisse des cécidomyies lorsqu'elles sont présentes. Il est primordial d'étudier l'effet des bandes alternées en rotation sur les autres espèces de cécidomyies susceptibles d'être présentes, comme la mouche de Hesse par exemple. Il faudrait également comparer l'efficacité du traitement sur des insectes à pupaison dans le sol et sans pupaison dans le sol, de manière à établir si ces résultats obtenus avec la cécidomyie du blé seront similaires sur d'autres espèces.

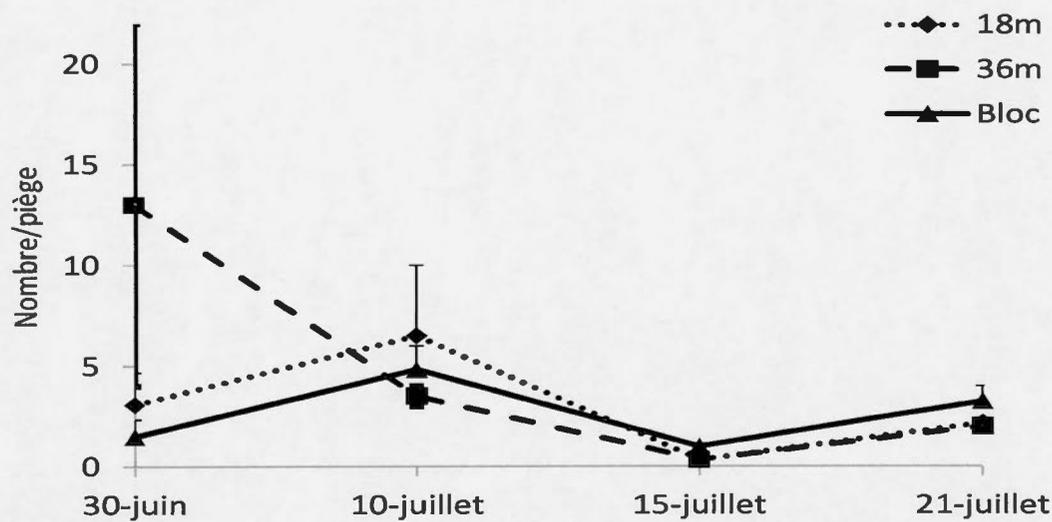


Figure 2.1- Abondance absolue de cécidomyies adultes selon le type d'aménagement durant l'émergence des adultes pour l'année 2009. ANOVA (moyenne \pm erreur type). Données 2010 non disponibles.

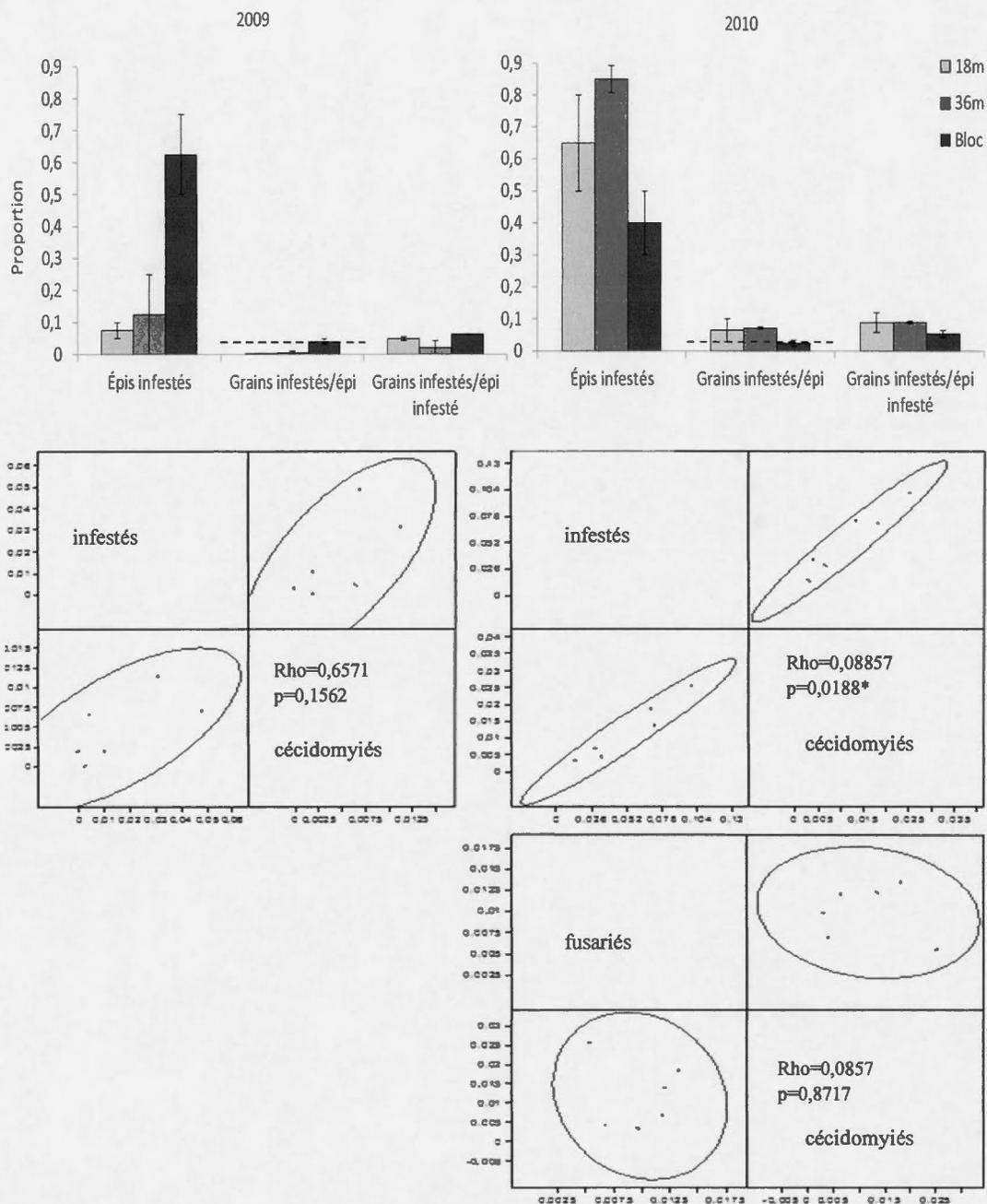


Figure 2.2- Proportion des larves de *Sitodiplosis mosellana* pour 2009 et 2010 selon le traitement (ANOVA). Proportion d'épis infestés, de grains infestés/épi et de grains infestés/épi infesté. Lignes pointillées=seuil économique. (ANOVA un critère \pm erreur type). Tests de corrélations de Spearman : grains infestés/cécidomyiés et cécidomyiés/fusariés pour l'année 2009 et 2010 (données cécidomyiés/fusariés 2009 non disponibles).

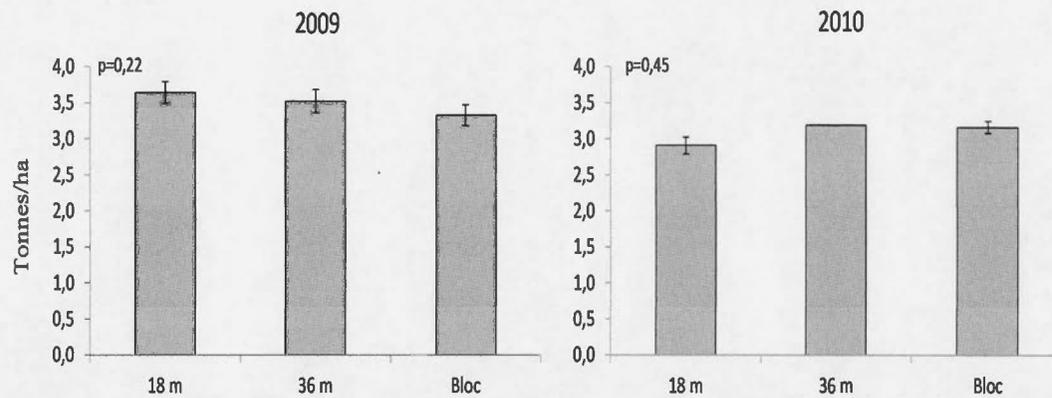


Figure 2.3- Rendements (ANOVA à un critère \pm erreur type) : Rendements (quantité de blé récoltée sur une surface donnée en tonnes/ha) selon le traitement pour l'année 2009 et 2010.

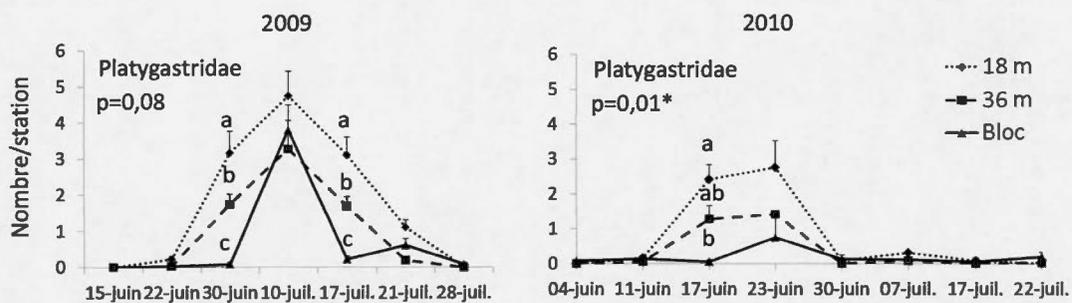


Figure 2.5- Abondance de Platygasteridae dans les filets entomologiques selon le traitement pour l'année 2009 et 2010 (ANOVA à un critère sur l'ensemble de l'été et à toutes les semaines \pm erreur type).

CHAPITRE III

**EFFET DES BANDES ALTERNÉES DE 18 M ET 36 M SUR L'ABONDANCE ET LA
DYNAMIQUE DES INSECTES RAVAGEURS ET ENNEMIS NATURELS DANS LE BLÉ**

GOYER Marilou, LABRIE Geneviève et LUCAS Éric

3.1 RÉSUMÉ

Les ravageurs les plus importants dans la culture du blé sont la cécidomyie orangée du blé, la mouche de Hesse, la légionnaire uniponctuée, les thrips et les pucerons. Face au développement de résistance de certains insectes à certains insecticides ainsi qu'à l'impact environnemental et sur la santé humaine de ces pesticides, d'autres méthodes de contrôle ont été envisagées, telles que l'aménagement en bandes alternées. Certaines études ont démontré qu'un aménagement en bandes alternées pouvait augmenter le rendement, diminuer le nombre d'insectes ravageurs, augmenter le nombre d'ennemis naturels par la création d'un milieu favorable et le contrôle par la présence de ces ennemis naturels, via l'augmentation du taux de parasitisme et de prédation. Par contre, ces études se font à petite échelle la plupart du temps (parcelles de moins de 1000 m²). L'objectif du présent projet était d'évaluer si un aménagement en bandes alternées de grande taille, correspondant à la largeur de la machinerie agricole moderne, pouvait aider à contrôler les insectes ravageurs. Des bandes alternées en rotation de blé, soya, maïs et vesce de 18 m et 36 m de large par 1 km de long ont été comparées à des blocs témoins ayant une largeur de 180 m par 1 km de long sur une ferme en régie biologique. Le suivi des insectes a été réalisé dans 18 stations par traitement chaque semaine en juin et juillet 2009 et 2010 à l'aide de filets entomologiques. Les résultats ont montré que les rendements étaient similaires dans tous les traitements. La diversité et le temps de résidence des ennemis naturels étaient également similaires dans tous les types d'aménagement. Pour les ravageurs, seuls les thrips démontraient une abondance plus faible dans les bandes alternées. Les coccinelles étaient plus abondantes dans les bandes de 18 m une semaine après le pic d'infestation des pucerons. Les parasitoïdes Platygastriidae étaient plus abondants dans les bandes alternées. Le ratio thrips/*Orius* était moins élevé (meilleur contrôle) dans les bandes alternées pour les deux années et moins élevé pour les pucerons/coccinelle dans les bandes de 18 m en 2009 durant la dernière semaine. Ces résultats montrent que la présence de bandes alternées peut favoriser la présence de certains ennemis naturels et améliorer leur réponse aux populations de ravageurs. Les résultats ont également montré que le ratio ravageurs/ennemi est un indice plus approprié pour évaluer le niveau de contrôle des ravageurs. Cette étude à grande échelle permettra d'orienter des stratégies de lutte mieux adaptées pour le contrôle de ravageurs en grandes cultures.

Mots clés : Bandes alternées, ravageurs, ennemis naturels, thrips, *Orius*, ratio ravageurs/ennemi, pucerons, coccinelles, Platygastriidae

3.2 INTRODUCTION

Les ravageurs les plus dommageable dans le blé en Amérique du Nord sont la cécidomyie orangée du blé *Sitodiplosis mosellana* Gehin (Diptera : Cecidomyiidae), la mouche de Hesse *Mayetiola destructor* (Say) (Diptera : Cecidomyiidae), la légionnaire uniponctuée *Mythimna unipuncta* Haworth (Lepidoptera : Noctuidae), les thrips (Thysanoptera) et quatre espèces de pucerons (Hemiptera : Aphididae) dont le puceron du maïs *Rhopalosiphum maidis* Fitch, le puceron bicolore des céréales *Rhopalosiphum padi* (L.), le puceron des céréales et du rosier *Methopolophium dirhodum* (Walker) et le puceron des céréales *Sitobion avenae* (F.) (Buntin *et al.*, 2007; MAAARO, 2013a; Rioux *et al.* 2012). À titre d'exemple, en termes de dommages, la cécidomyie orangée du blé peut occasionner des pertes de rendement importantes au Canada. En 1983, elle aura causé 30% de dommages en moyenne, causant des pertes économiques de 30 M \$ (Olfert *et al.*, 1985). Les pucerons, en plus des dommages causés par la ponction de la sève, peuvent transmettre le virus de la jaunisse nanisante de l'orge (MAAARO, 2013a; Rioux *et al.*, 2012). C'est le cas notamment de *R. padi* et *S. avenae* (Buntin *et al.*, 2007). Au Québec, avec les changements climatiques, on prévoit l'augmentation des températures, des pluies et une diminution de la période de gel (Desjarlais *et al.*, 2010). Ce phénomène risque de permettre dans un avenir plus ou moins rapproché à de nouveaux insectes de faire des ravages dans les régions plus au nord, ou de permettre à d'autres d'effectuer un cycle complet sans avoir besoin de migrer (Gagnon *et al.*, 2012). Ce pourrait être le cas par exemple de la légionnaire uniponctuée qui passe l'hiver dans des régions tropicales et subtropicales et migrent vers le nord au printemps (Gavloski et Meers, 2011) ou pour la mouche de Hesse, où la limite nord se situe au sud du Québec (Buntin *et al.*, 2007).

Bien que l'utilisation des insecticides puisse être efficace pour une vaste gamme de ravageurs, ces produits peuvent causer d'autres problèmes. Outre les effets néfastes pour l'environnement, ces produits peuvent causer l'apparition de résistance chez les insectes, dont les thrips (Immaraju *et al.*, 1992; Zhao *et al.*, 1995) et la mortalité des ennemis naturels utiles au contrôle des insectes ravageurs (Dowell, 1997; Michaud, 2003; Pietrantonio et Benedict, 1999). Il est donc nécessaire d'utiliser des nouvelles méthodes aidant à contrôler les

ravageurs. L'aménagement en bandes alternées est un exemple de méthode culturale impliquant la croissance en alternance d'une ou plusieurs cultures, assez espacées pour éviter qu'il y ait nuisance entre les plants, mais assez rapprochées pour permettre des interactions agronomiques entre les plants (Vandermeer, 1989). L'aménagement en bandes alternées permet la conservation des sols par la présence d'autres cultures durant une même année qui favorisent une meilleure rétention d'eau et donc une meilleure conservation de l'humidité du sol ainsi qu'une diminution de l'érosion de l'ensemble du champ (Gao *et al.*, 2009; Kaij, 1994). Cette diminution de l'érosion permet de diminuer la perte des éléments nutritifs (Li *et al.*, 2001), de la matière organique et des microorganismes (Kaij, 1994), ainsi que l'augmentation des rendements (Carman, 2005; Francis *et al.*, 1986; Li *et al.*, 2001). Des études ont également permis de constater que l'aménagement en bandes alternées pouvait exercer un certain contrôle sur les ravageurs par l'augmentation d'ennemis naturels et l'augmentation du taux de parasitisme (Ma *et al.*, 2007; Robert *et al.*, 2002; Wang et Ba, 1998). La présence d'ennemis naturels est un élément important pour l'équilibre d'un système (Altieri et Nicholls, 2004). Ceux-ci peuvent permettre le maintien des populations de ravageurs sous le seuil économique et assurer l'équilibre du système (Landis *et al.*, 2000).

