



Agriculture et
Agroalimentaire Canada

Agriculture and
Agri-Food Canada



Pratiques agricoles favorisant la répression des ravageurs des cultures par leurs prédateurs naturels

Elsa Étilé, Ph.D.

Pratiques agricoles favorisant la répression des ravageurs des cultures par leurs prédateurs naturels

Revue de littérature présentée à Agriculture et Agroalimentaire Canada
Contrat 01B46-2011-0257
Présentée le 06 août 2012, Montréal, QC

Les opinions et déclarations contenues dans cette publication n'engagent que leur auteur et ne reflètent pas nécessairement la politique d'Agriculture Agroalimentaire Canada ou celle du gouvernement du Canada.

© Sa Majesté la Reine du Chef du Canada, représentée par le ministre de l'Agriculture et de l'Agroalimentaire (2013).

No AAC : AAFC 12189F
No de catalogue Catalogue Number : A59-13/2014F-PDF
ISBN : 978-0-660-21851-9

*Issued also in English under the title
Agricultural Practices that Promote Crop Pest suppression by Natural Predators*

Photo de la page couverture : plant de piment visité par une coccinelle. Crédit photographique : M.E. Bartolo, Bugwood.org.

TABLE DES MATIÈRES

I.	INTRODUCTION.....	3
II.	RÔLE DES HABITATS SEMI-NATURELS ET DES ZONES NON-CULTIVÉES POUR LES ENNEMIS NATURELS	6
A.	Hôtes et proies alternatifs	7
B.	Ressources alimentaires végétales	9
C.	Abri et aires d'hivernation et de reproduction	10
D.	Paysage	12
III.	PRATIQUES D'AMÉNAGEMENT PROPICES À L'OPTIMISATION DE L'ACTIVITÉ DES ENNEMIS NATURELS	15
A.	Zones non-cultivées en périphérie des champs	15
B.	Favorisation de la biodiversité au sein des zones cultivées	17
C.	Implications pratiques	18
	Pratiques culturales et systèmes agricoles possibles	19
	Choix des stratégies culturales.....	20
	Choix des espèces de plantes en polyculture ou pour l'aménagement de l'habitat.....	21
D.	Autres pratiques culturales ayant un effet sur les ennemis naturels	24
	Labour.....	24
	Utilisation d'herbicides et de pesticides	24
	Fertilisation azotée	25
	Dates de semis et de récolte	25
	Dissémination de nourriture.....	25
IV.	CONCLUSION.....	26
	ANNEXE I	28
	ANNEXE II	30
V.	BIBLIOGRAPHIE	33

I. INTRODUCTION

Développée dans le but d'augmenter la productivité et de satisfaire les besoins grandissant en nourriture et en fibres textiles, l'agriculture moderne a eu pour conséquence une considérable simplification des systèmes cultureux en ce qui concerne la diversité des espèces cultivées et les pratiques culturelles à l'échelle des paysages agricoles (Altieri 1999, Altieri and Nicholls 2004). On considère aujourd'hui que ce sont dans les environnements agricoles que l'on constate de façon la plus évidente les conséquences de la perte massive de biodiversité (Altieri and Nicholls 2004). Au Canada l'expansion de l'agriculture intensive s'est produite sans conserver une quantité suffisante d'habitats naturels. Plus de la moitié des zones humides du sud du pays ont été perdues, dont 70% étaient situées dans le sud de l'Ontario (Mineau and McLaughlin 1996).

Associée à cette simplification de l'environnement agricole, la fragilisation des défenses naturelles des écosystèmes agricoles a mené à une utilisation intensive d'intrants pétrochimiques pour contrer rapidement les invasions de ravageurs, mauvaises herbes ou maladies devenues plus fréquentes (Matson *et al.* 1997). En 2008, la perte de production mondiale associée aux ravageurs arthropodes était estimée à 15% (Pimentel 2008). Les conséquences néfastes de cet usage massif de pesticides artificiels ne sont plus à prouver. L'usage des pesticides cause des dommages à l'environnement et à la santé humaine, et entraîne une perte d'efficacité liée au développement de résistance des insectes et des pertes économiques (Ekström and Ekbom 2011). En 2005, 2,4 millions d'hectares de terres agricoles canadiennes étaient traitées avec des insecticides (Statistiques Canada, 2006). En 2007, on estimait l'utilisation mondiale d'agents actifs à plus de 2,3 millions de tonnes et les dépenses associées, à plus de 39 milliards de dollars US (Grube *et al.* 2011). L'une des principales conséquences de l'agriculture intensive et de la lutte chimique demeure la diminution de la biodiversité et la perte des services écosystémiques qui lui sont associés, comme par exemple la pollinisation et la répression des ravageurs (Bianchi *et al.* 2006, Denys and Tscharrntke 2002).

Il est aujourd'hui largement acquis que le développement de systèmes de production agricole plus durables dépend de la réduction de l'utilisation des pesticides et, par conséquent, de la mise en place de systèmes cultureux favorisant la biodiversité et

basés sur l'utilisation des services fournis naturellement par les agroécosystèmes (Altieri and Nicholls 2004, Dinter 2002, Gurr *et al.* 2003, Landis *et al.* 2000, Madsen *et al.* 2004, Östman and Ives 2003, Ratnadass *et al.* 2012). Plus qu'une évolution vers de nouvelles techniques agricoles, l'agroécologie d'aujourd'hui s'inspire aussi des pratiques agricoles ancestrales ou pratiquée dans les pays en voie de développement, lesquelles sont basées sur la valorisation de la biodiversité et la mise en place de méthodes calquées sur les processus écologiques naturels (Altieri and Nicholls 2004). Cependant, les contextes agricoles et socio-économiques contemporains étant totalement différents, l'implantation efficace de ces pratiques représente un défi de taille.

Parmi les différents services offerts par les écosystèmes, la répression naturelle des ravageurs est considérée comme l'un des plus importants (Médiène *et al.* 2011, Östman and Ives 2003). Sa valeur annuelle était estimée à plus de 400 milliards de dollars US à l'échelle de la planète en 1997 (Jones and Sieving 2006) et évaluée à environ 5 milliards de dollars US au Canada en 2010. La diversité dans les agroécosystèmes peut favoriser l'activité des ennemis naturels et ainsi réduire la pression des ravageurs et les coûts qui leurs sont associés.

Cependant, plusieurs auteurs ont souligné l'importance d'identifier et supporter les fonctions écosystémiques clés qu'il faut diversifier, plutôt que de « diversifier pour diversifier » (Landis *et al.* 2000). Il a en effet été démontré que l'augmentation simple de la diversité peut éventuellement exacerber certains problèmes phytosanitaires (Gurr *et al.* 1998). Par conséquent, il est bien important de s'attarder aux mécanismes écologiques sous-jacents avant de considérer les pratiques culturales permettant une contribution optimale des alliés des cultures.



Figure 1. Application d'herbicide dans un champ cultivé selon un système de culture sans labour.

Crédit photographique : Jack Dykinga, USDA-ARS.

L'aménagement des environnements agricole dans le but de favoriser l'activité répressive des ennemis naturels définit la pratique de la « lutte biologique conservative ». Bien qu'elle fasse partie des moyens de répression des insectes nuisibles les plus anciennement documentés (Coll 2009), la lutte biologique conservative a été initialement négligée par la recherche scientifique au profit des autres formes de lutte biologique. La tendance s'est visiblement inversée durant ces deux dernières décennies et le nombre de publications sur le sujet s'est accru de façon considérable (Landis, Wratten and Gurr 2000). Aujourd'hui, il est généralement accepté que la lutte biologique conservative devrait être la trame de fond de tout programme de gestion des ennemis des cultures, qu'elle soit biologique ou intégrée (Coll 2009).

L'objectif de cette revue est tout d'abord de rassembler l'information permettant de comprendre le rôle de la biodiversité dans le service écologique de répression des ravageurs agricoles par leurs ennemis naturels, puis de présenter les pratiques agricoles visant à la favoriser ce service dans les agroécosystèmes et à mettre en place la lutte biologique conservative. Cette revue cible les résultats de travaux utiles aux principales cultures des provinces de l'Est du Canada, les productions maraîchères exclues.



Figure 2. Haie de saule à l'Île du Prince-Édouard, Canada.

Crédit photographique : Victoria MacPhail, 2012.

II. RÔLE DES HABITATS SEMI-NATURELS ET DES ZONES NON-CULTIVÉES POUR LES ENNEMIS NATURELS

Les monocultures sont des environnements dans lesquels il est difficile d'établir une répression biologique efficace parce que les ressources qu'ils offrent sont insuffisantes pour assurer que les populations d'ennemis naturels performant de façon optimale (Altieri and Nicholls 2004, Rusch *et al.* 2012). Les habitats semi-naturels, comme les forêts, les haies, les bordures de champs, les terres en jachère et les prés contiennent de nombreuses espèces d'arthropodes bénéfiques, puisqu'ils fournissent un environnement plus stable que les monocultures (Altieri and Nicholls 2004, Bianchi, Booij and Tscharntke 2006, Médiène, Valantin-Morison, Sarthou, De Tourdonnet, Gosme, Bertrand, Roger-Estrade, Aubertot, Rusch, Motisi, Pelosi and Doré 2011, Rusch *et al.* 2010). Cette stabilité est due au fait que ces habitats sont plus complexes et qu'ils renferment une plus grande biodiversité que les monocultures annuelles, fragilisées par plusieurs siècles de simplification (Altieri and Nicholls 2004) et de perturbation régulière.

Malgré que l'on ait longtemps cru que les habitats semi-naturels constituent une source d'organismes nuisibles, on sait aujourd'hui que de manière générale, ils contiennent davantage d'organismes bénéfiques que d'organismes nuisibles (Denys and Tscharntke 2002, Marshall 2004). La conservation ou la création de ces habitats est par conséquent primordiale au développement d'une agriculture durable.

Afin d'orienter les efforts de conservation, il est bien important de comprendre précisément par quels moyens ces habitats offrent les ressources adéquates au maintien des populations d'ennemis naturels et à l'optimisation de leur fonction répressive (Landis, Wratten and Gurr 2000). Selon Landis *et al.* (2000), il faut viser la « bonne diversité ». Ce processus peut être guidé par l'étude des ressources dont ont besoin les auxiliaires. Les habitats semi-naturels offrent aux insectes prédateurs et parasitoïdes des proies et des hôtes alternatifs aux ravageurs cibles, des ressources nutritives végétales, ainsi que des abris et des aires d'hivernation (Landis, Wratten and Gurr 2000, Médiène, Valantin-Morison, Sarthou, De Tourdonnet, Gosme, Bertrand, Roger-Estrade, Aubertot, Rusch, Motisi, Pelosi and Doré 2011, Rusch, Valantin-Morison, Roger-Estrade and Sarthou 2012).