La présente étude vise à déterminer si l'aménagement en bandes alternées de grande largeur (18 m et 36 m), adaptée à la machinerie agricole moderne peut contribuer au contrôle des insectes ravageurs. Notre hypothèse de travail est que la pression phytosanitaire exercée par la guildes des ravageurs du blé sera moindre dans les bandes alternées que dans les blocs de monoculture. Notre première prédiction est que les ennemis naturels seront plus abondants et diversifiés dans les bandes alternées que dans les blocs de monoculture. Notre seconde prédiction est que les ravageurs seront moins abondants dans les bandes alternées, en raison de la présence d'une guildes d'ennemis naturels plus importante. Notre dernière prédiction est que le rendement sera supérieur dans les bandes alternées que dans les blocs de monoculture.

3.3 MATÉRIEL ET MÉTHODE

Description du site

L'échantillonnage a été effectué sur une ferme à Les Cèdres, en Montérégie (45°19'N et 74°06 O). L'agriculture est de type biologique depuis une dizaine d'années. Le sol est de type argileux Ste-Rosalie. Les bandes alternées ont été mises en place en 2006. L'ensemble des parcelles à l'étude sont en rotation avec du blé, de la vesce, du maïs et du soya (dans cet ordre). La vesce est le précédent cultural du maïs et agit en tant qu'engrais vert. Le soya est le précédent cultural du blé. Les blocs témoins subissent aussi une rotation dans le même ordre, de sorte que le précédent cultural est toujours le même pour les trois types d'aménagements. Les rangs sont orientés nord-sud, les plants bénéficient donc du soleil durant toute la journée. Le travail du sol est minimal (en surface).

Aménagement du site

Pour l'étude, trois types d'aménagements ont été mis en place, soit deux largeurs de bandes alternées de 18 et 36 mètres de large. La largeur des bandes a été choisie en fonction de la largeur de la machinerie agricole moderne, ce qui facilite l'implantation du système sur de grandes surfaces. L'utilisation d'un système de guidage par GPS facilite aussi la mise en place des parcelles. Les blocs témoins servant à titre de monoculture étaient de 180 mètres de large. Tous ces traitements font 1 km de long. Pour chaque type d'aménagement, il y avait deux répétitions, pour une superficie totale de 468 000 m².

Échantillonnage

Le filet entomologique a été utilisé dans la culture du blé afin d'évaluer l'abondance des insectes ravageurs et des ennemis naturels. Trois transects de 6 stations ont été mis en place dans l'orientation nord-sud pour chaque traitement. Chaque station sur un transect était espacée de 10 m. L'espacement entre les transects a été déterminé selon la largeur des bandes. Un transect a d'abord été déterminé au centre de chaque parcelle de blé pour chacun des aménagements. Les deux autres transects étaient situés au centre de la première moitié et au centre de la deuxième moitié de chaque parcelle de blé. L'échantillonnage a été réalisé à 250 m du bord du champ afin d'éviter l'effet de bordure. Pour chaque station, trois coups de filet

entomologique ont été effectués dans le blé en marchant. L'échantillonnage a été réalisé une fois par semaine durant l'été 2009 et 2010 (juin et juillet). Les données considérées étaient le nombre d'insectes (ravageurs et ennemis naturels) selon le traitement et le ratio ravageurs/ennemi naturel (ratio pucerons/coccinelle et ratio thrips/*Orius*). Le temps de résidence des ennemis naturels était également considéré. Les données prises en compte étaient le nombre de semaines avec présence d'ennemis naturels, de coccinelles et d'*Orius* selon le traitement. Pour la diversité, les données considérées étaient la diversité d'ennemis naturels (Shannon) selon le traitement. La formule était la suivante:

$$H' = - \sum p_i \log_2 p_i$$

Où

Σ = Ensemble des espèces ($i=1$)

p_i = proportion d'une espèce i par rapport au nombre total d'espèces

Les rendements ont été mesurés à l'aide d'un capteur de rendement intégré à la machine agricole, en 2009 et 2010. Les rendements ont été standardisés selon le taux d'humidité du capteur de rendement de la batteuse à 14%.

Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel Jump 10. Puisque l'abondance des insectes était dépendante du temps, des tests ANOVA à un critère (traitement) ont été réalisés pour l'ensemble de l'été et pour chaque semaine pour l'abondance des insectes, le ratio ravageurs/ennemi naturel et les rendements. Lorsque les données étaient significatives, des tests posthoc de type HSD ont été réalisés. Pour déterminer s'il y avait une différence entre la diversité d'ennemis naturels et les traitements, des tests de Kruskal-Wallis ont été réalisés. Pour déterminer s'il y avait une différence entre les traitements pour le temps de résidence des ennemis naturels (nombre de semaine où au moins un insecte a été retrouvé dans le blé), des tests de khi carré et Fisher ont été effectués (à l'aide du logiciel SAS 9.3).

3.4 RÉSULTATS

A - Abondance des ravageurs

L'abondance totale des différents groupes de ravageurs est présentée au tableau 3.1. À noter que l'abondance est fortement influencée par celle des thrips. Les thrips étaient le groupe le plus abondant pour les deux années et représentaient 70,33% et 53,39% des insectes identifiés dans le blé en 2009 et 2010 respectivement. En 2009, les résultats ont montré que l'abondance des ravageurs était moins importante dans les bandes de 18 m par rapport aux bandes de 36 m ($F_{2,5}=9,82; p<0,0482$) (figure 3.1). En 2010, l'abondance des ravageurs était similaire dans tous les traitements ($F_{2,5}=8,11; p<0,0617$) (figure 3.1). En 2009 et 2010, les analyses ont montré que l'abondance était similaire entre les traitements pour les collemboles (2009 : $F_{2,5}=2,24; p=0,2535$; 2010 : $F_{2,5}=2,90; p=0,1988$), les cicadelles (2009 : $F_{2,5}=2,24; p=0,2535$; 2010 : $F_{2,5}=7,44; p=0,0687$), les punaises ternes (2009 : $F_{2,5}=1,52; p=0,3488$; 2010 : $F_{2,5}=2,28; p=0,249$) et les cercopes (2009 : $F_{2,5}=0,64; p=0,5848$; 2010 : $F_{2,5}=1,73; p=0,3160$) (figure 3.2).

Thrips

Les thrips représentaient 74,02 % des ravageurs collectés en 2009 et 57,02 % en 2010 (tableau 3.1). À noter que les thrips possédant des bandes et roussissures sur les ailes ont été écartés des analyses afin de ne conserver que les thrips ravageurs. En 2009, il y avait une tendance à avoir moins de thrips dans les bandes de 18 m que dans les bandes de 36 m ($F_{2,5}=9,27; p=0,0519$) (figure 3.2). En 2010, il y avait moins de thrips dans les bandes alternées que dans les blocs ($F_{2,5}=31,87; p=0,0095$).

Pucerons (toutes les espèces confondues)

Les pucerons représentaient 10,28 % des ravageurs collectés en 2009 et 19,45 % en 2010 (tableau 3.1). En 2009, les résultats ont montré que les pucerons aptères étaient moins abondants dans les blocs que dans les bandes de 36 m ($F_{2,5}=17,46; p=0,0222$), tandis que les pucerons ailés était plus abondants dans les bandes de 18 m par rapport aux blocs ($F_{2,5}=11,18; p=0,0407$) (figure 3.2). Toujours en 2009, les pucerons ailés étaient plus abondants dans les bandes de 18 m par rapport aux blocs durant le pic d'infestation (le 21

juillet) ($F_{2,5}=36,60$; $p=0,0078$). En 2010, les résultats ont montré que l'abondance des pucerons aptères était similaire dans tous les traitements ($F_{2,5}=3,20$; $p=0,1800$), de même que l'abondance des pucerons ailés ($F_{2,5}=5,11$; $p=0,1079$). Cependant, l'abondance des pucerons ailés était plus importante dans les bandes de 18 m par rapport aux blocs durant le pic d'infestation (le 7 juillet) ($F_{2,5}=36,60$; $p=0,0078$). À noter que les analyses par espèce n'ont montré aucun résultat significatif.

***Trigonotylus sp* (Miridae)**

Les punaises *Trigonotylus* représentaient 3,05 % des ravageurs collectés en 2009 et 9,58 % en 2010 (tableau 3.1). L'abondance de la punaise du genre *Trigonotylus* était très variable, malgré un patron d'abondance similaire au cours du temps pour les deux années (figure 3.2). En 2009, l'analyse réalisée sur l'ensemble de l'été a montré que l'abondance était similaire dans tous les traitements ($F_{2,5}=5,82$; $p=0,0927$). L'analyse réalisée sur chacune des semaines a montré qu'en 2009, il y avait plus de punaises dans les blocs que les bandes alternées le 30 juin ($F_{2,5}=33,04$; $p=0,0090$) et plus dans les blocs que dans les bandes de 36 m le 28 juillet ($F_{2,5}=14,92$; $p=0,0276$). Cependant, il y avait plus de punaises dans les bandes de 18 m que les bandes de 36 m le 17 juillet ($F_{2,5}=12,52$; $p=0,0350$). En 2010, l'analyse sur l'ensemble de l'été a montré qu'il y avait une abondance plus importante dans les bandes de 18 m que dans les blocs ($F_{2,5}=13,48$; $p=0,0317$). L'analyse réalisée sur chacune des semaines a montré qu'il y avait plus d'individus dans les bandes de 18 m que dans les bandes de 36 m et les blocs le 4 juin ($F_{2,5}=169,00$; $p=0,0008$), le 17 juin ($F_{2,5}=11,11$; $p=0,0410$), le 7 juillet ($F_{2,5}=28,13$; $p=0,0114$) et le 17 juillet ($F_{2,5}=87,38$; $p=0,0022$). Seule la dernière semaine avant la récolte présentait une abondance moins importante dans les bandes de 18 m par rapport aux bandes de 36 m et aux blocs ($F_{2,5}=24,16$; $p=0,0141$).

B - Abondance des ennemis naturels

L'abondance globale des ennemis naturels était similaire dans tous les traitements pour l'année 2009 ($F_{2,5}=0,8142$; $p=0,5219$) et l'année 2010 ($F_{2,5}=4,9086$; $p=0,1132$) (figure 3.1). Cependant, durant l'année 2009, l'abondance était plus importante dans les bandes de 18 m que dans les blocs le 22 juin ($F_{2,5}=13,40$; $p=0,0319$) et plus dans les bandes de 18 m que dans les bandes de 36 m et les blocs le 28 juillet ($F_{2,5}=51,22$; $p=0,0048$) (figure 3.1). Certains

ennemis naturels avaient une abondance similaire dans tous les traitements. C'est le cas des punaises anthocorides *Orius* sp. (2009 : $F_{2,5}=0,41;p=0,6919$; 2010 : $F_{2,5}=0,44;p=0,6780$), des neuroptères (2009 : $F_{2,5}=2,04;p=0,2755$; 2010 : $F_{2,5}=0,11;p=0,8984$) et des parasitoïdes de pucerons (2009 : $F_{2,5}=6,33;p=0,0838$; 2010 : $F_{2,5}=0,22;p=0,8111$) (figure 3.3).

Platygastridae

Les Platygastridae représentaient 51,49 % des ennemis naturels collectés en 2009 et 40,35 % en 2010 (tableau 3.1). En 2009, les tests effectués sur les Platygastridae ont montré que sur l'ensemble de l'été, il n'y avait pas de différence significative entre les traitements ($F_{2,5}=6,41;p=0,0825$) (figure 3.3). Toutefois, ceux-ci étaient plus abondants dans les bandes de 18 m que les bandes de 36 m et les blocs ainsi que dans les bandes de 36 m que les blocs le 30 juin ($F_{2,5}=75,90;p=0,0027$) et le 15 juillet ($F_{2,5}=624,07;p=0,0001$). En 2010, les résultats ont montré qu'il y avait plus de Platygastridae dans les bandes de 18 m que dans les blocs ($F_{2,5}=19,13;p=0,0196$). L'abondance des Platygastridae était plus importante dans les bandes de 18 m par rapport aux blocs le 17 juin ($F_{2,5}=12,66;p=0,0345$).

Coccinelles

Les coccinelles représentaient 13,20 % des ennemis naturels collectés en 2009 et 12,20 % en 2010 (tableau 3.1). En 2009, le nombre de coccinelles était similaire d'un traitement à l'autre ($F_{2,5}=6,20;p=0,0859$) (figure 3.3). Le 28 juillet cependant, il y avait plus de coccinelles dans les bandes de 18 m que dans les bandes de 36 m et les blocs ($F_{2,5}=100,18;p=0,0018$). En 2010, l'abondance des coccinelles étaient similaire dans tous les traitements ($F_{2,5}=1,77;p=0,3107$). Toutefois, il y avait plus de coccinelles dans les bandes de 18 m que dans les bandes de 36 m et les blocs le 17 juillet ($F_{2,5}=45,53;p=0,0057$).

Araignées

Les araignées représentaient 6,20 % des ennemis naturels collectés en 2009 et 11,75 % en 2010 (tableau 3.1). En 2009, les résultats ont montré que l'abondance des araignées était similaire d'un traitement à l'autre pour l'ensemble de l'été ($F_{2,5}=0,32;p=0,7426$) (figure 3.3). En 2010, l'abondance des araignées était également similaire dans tous les traitements

($F_{2,5}=3,30;p=0,1446$). Toutefois, il y avait plus d'individus dans les bandes de 18 m que dans les blocs le 23 juin ($F_{2,5}=14,77;p=0,0280$) et le 22 juillet ($F_{2,5}=19,40;p=0,0192$).

***Nabis* sp.**

Les punaises du genre *Nabis* sp. représentaient 5,64 % des ennemis naturels collectés en 2009 et 4,77 % en 2010 (tableau 3.1). Les résultats ont montré qu'il n'y avait pas de différence d'abondance entre les traitements pour les punaises *Nabis* sp. pour l'ensemble de l'été 2009 ($F_{2,5}=6,64;p=0,0790$) et 2010 ($F_{2,5}=0,92;p=0,4869$) (figure 3.3). Toutefois, il y avait une plus grande abondance dans les blocs que dans les bandes alternées le 17 juillet 2009 ($F_{2,5}=12,25;p=0,0360$).

C - Abondance des syrphes adultes (pollinisateurs)

Les syrphes représentaient 6,20 % des ennemis naturels collectés en 2009 et 10,31 % en 2010 (tableau 3.1). Dans le cas des syrphes adultes, l'abondance était similaire dans tous les traitements pour l'ensemble de l'année 2009 ($F_{2,5}=4,90;p=0,1132$) (figure 3.3). Cependant, il y avait plus de syrphes dans les blocs que dans les bandes alternées le 17 juillet ($F_{2,5}=7,24;p=0,0011$) et le 21 juillet ($F_{2,5}=11,08;p<0,0001$). En 2010, il n'y avait pas non plus de différence sur l'ensemble des semaines ($F_{2,5}=3,00;p=0,1925$). Il est à noter que les larves prédatrices n'étaient pas assez nombreuses pour effectuer des analyses.

D - Diversité des ennemis naturels

Compte tenu que l'identification des ennemis naturels n'a pas été effectuée avec la même précision pour les deux années, seul l'indice de diversité de Shannon a donc été calculé pour l'ensemble des ennemis naturels (la famille, le genre ou l'espèce selon le groupe d'insectes). Les résultats ont démontré que l'indice de diversité était similaire dans tous les traitements pour l'année 2009 (Kruskal-Wallis=2,57; $p=0,2765$) et 2010 (Kruskal-Wallis=1,14; $p=0,5647$) (figure 3.4). À noter que les tests effectués par semaine n'ont révélé aucune différence significative ($P < 0,05$).

E - Temps de résidence des ennemis naturels

Les résultats ont montré qu'il n'y avait pas de différence significative entre les traitements en ce qui concerne le temps de résidence des ennemis naturels (nombre de semaines où au moins un individu a été observé) pour l'année 2009 (test de Fisher : $p=0,1363$) et 2010 (test de Fisher : $p=0,0729$) (figure 3.5). En 2009, le temps de résidence des coccinelles était plus important dans les bandes de 18 m que dans les bandes de 36 m (test de Fisher : $p=0,0426$). En 2010, le temps de résidence des coccinelles était similaire dans tous les traitements (Likelihood ratio=0,67; $p=0,7158$). Le temps de résidence d'*Orius* était similaire dans tous les traitements pour l'année 2009 (Likelihood ratio=1,73; $p=0,4206$) et 2010 (Likelihood ratio=4,28; $p=0,12$).

F - Ratio proies/prédateur

Le nombre de ravageurs disponible par ennemi naturel était similaire dans tous les traitements pour l'année 2009 ($F_{2,5}=0,26$; $p=0,7820$) et l'année 2010 ($F_{2,5}=6,41$; $p=0,0800$) (figure 3.6). En 2009 le nombre de thrips par *Orius* était toutefois plus élevé dans les blocs que dans les bandes alternées ($F_{2,5}=20,05$; $p=0,0184$). En 2010, le nombre de thrips par *Orius* était plus élevé dans les blocs que dans les bandes de 36 m ($F_{2,5}=11,56$; $p=0,0389$). En 2009, l'abondance de pucerons/coccinelle était plus élevée dans les blocs que dans les bandes alternées durant la dernière semaine, soit le 28 juillet ($F_{2,5}=295,27$; $p=0,0004$). En 2010, l'abondance de pucerons/coccinelle était similaire dans tous les traitements pour l'ensemble des semaines ($F_{2,5}=1,63$; $p=0,3311$).

G - Rendements

En 2009, il n'y avait pas de différences de rendement entre les différents aménagements ($F_{2,5}=2,5558$; $p=0,2249$). Le rendement moyen variait entre 3,64; 3,53 et 3,32 t/ha pour les bandes de 18 m, 36 m et les blocs respectivement. En 2010, comme en 2009, il n'y avait pas de différences de rendement entre les différents traitements ($F_{2,5}=1,0542$; $p=0,4501$). Le rendement moyen était de 2,9; 3,19 et 3,16 t/ha pour les bandes de 18 m, 36 m et les blocs respectivement.

3.5 DISCUSSION

Notre hypothèse stipulant que les bandes alternées vont réduire la pression phytosanitaire est partiellement confirmée. En ce qui a trait aux ravageurs (prédiction 1), la réponse est très variable, puisque les différents taxons sont soit non affectés, soit favorisés, soit défavorisés. En ce qui a trait aux ennemis naturels (prédiction 2), seuls les *Platygastridae* et les coccinelles sont positivement affectés par les bandes alternées, les autres groupes n'étant pas affectés. Les résultats majeurs portent sur les ratios proies/prédateur. Il apparaît que les ratios de thrips/*Orius* et de pucerons/coccinelles sont plus importants dans les blocs de monoculture que dans les bandes alternées indiquant un plus grand potentiel de contrôle dans les bandes. Finalement, les rendements sont similaires dans les blocs que dans les bandes alternées (prédiction 3).

Ravageurs

Tel que mentionné précédemment, notre hypothèse stipulant que les bandes alternées vont réduire la pression phytosanitaire est partiellement confirmée (prédiction 1). Le groupe non affecté par le dispositif en bandes comprend les collemboles, cicadelles, punaises ternes et cercoptes. Dans certains cas, les espèces n'étaient probablement pas associées au blé, dont les cercoptes (espèces non identifiées). Dans d'autres cas, l'alimentation généraliste de ces ravageurs pourrait expliquer ces résultats. En effet, dans le cas de la punaise terne, cette espèce très généraliste (Haddad *et al.*, 2011) s'attaque aux céréales (Buntin *et al.*, 2007; Wise *et al.*, 2000), cultures fruitières, légumières (MAAARO, 2013b) et mauvaises herbes (Esquivel et Mowery, 2007). Dans le cas des collemboles, le groupe serait plutôt influencé par les conditions du sol (y compris les collemboles aériens) (Ponge *et al.*, 1993).

Les groupes de ravageurs favorisés par la présence de bandes alternées comprennent les punaises *Trigonotylus* (2010), les pucerons aptères et ailés pour l'ensemble de l'été 2009 et les pucerons ailés durant le pic d'infestation du puceron pour les deux années. Selon l'hypothèse de l'atterrissage approprié, lorsque l'insecte se déplace, il ne fait pas de différence entre une plante hôte et non hôte, mais serait guidé par certains stimuli (Finch et Collier, 2000). Par exemple, le choix d'atterrissage des pucerons serait provoqué par la présence d'une certaine longueur d'onde, la couleur et les odeurs (Kennedy *et al.*, 1961; Teulon et

Penman 1992). Les résultats montrent qu'il n'y a pas de pics de pucerons ailés au printemps. L'abondance de pucerons durant tout l'été est plutôt faible. Cependant, un pic d'aillés est observé à la fin de l'été. Or, les pucerons sont plutôt attirés par de jeunes plants (Fralav, 2006), ce qui ne correspond pas au stade du blé au moment où il y a un pic d'abondance (le stade est celui de maturation). Ces résultats pourraient s'expliquer par la présence d'une deuxième culture hôte à proximité, soit le maïs, culture intégrante des bandes alternées. En effet, les 4 espèces de pucerons s'attaquent également au maïs (Asin et Pons, 2001; Bourguet *et al.*, 2002; Kuo *et al.*, 2006; Lumbierres *et al.*, 2004; Rauschen *et al.*, 2009; Wheeler, 2001), une culture adjacente au blé dans le système en bandes. Ce qui signifie que dans la mesure où une deuxième culture hôte est présente dans le système, la migration des pucerons pourrait être facilitée. Le blé, pour les 4 espèces de pucerons, pourrait dans de telles circonstances constituer un réservoir de ravageurs pour le maïs, comme en conclut Fabre *et al.* (2005). Le maïs pourrait également agir en tant que barrière physique en empêchant les pucerons de sortir des bandes de blé (Finch et Collier, 2011; Johnson, 1969; Lewis et Stevenson, 1966). Une autre possibilité est que le microclimat (humidité et chaleur) formé par l'aménagement en bandes alternée soit favorable au développement des pucerons, puisque la dynamique des pucerons est dépendante de la température et de l'humidité relative (Aheer *et al.*, 2007 et 2008; Nasir et Ahmad, 2001; Wains *et al.*, 2010). Pour le cas des punaises du genre *Trigonotylus* (*Trigonotylus coalestialium* et *Trigonotylus ruficornis*), celles-ci auraient pu également être influencées par la présence des bandes de maïs. En effet, *T. ruficornis* est considérée comme une espèce spécialiste des graminées (Mangan *et al.*, 1982), tandis qu'une étude a montré que *T. coalestialium* pouvait être présente de manière abondante dans la culture du maïs (Rauschen *et al.*, 2009).

Le seul groupe défavorisé par la présence de bandes alternées était les thrips. La dispersion naturelle des thrips est grandement influencée par les courants d'air (Lewis, 1997; Gatehouse, 1997). Ces derniers auraient toutefois un certain contrôle dans le choix d'atterrissage (Kirk, 1984; Lewis, 1997). Le choix d'atterrissage serait influencé par la couleur des parcelles et les odeurs (Kirk, 1984; Kirk, 1985; Teulon, 1988; Teulon et Penman 1992), tout comme les pucerons. Il est donc fort probable que les parcelles de plus grandes

tailles soient plus attirantes que les parcelles de plus petites tailles, ce qui confirmerait l'hypothèse de l'atterrissage approprié pour les thrips.

Ennemis naturels

Notre hypothèse stipulant que la présence de bandes alternées va favoriser la présence d'une abondance plus importante d'ennemis naturels (prédiction 2) est en partie confirmée. Les résultats ont démontré que la plupart des ennemis naturels ne sont pas affectés par la présence de bandes alternées. C'est le cas entre-autres des araignées, pucerons parasités, punaises *Orius*, punaises *Nabis* et neuroptères. Dans certains cas, l'alimentation généraliste pourrait être en cause, comme pour les araignées (Triplehorn *et al.*, 2005) et les punaises *Nabis* sp. (Lattin, 1989). Ces dernières seraient d'ailleurs plus attirées par les composés volatiles dégagés par les plantes que par les odeurs dégagés par les proies (Nguyen, 2008). Dans d'autres cas, il est possible que l'abondance insuffisante de proie (pour les neuroptères) ait été un facteur limitant. En effet, la valeur adaptative d'un animal dépend de la quantité et qualité de sa diète (Hassell et Southwood, 1978). Or, l'abondance des pucerons était plutôt faible (< 1 puceron/plant). Dans d'autres cas, il est possible que ce soit l'abondance insuffisante d'hôtes, comme pour les parasitoïdes de pucerons. Il est à noter d'ailleurs que tous les ravageurs observés étaient loin du seuil d'intervention, soit moins d'un insecte par observation (chaque observation comprenant environ 3000 plants).

Seules les coccinelles et les Platygastriidae étaient favorisés de manière ponctuelle par la présence de bandes alternées durant les deux années. Dans le cas des coccinelles, l'abondance plus importante deux années de suite, une semaine après le pic d'infestation du puceron serait compatible avec l'étude réalisée sur les coccinelles à 7 points montrant que les coccinelles étaient attirées par les composés volatiles des plants infestés ou précédemment infestés par le puceron (Ninkovic *et al.*, 2001). Il est donc possible que les coccinelles suivent la migration des pucerons dans les bandes. Dans le cas des Platygastriidae, il est intéressant de constater que ceux-ci étaient plus abondants dans les bandes alternées durant les deux années. Ces résultats pourraient démontrer que la présence de bandes alternées (un milieu plus diversifié qu'une monoculture) peut favoriser chez certains insectes une abondance plus importante par un plus grand nombre de refuges, nourriture alternative et de sites pour la reproduction

(Altieri et Letourneau, 1982; Altieri et Nicholls, 2004). Il est également intéressant de noter que le patron d'abondance montre que, plus la largeur des bandes est petite et plus l'abondance des *Platygastridae* est importante. La présence de bandes adjacentes plus hautes favorise une meilleure conservation de l'humidité ainsi que des températures moins extrêmes en bordure, créé par l'ombrage, ce qui favorise l'établissement de parasitoïdes (Tonhasca, 1993). La distance à parcourir pour ces insectes est également moins importante, ce qui pourrait également faciliter les déplacements dans les différentes cultures du système en bandes.

Syrphes adultes (pollinisateurs)

Les pollinisateurs (les syrphes dans ce cas-ci), étaient plus abondants dans les blocs témoins, ce qui est contraire à nos attentes, puisqu'une plus grande diversité permet d'augmenter les chances d'établissement des ennemis naturels (Altieri et Nicholls, 2004). De plus, certaines études menées sur les syrphes mentionnent que l'abondance de pucerons (Smith 1976) et la présence de miellat de certains pucerons (Budenberg et Powell, 1992) seraient des facteurs influençant l'abondance de syrphes. Or, l'abondance de pucerons était plus importante dans les bandes alternées. Par contre, si certains syrphes semblent attirés par la présence de pucerons ou de miellat, certaines espèces seraient plutôt orientées vers les plantes sauvages que vers les pucerons (Smith, 1976). Il est possible que les blocs témoins possèdent des plantes sauvages d'avantage attirantes pour les syrphes, ce qui aurait pu expliquer ces résultats. La réponse des syrphes dépend aussi grandement de l'espèce (Budenberg et Powell, 1992; Smith, 1976; Vidal, 1997), et plusieurs autres facteurs peuvent influencer la réponse des syrphes, dont la dispersion, les conditions du microclimat et la présence d'autres ennemis naturels (Vidal, 1997).

Diversité des ennemis

De manière générale, dans la plupart des cas, un paysage plus complexe est associé à une plus grande abondance et diversité d'ennemis naturels (Bianchi *et al.*, 2006; Altieri et Nicholls, 2004). L'augmentation de la diversité végétale permet également un meilleur contrôle biologique par les ennemis naturels à une échelle plus ou moins grande (Bianchi *et al.*, 2006; Gardiner *et al.*, 2009; Roschewitz *et al.*, 2005; Thies *et al.*, 2003). Cette diversité

végétale permet d'avoir accès à plus de nourriture alternative (pollen et nectar), ce qui permet d'augmenter l'activité, la longévité et la fécondité des prédateurs et parasitoïdes (Hogg *et al.*, 2011; Wäckers *et al.*, 2008). Maisonhaute et Lucas (2011) ont démontré que les zones cultivées (autres que le maïs) étaient positivement associées avec une augmentation de la diversité du paysage, tandis que de nombreuses études mentionnent que la diversité du paysage est souvent associée avec une augmentation de la diversité des ennemis naturels. Nos résultats ont toutefois démontré que la diversité d'ennemis naturels était similaire dans tous les traitements. Nos résultats ne sont toutefois pas tout à fait en désaccord avec ceux de Maisonhaute et Lucas (2011). En effet, leurs résultats ont également démontré que l'abondance de certains groupes n'était pas toujours influencée de manière positive par l'augmentation de la diversité des cultures (même s'il s'agissait de la même famille, dont les coccinelles), alors que certains ennemis naturels étaient peu influencés par la présence d'autres cultures (chrysopes, hémérobes et larves de syrphes).

Temps de résidence des ennemis

Les résultats ont montré que le temps de résidence des ennemis naturels était similaire entre les différents types d'aménagements. Le problème majeur dans la plupart des systèmes agricoles est l'incapacité des ennemis naturels à maintenir une abondance viable permanente (Bianchi *et al.*, 2006; Thies et Tschardtke, 1999). Par exemple, certains insectes, tels les coccinelles, ont besoin de zones non cultivées afin d'effectuer leur hibernation (Bianchi et Van der Werf, 2003). Ces insectes dépendent donc des éléments du paysage (Maisonhaute *et Lucas*, 2011). Par contre, l'abondance de nourriture pourrait également être un facteur influençant positivement les ennemis naturels à rester en champ. Les résultats obtenus sur les coccinelles en 2009 pourraient en être un exemple. En effet, en 2009, les résultats ont montré que le temps de résidence de ce groupe d'ennemis naturels était plus élevé dans les bandes de 18 m par rapport aux bandes de 36 m, alors que la présence de pucerons était plus importante dans les bandes alternées de 18 m durant cette même année. Ces résultats concordent d'ailleurs avec l'étude de Ninkovic *et al.* (2001), qui a démontré que les coccinelles à 7 points étaient attirées par les composés volatiles des plants infestés ou précédemment infestés par les pucerons. La présence d'autres bandes dans le système pourrait également permettre aux coccinelles de rester dans le champ par la présence de

pucerons et de nourriture alternative lorsque la nourriture présente ne comble pas les besoins des coccinelles.

Ratio proies/prédateur

Les résultats majeurs de notre étude portent plutôt sur les ratios proies/prédateur. Il apparaît que les ratios de thrips/*Orius* et de pucerons/coccinelles sont plus faibles dans les bandes alternées, indiquant un potentiel de contrôle plus élevé dans un système en bandes. En effet, l'abondance des thrips (*Frankliniella occidentalis* et autres espèces) dépendrait surtout des punaises du genre *Orius* (Boissot, 1998). Cette idée a été étudiée avec *Orius insidiosus* qui attaque les larves et adultes de thrips dans les champs de poivrons (*F. occidentalis*, *F. tritici* et *F. bispinosa*) (Funderburk *et al.* 2000). Les résultats ont montré que le prédateur était efficace à contrôler les thrips lorsqu'il y avait un ratio de 1 :200 et une quasi-extinction avec un ratio de 1 :40. Notre étude a montré que le ratio en punaises *Orius* n'était pas assez élevé pour effectuer un contrôle efficace en 2009, comparativement aux bandes alternées (1 :484 dans les blocs, 1 :207 pour les bandes de 36 m et 1 :242 pour les bandes de 18 m), où un contrôle aurait pu être exercé. En 2010, malgré la faible abondance de punaises *Orius*, l'abondance de ces punaises était suffisante pour causer la quasi-extinction des thrips dans les bandes alternées (1 :52 dans les bandes de 18 m et 1 :24 dans les bandes de 36 m), comparativement à un contrôle possible dans les blocs (1 :226). Il est possible que les punaises restent tout de même dans le système en bandes alternées dans les bandes adjacentes, comme le soya ou le maïs, deux cultures reconnues pour abriter des *Orius* (Butler et O'Neil, 2006; Dicke et Jarvis, 1962; Isenhour *et al.*, 1989; Rudledge *et al.*, 2005). La présence de nourriture alternative dans les autres bandes (Corey *et al.*, 1998; Cucozza *et al.*, 1997) aurait pu réduire le mouvement de la punaise *Orius*, comme l'a démontré Skirvin *et al.* (2007) sur *Orius laevigatus* (Fieber).