Figure 3. Punaise prédatrice généraliste de l'espèce *Nabis americana* attaquant un puceron.

Crédit photographique : MAPAQ, IRIIS phytoprotection (<http://www.iriisphytoprotection.qc.ca/>), 2013.

A. Hôtes et proies alternatifs

Les habitats non cultivés contiennent des populations d'hôtes et proies alternatifs utiles aux parasitoïdes et prédateurs des ravageurs (Bianchi, Booij and Tscharntke 2006, Denys and Tscharntke 2002, Landis, Wratten and Gurr 2000)). Selon Landis et Menalled (1998), plus de 60% des hôtes alternatifs des parasitoïdes qui répriment les populations de lépidoptères herbivores dans le maïs, le soya le blé et la luzerne se retrouvent également dans des arbres et des arbustes.

Il est aujourd'hui largement acquis que la présence et l'accessibilité de proies ou hôtes alternatifs sont primordiales afin que les insectes prédateurs généralistes (ayant plusieurs proies ou hôtes alternatifs) assurent une répression optimale des organismes nuisibles. La consommation de ressources alternatives par les insectes prédateurs devient désavantageuse seulement si elle se fait au dépend de la consommation du ravageur cible (Huffaker and Flaherty 1966). Les ressources animales alternatives sont utiles pour la survie en cas de faible densité de proies suite à une chute des populations, ou lors d'un décalage temporel entre les proies et les ennemis naturels d'intérêt (van Emden 1990). De par leur alimentation plus variée, les prédateurs généralistes sont plus dépendants des proies ou hôtes alternatifs que les prédateurs spécialistes (Rusch, Valantin-Morison, Sarthou and Roger-Estrade 2010).

Östman et Ives (2003) ont rapporté que la présence de fortes populations de pucerons du pois *Acyrtosiphon pisum* (figure attirait les punaises prédatrices (*Nabis* spp.) dans des champs de luzerne. Subséquemment, l'augmentation des populations de punaises dans les champs a permis une meilleure répression de la cicadelle de la pomme de terre (*Empoasca fabae*), un ravageur important de la culture (Östman and Ives 2003). Lorsque

la proie alternative et le ravageur cible sont tous deux un ennemi de la culture, comme dans le cas du puceron du pois et de la cicadelle de la pomme de terre, on parle d'« interaction proie-proie négative ».

La présence de ces proies alternatives peut même dans certains cas accroître la taille des populations d'auxiliaires. La densité de la population du parasitoïde *Anagrus erpos* s'est accrue de façon significative grâce à la présence d'habitats semi-naturels offrant des proies alternatives (Corbett and Rosenheim 1996).

Plusieurs espèces de parasitoïdes peuvent se nourrir du miellat sécrété par de nombreuses espèces d'insectes suceurs de sève comme les pucerons (Wäckers *et al.* 2008). Leur présence dans les zones non-cultivées peut donc favoriser la répression des ravageurs dans les champs. Evans et England (1996) ont reporté des niveaux plus élevés de parasitisme du charançon de la luzerne (*Hypera prostica*) par l'hyménoptère *Bathyplectes curculionis* en présence de pucerons du pois (Evans and England 1996). L'accès au miellat des pucerons a permis d'augmenter de façon significative la fécondité ainsi que la durée de vie des adultes du parasitoïde. De même, Fuschberg *et al.* (2007) ont reporté un taux de parasitisme des œufs de pyrale du maïs environ deux fois supérieur chez les femelles du parasitoïde *Trichogramma ostriniae* ayant eu accès au miellat sécrété par le puceron du maïs *Rhopalosiphum maidis*. Ces parasitoïdes ont également augmenté la taille de leur progéniture et la proportion de femelles dans ces conditions (Fuchsberg *et al.* 2007).

Il a également été démontré que la présence de proies alternatives peut faciliter le contrôle biologique des organismes nuisibles en diminuant la prédation intraguilde qui pourrait exister entre leurs différents prédateurs. Dinter (2002), rapporte une meilleure répression du puceron des céréales *Sitobion avenae* (Homoptera : Aphididae) par une combinaison de larves de chrysopes et d'araignées en présence de proies alternatives. L'introduction de collemboles et de mouches à fruits au système a visiblement diminué la prédation intraguilde entre araignées et chrysope qui avait été constatée en l'absence de ces proies alternatives (Dinter 2002).

Il est tout de même important de noter que la présence de proies alternatives n'a pas toujours d'effet positif sur la répression des insectes nuisibles; ceci est en partie dû à la spécificité de chaque interaction prédateur-proie et prédateur-prédateur et du comportement alimentaire des différents protagonistes (Gavish-Regev *et al.* 2009, Lucas and Rosenheim 2011, Madsen, Terkildsen and Toft 2004, Ratnadass, Fernandes, Avelino and Habib 2012).

Figure 4. Les larves et les carabes adultes de l'espèce *Agonum muelleri* chassent les limaces, les chenilles, les pucerons et autres insectes à corps mou.

Crédit photographique : MAPAQ, IRIS phytoprotection (<http://www.iriisphytoprotection.qc.ca/>), 2013.



B. Ressources alimentaires végétales

La littérature compte de nombreuses études qui mentionnent la végétation comme source nutritionnelle alternative pour les prédateurs et parasitoïdes (Bianchi, Booij and Tscharnkte 2006, Lundgren *et al.* 2009, Wäckers, van Rijn and Heimpel 2008) en font des revues). L'exploitation du pollen, des nectars floraux et extra-floraux, de la sève ou des graines des plantes s'observe chez une grande variété d'ordres d'insectes, incluant les Hyménoptères, les Diptères, les Coléoptères, les Hétéroptères, les Thysanoptères, les Neuroptères, les Lépidoptères, mais aussi chez certains arachnides comme les araignées et les acariens prédateurs (Hagen 1986, Wäckers, van Rijn and Heimpel 2008). Seulement 25% des 163 familles d'insectes parasites et prédateurs étudiés par Hagen (1987) étaient strictement carnivores. Les 75% autres se nourrissaient de ressources végétales à au moins un stade de leur vie (Hagen 1986).

Ces sources de sucre, de protéines et parfois d'eau constituent pour eux des sources d'énergie pour la reproduction, aident à les maintenir en vie en lorsque les proies viennent à manquer et sont aussi un moyen d'équilibrer leur alimentation (Landis *et al.* 2005, Lundgren 2009, Rusch, Valantin-Morison, Sarthou and Roger-Estrade 2010). Plusieurs études ont montré qu'une végétation plus diverse résulte en une plus grande disponibilité de pollen et de nectar, menant par exemple, à une plus grande densité de carabes dans le blé (Zangger *et al.* 1994), de syrphes dans l'orge (Sutherland *et al.* 2001) ou de coccinelles dans les vergers (Brown 2012). D'autres études ont montré que plusieurs espèces de parasitoïdes se nourrissent de nectars floraux (Jervis *et al.* 1993, Wäckers 2001) et voient leur taux de parasitisme, la taille de leur population, leur

distribution ou leur diversité varier selon la disponibilité de nectar floral (Berndt *et al.* 2006, Marino *et al.* 2006).

Plusieurs espèces de parasitoïdes et prédateurs utilisent les ressources végétales situées dans les habitats semi-naturels en dehors des champs. Selon Lundgren (2009), cette migration vers les habitats adjacents aux champs serait même obligatoire pour certains alliés naturels dont la survie dépend de la disponibilité de ces ressources végétales souvent plus stable dans l'espace et dans le temps que les ressources animales. Par conséquent, en plus d'améliorer leur survie, ces ressources alimentaires influencent le mouvement des ennemis naturels vers et hors des zones cultivées (Lundgren 2009).



Figure 5. Une bande fleurie en marge d'une culture en Grande-Bretagne procure à de nombreuses espèces de prédateurs les ressources végétales, comme le pollen et le nectar des fleurs, dont ils ont besoin à un ou plusieurs stades de leur vie.

Crédit photographique : ©
Copyright Living
Countryside,
www.ukagriculture.com.

C. Abri et aires d'hivernation et de reproduction

De par leur complexité structurale supérieure à celle des zones cultivées, les habitats non-cultivés peuvent bénéficier aux populations d'arthropodes en leur offrant des abris, des zones de reproduction ou des aires d'hivernation (Altieri and Nicholls 2004). Plusieurs études ont montré que la végétation herbacée et les zones boisées offrent un microclimat plus modéré que les champs cultivés, protégeant ainsi les ennemis naturels des variations de température trop importantes (Rahim *et al.* 1991). Dans le maïs par exemple, l'accès au microclimat des zones non-cultivées dans et en bordure des champs a permis d'améliorer la longévité et le taux de parasitisme de parasitoïdes importants de la pyrale du maïs (Dyer and Landis 1996, Landis and Haas 1992, Orr *et al.* 1997). Dans la luzerne, la pratique de la récolte en bandes permet de conserver des zones refuges aux

ennemis naturels et de conserver des populations de différentes espèces de chrysopes, de coccinelles et de punaises prédatrices (Landis, Wratten and Gurr 2000).

Dans les cultures annuelles, ces zones refuges servent également d'habitats d'hivernation pour les ennemis naturels. Dans le contexte canadien, il est important de souligner l'importance de ces zones d'hivernation. En effet, peu d'insectes prédateurs survivent à l'hiver canadien dans les environnements agricoles ouverts (McLaughlin and Mineau 1995). La densité des populations de ces insectes bénéfiques au printemps dépend fortement de la quantité d'habitats semi-naturels disponibles durant l'hiver précédent (McLaughlin and Mineau 1995).

Par ailleurs, la diversité et la distribution des zones d'hivernation déterminent aussi la distribution spatiale et temporelle au printemps suivant. Par exemple, le syrphe *Episyrphus balteatus*, prédateur important de pucerons dans les régions de l'Est du Canada, hiverne sous forme d'adulte ou sous forme de larve, dépendamment du type d'abris hivernaux à sa disposition et de leur orientation géographique (Sarhou *et al.* 2005).

Étant donné que la survie hivernale des ennemis naturels est cruciale à l'efficacité de la répression qu'ils offriront durant la saison suivante, plusieurs études ont tenté d'identifier quels habitats permettent d'optimiser les conditions d'hivernation des ennemis naturels (Landis, Wratten and Gurr 2000). Par exemple, en Angleterre, une étude menée dans des champs de céréales a permis d'identifier les herbes pérennes *Dactylis glomerata* et *Hocus lanatus* comme les espèces à privilégier lors de la création de « beetle banks » (bandes enherbées pour coléoptères) car elles supportent un plus grand nombre de prédateurs (Thomas *et al.* 1992).



Figure 6. Les syrphidés adultes se nourrissent de pollen et de nectar, mais leurs larves sont prédatrices et se nourrissent de pucerons, de cochenilles et d'autres petits insectes à corps mou.

Crédit photographique : MAPAQ, IRIIS
phytoprotection (<http://www.iriisphytoprotection.qc.ca/>), 2013.



Figure 7. Paysage agricole hétérogène comportant de nombreux habitats naturels et semi-naturels.

Crédit photographique :
Ron Garnett, AirScapes.ca.

La végétation non-cultivée peut également servir de sites d'oviposition à plusieurs espèces d'auxiliaires (Landis, Wratten and Gurr 2000). Par exemple, la coccinelle maculée *Coleomegilla maculata* (Coleoptera: Coccinellidae), un prédateur très généraliste présent dans de nombreuses cultures herbacées et dans les vergers de l'Est du Canada (Coderre and Tourneur 1986), pond plus d'œufs sur la mauvaise herbe *Acalypha ostryaefolia* que sur le maïs sucré, même si elle contient moins de proies que le maïs. Les parcelles de maïs entourées d'*A. ostryaefolia* contiennent significativement plus de *C. maculata* que les parcelles sans bordure et le taux de prédation sur le vers de l'épi *Helicoverpa zea* y est également supérieur (Cottrell and Yeargan 1998).

Selon Keller et Häni (2000), neuf espèces d'auxiliaires sur dix ont besoin d'un environnement non-cultivé à au moins un stade de leur cycle de vie, alors que pour les insectes nuisibles, ce ne serait le cas que pour 50% d'entre eux (Keller and Häni 2000).

D. Paysage

L'importance du contexte paysager sur la dynamique des ravageurs et de leurs ennemis naturels est de plus en plus documentée (Bianchi, Booij and Tscharrntke 2006, Veres *et al.* 2011). Les revues de Bianchi *et al.* (2006) et de Veres *et al.* (2011) ont fait ressortir que, dans la plupart des situations, les paysages plus complexes comportant davantage d'habitats semi-naturels sont associés à une plus grande abondance et une plus grande diversité d'ennemis naturels. Malheureusement, peu nombreuses sont les études ayant tenté de déterminer quel était l'impact réel de ces changements sur les populations de

ravageurs et sur les dommages qu'ils occasionnent. Pour cette raison, les liens directs entre la répression naturelle des ravageurs et le paysage sont moins clairs (Veres *et al.* 2011).

Sur dix études mentionnées dans la revue de Bianchi *et al.* (2006), cinq ont mis en évidence une réduction de la pression des ravageurs dans les paysages complexes. Dans ces cinq études, la pression mesurée variait entre 5 à 60% de la pression mesurée dans les paysages non diversifiés (une de ces études avait mesuré une influence positive significative dans la moitié des observations seulement). Les ravageurs affectés étaient principalement des espèces de pucerons, de thrips et de méligèthes. Ces études ont mentionné des effets tels que l'augmentation du taux d'oviposition ou du taux de parasitisme des ennemis naturels pour expliquer ces résultats (Bianchi, Booij and Tscharntke 2006).

Par ailleurs, plusieurs études récentes ont souligné l'importance de considérer les interactions biologiques à des échelles plus grandes que l'habitat ou le champ lors de la mise en place de programmes de lutte biologique conservative ; la proportion d'habitats cultivés et non-cultivés ainsi que leur disposition dans le paysage sont des facteurs d'importance pour la dynamique des ennemis naturels (Médiène, Valantin-Morison, Sarthou, De Tourdonnet, Gosme, Bertrand, Roger-Estrade, Aubertot, Rusch, Motisi, Pelosi and Doré 2011, Veres, Petit, Conord and Lavigne 2011).

Dans l'Est du Canada, très peu d'études se sont intéressées à l'effet du contexte paysager sur les ravageurs et leurs ennemis naturels. Au Québec, une étude parue en 2010 avait pour objectif de déterminer si le paysage influençait l'assemblage d'insectes prédateurs (des carabes) fréquentant les fossés bordant les champs de maïs grain. Il en est ressorti que les zones non-cultivées et l'hétérogénéité du paysage avaient, de façon générale, une influence positive sur l'abondance et la diversité des carabes, ce qui concorde avec les tendances actuelles (Maisonhaute *et al.* 2010).



Figure 8. Guêpe braconide de l'espèce *Aphidius cleman* près d'une momie de puceron (puceron parasité).

Crédit photographique : David Cappaert, Michigan State University, Bugwood.org.

Dans le soya, des études américaines ont démontré que la simplification du paysage agricole avait entraîné une réduction de 24% de la répression du puceron du soya par ses ennemis naturels (Landis *et al.* 2008). Une autre étude actuellement en cours au Québec a pour objectif de déterminer quelles sont les structures du paysage favorisant ou non les infestations et l'établissement du puceron du soya dans les champs, ainsi que sa répression par les ennemis naturels (étude actuellement en cours à l'Université du Québec à Montréal). Le but ultime de cette étude est de pouvoir effectuer des recommandations aux producteurs agricoles. En effet, la recherche en est encore à ses prémices pour ce qui est du développement de critères de gestion du paysage accessibles aux producteurs et de la mise en pratique. Il est tout d'abord crucial de savoir à quelle échelle spatiale les espèces répondent aux effets du paysage (Médiène, Valantin-Morison, Sarthou, De Tourdonnet, Gosme, Bertrand, Roger-Estrade, Aubertot, Rusch, Motisi, Pelosi and Doré 2011).

III. PRATIQUES D'AMÉNAGEMENT PROPICES À L'OPTIMISATION DE L'ACTIVITÉ DES ENNEMIS NATURELS

A. Zones non-cultivées en périphérie des champs

Les fonctions agroécologiques des habitats semi-naturels mettent en évidence l'importance des zones non-cultivées pour les ennemis naturels et soulignent donc la nécessité de conserver ou d'implanter ces zones dans un environnement agricole. La variété des ressources disponibles dans ces zones non-cultivées permet le développement des arthropodes bénéfiques qui se déplacent ensuite vers les champs (Duelli *et al.* 1990, Tscharnkte *et al.* 2007). Il a en effet été démontré que la quantité et la qualité de parcelles d'habitats non-cultivés adjacentes au champ peut affecter la régulation « top-down » des organismes nuisibles (Olson and Wäckers 2007). L'implantation de zones tampons (bordures, haies, bandes enherbées pour coléoptères (*beetle banks*), bandes de conservation, coupe-vents) constituent des moyens pratiques d'utiliser les fonctions naturelles des habitats non-cultivés au profit des cultures (Médiène, Valantin-Morison, Sarthou, De Tourdonnet, Gosme, Bertrand, Roger-Estrade, Aubertot, Rusch, Motisi, Pelosi and Doré 2011).



Figure 9. Large bande enherbée, en Grande-Bretagne, qui constitue un refuge pour les coléoptères (*beetle bank*).

Crédit photographique : © Copyright Living Countryside, www.ukagriculture.com.

Il existe de nombreux cas où l'implantation ou la conservation de zones tampons a permis d'améliorer la répression biologique des ravageurs par les ennemis naturels (Altieri and Nicholls 2004). Cependant, selon ces mêmes auteurs, plusieurs questions requièrent encore de la recherche afin de tirer des conclusions plus claires sur la façon d'offrir des bordures non-cultivées aux auxiliaires bénéfiques :

1. A quel point les ennemis naturels dépendent-ils des haies, des fossés ou des forêts pour leur existence dans les zones agricoles, particulièrement durant l'hiver ?
2. Est-ce que ces bordures influencent la diversité et l'abondance des organismes entomophages retrouvés dans les champs adjacents ?
3. Quels attributs spécifiques des zones tampons sont importants pour les ennemis naturels ?
4. Est-il possible d'optimiser les refuges naturels déjà présents ou faut-il en créer de nouveaux ?

Ces questions sont encore tout à fait d'actualité au Canada car très peu d'études ont tenté d'y répondre. En 1996, Mineau et McLaughlin avançaient que les écologistes canadiens avaient encore beaucoup à faire avant de pouvoir faire des recommandations d'aménagement spécifiques qui permettraient d'optimiser les services offerts par les écosystèmes. Dans les provinces de l'Est du Canada, très peu d'études se sont penchées sur l'influence de ces zones non-cultivées sur l'abondance et l'activité des organismes bénéfiques (Boutin *et al.* 2003, Boutin *et al.* 2009, Maisonhaute, Peres-Neto and Lucas 2010). Mondialement, un nombre grandissant d'études se sont penchées sur l'influence de ces habitats périphériques sur les populations d'arthropodes (Asteraki *et al.* 2004, Blake *et al.* 2011, Cole *et al.* 2007, Denys and Tscharntke 2002, Eyre and Leifert 2011, Frampton and Dorne 2007, Olson and Wäckers 2007, Reeves *et al.* 2010, Thomas and Marshall 1999, Thomas *et al.* 2001). Par contre, un nombre restreint d'entre elles ont comparé les différentes techniques d'implantation ou de conservation de ces zones non-cultivées afin de tirer des conclusions permettant d'offrir des recommandations aux producteurs (Fritch *et al.* 2011, Olson and Wäckers 2007, Thomas and Marshall 1999). Aucune étude de ce type n'a été recensée dans l'Est du Canada.

B. Favorisation de la biodiversité au sein des zones cultivées

La diversité au sein d'un paysage agricole est directement liée à la taille des populations d'ennemis naturels et à la répression des ravageurs dans ce contexte paysager (Landis, Menalled, Costamagna and Wilkinson 2005). Il est possible que la meilleure façon de favoriser les insectes auxiliaires soit de rendre disponibles les ressources dont ils dépendent directement à l'intérieur des champs (Andow 1991, Lundgren 2009). En effet, ce ne sont pas toutes les espèces entomophages qui sont capables de voyager en dehors des champs en quête de ressources. Pour plusieurs prédateurs, le stade larvaire est relativement ou entièrement sessile, et par conséquent, seules les ressources disponibles au sein même du champ leurs sont accessibles (Lundgren 2009). De plus, plusieurs parasitoïdes, et aussi certains prédateurs, sont fortement dépendants du vent pour leurs déplacements, ce qui peut rendre leur migration hors du champ et leur retour dans le champ assez difficile. Le fait d'incorporer les ressources directement au champ permet donc de limiter le besoin d'émigration de ces auxiliaires bénéfiques hors des champs (Lundgren 2009).