Dans le cas des coccinelles, une étude menée sur la coccinelle *Nephus includens* a montré que pour exercer un contrôle efficace, un ratio de 1 :20 (coccinelle/pucerons) devrait être utilisé comme moyen de lutte augmentative contre le puceron *Aphis gossypii* (Bayoumy, 2011). Bien que les ratios puissent être différents d'une espèce à l'autre, ce ratio peut tout de même être utilisé comme point de référence. Notre étude a montré que le ratio en coccinelles

était assez élevé pour assurer un contrôle dans les bandes alternées (ratio < 1 :5) durant la dernière semaine de l'année 2009, une semaine après le pic d'infestation du puceron. Le contrôle était cependant moins certain pour les blocs (environ 1 :20). En 2010, aucun contrôle n'était possible pour l'ensemble des semaines, ni aucune semaine particulière, ce qui concorde avec les résultats obtenus pour les pucerons aptères et ailés pour l'ensemble de l'année 2010. Il est possible que l'abondance de proies disponibles influence l'abondance de coccinelles dans les parcelles. La présence de nourriture pourrait donc être un facteur déterminant. La présence de bandes alternées pourrait permettre aux coccinelles de rester à l'intérieur du champ dans un contexte où la présence de proies alternative est disponible (Altieri et Letourneau, 1982; Powell, 1986) dans les bandes adjacentes. Les bandes adjacentes pourraient jouer le rôle de cultures sources pour les ennemis naturels (Corbett et Plant, 1993; Pulliam, 1988), comme les coccinelles. La proximité des cultures pourrait aider à assurer un meilleur contrôle en permettant une réponse plus rapide (Labrie, 2008).

Rendements

Finalement, notre troisième hypothèse prédisant que les rendements seraient plus importants dans les bandes alternées a été réfutée (prédiction 3). En effet, les résultats ont montré que les rendements étaient similaires dans les blocs et les bandes alternées. Certaines études montrent que la présence importante de ravageurs peut affecter les rendements (Polaszek et Delvare, 2000; Traore *et al.*, 2011). Cependant, aucune différence n'a été notée pour les deux années. Il est possible que l'abondance des ravageurs durant les deux années n'était pas assez importante pour causer des dommages menant à une diminution des rendements. Par contre, à plus long terme, la présence plus abondante de certains ennemis naturels risque de causer moins de dommages aux cultures et donc aux rendements, puisqu'une diversité végétale plus grande permet un meilleur équilibre et une plus grande stabilité face à l'augmentation de ravageurs (Altieri et Nicholls, 2004). Cette diversité joue un rôle important dans l'activité, la longévité et la fécondité des prédateurs et parasitoïdes (Hogg *et al.*, 2011; Wäckers *et al.*, 2008), puisqu'elle permet d'avoir accès à plus de nourriture et de proies alternatives, de refuges pour l'hiver et des sites pour la reproduction (Altieri et Letourneau, 1982; Altieri et Nicholls, 2004).

Conclusion

Plusieurs ouvrages témoignent du potentiel des ennemis naturels dans la lutte biologique (DeBach et Rosen, 1991; Hajek, 2004; Jervis, 2007; Vincent *et al.*, 2007). Cependant, les études sont presque toujours réalisées à petite échelle. Cette étude aura permis de démontrer que l'aménagement en bandes alternées n'influence pas l'abondance des ravageurs dans le blé, sauf peut-être pour les thrips où ceux-ci semblent défavorisés. La présence de bandes alternées n'influence pas tous les ennemis naturels de manière ponctuelle. Les plus susceptibles d'être influencés positivement par la présence des bandes sont les coccinelles et les Platygastriidae. Puisque la présence des ennemis naturels semble dépendre de plusieurs facteurs dont la biologie des insectes, la présence de nourriture ou d'hôtes (Altieri et Nicholls, 2004; Ninkovic *et al.*, 2001), il sera important d'en tenir compte lors d'un futur aménagement de ce genre, afin d'assurer un système adéquat adapté au contexte local. Les ratios ravageurs/ennemi ont démontré un meilleur indice de contrôle que l'abondance des ennemis naturels. Il sera donc important de prendre en compte les ratios qui peuvent démontrer la capacité d'un certain contrôle, malgré une faible abondance, comme l'a démontré le ratio thrips/*Orius* et le ratio pucerons/coccinelle. Cette étude à grande échelle permettra d'orienter des stratégies de lutte mieux adaptées pour le contrôle de ravageurs en grandes cultures.

Tableau 3.1- Abondance totale des différents groupes de ravageurs et ennemis naturels pour l'année 2009 et 2010.

Ravageurs	2009				2010			
	18 m	36 m	Bloc	Total	18 m	36 m	Bloc	Total
Collembola (Symphypleona)	1139	704	1659	3502	71	56	40	167
Hemiptera, Cercopidae	8	2	8	18	69	19	25	113
Hemiptera, Cicadellidae	91	86	147	324	838	403	176	1417
Hemiptera, Aphididae (aptères)	1052	1298	656	3006	1008	873	504	2385
Hemiptera, Aphididae (aîlés)	90	44	21	155	80	69	48	197
Hemiptera, Miridae <i>L. lineolaris</i>	6	18	21	45	28	61	66	155
Hemiptera, Miridae <i>Trigonotylus sp.</i> (adultes)	412	225	300	937	567	384	320	1271
Thysanoptera, Thrips	6358	8785	7613	22756	1736	1546	4286	7568
Ennemis naturels								
Aranea	27	28	36	91	54	29	23	106
Coleoptera, Coccinellidae	116	61	36	213	46	34	30	110
Hemiptera, Anthicoridae, <i>Orius sp.</i>	17	13	20	50	33	20	20	73
Hemiptera, Nabidae, <i>Nabis sp.</i>	12	26	53	91	12	6	25	43
Hemiptera, Pentatomidae, <i>Podisus sp.</i>	1	2	1	4	4	3	4	11
Hymenoptera, Ichneumonoidea	88	79	54	221	21	31	38	90
Hymenoptera, Platygasteridae	427	246	158	831	207	103	54	364
Neuroptera	7	3	2	12	4	3	5	12
Diptera, Syrphidae (larves)	0	1	0	1	0	0	0	0
Pollinisateurs								
Diptera, Syrphidae (adultes)	5	21	74	100	35	28	30	93

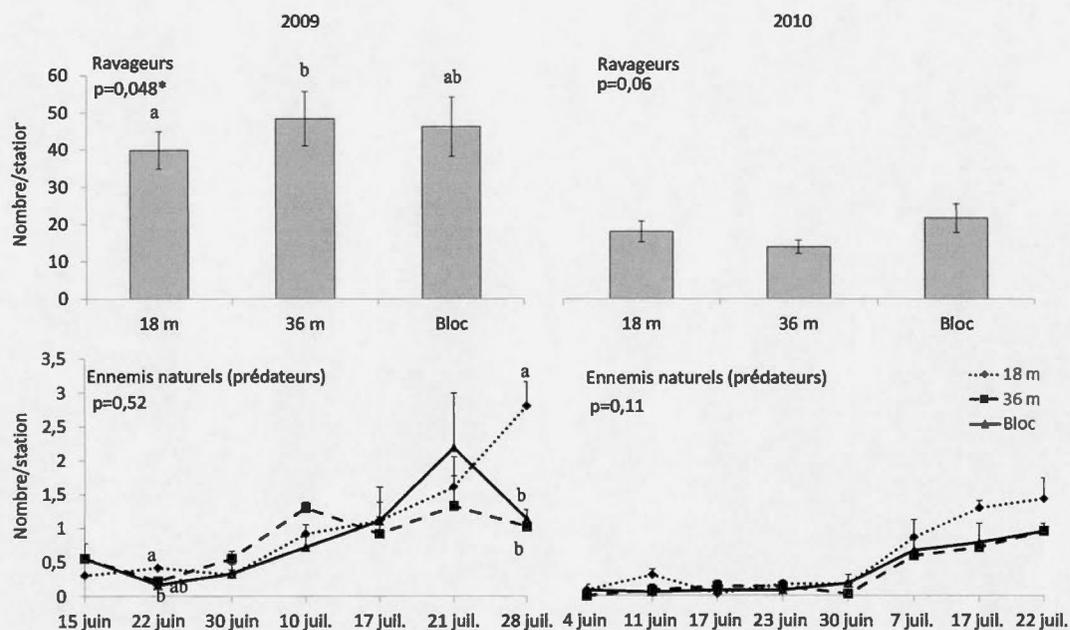


Figure 3.1- Abondance de ravageurs et ennemis naturels (prédateurs) selon le type d'aménagement pour l'été 2009 et 2010 (moyenne \pm erreur type). Tests ANOVA à un critère réalisés sur l'ensemble de l'été et chacune des semaines. Les lettres présentent les différences suite au test HSD.

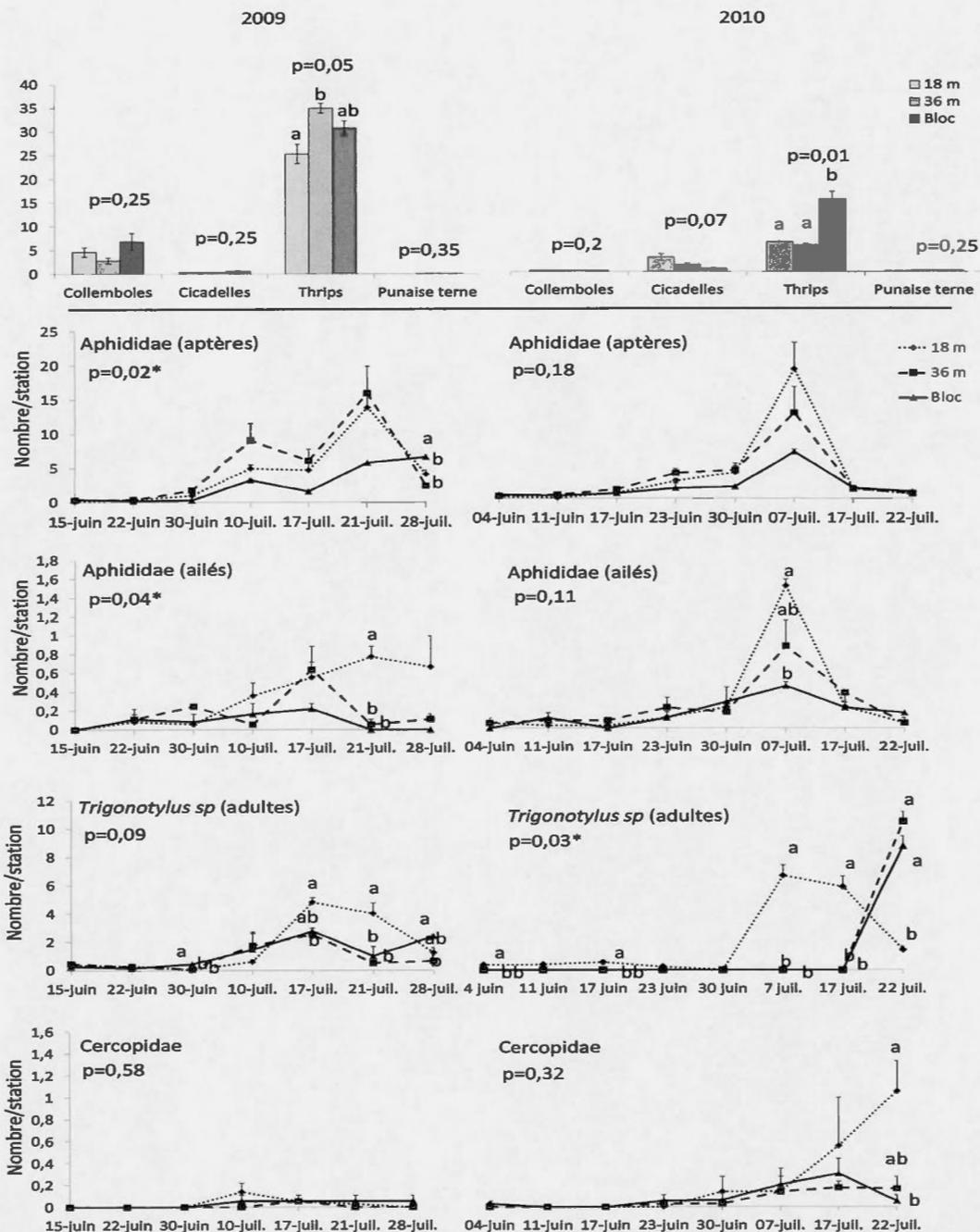


Figure 3.2- Abondance (nombre moyen/station) des différents groupes de ravageurs selon le type d'aménagement pour l'année 2009 et 2010 (moyenne \pm erreur type). Les lettres présentent les différences significatives identifiées par le test HSD. L'abondance importante de thrips explique la différence des résultats globaux et par ravageur.

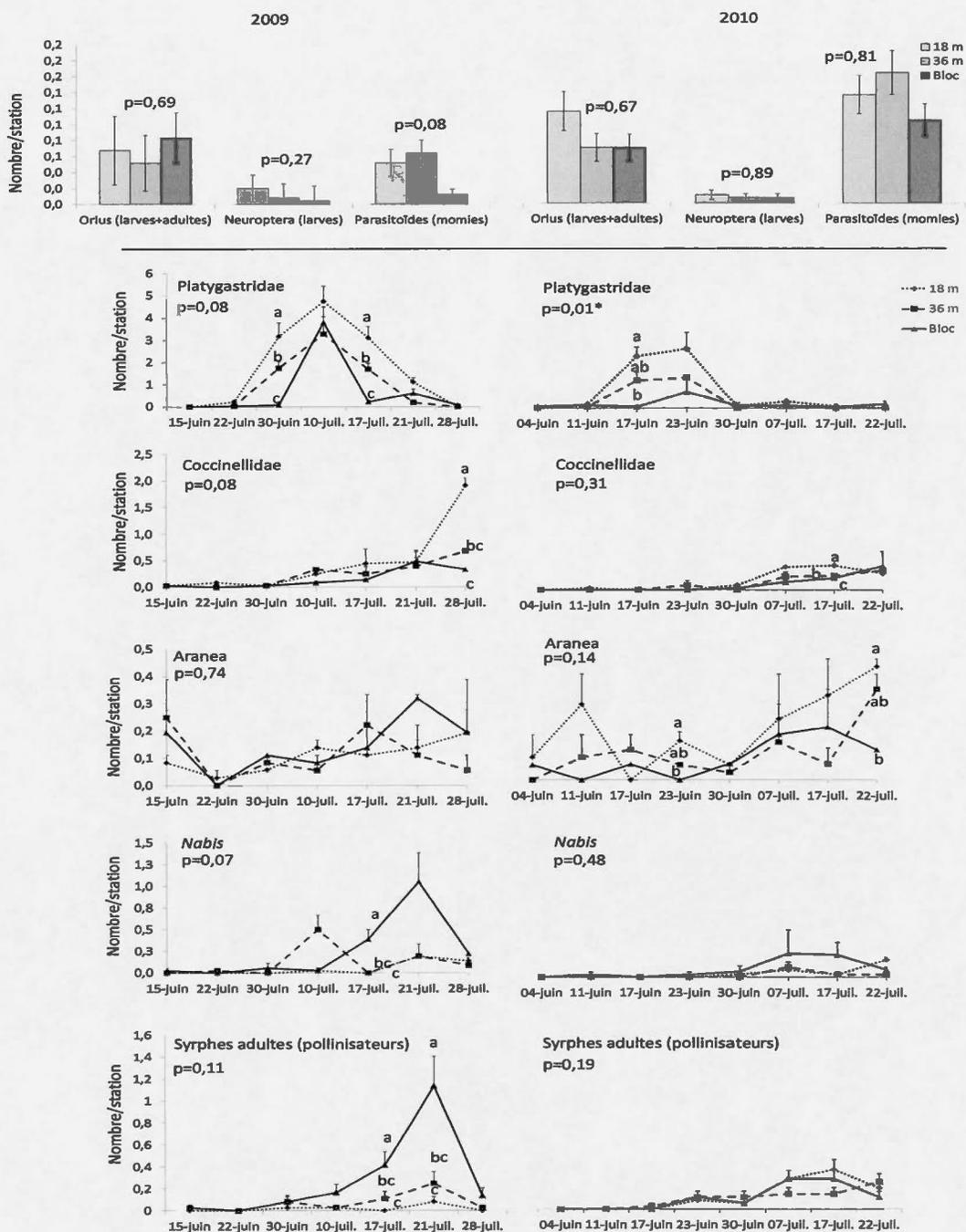


Figure 3.3- Abondance (nombre moyen/station) des différents groupes d'ennemis naturels selon le type d'aménagement pour l'année 2009 et 2010 (moyenne \pm erreur type). Les lettres présentent les différences significatives identifiées par le test HSD.

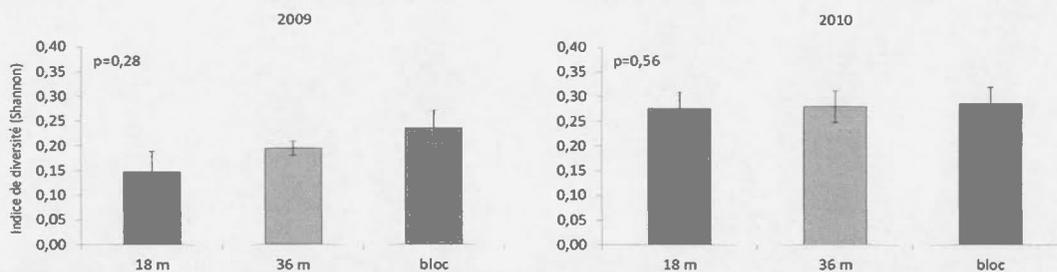


Figure 3.4- Indice de diversité des ennemis naturels (Shannon) selon le traitement pour l'année 2009 et 2010 (moyenne \pm erreur type). Test Kruskal-Wallis.

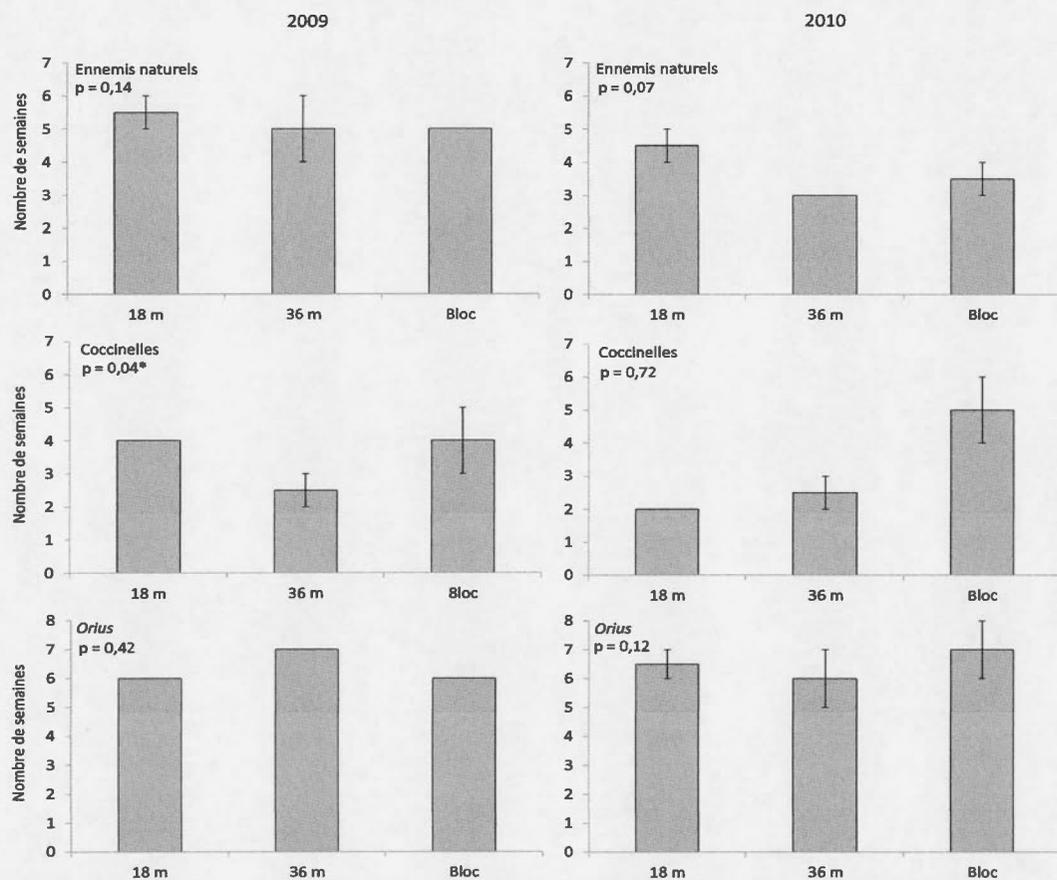


Figure 3.5- Temps de résidence des prédateurs selon le traitement (moyenne \pm erreur type). Le temps de résidence implique le nombre de semaine moyen où le groupe d'insecte est observé en champ.

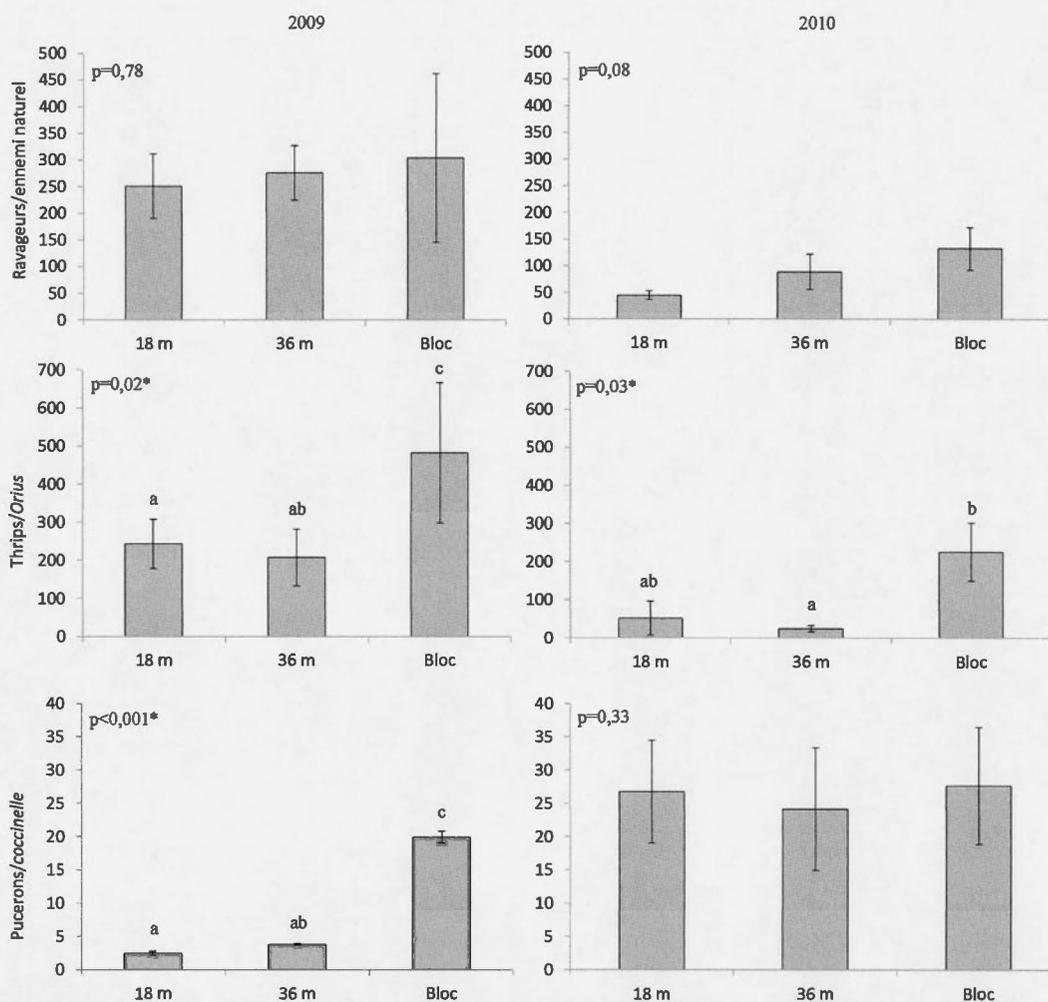


Figure 3.6- Nombre de ravageurs disponibles par ennemi naturel (obtenu par le ratio ravageurs/ennemi) pour l'ensemble des ennemis naturel et pour chacun des groupes (moyenne \pm erreur type). Le ratio du nombre de ravageurs/ennemi naturel a permis d'obtenir le nombre de ravageurs qui peuvent être consommés par ennemi naturel. Tests ANOVA à un critère pour l'ensemble de l'été 2009 et 2010 et pour la semaine 7 pour le graphique pucerons/coccinelle 2009. Les lettres présentent les différences identifiées par le test HSD.

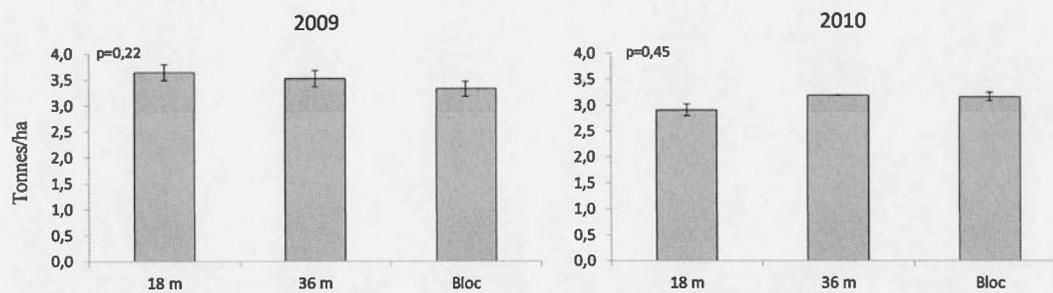


Figure 3.7- Rendements (ANOVA à un critère) : Rendements (quantité de blé récoltée sur une surface donnée en tonnes/ha) selon le traitement pour l'année 2009 et 2010 (moyenne \pm erreur type)

4. CONCLUSION GÉNÉRALE

Notre étude s'est penchée sur la possibilité d'aménager des bandes alternées en grandes cultures, dans une optique de lutte contre les insectes ravageurs du blé. La différence entre notre système et la plupart des systèmes étudiés précédemment venait de la taille des bandes, puisque que les largeurs de celles-ci étaient adaptées à la largeur de la machinerie agricole moderne, ce qui est d'autant plus pratique pour sa mise en place et pour la récolte. Afin de savoir si ce type d'aménagement avait une influence sur l'abondance et la dynamique des ravageurs, ennemis naturels et rendements dans le blé, l'échantillonnage de ces trois éléments était indispensable. Tout d'abord, l'étude s'est concentrée sur l'abondance de la cécidomyie orangée du blé, notre ravageur principal au stade adulte et larvaire (chapitre II). La corrélation entre les infestations de larves et de dommages (grains fusariés et cécidomyiés) a été analysée. Le chapitre III portait quant à lui sur l'abondance des autres ravageurs. L'abondance, la diversité et le temps de résidence des ennemis naturels ont été analysés ainsi que le ratio ravageurs/ennemi.

Globalement, nos résultats mettent en évidence que l'aménagement en bandes alternées seul, n'aide pas à contrôler l'abondance des ravageurs du blé. Les résultats du chapitre II et III portant sur les différents groupes de ravageurs montrent qu'à l'exception des thrips, aucun autre ravageur n'était négativement affecté par la présence de bandes alternées. La présence de bandes alternées n'a eu aucun effet sur la cécidomyie orangée du blé (notre ravageur principal), les cercopes, les cicadelles, les punaises ternes et les collemboles. Plusieurs facteurs peuvent affecter la présence des ravageurs dans les cultures. Pour la COB, la zone de recrutement trop grande des cécidomyies et la provenance de celles-ci ainsi que la longue diapause dans le sol (Barnes, 1956) et la mise en place récente des parcelles pourraient être en cause. Pour les autres ravageurs, plusieurs facteurs tels la mobilité de l'insecte, son degré de spécialisation pour une plante hôte ou les conditions du sol pourraient expliquer les résultats (Haddad *et al.*, 2011; Ponge, 2006). Ces résultats mettent en évidence que, puisque les différents groupes de ravageurs possèdent une biologie qui leur est propre, plusieurs facteurs doivent être considérés pour que le système en bandes puisse exercer un contrôle sur ceux-ci. De plus, il a été noté que la présence d'une deuxième culture hôte

pourrait favoriser l'abondance des pucerons et des punaises *Trigonotylus* (2010) (ce qui facilite la migration des insectes d'une culture à l'autre), puisque ceux-ci étaient plus abondants dans les bandes alternées. Il sera donc important d'en tenir compte lors d'un aménagement en bandes visant à réduire les ravageurs dans les cultures.

Une abondance importante de ravageurs peut avoir un impact négatif sur les rendements, puisque les insectes s'alimentent des plantes hôtes et peuvent être des vecteurs de maladies (Langevin *et al.*, 2007; Polaszek et Delvare, 2000; Traore *et al.*, 2011). Par exemple, des études ont démontré qu'il pouvait y avoir une corrélation entre la présence de cécidomyie et la fusariose (Langevin *et al.*, 2007; Mongrain *et al.*, 1997; Mongrain *et al.*, 2000). Nos résultats ont toutefois démontré que les rendements étaient similaires entre les traitements et qu'il n'y avait aucune corrélation entre la proportion de grains cécidomyiés et de grains fusariés pour les deux années. Cependant, il est possible que la faible proportion de grains cécidomyiés et fusariés retrouvés ait influencé les résultats.

Plusieurs études mentionnent que l'aménagement en bandes alternées peut avoir des effets positifs sur les rendements (Carman, 2005; Gao *et al.*, 2009; Klaij, 1994; Li *et al.*, 2001; Thorsted *et al.*, 2006a). Afin d'avoir une meilleure idée de la valeur réelle des cultures en bandes, les rendements auraient pu également être calculés sous forme LER (Land Equivalent Ratio ou coefficient de rendement équivalent). Le LER consiste à calculer la surface relative nécessaire de blocs témoins pour avoir la même production que la culture en bandes alternées (Mead et Willey, 1980). Par exemple, un ratio de 1,15 signifie que la surface nécessaire de la culture située dans les blocs témoins doit être de 15% supérieure à celle des bandes alternées pour obtenir un rendement équivalent. Quelques calculs rapides ont permis cependant de voir que le rendement était semblable entre les aménagements (les données variaient entre 0,97 et 1,09), ce qui met en évidence que l'aménagement en bandes alternées n'a eu aucun impact réel sur les rendements dans la culture du blé, peut-être parce que les conditions du sol et la rotation des cultures étaient les mêmes pour tous les types d'aménagements et qu'ils y ont joué un rôle plus important.

Plusieurs études mentionnent que la présence de bandes alternées augmente l'abondance d'ennemis naturels (Ma *et al.*, 2007; Robert *et al.*, 2002; Wang et Ba, 1998). Nos résultats démontrent toutefois que la présence de bandes alternées n'influence pas tous les ennemis naturels de manière ponctuelle, ce qui concorde avec les résultats de Bianchi *et al.* (2006), qui démontre que sur 24 études, les populations d'ennemis naturels étaient plus élevées dans les paysages complexes dans 74% des cas, mais pas dans 26% des cas. Il n'est pas surprenant que tous les ennemis naturels ne répondent pas de la même manière à la présence de bandes alternées. Plusieurs facteurs peuvent influencer la présence d'ennemis naturels, dont la biologie de l'insecte, l'arrangement des cultures dans l'espace et le temps (Lashomb et Ng; 1984; Stern, 1981), la présence des éléments du paysage et la distance avec la culture cible, (Maisonhaute et Lucas, 2011), la composition et l'abondance de la végétation à l'intérieur et à proximité du champ, le type de sol, le type d'aménagement, la présence de nourriture alternative et d'hôtes (Altieri et Letourneau, 1982; Altieri et Nicholls, 2004), etc., d'où l'importance de cibler un ou quelques groupes afin d'obtenir une lutte plus efficace.

Les ennemis naturels les plus susceptibles d'être influencés de manière positive par la présence de bandes alternées sont les coccinelles et les *Platygastridae*. Durant les deux années d'études, les résultats portant sur ces deux groupes ont montré que l'abondance était plus importante dans au moins une des deux bandes alternées que dans les blocs témoins à un moment crucial durant l'été. L'augmentation des coccinelles dans les bandes alternées de 18 m, une semaine après le pic d'infestation du puceron, deux années de suite, démontre que la migration d'une bande à l'autre pourrait être facilitée et plus rapide lors d'une augmentation de pucerons. Les pucerons et la nourriture alternative se retrouvant également dans les bandes adjacentes, ceux-ci auraient pu rester à l'intérieur du système en bandes, dans les cultures adjacentes. Il sera d'ailleurs nécessaire d'échantillonner dans les cultures adjacentes lors d'études subséquentes sur les coccinelles et les pucerons, afin de mieux connaître la dynamique de celles-ci dans les autres cultures du système en bandes. Quoi qu'il en soit, l'aménagement en bandes alternées est prometteur pour le contrôle des pucerons par les coccinelles.

Comme mentionné précédemment, les *Platygastridae* étaient également plus abondants dans les bandes alternées, ce qui concorde avec diverses études mentionnant que les parasitoïdes étaient plus abondants dans ce type d'aménagement (Ma *et al.*, 2007; Robert *et al.*, 2002; Tonhasca, 1993). Ici, l'hypothèse des ennemis naturels pourrait s'appliquer. En effet, une plus grande diversité des cultures pourrait permettre une plus grande source de nourriture disponible (pollen et nectar) et de refuges contre les prédateurs, ce qui serait favorable à l'activité, la longévité et la fécondité des parasitoïdes ainsi qu'au contrôle des ravageurs, par ces parasitoïdes (Altieri et Nicholls, 2004; Hogg *et al.*, 2011; Wäckers *et al.*, 2008). La largeur des bandes pourrait favoriser la présence en plus grande abondance de parasitoïdes par la présence d'ombrage créé par des cultures adjacentes, ce qui permettrait la conservation de l'humidité et la diminution du risque lié à un rayonnement solaire trop intense (Tonhasca, 1993). C'est ce qui pourrait expliquer l'abondance plus importante dans les bandes. Ces résultats sont d'autant plus intéressants, puisque l'observation de *Platygaster tuberosa* a été notée (Buhl N. P *et al.*, 2012), ce qui est prometteur pour un système en bandes alternées. Par contre, d'autres études seront nécessaires afin de déterminer si le portrait est le même pour cette espèce. De plus, il faudra vérifier si une baisse de l'abondance des cécidomyies est observée, en relation avec le parasitoïde.