La polyculture, qui peut se définir comme un type d'aménagement cultural au sein duquel au moins deux plantes utiles sont cultivées simultanément (Ruthenberg 1971), permet de favoriser l'activité des ennemis naturels en leur offrant diverses ressources, comme des ressources alimentaires alternatives, des aires de reproduction, des abris et des zones d'hivernation, et ceci au sein même des champs à protéger (Altieri and Nicholls 2004). Les résultats de la revue publiée par Andow (1991) indiquent que les bénéfiques associés aux systèmes en polyculture dépassent les effets négatifs. Sur les 287 espèces d'herbivores identifiées par Andow, 52% étaient moins abondantes dans les agroécosystèmes diversifiés par rapport aux monocultures, alors que seulement 15% d'entre elles ont été plus abondantes dans les polycultures. L'une des principales hypothèses avancée pour expliquer ces résultats est l'hypothèse de « l'ennemi naturel », initialement proposée par Root (1973). Selon cette hypothèse, les ennemis naturels généralistes (p. ex. les chrysopes, les coccinelles) et les spécialistes (surtout les parasitoïdes) devraient être plus nombreux dans les polycultures et par conséquent, seraient plus efficaces à réprimer les populations d'herbivores (Altieri and Nicholls 2004, Root 1973). Les généralistes devraient être également plus abondant principalement parce que : ils peuvent alterner leur alimentation entre les différents types d'arthropodes présents dans les polycultures à différents moments de la saison de croissance ; ils peuvent avoir accès aux ressources végétales (pollen, nectar) offertes par

les polycultures ; les proies et hôtes sont plus abondants et plus divers dans les polycultures ; ils maintiennent leurs populations en reproduction (Smith and McSorley 2000). Quant aux organismes spécialistes, ils devraient être plus abondants surtout parce que les refuges offerts par les polycultures à leurs proies/hôtes empêchent l'extinction de leurs populations, ce qui stabilise les relations prédateurs-proies et parasitoïdes-hôtes (Altieri and Nicholls 2004).

Certains auteurs ont cependant avancé que la diversification pourrait avoir un impact négatif sur les organismes spécialistes, qui, perturbés par des proies réparties de façon moins homogène, perdraient leur capacité à repérer ces proies (Sheehan 1986). Ces divergences théoriques nous rappellent à quel point les systèmes agroécologiques sont complexes et nous explique pourquoi la mise en place de recommandations pratiques est elle aussi une tâche complexe.

C. Implications pratiques

Nous avons mis en évidence l'importance de la biodiversité dans et autour des champs dans le but de favoriser le service écosystémique de répression des ravageurs. Plusieurs facteurs sont à prendre en considération lorsqu'on en vient aux implications pratiques de manipulation de l'habitat. Encore une fois, il ne s'agit pas de « diversifier pour diversifier » mais bien de mettre en place des stratégies de diversification optimales en tenant compte de la biologie des organismes impliqués aux différents niveaux trophiques et des principes écologiques qui déterminent les interactions entre eux. Concrètement, le défi est de trouver les façons optimales d'augmenter la biodiversité sans compromettre l'objectif initial de l'agriculture basé sur des cultures productives et durables.

Un autre défi consiste à motiver les producteurs à adopter ces méthodes de suppression des ravageurs. Beaucoup d'entre eux demeurent hésitants à adopter ces pratiques, d'une part à cause du caractère imprévisible des méthodes de répression basées sur l'écologie et d'autre part à cause de la complexification que ces méthodes amènent dans leurs pratiques agricoles. L'aménagement de l'habitat est souvent plus complexe que les techniques de contrôle des ravageurs utilisées dans l'agriculture conventionnelle et va à l'inverse de la simplification des pratiques agricoles largement favorisée durant le dernier siècle (Gurr, van Emden and Wratten 1998). Le travail des chercheurs est donc de taille, et les caractéristiques uniques de chaque système agricole le rend d'autant plus complexe.

Pratiques culturales et systèmes agricoles possibles

Plusieurs pratiques agronomiques ont été expérimentées durant les dernières décennies, s'inspirant souvent des principes agricoles traditionnels (Altieri and Nicholls 2004). Parmi ces pratiques, on retrouve les cultures mixtes, la culture en bandes alternées, les cultures intercalaires, les couvre-sols et l'agroforesterie. Le tableau à l'annexe I, inspiré de Gurr (2003), Altieri et Nicholls (2004) et Lundgren (2009), répertorie l'ensemble de ces pratiques avec une brève description de la mise en pratique et des références aux auteurs les ayant présentées ou mentionnées dans des revues.

Altieri et Nicholls (2004) proposent d'utiliser ces différentes options selon que la culture à protéger soit de nature annuelle ou pérenne. Ainsi, pour des cultures annuelles telles que le maïs, le soya, les céréales et certaines plantes fourragères, les producteurs devraient favoriser des techniques comme la rotation des cultures, les cultures intercalaires, les bandes alternées, les couvre-sols de mauvaises herbes, les friches aménagées ou les brise-vents en périphérie des champs. Pour les systèmes de cultures pérennes telles que les vergers, les vignobles et certaines plantes fourragères (p.ex. la luzerne), les auteurs préconisent les couvre-sols, le paillis vivant, les polycultures pérennes, les vergers mixtes, les cultures intercalaires de plantes annuelles et la manipulation de la végétation environnante.



Figure 10. Culture de maïs et de lin en bandes alternées.

Crédit photographique : © Copyright Living Countryside, www.ukagriculture.com.

En plus de favoriser la répression des ravageurs par leurs ennemis naturels, ces techniques apportent d'autres services écosystémiques qui contribuent au développement de systèmes cultureux durables, comme par exemple de limiter les invasions par les ravageurs eux-mêmes et d'améliorer la santé du sol, selon les cas. Ces services ne feront pas l'objet de cette revue.

Choix des stratégies culturelles

Il peut être complexe de choisir les meilleures stratégies pour offrir aux auxiliaires des cultures les ressources dont ils ont besoin et optimiser leurs activités. En ce qui concerne l'accès à de la nourriture végétale alternative, Lundgren (2009) suggère que la meilleure solution serait peut-être une combinaison des différentes pratiques listées à l'annexe 1.

Le développement de solutions de gestion des ravageurs est quasiment impossible sur de larges zones géographiques parce que les sols, le climat, les populations de ravageurs et l'historique de gestion des sites sont tous des facteurs qui influencent les interactions écologiques (Shennan 2008). Chaque agroécosystème est unique. Il est bien important de déterminer le contexte phytosanitaire spécifique à l'environnement agricole étudié afin de faire un choix éclairé parmi les pratiques culturelles. Il faut éviter les pratiques antagonistes qui pourraient mener à un résultat indésirable.

Prenons l'exemple des lépidoptères ravageurs du maïs. Le stade larvaire de la légionnaire d'automne *Spodoptera frugiperda* peut causer des dégâts importants aux cultures de maïs, y compris dans les provinces de l'Est du Canada. Il a été démontré que ces larves sont systématiquement plus fréquentes dans les champs de maïs dépourvus de mauvaises herbes que dans les champs où poussent des populations complexes de mauvaises herbes naturelles ou sélectionnées (Altieri and Nicholls 2004). Pavuk et Stinner (1992) rapportent que le parasitoïde *Eriborus terebrans* a tendance à parasiter davantage la pyrale du maïs *Ostrinia nubilalis* dans les champs avec des mauvaises herbes par rapport aux champs désherbés (Pavuk and Stinner 1991). En revanche, le vers de l'épi *Helicoverpa zea*, un autre ravageur du maïs important dans l'Est du Canada, cause autant de dommage dans les champs avec mauvaises herbes que dans les champs désherbés. Cette dernière observation suggère que toutes les espèces ne sont pas similairement influencées par la présence des mauvaises herbes, ou, d'une façon plus générale, par les types d'aménagements pouvant être effectués dans les champs (Altieri and Nicholls 2004).

Aux tableaux 1 et 2 de l'annexe II, sont présentés quelques auteurs ayant étudié l'effet de ces pratiques sur les ennemis naturels, le ravageur ciblé et la culture. Les études les plus pertinentes pour les régions de l'Est du Canada ont été sélectionnées.

Ces tableaux permettent de constater que l'étude de l'effet des pratiques culturales et de l'aménagement de l'habitat sur les ennemis naturels est encore à ses débuts dans les provinces de l'Est du Canada. Les cultures pour lesquelles on retrouve le plus d'information sont le maïs, le soya, les céréales et les vergers de pomme. Boiteau (2010) indique qu'aucune méthode de favorisation des ennemis naturels par les pratiques culturales n'a été expérimentée pour la culture de la pomme de terre. Une étude réalisée au Nouveau Brunswick a tout de même permis de montrer que l'ouverture de la canopée culturale et l'absence de litière limitent la migration des ennemis naturels des habitats non-cultivés vers les cultures (Boiteau 2010). Dans les bleuetières, une étude récente menée en Nouvelle-Écosse s'est intéressée au potentiel de la présence de compost dans les champs comme source de prédateurs de la mouche du bleuet *Rhagoletis mendax*, un ravageur dont les larves peuvent causer des dommages importants (Renkema *et al.* 2012). Cette étude montre que le carabe *Pterostichus melanarius* est un prédateur intéressant lorsqu'il a peu de proies alternatives. Cependant, malgré le fait que le compost ait attiré les carabes, il n'a pas entraîné la diminution des populations de *R. mendax* (Renkema, Lynch, Cutler, Mackenzie and Walde 2012).

Choix des espèces de plantes en polyculture ou pour l'aménagement de l'habitat

Le choix des espèces végétales à introduire dans un champ peut se révéler assez complexe. Les plantes annuelles peuvent requérir plusieurs cycles de plantation ou de coupe afin de promouvoir la croissance secondaire de boutons de fleurs (Irvin *et al.* 1999). Ces pratiques peuvent demander beaucoup de temps et d'ouvrage et peuvent interférer avec les pratiques courantes du cultivateur.

Pour faire un choix éclairé dans un système cultural spécifique, Lundgren (2009) suggère de s'inspirer des résultats d'études préalables. Quant à Fiedler et Landis, ils suggèrent de privilégier les plantes natives par rapport aux exotiques (Fiedler and Landis 2007). L'avantage qu'offrent les annuelles est qu'elles ne persistent pas l'année suivante (Landis, Wratten and Gurr 2000). Pour les plantes pérennes, il serait avantageux qu'elles soient de bonnes compétitrices des mauvaises herbes pour l'année suivante (Landis, Wratten and Gurr 2000). D'autres facteurs sont à considérer, comme l'attractivité de ces

plantes pour les ennemis naturels, pour les prédateurs de ces ennemis naturels ou encore pour des agents pathogènes potentiellement néfastes à la culture d'intérêt (Bottrell *et al.* 1998). D'autres auteurs mentionnent également la période de floraison, le coût et la disponibilité des semences, et la compétitivité de la plante comme des facteurs d'importance (Gurr, van Emden and Wratten 1998).

Pearson (1990) a proposé une approche qui permet de faire un choix en fonction des différents critères de la plante (tableau 1 – page suivante). Son approche consiste à évaluer le potentiel de la plante selon les critères suivants : facteurs biologiques, risques pour la culture principale et considérations économiques. Un poids est donné à chacun de ces facteurs selon le contexte agroenvironnemental du producteur et une note est attribuée à la plante pour chacun de ses facteurs en fonction des connaissances de ses propriétés écologiques et économiques. Cette approche permet d'obtenir un score pour chaque espèce de plante qui permettra de comparer les candidates avant de faire un choix (Gurr, van Emden and Wratten 1998, Pearson 1990).



Figure 11. *Phacelia tanacetifolia*, une plante souvent semée par les producteurs européens à des fins de conservation.

Crédit photographique : © Copyright Living Countryside,
www.ukagriculture.com.

Tableau 1. Approche par la « liste de contrôle classée et pondérée » pour évaluer le potentiel de la *Phacelia tanacetifolia* comme source de nourriture lors la manipulation des habitats d'une culture de luzerne (*Medicago sativa*) dans la Nouvelle-Galle du Sud – New South Wales – Australie *

Critères	Pondération (1 = sans importance à 5 = important)	Valeur estimée	Valeur finale (pondération X valeur estimée)
RISQUES		(1=risque élevé à 5=risque faible)	
Capacité de devenir une mauvaise herbe	3	3	9
Hôte alternatif ou intermédiaire d'un pathogène des cultures	3	4	12
Toxicité pour le bétail	5	5	25
Contamination potentiel des produits	4	5	20
FACTEURS ÉCONOMIQUES		(1=mauvais à 5=bon)	
Possibilité d'une seconde culture	2	3	6
Prix abordable et disponibilité des semences	2	1	2
Coûts d'établissement	2	4	6
FACTEURS BIOLOGIQUES		(1=mauvais à 5=bon)	
Production de pollen (totale et distribuée dans le temps)	4	4	16
Production de nectar (totale et distribuée dans le temps)	4	5	12
Compatibilité agronomique avec la culture	5	4	20
Vigueur ou compétitivité avec les mauvaises herbes	3	3	9
Vivaces ou annuelle se ressemant spontanément	1	2	2
		TOTAL	139**

* Tableau traduit et adapté de Pearson (1990) – référer au texte original de l'auteur pour la discussion.

**La valeur finale doit être comparée avec celle d'autres plantes candidates ayant été évaluées selon la même approche.

D. Autres pratiques culturales ayant un effet sur les ennemis naturels

Labour

Le labour du sol peut avoir un impact majeur sur les organismes vivant dans le sol et sur les relations entre organismes de différents niveaux trophiques (El Titi 2003). L'intensité du labour, la méthode utilisée, la fréquence des opérations et la période de culture sont tous des facteurs qui peuvent avoir un impact sur les ennemis naturels. De façon générale, une réduction de l'intensité du labour permet de créer un environnement plus stable, ce qui favorise le développement d'espèces plus diverses (Altieri 1999). Plus l'intensité du labour diminue, plus l'abondance et la diversité de la faune augmente. Toutefois, les effets sont variables d'une espèce à l'autre, en fonction de leurs spécificités écologiques. Par exemple, les espèces dont le stade larvaire ou pupal se déroule dans le sol sont particulièrement susceptibles au travail du sol (Kendall 2003). Une étude réalisée dans le canola a démontré que le labour du sol après la récolte avait eu pour conséquence, au printemps suivant, une réduction du taux d'émergence des parasitoïdes hivernants dans le sol (Ferguson *et al.* 2003).



Figure 12. Le labour du sol peut avoir un impact majeur sur les organismes vivant dans le sol et sur les relations entre organismes de différents niveaux trophiques.

Crédit photographique : © Copyright Living Countryside, www.ukagriculture.com.

Utilisation d'herbicides et de pesticides

De nombreuses études ont démontré l'effet négatif des pesticides sur les communautés d'ennemis naturels. Les effets sur les prédateurs et les parasitoïdes peuvent être directs (p. ex. en affectant directement leurs fonctions biologiques) ou indirects (p. ex. en affectant leurs ressources alternatives). Pour citer quelques exemples, Ulber *et al.* (2010) ont montré que plusieurs espèces de parasitoïdes des ravageurs du canola sont directement affectées par l'arrosage de pesticides durant la floraison, période à laquelle ils sont particulièrement actifs (Ulber *et al.* 2010). Les effets indirects des herbicides sur certains arthropodes ont été démontrés par Heard *et al.* (2006) dans le maïs : la

suppression des mauvaises herbes par l'application d'herbicide a également supprimé les ressources qu'elles offraient aux auxiliaires (Heard *et al.* 2006).

Fertilisation azotée

En plus d'avoir un effet sur les ravageurs, la fertilisation peut avoir un effet sur leurs ennemis naturels (Rusch, Valantin-Morison, Sarthou and Roger-Estrade 2010). Safraz *et al.* (2009) ont étudié l'effet de la fertilisation sur la fausse teigne des crucifères *Plutella xylostella* et son parasitoïde *Diadegma insulare* dans le canola. Ils ont démontré que *D. insulare* a mieux performé sur des plants ayant reçu de fortes doses de fertilisants et que la proportion de *P. xylostella* ayant échappé au contrôle par le parasitoïde était supérieure sur les plants ayant reçu moins de fertilisants (Safraz *et al.* 2009).

Dates de semis et de récolte

Bien que le sujet ait été peu exploité, certaines études mentionnent le fait que les dates de semis et de récolte pourraient avoir un impact sur les communautés d'ennemis naturels, tout comme elles ont un impact sur les ravageurs eux-mêmes (Rusch *et al.* 2010). Selon Riechert et Lockley, la perturbation massive engendrée par la récolte pourrait avoir un plus grand impact sur les araignées que l'utilisation de pesticides (Riechert and Lockley 1984). Les effets réels sur la répression des ravageurs restent à prouver.

Dissémination de nourriture

L'application directe au champ de ressources alimentaires végétales destinées aux ennemis naturels est une alternative de plus en plus exploitée. Dans le chapitre 16 du livre *Relationships of Natural Enemies and Non-Prey Foods*, Lundgren (2009) offre une revue détaillée de la pratique de la « dissémination de nourriture » (traduction personnelle de « *Food Spray* »). Il décrit les techniques optimales d'application et discute des difficultés et désavantages de cette pratique. Bien que la description détaillée de cette pratique ne fasse pas l'objet de de cette revue, il est tout de même important de mentionner qu'elle est largement pratiquée et considérée comme très prometteuse dans le développement de programmes de gestion intégrée des ennemis des cultures (Lundgren 2009). Nous en avons mentionné un exemple dans le tableau 2 de l'annexe II.

IV. CONCLUSION

Dans cette revue de littérature, nous avons exploré les principes et les applications pratiques de l'aménagement de l'habitat dans le but de favoriser la répression des ravageurs par leurs ennemis naturels en milieu agricole. La multiplication des ennemis naturels dans les champs est nécessaire. Toutefois, cela ne suffit pas nécessairement à augmenter le contrôle biologique de façon suffisante. Il faut également que ces ennemis naturels réduisent les populations de ravageurs suffisamment pour réduire les dommages à la culture en dessous du seuil économique de contrôle. Les auteurs d'études se concentrent généralement sur les effets qu'ont les pratiques agricoles sur l'abondance des auxiliaires, mais oublient de mesurer les effets concrets sur le rendement et la qualité des cultures.

Afin d'encourager les producteurs à adopter des pratiques de lutte biologique conservative, il est nécessaire de leur fournir des stratégies efficaces et économiquement viables. Malheureusement, les résultats des études sont très variables. Le niveau d'incertitude est encore trop élevé pour émettre des recommandations qui viseront à réprimer un herbivore spécifique dans un ensemble particulier de conditions (Letourneau *et al.* 2009).

Selon Landis *et al.* (2000), la plupart des facteurs qui limitent l'efficacité des ennemis naturels dans les systèmes agricoles (p.ex. les pesticides, le manque de nourriture ou l'absence d'hôtes alternatifs) sont des conséquences des régimes de perturbations imposés à ces systèmes. Les efforts de conservation des ennemis naturels devraient viser non seulement ces facteurs limitant, mais également les perturbations qui sont à leur origine. La conservation devrait donc englober des actions à plusieurs échelles. A titre d'exemple, l'élimination des pesticides dans un champ pourrait permettre l'établissement de populations d'ennemis naturels. Toutefois, si les métapopulations viables pouvant fournir des immigrants sont absentes dans le paysage agricoles, les efforts fournis à l'échelle du champ pourraient s'avérer inefficaces à plus ou moins long terme (Landis, Wratten and Gurr 2000).

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la communauté scientifique est de plus en plus consciente de l'importance de l'échelle d'action dans l'établissement de stratégies phytosanitaires viables. Cependant, le travail n'en est qu'à ses débuts dans l'Est du Canada. Au Canada, la problématique de l'échelle géographique est

particulièrement importante. À la base des principes de la lutte biologique conservative, le caractère auto-régulateur des communautés naturelles peut être difficile à réimplanter dans les systèmes agricoles modernes ultra-simplifiés. Les champs canadiens s'étendent sur des surfaces de plus en plus importantes (Canada Grains Council 2004-), alors que la taille des champs représente un obstacle supplémentaire à l'établissement de communautés d'ennemis naturels (Mineau and McLaughlin 1996).

Sur le plan économique, l'une des difficultés majeures reste de convaincre les producteurs de la viabilité des pratiques suggérées. Selon Cullen et al. (2008), l'utilisation de la lutte biologique conservative a le potentiel d'être économiquement avantageuse. Malheureusement, trop peu d'études ont été menées dans le but précis d'évaluer cet avantage économique, comme l'ont fait Schmidt et al. (2007), par exemple. Ces auteurs ont étudié l'effet de paillis vivant de luzerne sur les ennemis naturels du soya. Ils ont observé que cette pratique permettait de réduire le niveau des populations de pucerons du soya (*Aphis glycines* Matsumura) en dessous du seuil économique. Cependant, ils ont conclu que cette pratique n'était pas économiquement avantageuse car la compétition entre la luzerne et le soya avait réduit le rendement de soya de 26%. Il serait nécessaire de mener ce genre d'étude complète afin de s'assurer de la viabilité économique des stratégies proposées aux producteurs désireux de se tourner vers ces pratiques.