Nos résultats portant sur la diversité des ennemis naturels ont démontré que, même si les zones cultivées contribuent à l'augmentation de la diversité du paysage (Maisonhaute et Lucas, 2011), et que cette diversité peut contribuer à l'augmentation de la diversité des ennemis naturels, la présence d'autres cultures dans les bandes alternées ne contribue pas à l'augmentation de la diversité de ceux-ci. Ces résultats pourraient toutefois s'expliquer par les réponses variables entre les différents groupes et les espèces à l'intérieur d'un groupe. Le faible impact de la présence d'autres cultures sur d'autres groupes dont les chrysopes, hémérobes et syrphes (Maisonhaute et Lucas, 2011) pourrait également expliquer ces résultats.

Une culture source (habitat de haute qualité) permet l'augmentation des populations d'ennemis naturels (Pulliam, 1988). La présence de plus d'une culture dans un champ permet au surplus d'ennemis naturels de se déplacer d'une culture à l'autre et de retenir les ennemis

naturels dans le système en bandes. La conservation des ennemis naturels en champ dépend de plusieurs facteurs, dont la nourriture disponible, d'hôtes, de refuges contre les prédateurs, de sites de pontes, etc. (Altieri et Nicholls, 2004). Les résultats portant sur le temps de résidence des ennemis naturels était le même entre les types d'aménagement. Cependant, ces résultats ne signifient pas pour autant que ceux-ci n'étaient pas présents dans les bandes adjacentes. La rapidité de réponse des coccinelles, soit une abondance plus importante dans les bandes de 18 m une semaine après le pic d'infestation des pucerons pour les deux années démontre que celles-ci étaient peut-être à proximité de la culture du blé. Dans des études futures, il faudra vérifier si les ennemis naturels demeurent dans les bandes adjacentes.

Dans certains cas, l'abondance des ennemis naturels était plutôt faible. Toutefois, une abondance faible d'ennemis naturels ne permet pas de justifier qu'un contrôle ne peut se faire. Par exemple, le ratio thrips/*Orius* a permis de constater que l'abondance de punaises *Orius* était suffisante pour contrôler l'abondance de thrips. En effet, on considère qu'un ratio de 1 :200 est suffisant pour contrôler les thrips alors que l'on parle d'une quasi extinction avec un ratio de 1 :40 (Funderburk *et al.* 2000). De plus, la comparaison entre les bandes alternées et les blocs a permis de constater que le contrôle était efficace dans le système en bandes, alors qu'il ne l'était pas dans les blocs durant les deux années. Il est donc important de tenir compte des ratios proies/prédateur dans un tel système, qui permet de démontrer une certaine capacité de contrôle, malgré une faible abondance.

En conclusion, nos résultats mettent en évidence que pour notre ravageur cible (la cécidomyie orangée du blé), la mise en place de bandes alternées n'aide pas à contrôler l'abondance de l'insecte, du moins, à court terme. Si l'on veut revérifier à plus long terme, il faudra attendre quelques années encore, soit le temps maximal que peut durer la diapause de l'insecte. Pour les autres ravageurs, d'autres études plus ciblées, soit des groupes plus restreints et problématiques identifiés à l'espèce pourraient être effectuées, puisque les réponses sont variables d'un groupe à l'autre. Quoi qu'il en soit, nos résultats démontrent que l'influence majeure du succès des bandes alternées réside dans la présence d'ennemis naturels. Les ennemis naturels les plus prometteurs sont les coccinelles, les Platygastriidae et les punaises *Orius*. Ce dernier (bien que son abondance était faible) a démontré qu'un contrôle

pouvait être exercé dans les bandes alternées, ce qui n'était pas le cas dans les blocs deux années de suite. Il sera donc important de considérer les ratios proies/prédateur afin d'obtenir un indice de contrôle. Les autres ennemis naturels ne réagissent pas de la même façon à la présence de bandes alternées, c'est pourquoi on est en mesure de se demander s'il est plus important d'avoir une grande diversité d'ennemis ou plutôt de cibler un petit groupe, idéalement non en compétition entre eux afin d'augmenter l'efficacité du système. De plus, il faudra probablement considérer la biologie de chacune des espèces cibles afin de créer un milieu propice à leur établissement au courant d'une saison entière. La présence des bandes adjacentes considérées devraient offrir de la nourriture alternative (pollen et nectar), refuges contre les prédateurs et sites de reproduction (Altieri et Nicholls, 2004; Ninkovic *et al.*, 2001) durant toute la saison. Ceci implique peut-être de sacrifier une bande afin d'empêcher l'émigration des insectes bénéfiques. Quoi qu'il en soit, nos résultats tendent à démontrer que l'efficacité d'un système en bandes est prometteur pour le contrôle des insectes ravageurs par la présence d'ennemis naturels, lorsque bien ciblé et adapté au contexte local.

5. BIBLIOGRAPHIE

- AAC, 2005. « Profil de la culture du blé au Canada ». PDF en ligne : http://dsp-psd.tpsgc.gc.ca/collection_2009/agr/A118-10-16-2005F.pdf
- AAC, 2012. « Profil de la culture du blé au Canada, 2010 ». En ligne : http://publications.gc.ca/collections/collection_2012/agr/A118-10-30-2012-fra.pdf
- Agriculture and Rural Development, 2012. « Wheat midge ». Alberta, Canada, Government of Alberta. En ligne : [http://www1.agric.gov.ab.ca/\\$department/deptdocs.nsf/all/agdex2507](http://www1.agric.gov.ab.ca/$department/deptdocs.nsf/all/agdex2507)
- Aheer G.M., Ali A., Munir M. 2008. « Abiotic factors effect on population fluctuation of alate aphids in wheat ». *Journal of Agricultural Research* 46(4): 367-371.
- Aheer, G.M., Munir M. et Ali A., 2007. « Impact of weather factors on population of wheat aphids at Mandi Baha ud Din district ». *Journal of Agricultural Research* 45(1): 61-66.
- Altieri M.A. et Letourneau D.K., 1982. « Vegetation management and biological control in agroecosystems ». *Crop Protection* 1: 405-430.
- Altieri M.A. et Nicholls C.I., 2004. « Biodiversity and pest management ». New York, Food Products Press. 236 pp.
- Altieri M.A. et Schmidt L.L., 1984. « Abundance patterns and foraging activity of ant communities in abandoned, organic and commercial apple orchards in northern California ». *Agriculture Ecosystems. and Environment* 11: 341- 352.
- Altieri M.A. et Schmidt L.L., 1985. « Cover crop manipulation in northern California orchards and veneyards: effects on arthropod communities ». *Biological Agriculture and Horticulture* 3: 1-24.
- Andow, D.A., 1983. « The effect of plant diversity on insect populations » dans *Plant diversity and insect populations: Interactions among beans, weeds and insects. Entomology*. Ithaca, NY, Cornell University Thèse PhD. p.1-41
- Andow, D.A., 1991. « Vegetational diversity and arthropod population response ». *Annual Review of Entomology* 36: 561-586.
- Asin L. et Pons X., 2001. « Effect of high temperature on the growth and reproduction of corn aphids (Homoptera: Aphididae) and implications for their population dynamics on the northeastern Iberian Peninsula ». *Environmental. Entomology* 30 : 1127-1134.

- Auzel P., Gaonac'h H., Poisson F., Siron R., Calmé S., Belanger M., Bourassa M.M., Kestrup A., Cuerrier A., Downing A., Lavallée C., Pelletier F., Chambers J., Gagnon A.E., Bedard M.C., Gendreau Y., Gonzalez A., Mitchell M., Whiteley J. et Larocque A., 2012. « Impacts des changements climatiques sur la biodiversité du Québec : Résumé de la revue de littérature ». CSBQ, MDDEP, Ouranos. 29 p.
- Bandara K.A.N.P., Kumar V., Ninkovic V., Ahmed E., Pettersson J. et Glinwood R., 2009. « Can leek interfere with bean plant-bean fly interaction »? *Journal of Economic Entomology* 102(3): 999-1008.
- Barbosa P., 1998. « Conservation biological control ». Academic Press, San Diego. 396 pp.
- Barker P.S. et McKenzie R.I.H., 1996. « Possible sources of resistance to the wheat midge in wheat ». *Journal of Plant Sciences* 76: 689-695.
- Barnes H.F., 1956. « Gall midges of economic importance ». VII. Gall midges of cereal crops. Crosley Lockwood, London. 261 pp.
- Barral J.A. et Sagnier H., 1888. « Dictionnaire d'agriculture ». Paris. 944 pp.
- Bates B.A., 1989. « The population dynamics of *Limothrips denticornis* Haliday (Thysanoptera: Thripidae) on barley ». Mémoire M.Sc. North Dakota State University 172 pp.
- Bayoumy M.H., 2011. « Foraging behavior of the coccinellid *Nephus includes* (Coleoptera: Coccinellidae) in response to *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae) with particular emphasis on larval parasitism ». *Environmental Entomology* 40(4): 835-843.
- Beirne, B. F. 1971. « Pest insects of annual crop plants in Canada. I. Lepidoptera. II, Diptera. III. Coleoptera ». *Memoirs of the Entomological Society* 78: 1-124.
- Bianchi F.J.J.A. et van der Werf W., 2003. « The effect of the area and configuration of hibernation sites on the control of aphids by *Coccinella septempunctata* (Coleoptera: Coccinellidae) in agricultural landscapes: A simulation Study ». *Environmental Entomology* 32(6): 1290-1304.
- Bianchi F.J.J.A., Booij C.J.H. et Tschardt T., 2006. « Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control ». *Proceedings of Royal Society* 273: 1715-1727.
- Birkett M.A., Bruce, T.J.A., Martin J.L., Smart L.I., Oakley J. et Wadhams L.J., 2004. « Responses of female orange wheat blossom midge, *Sitodiplosis mosellana*, to wheat panicle volatiles ». *Journal of Chemical Ecology* 30(7): 1319-1328.

- Boisclair J. et Estevez B., 2006. « Lutter contre les insectes nuisibles en agriculture biologique: Intervenir en harmonie face à la complexité ». *Phytoprotection* 87(2): 83-90.
- Boissot, N.B., Reynaud B. et Letourmy P., 1998. « Temporal analysis of western flower thrips (Thysanoptera : Tripidae) population dynamics on Reunion Island ». *Environmental Entomology* 27 : 1437-1443.
- Borror D.J., Triplehorn C.A. et Johnson N.F., 2005. « An introduction to the study of insects ». 6th edition. Philadelphia Saunders College Publishing, 875 p.
- Bourguet D., Chaufaux J., Micoud A., Delos M., Naïbo B., Bombarde F., Marque G., Eychenne N. et Pagliari C., 2002. « *Ostrinia nubilalis* parasitism and the field abundance of nontarget insects in transgenic *Bacillus thuringiensis* corn (*Zea mays*) ». *Environmental Biosafety Research* 1: 49-60.
- Budenberg W.J. et Powell W., 1992. « The role of honeydew as an ovipositional stimulant for two species of syrphids ». *Entomologia Experimentalis Applicata* 64(1): 57-61.
- Buhl N. P. et G. Notton, 2009. « A revised catalogue of the Platygastriidae of the British Isles (Hymenoptera: Platygastroidea) ». *Journal of Natural History* 43(27-28) : 1651-1703.
- Buhl N.P., Goyer M., Labrie G. et Lucas É., 2012. « A new species of *Platygaster* (Hymenoptera: Platygastriidae) from Canada associated with wheat ». *Entomologist's Monthly Magazine* 148(1776-79): 132-136.
- Buntin G.D., Pike K.S., Weiss M.J. et Webster J.A., 2007. « Handbook of small grain insects ». *Entomological Society of America* 120 pp.
- Butler, C. D., and R. J. O'Neil, 2006. « Defensive response of the soybean aphid (Hemiptera: Aphididae) to predation by insidious flower bug (Hemiptera: Anthocoridae) ». *Annals of Entomological Society of America* 99: 317-320.
- Capinera, J.L., 2008. « Encyclopedia of Entomology ». 2e édition. Vol. 1-4. Springer, Dordrecht, Pays-Bas. 4346 pp.
- Capinera J.L., 2009. « Armyworm, *Pseudaletia unipuncta* (Haworth) (Insecta: Lepidoptera: Noctuidae) ». En ligne: <http://edis.ifas.ufl.edu/pdffiles/IN/IN70200.pdf>.
- Capinera, J.L., Weissling T.J. et Schweizer E.E., 1985. « Compatibility of intercropping with mechanized agriculture: Effects of strip intercropping of pinto beans and sweet corn on insect abundance in Colorado ». *Journal of Economic Entomology* 78: 354-357.
- Carman D, 2005. « Strip cropping ». En ligne : http://www.sera17.ext.vt.edu/Documents/BMP_strip_cropping.pdf.

- Clément, M., Y. Déry, B. Duval, C. Parent, M. Roy et G. Labrie, 2008. « La légionnaire uniponctué : Identification, dépistage et stratégie d'intervention ». Bulletin du RAP-Grandes Cultures no 10-18 juin 2008 (modifié le 27 juin).
- Collier R, Finch S, Davies G, 2001. « Pest insect control in organically produced crops of field vegetables ». Proceedings: 53rd International Symposium on Crop Protection, University of Ghent, Belgium, pp. 259–267.
- Commission canadienne des grains, 2008. « Guide officiel du classement des grains, 1^{er} août 2012 ». En ligne : <http://www.grainscanada.gc.ca/oggg-gocg/2012/24-experimentaux-2012-fra.pdf>
- Corbett A. et Plant R.E., 1993. « Role of movement in the response of natural enemies to agroecosystem diversification: A theoretical evaluation ». *Environmental Entomology* 22(3): 519-531.
- Corey, D., Kambhampati, S. & Wilde, G. E. 1998. « Electrophoretic analysis of *Orius insidiosus* (Hemiptera: Anthocoridae) feeding habits in field corn ». *Journal of the Kansas Entomological Society* 71, 11-17.
- Cromatie W.J., 1981. « The environmental control of insects using crop diversity ». dans *CRC Handbook of pest management in agriculture*. D. Pimentel. Boca Raton, FL. 1: 223-251.
- DeBach P. et Rosen D., 1991. « Biological control by natural enemies ». 2^e édition. Cambridge University Press, New York. NY. 440 p.
- DEKALB, 2009. « Maïs semé en rangs jumelés ». En ligne : http://www.dekalb.ca/content/pdf/mais_eme_en_rangs_jumeles.pdf
- Delisle J. et McNeil J.N., 1987. « Calling behaviour and pheromone titre of the true armyworm *Pseudaletia unipuncta* (Haw.) (Lepidoptera: Noctuidae) under different temperature and photoperiodic conditions ». *Journal of Insect Physiology* 33(5): 315-324.
- Desjarlais C., Allard M., Bélanger D., Blondlot A., Bouffard A., Bourque A., Chaumont D., Gosselin P., Houle D., Larrivée C., Lease N., Pham A.T., Roy R., Savard J.P., Turcotte R. et Villeneuve C., 2010 « Savoir s'adapter aux changements climatiques », Ouranos, Montréal, 128 p.
- Dicke, F. F. and Jarvis J. L., 1962. « The habits and seasonal abundance of *Orius insidiosus* (Say) (Hemiptera: Anthocoridae) on corn ». *Journal of the Kansas Entomological Society* 35: 339-344.