L'adoption des pratiques nécessite encore d'importants efforts de recherche afin de conserver au mieux les habitats naturels qui favoriseront l'autorégulation des systèmes de production agricole. Toutefois, grâce aux résultats encourageants fournis par les communautés agricoles, cela constitue malgré tout un paradigme du 21^{ème} siècle (Kassam, 2011).

ANNEXE I

Pratiques agronomiques encourageant la diversité à l'intérieur et à l'extérieur des champs

Tableau développé d'après Gurr 2003; Altieri et Nicholls 2004 et Lundgren 2009).

Échelle		Pratique	Description	Références
Champ	Mauvaises herbes : a. Tolérance	Réduire l'application d'herbicide	Tolérer une faible présence des mauvaises herbes dans les champs en réduisant la dose ou la fréquence d'applications d'herbicide. Respecter les seuils économiques d'intervention (c'est-à-dire lorsque la densité de la population des mauvaises herbes à un stade donné est telle que le rendement final de la culture sera suffisamment affecté pour justifier les coûts liés à l'application d'un herbicide).	(Altieri and Letourneau 1982, Zandstra and Motooka 1978)
		Application d'herbicide dirigée	Cibler uniquement les mauvaises herbes les plus compétitives, laissant les autres comme source de biodiversité.	(Zandstra and Motooka 1978)
		Modifier la distribution spatiale et temporelle des mauvaises herbes	Ne pas appliquer d'herbicide dans certaines parcelles distribuées dans l'ensemble du champ. Appliquer l'herbicide en bandes décalées dans le temps afin que les mauvaises herbes soient présentes dans certaines zones du champ tout au long de la saison.	(Altieri and Nicholls 2004, Bugg and Waddington 1994, Lys 1994)
	b. Introduction	Bandes cultivées de mauvaises herbes	Sélection d'espèces à semer en bandes dans les champs	(Hausammann 1996, Landis, Wratten and Gurr 2000, Nentwig et al. 1998, Zandstra and Motooka 1978)
	Cultures mixtes	Cultures intercalaires simultanées et cultures en bandes alternées	Polyculture traditionnelle	(Altieri and Letourneau 1982, Coll 1998, Wilkinson and Landis 2005)
		Cultures intercalaires en décalage ou sursemis	Planter ou semer la culture suivante directement à travers la culture présente, afin de ne jamais laisser le sol à nu.	(Altieri and Letourneau 1982, Coll 1998, Landis, Wratten and Gurr 2000)

Échelle		Pratique	Description	Références
	Couvre-sols	Semis automnal	Semer le couvre-sol à l'automne et le détruire avant le développement de la culture principale l'année suivante (ce qui permet d'avoir des ennemis naturels présents avant que la culture soit installée).	(Clark 1998, Wilkinson and Landis 2005)
		Paillis vivant	Planter une culture de sous-étage qui sera conservée lorsque la culture principale sera plantée (surtout dans les vergers).	(Altieri et Letourneau, 1982; Landis <i>et al.</i> , 2000; O'Neal <i>et al.</i> , 2005; Prasifka <i>et al.</i> , 2006; Wilkinson et Landis, 2005)
	Diversification au sein de la monoculture	Diversification variétale	Planter plusieurs variétés de la même espèce présentant des caractéristiques différentes.	(Lundgren, 2009)
		Diversification spécifique : « monoculture relaxée »	Planter plusieurs espèces phylogénétiquement proches	(Gurr <i>et al.</i> 2003)
		Diversification structurale	Rendre la structure de la culture plus complexe, par exemple en récoltant différentes bandes en quinconce, ce qui permet de toujours garder un refuge pour les ennemis naturels	(Gurr, Wratten and Michael Luna 2003, Hossain <i>et al.</i> 2001)
	Zones non-cultivées dans les champs	Bandes enherbées pour coléoptères (<i>Beetle Banks</i>)		(Landis, Wratten and Gurr 2000, MacLeod <i>et al.</i> 2004)
Ferme	Zones non-cultivées hors des champs	Diversification de la végétation au-delà des bordures du champ	Friches naturelles ou semées autour des champs	(Gurr, Wratten and Michael Luna 2003, Thies and Tschardtke 1999)
Paysage	Modifications du paysage	Paysages hétérogènes Paysages avec boisés		(Gurr, Wratten and Michael Luna 2003, Marino, Landis and Hawkins 2006)

ANNEXE II

Exemples de stratégies d'aménagement et leur effet sur la répression des ravageurs dans les grandes cultures, les cultures fourragères, les vergers de pomme, les vignobles et les petits fruits

NB : les effets sur les ravageurs et les cultures n'indiquent pas nécessairement un lien direct avec les ennemis naturels.

PRATIQUE CULTURALE	RAVAGEUR CIBLÉ	EFFET SUR LES AUXILIAIRES	IMPACT SUR LE RAVAGEUR ET/OU LA CULTURE	AUTRES EFFETS NOTOIRES	LIEU	RÉFÉRENCE
Bandes alternées (18m ou 36m) de maïs, soya, blé et vesce	Puceron du soya (<i>Aphis glycines</i>)	+ nombreux dans monoculture globalement + dans les bandes lors du pic d'infestation	2X moins de pucerons que dans monoculture de soya	Meilleur synchronisme entre ennemis naturels et ravageurs dans les bandes	Québec	(Labrie 2010)
Bandes alternées (18m ou 36m) de maïs, soya, blé et vesce	Pyrale du maïs (<i>Ostrinia nubilalis</i>)	+ diversifiés dans les bandes	+ de pucerons dans les bandes de 18m		Québec	(Labrie 2010)
Soya en culture intercalaire dans le maïs	Pyrale du maïs (<i>Ostrinia nubilalis</i>)	non identifié	- Réduction de 40% des dommages par rapport à la monoculture de maïs - Pas de changement de rendement	Compétition entre soya et maïs qui a affecté de rendement de maïs	Ontario	(Martin <i>et al.</i> 1989)
Maïs en culture intercalaire dans le soya	Puceron du soya (<i>Aphis glycines</i>)	2X plus d'ennemis naturels que dans la monoculture	contrôle du puceron à + de 80%		Chine	(Wang and Ba 1998)
Luzerne en couvre- sol dans le soya	Puceron du soya (<i>Aphis glycines</i>)	45% + d'ennemis naturels que dans la monoculture	- Arrivée plus tardive du puceron dans les parcelles avec couvre-sol - Maintien des populations de pucerons sous le seuil économique	Réduction du taux de croissance de la population de pucerons par la luzerne (- d'azote dans le soya associé à la luzerne)	Iowa, US	(Schmidt <i>et al.</i> 2007)

PRATIQUE CULTURALE	RAVAGEUR CIBLÉ	EFFET SUR LES AUXILIAIRES	IMPACT SUR LE RAVAGEUR ET/OU LA CULTURE	AUTRES EFFETS NOTOIRES	LIEU	RÉFÉRENCE
Luzerne et trèfle Kura en couvre-sol dans le maïs et le soya	Pyrale du maïs (<i>Ostrinia nubilalis</i>)	-Augmentation de l'abondance des carabes en corrélation avec la consommation des pupes d' <i>O. nubilalis</i>	Non précisé		Iowa, US	(Prasifka <i>et al.</i> 2006)
Distribution de graines de moutarde (comme source de nourriture) dans le canola	<i>Delia radicum</i>	Parasitisme d' <i>A. bipustulata</i> supérieur dans les parcelles avec graines de moutarde	Pas d'effet sur la population de <i>D. radicum</i> ni sur les dommages causés par les larves		Suisse/Canada	(Riley <i>et al.</i> 2007)
Système agroforestier de luzerne avec des allées de noyers	Plusieurs	Deux fois plus d'arthropodes prédateurs et parasites que dans la monoculture de luzerne	Moitié moins d'herbivores que dans la monoculture de luzerne	Impact mineur sur la croissance des noyers et le rendement en noix	Missouri	(Stamps <i>et al.</i> 2002)
Haies forales en bordure des vergers de pommiers	Punaise terne, Hoplocampes, Cicadelle blanche, Pucerons, Acariens	Plus nombreux près des platebandes (araignées, coccinelles, syrphes, chrysopes)	- Moins d'hoplocampes dans les parcelles avec plate-bande de fleurs - Moins de dommages d'hoplocampes	Plus d'effet au-delà de 10 mètres des haies forales	Québec	(De Almeida 2012)
Couvre-sol fleuri (phacélie, sarrasin) en verger de pommier	Pucerons des pommiers : - <i>Aphis pomi</i> - <i>Aphis spiraecola</i>	- Pas d'effet sur l'abondance des auxiliaires - Absence de couvre-sol : 1) effet négatif sur l'oviposition de la cécidomyie 2) effet positif sur les coccinelles adultes	Pas d'effet sur l'abondance des pucerons	Les effets sur les ennemis naturels sont variables en fonction du cultivar de pomme	Québec	(Fréchette <i>et al.</i> 2008)

PRATIQUE CULTURALE	RAVAGEUR CIBLÉ	EFFET SUR LES AUXILIAIRES	IMPACT SUR LE RAVAGEUR ET/OU LA CULTURE	AUTRES EFFETS NOTOIRES	LIEU	RÉFÉRENCE
Bandes de fleurs à l'intérieur du verger de pommes	Carpocapse de la pomme : <i>Cydia pomonella</i>	Abondance et diversité des parasitoïdes supérieures dans les plates-bandes de fleurs.	Les parasitoïdes retrouvés dans les carpocapses n'étaient pas ceux retrouvés dans les plates-bandes.		France	(Dib <i>et al.</i> 2012)
Mise en place d'un couloir de végétation entre la forêt riveraine et le vignoble	Cicadelles et thrips	Augmentation des populations de coccinelles, syrphes, punaises prédatrices et chrysopes	Baisse des populations de cicadelles et thrips de façon significatives proche des couloirs.		Californie	(Nicholls <i>et al.</i> 2008)
Couvre-sol (trèfle, sarrasin ou ivraie) dans les allées du champ de bleuets	Mouche de l'oignon : <i>Delia antiqua</i>	Augmentation de l'abondance relative des carabes	Non-précisé		Michigan	(O'Neal <i>et al.</i> 2005)

V. BIBLIOGRAPHIE

- Altieri, M.A.** (1999) The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **74**, 19-31.
- Altieri, M.A. and Letourneau, D.K.** (1982) Vegetation management and biological control in agroecosystems. *Crop Protection*, **1**, 405-430.
- Altieri, M.A. and Nicholls, C.I.** (2004) *Biodiversity and pest management in agroecosystems* 2nd edn. New York: Food Products Press.
- Andow, D.A.** (1991) Vegetational Diversity and Arthropod Population Response. *Annual Review of Entomology*, **36**, 561-586.
- Asteraki, E.J., Hart, B.J., Ings, T.C. and Manley, W.J.** (2004) Factors influencing the plant and invertebrate diversity of arable field margins. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **102**, 219-231.
- Berndt, L.A., Wratten, S.D. and Scarratt, S.L.** (2006) The influence of floral resource subsidies on parasitism rates of leafrollers (Lepidoptera: Tortricidae) in New Zealand vineyards. *Biological Control*, **37**, 50-55.
- Bianchi, F.J., Booij, C.J. and Tscharntke, T.** (2006) Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proceedings. Biological sciences / The Royal Society*, **273**, 1715-1727.
- Blake, R.J., Woodcock, B.A., Ramsay, A.J., Pilgrim, E.S., Brown, V.K., Tallowin, J.R. and Potts, S.G.** (2011) Novel margin management to enhance Auchenorrhyncha biodiversity in intensive grasslands. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **140**, 506-513.
- Boiteau, G.** (2010) Insect Pest Control on Potato: Harmonization of Alternative and Conventional Control Methods. *American Journal of Potato Research*, **87**, 412-419.
- Bottrell, D.G., Barbosa, P. and Gould, F.** (1998) Manipulating natural enemies by plant variety selection and modification: A realistic strategy?, pp. 347-367.
- Boutin, C., Jobin, B. and Bélanger, L.** (2003) Importance of riparian habitats to flora conservation in farming landscapes of southern Québec, Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **94**, 73-87.
- Boutin, C., Martin, P.A. and Baril, A.** (2009) Arthropod diversity as affected by agricultural management (Organic and Conventional Farming), plant species, and landscape context. *Ecoscience*, **16**, 492-501.
- Brown, M.W.** (2012) Role of biodiversity in integrated fruit production in eastern North American orchards. *Agricultural and Forest Entomology*, **14**, 89-99.
- Bugg, R.L. and Waddington, C.** (1994) Using cover crops to manage arthropod pests of orchards: A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **50**, 11-28.
- Canada Grains Council** (2004-) Online Statistical Handbook [electronic resource].
- Clark, A.** (1998) *Managing Cover Crops Profitably* 2nd edn. Beltsville, MD.

- Coderre, D.L. and Tourneur, J.C.** (1986) Synchronization and voracity of aphidophagous insects on maize in Quebec, Canada. In *Ecology of Aphidophaga* (Hodek, I. ed. Dordrecht, The Netherlands: Dr. W. Junk pp. 363-368.
- Cole, L.J., McCracken, D.I., Baker, L. and Parish, D.** (2007) Grassland conservation headlands: Their impact on invertebrate assemblages in intensively managed grassland. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **122**, 252-258.
- Coll, M.** (1998) Parasitoid activity and plant species composition in intercropped systems. In *Enhancing Biological Control: Habitat Management to Promote Natural Enemies of Agricultural Pests* (Bugg, C.H.P.R.L. ed. Berkeley, CA: University of California Press, pp. 85-120.
- Coll, M.** (2009) Conservation biological control and the management of biological control services: are they the same? *Phytoparasitica*, **37**, 205-208.
- Corbett, A. and Rosenheim, J.A.** (1996) Quantifying Movement of a Minute Parasitoid, *Anagrus epos* (Hymenoptera: Mymaridae), Using Fluorescent Dust Marking and Recapture. *Biological Control*, **6**, 35-44.
- Cottrell, T.E. and Yeargan, K.V.** (1998) Influence of a Native Weed, *Acalypha ostryaefolia* (Euphorbiaceae), on *Coleomegilla maculata* (Coleoptera: Coccinellidae) Population Density, Predation, and Cannibalism in Sweet Corn. *Environmental Entomology*, **27**, 1375-1385.
- De Almeida, J.** (2012) Aménagement d'une haie composite pour favoriser l'établissement et le maintien de la faune auxiliaire dans les vergers de pommiers. Montréal, Canada: Université du Québec à Montréal.
- Denys, C. and Tscharrntke, T.** (2002) Plant-insect communities and predator-prey ratios in field margin strips, adjacent crop fields, and fallows. *Oecologia*, **130**, 315-324.
- Dib, H., Libourel, G. and Warlop, F.** (2012) Entomological and functional role of floral strips in an organic apple orchard: Hymenopteran parasitoids as a case study. *Journal of Insect Conservation*, **16**, 315-318.
- Dinter, A.** (2002) Microcosm studies on intraguild predation between female erigonid spiders and lacewing larvae and influence of single versus multiple predators on cereal aphids. *Journal of Applied Entomology*, **126**, 249-257.
- Duelli, P., Studer, M., Marchand, I. and Jakob, S.** (1990) Population movements of arthropods between natural and cultivated areas. *Biological Conservation*, **54**, 193-207.
- Dyer, L.E. and Landis, D.A.** (1996) Effects of Habitat, Temperature, and Sugar Availability on Longevity of *Eriborus terebrans* (Hymenoptera: Ichneumonidae). *Environmental Entomology*, **25**, 1192-1201.
- Ekström, G. and Ekbom, B.** (2011) Pest Control in Agro-ecosystems: An Ecological Approach. *Critical Reviews in Plant Sciences*, **30**, 74-94.
- Evans, E.W. and England, S.** (1996) Indirect Interactions in Biological Control of Insects: Pests and Natural Enemies in Alfalfa. *Ecological Applications*, **6**, 920-930.
- Eyre, M.D. and Leifert, C.** (2011) Crop and field boundary influences on the activity of a wide range of beneficial invertebrate groups on a split conventional/organic farm in northern England. *Bulletin of Entomological Research*, **101**, 135-144.
- Ferguson, A.W., Campbell, J.M., Warner, D.J., Watts, N.P., Schmidt, J.E.U. and Williams, I.H.** (2003) Spatio-temporal distributions of *Meligethes aeneus* and its

- parasitoids in an oilseed rape crop and their significance for crop protection. In *11th International Rapeseed Congress*, pp. 1057–1059.
- Fiedler, A.K. and Landis, D.A.** (2007) Attractiveness of Michigan Native Plants to Arthropod Natural Enemies and Herbivores. *Environmental Entomology*, **36**, 751-765.
- Frampton, G.K. and Dorne, J.L.C.M.** (2007) The effects on terrestrial invertebrates of reducing pesticide inputs in arable crop edges: A meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, **44**, 362-373.
- Fréchette, B., Cormier, D., Chouinard, G., Vanoosthuyse, F. and Lucas, É.** (2008) Apple aphid, *Aphis* spp. (Homoptera: Aphididae), and predator populations in an apple orchard at the non-bearing stage: The impact of ground cover and cultivar. *European Journal of Entomology*, **105**, 521-529.
- Fritch, R.A., Sheridan, H., Finn, J.A., Kirwan, L. and hUallacháin, D.Ó.** (2011) Methods of enhancing botanical diversity within field margins of intensively managed grassland: A 7-year field experiment. *Journal of Applied Ecology*, **48**, 551-560.
- Fuchsberg, J.R., Yong, T.-H., Losey, J.E., Carter, M.E. and Hoffmann, M.P.** (2007) Evaluation of corn leaf aphid (*Rhopalosiphum maidis*; Homoptera: Aphididae) honeydew as a food source for the egg parasitoid *Trichogramma ostrinae* (Hymenoptera: Trichogrammatidae). *Biological Control*, **40**, 230-236.
- Gavish-Regev, E., Rotkopf, R., Lubin, Y. and Coll, M.** (2009) Consumption of aphids by spiders and the effect of additional prey: evidence from microcosm experiments. *BioControl*, **54**, 341-350.
- Grube, A., Donaldson, D., Kiely, T. and Wu, L.** (2011) Pesticides Industry Sales and Usage: 2006 and 2007 Market Estimates (U.S. Environmental Protection Agency, O.o.C.S.a.P.P. ed. Washington, DC).
- Gurr, G.M., van Emden, H.F. and Wratten, S.D.** (1998) Chapter 9 - Habitat manipulation and natural enemy efficiency: Implications for the control of pests. In *Conservation Biological Control* (Pedro, B. ed. San Diego: Academic Press, pp. 155-183.
- Gurr, G.M., Wratten, S.D. and Michael Luna, J.** (2003) Multi-function agricultural biodiversity: Pest management and other benefits. *Basic and Applied Ecology*, **4**, 107-116.
- Hagen, K.S.** (1986) Nutritional ecology of terrestrial predators. In *Nutritional ecology of insects, mites, spiders, and related invertebrates*. (Slansky, F., Rodriguez, J. G. ed. New York: Wiley, pp. 533-577.
- Hausammann, A.** (1996) Strip-management in rape crop: is winter rape endangered by negative impacts of sown weed strips? *Journal of Applied Entomology*, **120**, 505-512.
- Heard, M.S., Clark, S.J., Rothery, P., Perry, J.N., Bohan, D.A., Brooks, D.R., Champion, G.T., Dewar, A.M., Hawes, C., Houghton, A.J., May, M.J., Scott, R.J., Stuart, R.S., Squire, G.R. and Firbank, L.G.** (2006) Effects of successive seasons of genetically modified herbicide-tolerant maize cropping on weeds and invertebrates. *Annals of Applied Biology*, **149**, 249-254.
- Hossain, Z., Gurr, G.M. and Wratten, S.D.** (2001) Habitat manipulation in lucerne (*Medicago sativa* L.): Strip harvesting to enhance biological control of insect pests. *International Journal of Pest Management*, **47**, 81-88.