- Ding H., Lamb R.J. et Ames N., 2000. « Inducible production of phenolic acids in wheat and antibiotic resistance to *Sitodiplosis mosellana* ». *Journal of Chemical Ecology* 26(4): 969-985.
- Doane J.F. et Olfert O.O., 2008. « Seasonal development of wheat midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Diptera: Cecidomyiidae), in Saskatchewan, Canada ». *Crop Protection* 27: 951-958.
- Doane J.F., Olfert O. et Mukerji M.K., 1987. « Extraction precision of sieving and brine flotation for removal of wheat midge, *Sitodiplosis mosellana* (Diptera: Cecidomyiidae), from soil ». *Journal of Economic Entomology* 80:268-271.
- Dosdall L.M., Ulmer B.J., Gibson G.A.P., Carcamo H.A., 2006. « The spatio-temporal distribution dynamics of the cabbage seedpod weevil, *Ceutorhynchus obstrictus* (Coleoptera:Curculionidae), and its larval parasitoids in canola in western Canada ». *Biocontrol Science Technology* 16:987-1006.
- Dowell R.V., 1997. « Laboratory toxicity of a photo activated dye mixture to six species of beneficial insects ». *Journal of Applied Entomology* 121 : 271-274.
- Dowell R.V. et Cherry, R.H., 1981. « Survey traps for parasitoids, and coccinellid predators of the citrus blackfly, *Aleurocanthus woglumi* ». *Entomologia Experimentalis et Applicata* 29: 356-362.
- Dubuc N., 2011. « Cultivez intelligemment: Comment réduire l'impact du poids des machineries agricoles ». MAPAQ. Conférence donnée par Agri-Vision le 7 déc. 2011. 27 p.
- Dupont, E. 1857. « Essai sur les insectes et les maladies qui affectent le blé ». Presses à vapeur du Canada. Montréal. 38 pp.
- Duval J., 1993. « Les thrips des cultures en serre. ». Ecological Agriculture Projects, McGill University (Macdonald Campus). En ligne: <http://eap.mcgill.ca/agrobio/ab360-03.htm>
- Duval B., Côté M., Langevin F., Labrie G., Roy M. et Meloche F., 2011. « Rapport de dépistage de la cécidomyie orangée du blé (*Sitodiplosis mosellana*) au Québec en 2010 ». Réseau d'avertissements phytosanitaires, Bulletin d'information. Rapport d'étape. Grandes cultures no 01. 4 p.
- Duval B., Langevin F., Labrie G. et Moloche F., 2010. « Rapport de dépistage de la cécidomyie orangée du blé (*Sitodiplosis mosellana*) en 2009 ». Réseau d'avertissements phytosanitaires, Bulletin d'information no 3, 4 pp.
- Elliott B., Olfert O. et Hartley S., 2011. « Management practices for wheat midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) ». *Prairie Soils and Crops Journal* 4 : 8-13.

- Ellsbury M.M., Powell J.E., Forcella F., Woodson W.D., Clay S.A. et Riedell W.E., 1998. « Diversity and dominant species of ground beetle assemblages (Coleoptera: Carabidae) in crop rotation and chemical input systems for the Northern Great Plains ». *Ecology and Population Biology* 91(5) : 619-625.
- Environnement Canada, 2009. « Valeurs mensuelles pour juillet 2009 ». En ligne : http://climate.weatheroffice.gc.ca/prods_servs/cdn_climate_summary_report_f.html?intMonth=7&intYear=2009&prov=QUE&txtFormat=html&btnSubmit=Soumettre
- Environnement Canada, 2010. « Valeurs mensuelles pour juillet 2010 ». En ligne : http://climate.weatheroffice.gc.ca/prods_servs/cdn_climate_summary_report_f.html?intMonth=7&intYear=2010&prov=QUE&txtFormat=html&btnSubmit=Soumettre
- Esquivel J.F. et Mowery S.V., 2007. « Host plants of the tarnished plant bug (Heteroptera: Miridae) in central Texas ». *Environmental Entomology* 36 : 725-730.
- Fabre F., Plantegenest M., Mieuze L., Dedryver C.A., Leterrier J.L. et Jacquot E., 2005. « Effect of climate and land use on the occurrence of viruliferous aphids and the epidemiology of barley yellow dwarf disease ». *Agriculture, Ecosystems and Environment* 106(1) : 49-55.
- Finch S. et Collier R.H., 2000. « Host plant selection by insects: A theory based on appropriate/inappropriate landings by pest insects of cruciferous plants ». *Entomologia Experimentalis et Applicata* 96(2): 91-102.
- Finch S. et Collier, R.H., 2011. « The influence of host and non-host companion plants on the behavior of insect pests in field crops ». *Entomologia Experimentalis Applicata* 142(2): 87-96.
- Floate K.D., Doane J.F. et Gillott C., 1990. « Carabid predators of the wheat midge (Diptera: Cecidomyiidae), in Saskatchewan ». *Environmental Entomology* 19:1503-1511.
- Floate K.D. Elliott R.H., Doane J.F. et Gillott C., 1989. « Field bioassay to evaluate contact and residual toxicities of insecticides to carabid beetles (Coleoptera: Carabidae) ». *Journal of Ecological Entomology* 82(6): 1543-1547.
- Fortin, M.C., Culley J. et Edwards M., 1994. « Soil water, plant growth, and yield of strip-intercropped corn ». *Journal of Production Agriculture* 7:63-69.
- Francis C., Jones A., Crookstone, K., Wittler K. et Goodman S., 1986. « Strip cropping corn and grain legumes: A review ». *American Journal of Alternative Agriculture* 1: 159-164
- Fraval A., 2006. « Les pucerons ». INRA. En ligne:
 1^{ère} partie : <http://www.inra.fr/opie-insectes/pdf/i142fraval3.pdf>
 2^e partie : <http://www.inra.fr/opie-insectes/pdf/i141fraval1.pdf>

- Funderburk, J., J. Stavisky, and S. Olson, 2000. « Predation of *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae) in field peppers by *Orius insidiosus* (Hemiptera: Anthocoridae) ». *Environmental Entomology* 2000(29): 376–382.
- Gagnon A.-E., Roy M. et Roy A., 2012. « Impacts directs et indirects des changements climatiques sur les ennemis des cultures ». Document de synthèse. 80 pp.
- Gagnon A.-E., Arsenault L., Bourgeois G., Bourdages L., Grenier P. et Roy M., 2013. « Études de cas pour faciliter une gestion efficace des ennemis des cultures dans le contexte de l'augmentation des risques phytosanitaires liés aux changements climatiques ». Rapport final, projet no 550004-px1. *Ouranos*, 183 p.
- Gao A. D. Y., Suna J., Lib F., Liua Z., Liua H. et Liua Z., 2009. « Crop coefficient and water-use efficiency of winter wheat/spring maize strip intercropping ». *Field Crops Research* 111(1-2): 65-73.
- Gardiner M.M., Landis D.L., Gratton C., DiFonzo C.D., O'Neal M., Chacon J.M., Wayo M.T., Schmidt N.P., Mueller E.E. et Heimpel G.E., 2009. « Landscape diversity enhances biological control of an introduced crop pest in the North-Central USA. *Ecological Applications* 19: 143-154.
- Gatehouse, A. G. 1997. « Behavior and ecological genetics of wind-borne migration by insects ». *Annual Review of Entomology* 42: 475-502.
- Gavloski J. and Meers S.. 2011. « Arthropods of Cereal Crops in Canadian Grasslands. In *Arthropods of Canadian Grasslands (Volume 2): Inhabitants of a Changing Landscape* ». Edited by K. D. Floate. Biological Survey of Canada. pp. 217-237.
- Ghaffarzadeh M., 1999. « Strip intercropping ». En ligne: <https://store.extension.iastate.edu/Product/pm1763-pdf>
- Ghaffarzadeh M., Garcia P. et Cruse R.M., 1997. « Tillage effect on soil water content and corn yield in a strip intercropping system ». *Agronomy Journal* 89: 893-899.
- Gould F., 1986. « Simulation models for predicting durability of insect-resistant germplasm: A deterministic diploid, two-locus model ». *Environmental Entomology* 15: 1-10.
- Gouvernement du Nouveau Brunswick, 2002. « Légionnaire uniponctuée ». En ligne: <http://www.gnb.ca/0057/Legionnaire.pdf>
- Guppy JC. 1961. « Life history and behaviour of the armyworm, *Pseudaletia unipuncta* (Haw.) (Lepidoptera: Noctuidae), in eastern Ontario ». *The Canadian Entomologist* 93: 1141-1153.

- Haddad N.M., Crustsinger G.M., Gross K., Haarstad J. et Tilman D., 2011. « Plant diversity and the diversity of food web ». *Ecology Letters* 14:42-46.
- Hajek A., 2004. « Natural enemies: An introduction to biological control. University Press. New York. 378 p.
- Hassell, M. P., and T. R. E. Southwood. 1978. « Foraging strategies of insects ». *Annual Review of Ecology and Systematics* 9:75-98.
- Hoa Y.-N., Miao J., Wu Y.-Q., Gong Z.J., Jiang Y.-L., Duan Y., Li T., Cheng W.-N. et Cut J.-X., 2013. « Flight performance of the orange wheat blossom midge (Diptera: Cecidomyiidae) ». *Journal of Economic Entomology* 106(5): 2043-2047.
- Hogg B.N., Bugg R.L. et Daane K.M., 2011. « Attractiveness of common insectary and harvestable floral resources to beneficial insects ». *Biological Control* 56: 76-84.
- Holland J.M. et Thomas S.R., 2000. « Do polyphagous predators help control orange wheat blossom midge, *Sitodiplosis mosellana* GeÅ hin (Dipt.,Cecidomyiidae) in winter wheat »? *Journal of Applied Entomology* 124 : 325-329.
- Hu ML, Zhang KB. 1995. « Studies on diapause habits of *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) ». *Entomological Knowledge* 32(1): 13-16.
- Huffaker C., Berryman A. et Turchin P., 1999. « Dynamics and regulation of insect populations ». C. B. Huffaker et A. P. Gutierrez [eds.], *Ecological entomology*, 2^e édition, Wiley, New York. 269-305.
- Immaraju A.J., Paine D.T., Bethke A.J., Robb L.K. Et Newman P.J., 1992. « Western flower thrips (Thysanoptera: Thripidae) resistance to insecticides in Coastal California greenhouses ». *Journal of Economic Entomology* 85(1): 9-14.
- Iowa State University, 2008. « Soybean production ». En ligne: http://extension.agron.iastate.edu/soybean/production_spacing.html
- Iragavarapu T.K. and G.W. Randall. 1996. « Border effects on yield in a strip-intercropped soybean, corn, and wheat production system ». *Journal of Production Agriculture* 9:101-107
- Isenhour D.J., Wiseman B.R., et Layton R.C., 1989. « Enhanced Predation by *Orius insidiosus* (Hemiptera: Anthocoridae) on Larvae of *Heliothis zea* and *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) Caused by Prey Feeding on Resistant Corn Genotypes ». *Environmental Entomology* 18(3):418-422.
- Jervis M.A., 2007. « Insects as natural enemies: A practical perspective ». Springer, Pays-Bas, 750 p.

- Jin M., YuQing W., ZhenXing Y., HuaShuang C., ShunTong L., YueLi J. et Yun D., 2011. « Trajectory analysis of long-distance dispersal of the wheat midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Diptera: Cecidomyiidae), with air current ». *Acta Entomologica Sinica* 54(4) : 432-436.
- Johnson C.G., 1969. « Migration dispersal of insects by flight ». Methuen et Co., Royaume-Uni (Angleterre). 763 p.
- Kennedy J.S., Booth C.O. and Kershaw W.J.S., 1961. « Host finding by aphids in the field ». III. Visual attraction. *Annals of Applied Biology* 49: 1-21.
- Kim I.-K., Park J.-D., Shin S.-C. et Park I.-K., 2011. « Prolonged embryonic stage and synchronized life history of *Platygaster robiniae* (Hymenoptera : Platygasteridae), a parasitoid of *Obolodiplosis robiniae* (Diptera : Cecidomyiidae) ». *Biological Control* 57 : 24-30.
- Kirk, W. D. J. 1984. « Ecologically selective coloured traps ». *Ecological Entomology* 9: 35-41.
- Kirk, W. D. J. 1985. « Effect of some floral scents on host feeding by thrips (Insecta: Thysanoptera) ». *Journal of Chemical Ecology* 11: 35-43
- Klajj M., 1994. Chapitre 10. « La conservation des sols et de l'eau ». Dans Klajj, M.C. et Hoogmoed W.B., 1994. « Le travail du sol pour une agriculture durable » Cours de formation, 4-13 juillet 1994. Archives de documents de la FAO, Italie. 118 p.
- Knodel J. et Ganehiarachchi M., 2008. « Integrated Pest Management of the Wheat Midge in North Dakota ». North Dakota State University (NDSU). Dakota. En ligne: <http://www.ag.ndsu.edu/pubs/plantsci/pests/e1330.htm>.
- Koul O., Dhaliwal G.S. et Cuperus G.W., 2004. « Integrated Pest Management: Potential, constraints and challenges ». CABI Publishing, Wallingford. 329 pp.
- Kuo M-H., Chiu M-C. et Perng J-J., 2006. « Temperature effects on life history traits of the corn leaf aphid, *Rhopalosiphum maidis* (Homoptera: Aphididae) on corn in Taiwan ». *Applied Entomology and Zoology* 41: 171-177.
- Labrie, G., 2008. « Culture en bandes alternées pour le contrôle des insectes ». Journée Phytoprotection dans les grandes cultures. St-Jean-sur-Richelieu. 20 février.
- Labrie G., Estevez B. et Lucas É., 2010. « Bandes alternées comme moyen de lutte contre les ravageurs en grandes cultures ». Journée d'information scientifique. Drummondville. 18 février.
- Lamb R.J., Smith M.A.H., Wise I.L. et Olfert O.O., 2004. « An interspersed refuge for *Sitodiplosis mosellana* (Diptera:Cecidomyiidae) and a biocontrol agent *Macroglenes*

- penetrans* (Hymenoptera:Pteromomalidae) to manage crop resistance in wheat ». *Bulletin of Entomological Research* 94: 179-188.
- Lamb R.J., Tucker J.R., Wise I. et Smith M.A.H., 2000. « Trophic interaction between *Sitodiplosis mosellana* (Diptera: Cecidomyiidae) and spring wheat: Implications for yield and seed quality ». *The Canadian Entomologist* 132(5): 607-625.
- Landis D.A., Wratten S.D., et Gurr G.M., 2000. « Habitat management to conserve natural enemies of arthropod pests in agriculture ». *Annual Review of Entomology* 2000 (45): 175-201.
- Langevin F., Comeau A. et Savard M., 2007. « Investigation about potential links between orange wheat blossom midge damage, *Fusarium* diseased kernels, and DON in wheat ». Agriculture et Agroalimentaire Canada, Québec. 1p.
- Lashomb J.H. et Ng Y.S., 1984. « Colonization by Colorado potato beetles *Leptinotarsa decemlineata* (Say) (Coleoptera: Chrysomelidae) in rotated and nonrotated potato fields ». *Environmental Entomology* 13: 1352-1356.
- Lattin D.J., 1989. « Bionomics of the Nabidae ». *Annual Review of Entomology* 34 :383-400.
- Lauzon M., Dion Y. et Rioux S., 2008. « Fusariose de l'épi chez le blé et l'orge ». CÉROM, phytopathologie. Bulletin technique No 2.01. 5 p.
- Légaré J.-P., Moisan-De Serres J. et Morissette-Bélanger M.-H., 2013. « La légionnaire uniponctué (Lepidoptera : Noctuidae) ». MAPAQ. En ligne : http://www.agrireseau.qc.ca/grandescultures/documents/La%201%C3%A9gionnaire%20uniponctu%C3%A9e_Final.pdf.
- Lewis T., 1973. « Thrips; their biology, ecology and economic importance ». Academic press, London. 349 pp.
- Lewis, T. 1997. « Flight and dispersal », pp. 175-197. Dans T. Lewis [ed.], « Thrips as crop pests ». CAB International, Wallingford, UK.
- Lewis T. et Stevenson J.W., 1966. « The permeability of artificial windbreaks and the distribution of flying insects in the leeward sheltered zone ». *Annals of Applied Biology* 58: 355-363.
- Li L., Sun J., Zhang F., Li X., Yang S. et Rengel Z., 2001. « Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping: I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients ». *Field crops research* 71(2): 123-137.
- Lumbierres B., Albajes R. et Pons X. 2004: « Transgenic Btmaize and *Rhopalosiphum padi* (Hom., Aphididae) performance ». *Ecological Entomology* 29: 309-317.

- Ma K-Z, Hao S-G, Zhao H-Y et Kang L., 2007. « Strip cropping wheat and alfalfa to improve the biological control of the wheat aphid *Macrosiphum avenae* by the mite *Allothrombium ovatum* ». *Agriculture, Ecosystems and Environment* 119: 49-52
- MAAARO, 2013a. « Déprédateurs des grandes cultures : Ravageurs des céréales ». En ligne : <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/pub811/13cereal.htm>.
- MAAARO, 2013b. « Dégâts de la punaise terne sur les cultures légumière en Ontario ». En ligne : <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/facts/98-026.htm>.
- Maisonhaute, J.-É. 2010. « Influence de la structure du paysage sur l'assemblage des prédateurs terricoles dans les zones agricoles non cultivée ». Mémoire de maîtrise. UQÀM. 88 p.
- Maisonhaute J.-É. et Lucas É. 2011. « Influence of landscape structure on the functional groups of an aphidophagous guild: Active-searching predators, furtive predators and parasitoids ». *European journal of environmental sciences* 1: 41-50.
- Mangan L.R., Byers A.R., Wutz A. et Templeton W. C. Jr., 1982. « Plant associations of insects collected in swards with and without legumes seeded by minimum host tillage. *Environmental Entomology* 11: 225-260.
- Manitoba Agriculture, Food and Rural Initiatives, 2011. « Wheat midge ». En ligne: <http://www.gov.mb.ca/agriculture/crops/insects/fad47s00.html>
- MAPAQ, 2004. « Glossaire ». En ligne : <http://archive.is/YjhQG>
- McKenzie R.I.H., Lamb R.J., Aung T., Wise I.L., Barker P., and Olfert O.O., 2002. « Inheritance of resistance to wheat midge, *Sitodiplosis mosellana*, in spring wheat ». *Plant Breeding* 121: 383-388.
- Mead R. et Willey R.W., 1980. « The Concept of a 'Land Equivalent Ratio' and Advantages in Yields from Intercropping ». *Experimental Agriculture* 16(3): 217-228.
- Miao J., Wu Y.-Q., Gong Z.-J., He Y.-Z., Duan Y. et Jiang Y.-L., 2013. « Long-distance wind-borne dispersal of *Sitodiplosis mosellana* (Gehin) (Diptera: Cecidomyiidae) in northern China ». *Journal of Insect Behavior* 26: 120-129.
- Michaud J.P., 2003. « Natural mortality of Asian citrus psyllid (Homoptera: Psyllidae) in central Florida ». *Biological Control* 29(2) : 260-269.
- Mittapalli, O., R. H. Shukle, and I. L. Wise. 2006. « Identification of mariner-like elements in *Sitodiplosis mosellana* (Diptera: Cecidomyiidae) ». *The Canadian Entomologist* 138: 138-146.

- Mongrain D., Couture L. et Comeau A., 2000. « Natural occurrence of *Fusarium graminearum* on adult wheat midge and transmission to wheat spikes ». *Cereal Research Communications* 28(1-2) : 173-180.
- Mongrain D., Couture L. Dubuc J-P. et Comeau A., 1997. « Occurrence of the orange wheat blossom midge [Diptera: Cecidomyiidae] in Québec and its incidence on wheat grain microflora ». *Phytoprotection* 78: 17-22.
- Munger H., Vanasse A., Rioux S. et Labrie G., 2011. « Le travail réduit du sol et les systèmes sans intrants chimiques peuvent-ils réduire l'incidence de la fusariose et la présence de la cécidomyie orangée chez le blé »? La journée Grandes cultures, Grandes cultures biologiques, p. 20-23.
- Nasir S., Ahmad F. 2001. « Correlation between wheat aphid population and abiotic factors ». *Pakistan Entomologist* 23(1): 23-25.
- Nguyen Q.H., 2008. « Circadian rhythms and effects of different diets on the development and reproduction of *Nabis Kinbergii* (Hemiptera : Nabidae) ». Mémoire de maîtrise. 66 pp.
- Ninkovic V., Abassi S.A. et Pettersson J., 2001. « Influence of aphid-induced plant volatiles on ladybird beetle searching behavior ». *Biological Control* 21(2) : 191-195.
- Olfert O.O., Doane J.F. et Braun L., 2003. « Establishment of *Platygaster tuberosula*, an introduced parasitoid of the wheat midge, *Sitodiplosis mosellana* ». *The Canadian Entomologist* 135: 333-308.
- Olfert O., Elliott R. H. et Hartley S, 2009. « Non-native insects in agriculture : strategies to manage the economic and environment impact of wheat midge *Sitodiplosis mosellana*, in Saskatchewan ». *Biological Invasions* 11 : 127, 133.
- Olfert O.O., Mukerji M.K., et Doanes J.F., 1985. « Relationship between infestation levels and yield loss caused by wheat midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Diptera: Cecidomyiidae) in spring wheat in Saskatchewan ». *The Canadian Entomologist* 117: 593-598.
- Perrin R. M., 1977. « Pest management in multiple cropping systems ». *Agroecosystems* 3: 93-118.
- Pietrantonio P.V. et Benedict J.H., 1999. « Effect of a new cotton insecticide chemistries debufenozide spinosad et chlorfenapyr on *Orius insidiosus* and two *Cotasa* species ». *Southwestern Entomologist* 24(1) : 21-29.
- Pintureau B., 2009. « La lutte biologique et les Trichogrammes ». Éditions Le manuscrit, Paris, 257 p.

- Pivnick KA, Labbé E., 1993. « Daily patterns of activity of females of the orange wheat blossom midge, *Sitodiplosis mosellana* (Gehin) (Diptera: Cecidomyiidae) ». *Canadian Entomologist* 125:725–736.
- Polaszek A. et Delvare G., 2000. « Les foreurs des tiges de céréales en Afrique : Importance économique, systématique, ennemis naturels et méthodes de lutte ». Éditions CIRAD, France. 546 pp.
- Ponge J.-F., 1993. « Biocenoses of Collembola in atlantic temperate grass-woodland ecosystems ». *Pedobiologia* 37(4): 223-244.
- Ponge J.-F., Dubs F., Gillet S., Sousa P.J. et Lavelle P., 2006. « Decreased biodiversity in soil springtail communities : the importance of dispersal and landuse history in heterogeneous landscapes ». *Soil Biology and Biochemistry* 38: 1158-1161.
- Powell W., 1986. « Enhancing parasitoid activity in crops. In insect parasitoids ». dans Waage J. and Greathead D. éd Academic Press, London. p. 319-335.
- Pulliam, H.R. 1988. « Sources, sinks, and population regulation ». *American Naturalist* 132: 652-669.
- Ratnadass, A., P. Fernandes, J. Avelino and R. Habib. 2012. « Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: a review ». *Agronomy for Sustainable Development* 32: 273-303.
- Rauschen S., Schultheis E. Pagel-Wieder S., Schuphan I. et Eber S., 2009. « Impact of Bt-corn MON88017 in comparison to three conventional lines on *Trigonotylus caelestialium* (Kirkaldy) (Heteroptera: Miridae) field densities ». *Transgenic Research* 18: 203–214.
- Rioux S., Bernier D. et Labrie G., chapitre 6 (Phytoprotection) dans Beauregard G. et Ruel D., 2012. « Guide de production : Les céréales à paille ». Éditions du CRAAQ, 148 pp.
- Robb K.L., 1988. « Analysis of *Frankliniella occidentalis* (Pergande) as a Pest of Floricultural Crops in California Greenhouses ». Thèse PhD. University de Californie, Riverside. 135 pp.
- Robert G. Ahern, M. Brewer J., 2002. « Effect of different wheat production systems on the presence of two parasitoids (Hymenoptera: Aphelinidae; Braconidae) of the Russian wheat aphid in the North American Great Plains ». *Agriculture Ecosystems and Environment* 92: 201-210.
- Root R.B., 1973. « Organization of plant-arthropod association in simple and diverse habitats: The fauna of collards (*Brassica oleracea*) ». *Ecological Monographs* 43(1):95-124.

- Roschewitz I., Hucker M., Tschardt T. et Thies C., 2005. « The influence of landscape context and farming practices on parasitism of cereal aphids ». *Agriculture Ecosystems and Environment* 108: 218-227.
- Roy, M., 2002. « Impact potentiel des changements climatiques sur l'entomofaune agricole au Québec ». 65e Congrès de l'Ordre des agronomes du Québec. Changements Climatiques: Comprendre pour mieux agir! Québec: 7-8 juin.
- Roy M., Langevin F., Légaré J.-P., et Duval B., 2008. « La cécidomyie orangée du blé *Sitodiplosis mosellana* Gehin (Diptera : Cecidomyiidae) ». Laboratoire de diagnostic en phytoprotection. MAPAQ, Québec. 6p.
- Rutledge C.E. et O'Neil C.E., 2005. « *Orius insidiosus* (Say) as a predator of the soybean aphid, *Aphis glycines* Matsumura ». *Biological Control* 33 : 56-64.
- SAG pesticides, 2013. « Chlorpyrifos ». En ligne : www.sagepesticides.qc.ca/Recherche/resultats.aspx?Search=matiere&ID=112.
- SAG pesticides, 2014. « Effets toxiques des matières actives ». En ligne : <http://www.sagepesticides.qc.ca/Recherche/RechercheMatiere.aspx>
- Schaafsma A.W., Tamburic-Ilincic L. et Hooker D.C., 2005. « Effect of previous crop, tillage, field size, adjacent crop, and sampling direction on airborne propagules of *Gibberella zeae*/Fusarium graminearum, fusarium head blight severity, and deoxynivalenol accumulation in winter wheat ». *Canadian Journal of Plant Pathology* 27(2): 217-224.
- Shanower T.G., 2005. « Occurrence of *Sitodiplosis mosellana* (Diptera: Cecidomyiidae) and its parasitoid *Macroglens penetrans* (Hymenoptera: Platygasteridae) in northeastern Montana ». *The Canadian Entomologist* 37: 753-755.
- Skirvin D.J., Kravar-Garde L., Reynolds K., Jones J., Mead A. et Fenlon J., 2007. « Supplemental food affects thrips predation and movement of *Orius laevigatus* (Hemiptera: Anthocoridae) and *Neoseiulus cucumeris* (Acari: Phytoseiidae) ». *Bulletin of Entomological Research* 97: 307-315.
- Smith G.J., 1976. « Influence of crop background on natural enemies of aphids on Brussels sprouts ». *Annals of Applied Biology* 83(1): 15-29.
- Solbreck C. et Widenfalk O., 2012. « Very long diapause and extreme resistance to population disturbance in a galling insect ». *Ecologica Entomology* 37(1): 51-55.
- Statistique Canada, 2013a. « Tableau CAMSIM 001-0010 – Estimation de la superficie, du rendement, de la production et du prix moyen à la ferme des principales grandes cultures en unités métriques ». En ligne : <http://www5.statcan.gc.ca/cansim/a26?lang=fra&id=0010010&p2=17>

- Statistique Canada, 2013b. « Tableau 002-0001 - Recettes monétaires agricoles, annuel (dollars), CANSIM (base de données) ». En ligne : <http://www5.statcan.gc.ca/cansim/a26?lang=fra&id=0020001&p2=17>.
- Stern, V., 1981. « Environmental control of insects using trap crops sanitation, prevention and harvesting ». dans. Pimentel D. « Handbook of Pest Management in Agriculture ». CRC Press, Boca Raton, Florida. 1: 199-207.
- Stern V M, S. R. F., van den Bosch K & Ragen K S., 1959. « The integration of chemical and biological control of the spotted alfalfa aphid: the integrated control concept ». *Hilgardia* 29 81-101.
- Sullivan P., 2003. « Intercropping principles and production practices ». En ligne: <http://attra.ncat.org/attra-pub/PDF/intercrop.pdf>
- Tahvanainen J.O. et R.B. Root, 1972. « The influence of vegetational diversity on the population ecology of a specialized herbivore *Phyllotreta cruciferae* (Coleoptera: Chrysomelidae) ». *Oecologia* 10: 321-346
- Teulon, D. A. J. 1988. « Pest management of the New Zealand flower thrips (*Thrips obscuratus* (Crawford) Thysanoptera: Thripidae) on stone fruit in Canterbury New Zealand ». Lincoln College University of Canterbury, Canterbury, Nouvelle-Zélande.
- Teulon, D. A. J., and D. R. Penman. 1992. « Colour preferences of New Zealand thrips (Terebrantia: Thysanoptera) ». *New Zealand Entomologist* 15: 8-13
- Thies C. et Tschardtke T., 1999. « Landscape structure and biological control in agroecosystems ». *Science* 285: 893-895.
- Thies C., Steffan-Dewenter I. et Tschardtke T., 2003. « Effects of landscape context on herbivory and parasitism at different spatial scales ». *Oikos* 101: 18-25.
- Thorsted M.D., Olesen J. E. et Weiner J., 2006a. « Width of clover strips and wheat rows influence grain yield in winter wheat/white clover intercropping ». *Field crops research* 95(2-3): 280-290.
- Thorsted M.D., Weiner J. et Olsen J.E., 2006b. « Above-and below-ground competition between intercropped winter wheat *Triticum aestivum* and white clover *Trifolium repens* ». *Journal of Applied Ecology* 43: 237-245.
- Tonhasca A. Jr., 1993. « Effects of agroecosystem diversification on natural enemies of soybean herbivores ». *Entomologia Experimentalis et Applicata* 69: 83-90.
- Traore M., Lompo F., Thio B., Ouattara B., Ouattara K. et Sedogo M., 2011. « Influence de la rotation culturale, fertilisation et du labour sur l'infestation des racines de sorgho (*Sorghum bicolor*) par le nématode *Pratylenchus brachyurus* et l'effet sur le rendement

- dans la culture au Burkina Faso ». *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 4 (6): 1991-8631.
- Triplehorn C.A., Johnson N.F. et Borror D.J., 2005. « Introduction to the study of insects ». 7^e édition. Belmont, CA : Thompson Brooks, CA. 864 pp.
- Tscharntke T., Bommarco R., Clough Y., Crist T.O., Kleijn D., Rand T.A., Tylianakis J.M., van Nouhuys S. et Vidal S., 2007. « Conservation Biological Control and enemy diversity on a landscape scale ». *Biological Control* 43: 294-309.
- Turgeon J.J. et McNeil J.N., 1983. « Modifications in the calling behaviour of *Pseudaletia unipuncta* (Lepidoptera: Noctuidae), induced by temperature conditions during pupal and adult development ». *The Canadian Entomologist* 115:1015-1022.
- Vandermeer J., 1989. « The ecology of intercropping ». Cambridge University Press, New York. 237 pp.
- Van Emden, H.F., 1965. « The role of uncultivated land in the biology of crop pests and beneficial insects ». *Scientific Horticulture* 17: 121-136.
- Vidal S., 1997. « Factors influencing the population dynamics of *Brevicoryne brassicae* in undersown Brussels sprouts ». *Biological Agriculture and Horticulture* 15: 285-295.
- Vincent C., Goettel M.S. et Lazarovits G., 2007. « Biological control: A global perspective ». CAB international/AAFC, Londres. 432 p.
- Wäcker F.L., van Rijn P.C.J. et Heimpel G.E., 2008. « Honeydew as food source for natural enemies: Macking the best of a bad meal »? *Biological Control* 45: 176-184.
- Wains S.M., Ali A.M., Hussain M., Anwar J., Zulkiffal M. et Sabir W., 2010. « Aphid dynamics in relation to meteorological factors and various management practices in bread wheat ». *Journal of Plant Protection Research* 50(3): 385-392.
- Wang Y. et Ba F., 1998. « Study of the optimum control of soybean aphid ». *Acta Phytolacica Sinica* 25(2): 151-155
- Wetzler R.E. et Risch S.J., 1984. « Experimental studies of beetle diffusion in simple and complex crop habitats ». *Journal of Animal Ecology* 53: 1-19.
- Wheeler AG Jr, 2001. « Biology of Plant Bugs (Hemiptera : Miradae). Pests, Predators, Opportunists ». Cornell University Press, New York. 507 pp.
- Wise I.L., Lamb R.J., McKenzie R.I.H. and Wistlecrafft J.W., 2006. « Resistance to Hessian fly (Diptera: Cecidomyiidae) in a Canadian spring wheat cultivar ». *The Canadian Entomologist* 138 (5): 638-646.

- Wise I.L., Lamb R.J. et Smith M.A.H., 2002. « Susceptibility of hulled and hulless barley (Gramineae) to *Sitodiplosis mosellana* (Diptera: Cecidomyiidae) ». *The Canadian Entomologist* 134(2): 1991-8631.
- Wise, I. L., Tucker, J. R. et Lamb, R. J. 2000. « Endommagements des grains de blé par la punaise terne *Lygus lineolaris* L ». *Canadian Journal of Plant Science* 80: 459-461.
- Yao F.-L., You M.S., Vasseur L., Yang G. et Zheng Y.-K., 2012. « Polycultural manipulation of better regulation of planthopper populations in irrigated rice-based ecosystems ». *Crop Protection* 34: 104-111.
- Yves A.R. et Carpenter S.R., 2007. « Stability and diversity of ecosystems ». *Science* 317(5843): 58-62.
- Zhang et al, 2007. « Growth, yield and quality of wheat and cotton in relay strip intercropping systems ». *Field Crops Research* 103 : 178-188.
- Zhao G., Liu W., Brown M. John et Knowles O.C., 1995. « Insecticide resistance in field and laboratory strains of western flower thrips (Thysanoptera: Thripidae) ». *Journal of Economic Entomology* 88(5): 1164-1170.