- Huffaker, C.B. and Flaherty, D.L.** (1966) Potential of Biological Control of Two-Spotted Spider Mites on Strawberries in California¹. *Journal of Economic Entomology*, **59**, 786-792.
- Irvin, N.A., Wratten, S.D., Chapman, R.B. and Frampton, M.C.** (1999) The effects of floral resources on longevity, populations and efficacy of the leafroller parasitoid (*Dolichogenidea tasmanica* (Cameron)) in apples. In *New Zealand Plant Protection Conference* (Society, N.Z.P.P. ed. Wellington, New Zealand, pp. 84-88.
- Jervis, M.A., Kidd, N.A.C., Fitton, M.G., Huddleston, T. and Dawah, H.A.** (1993) Flower-visiting by hymenopteran parasitoids. *Journal of Natural History*, **27**, 67-105.
- Jones, G.A. and Sieving, K.E.** (2006) Intercropping sunflower in organic vegetables to augment bird predators of arthropods. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **117**, 171-177.
- Keller, S. and Häni, F.** (2000) Ansprüche von nützlingen und schadlingen an den lebensraum. In *Streifenförmige Ökologische ausgleichsflächen in der kulturlandschaft: ackerkrautstreifen, buntbrache, feldränder*. (Nentwig, W. ed. Switzerland: Verlag Agrarökologie, pp. 199–217.
- Kendall, D.A.** (2003) Soil Tillage and epigeal predatory Arthropods. In *Soil Tillage in Agroecosystems* (El Titi, A. ed. US: CRC Press.
- Labrie, G.** (2010) Synthèse de la littérature scientifique sur le puceron du soya, *Aphis glycines* Matsumura: CEROM.
- Landis, D.A., Gardiner, M.M., Van Der Werf, W. and Swinton, S.M.** (2008) Increasing corn for biofuel production reduces biocontrol services in agricultural landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **105**, 20552-20557.
- Landis, D.A. and Haas, M.J.** (1992) Influence of Landscape Structure on Abundance and Within-Field Distribution of European Corn Borer (Lepidoptera: Pyralidae) Larval Parasitoids in Michigan. *Environmental Entomology*, **21**, 409-416.
- Landis, D.A., Menalled, F.n.D., Costamagna, A.C. and Wilkinson, T.K.** (2005) Manipulating plant resources to enhance beneficial arthropods in agricultural landscapes. *Weed Science*, **53**, 902-908.
- Landis, D.A., Wratten, S.D. and Gurr, G.M.** (2000) Habitat Management to Conserve Natural Enemies of Arthropod Pests in Agriculture. *Annual Review of Entomology*, **45**, 175-201.
- Letourneau, D.K., Jedlicka, J.A., Bothwell, S.G. and Moreno, C.R.** (2009) Effects of Natural Enemy Biodiversity on the Suppression of Arthropod Herbivores in Terrestrial Ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, **40**, 573-592.
- Lucas, É. and Rosenheim, J.A.** (2011) Influence of extraguild prey density on intraguild predation by heteropteran predators: A review of the evidence and a case study. *Biological Control*, **59**, 61-67.
- Lundgren, J.G.** (2009) Relationships of Natural Enemies and Non-Prey Foods: Springer Netherlands.
- Lundgren, J.G., Wyckhuys, K.A.G. and Desneux, N.** (2009) Population responses by *Orius insidiosus* to vegetational diversity. *BioControl*, **54**, 135-142.

- Lys, J.-A.** (1994) The positive influence of strip-management on ground beetles in a cereal field: increase, migration and overwintering. *SERIES ENTOMOLOGICA*, **51**, 451.
- MacLeod, A., Wratten, S.D., Sotherton, N.W. and Thomas, M.B.** (2004) 'Beetle banks' as refuges for beneficial arthropods in farmland: long-term changes in predator communities and habitat. *Agricultural and Forest Entomology*, **6**, 147-154.
- Madsen, M., Terkildsen, S. and Toft, S.** (2004) Microcosm studies on control of aphids by generalist arthropod predators: Effects of alternative prey. *BioControl*, **49**, 483-504.
- Maisonhaute, J.-É., Peres-Neto, P. and Lucas, É.** (2010) Influence of agronomic practices, local environment and landscape structure on predatory beetle assemblage. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **139**, 500-507.
- Marino, P.C., Landis, D.A. and Hawkins, B.A.** (2006) Conserving parasitoid assemblages of North American pest Lepidoptera: Does biological control by native parasitoids depend on landscape complexity? *Biological Control*, **37**, 173-185.
- Marshall, E.J.P.** (2004) Agricultural landscapes: Field margin habitats and their interaction with crop production. *Journal of Crop Improvement*, **12**, 365-404.
- Martin, R.C., Arnason, T.J., Lambert, J.D.H., Isabelle, P., Voldeng, H.D. and Smith, D.L.** (1989) Reduction of European Corn Borer (Lepidoptera: Pyralidae) Damage by Intercropping Corn with Soybean. *Journal of Economic Entomology*, **82**, 1455-1459.
- Matson, P.A., Parton, W.J., Power, A.G. and Swift, M.J.** (1997) Agricultural Intensification and Ecosystem Properties. *Science*, **277**, 504-509.
- McLaughlin, A. and Mineau, P.** (1995) The impact of agricultural practices on biodiversity. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **55**, 201-212.
- Médiène, S., Valantin-Morison, M., Sarthou, J.P., De Tourdonnet, S., Gosme, M., Bertrand, M., Roger-Estrade, J., Aubertot, J.N., Rusch, A., Motisi, N., Pelosi, C. and Doré, T.** (2011) Agroecosystem management and biotic interactions: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, **31**, 491-514.
- Mineau, P. and McLaughlin, A.** (1996) Conservation of biodiversity within canadian agricultural landscapes: Integrating habitat for wildlife. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, **9**, 93-113.
- Nentwig, W., Frank, T. and Lethmayer, C.** (1998) Sown weed strips: artificial ecological compensation areas as an important tool in conservation biological control. In *Conservation Biological Control*. San Diego, Calif. (USA): Academic Press, pp. 133-153.
- O'Neal, M.E., Zontek, E.L., Szendrei, Z., Landis, D.A. and Isaacs, R.** (2005) Ground predator abundance affects prey removal in highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum*) fields and can be altered by aisle ground covers. *BioControl*, **50**, 205-222.
- Olson, D.M. and Wäckers, F.L.** (2007) Management of field margins to maximize multiple ecological services. *Journal of Applied Ecology*, **44**, 13-21.
- Orr, D.B., Landis, D.A., Mutch, D.R., Manley, G.V., Stuby, S.A. and King, R.L.** (1997) Ground Cover Influence on Microclimate and Trichogramma (Hymenoptera: Trichogrammatidae) Augmentation in Seed Corn Production. *Environmental Entomology*, **26**, 433-438.

- Östman, Ö. and Ives, A.R.** (2003) Scale-dependent indirect interactions between two prey species through a shared predator. *Oikos*, **102**, 505-514.
- Pavuk, D.M. and Stinner, B.R.** (1991) Influence of Weeds in Corn Plantings on Population Densities of and Damage by Second Generation *Ostrinia nubilalis* (Hubner) (Lepidoptera: Pyralidae) Larvae. *Environmental Entomology*, **20**, 276-281.
- Pearson, A.W.** (1990) The Management of Research and Development. In *Technology and Management* (Wild, R. ed. New York, NY: Nichols, pp. 28-41.
- Pimentel, D.** (2008) Preface Special Issue: Conservation biological control. *Biological Control*, **45**, 171.
- Prasifka, J.R., Schmidt, N.P., Kohler, K.A., O'neal, M.E., Hellmich, R.L. and Singer, J.W.** (2006) Effects of Living Mulches on Predator Abundance and Sentinel Prey in a Corn–Soybean–Forage Rotation. *Environmental Entomology*, **35**, 1423-1431.
- Rahim, A., Hashmi, A.A. and Khan, N.A.** (1991) Effects of Temperature and Relative Humidity on Longevity and Development of *Ooencyrtus papilionis* Ashmead (Hymenoptera: Eulophidae), a Parasite of the Sugarcane Pest, *Pyrilla perpusilla* Walker (Homoptera: Cicadellidae). *Environmental Entomology*, **20**, 774-775.
- Ratnadass, A., Fernandes, P., Avelino, J. and Habib, R.** (2012) Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, **32**, 273-303.
- Reeves, R.B., Greene, J.K., Reay-Jones, F.P.F., Toews, M.D. and Gerard, P.D.** (2010) Effects of adjacent habitat on populations of stink bugs (Heteroptera: Pentatomidae) in cotton as part of a variable agricultural landscape in South Carolina. *Environmental Entomology*, **39**, 1420-1427.
- Renkema, J.M., Lynch, D.H., Cutler, G.C., Mackenzie, K. and Walde, S.J.** (2012) Emergence of Blueberry Maggot Flies (Diptera: Tephritidae) from Mulches and Soil at Various Depths. *Environmental Entomology*, **41**, 370-376.
- Riechert, S.E. and Lockley, T.** (1984) Spiders as Biological Control Agents. *Annual Review of Entomology*, **29**, 299-320.
- Riley, K.J., Kuhlmann, U., Mason, P.G., Whistlecraft, J., Donald, L.J. and Holliday, N.J.** (2007) Can mustard seed meal increase attacks by *Aleochara* spp. on *Delia radicum* in oilseed rape? *Biocontrol Science and Technology*, **17**, 273-284.
- Root, R.B.** (1973) Organization of a plant-arthropod association in simple and diverse habitats: the fauna of collards (*Brassica oleracea*). *Ecological Monographs*, **43**, 95-124.
- Rusch, A., Valantin-Morison, M., Roger-Estrade, J. and Sarthou, J.P.** (2012) Using landscape indicators to predict high pest infestations and successful natural pest control at the regional scale. *Landscape and Urban Planning*.
- Rusch, A., Valantin-Morison, M., Sarthou, J.-P. and Roger-Estrade, J.** (2010) Chapter six - Biological Control of Insect Pests in Agroecosystems: Effects of Crop Management, Farming Systems, and Seminatural Habitats at the Landscape Scale: A Review. In *Advances in Agronomy* (Donald, L.S. ed: Academic Press, pp. 219-259.
- Ruthenberg, H.** (1971) *Farming Systems in the Tropics* London: Clarendon Press.

- Sarfraz, M., Dosdall, L.M. and Keddie, B.A.** (2009) Fitness of the parasitoid *Diadegma insulare* is affected by its host's food plants. *Basic and Applied Ecology*, **10**, 563-572.
- Sarthou, J.P., Ouin, A., Arrignon, F., Barreau, G. and Bouyjou, B.** (2005) Landscape parameters explain the distribution and abundance of *Episyrphus balteatus* (Diptera: Syrphidae). *European Journal of Entomology*, **102**, 539-545.
- Schmidt, N.P., O'Neal, M.E. and Singer, J.W.** (2007) Alfalfa Living Mulch Advances Biological Control of Soybean Aphid. *Environmental Entomology*, **36**, 416-424.
- Sheehan, W.** (1986) Response by Specialist and Generalist Natural Enemies to Agroecosystem Diversification: A Selective Review. *Environmental Entomology*, **15**, 456-461.
- Shennan, C.** (2008) Biotic interactions, ecological knowledge and agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **363**, 717-739.
- Smith, H.A. and McSorley, R.** (2000) Intercropping and Pest Management: A Review of Major Concepts. *American Entomologist*, **46**, 154-161.
- Stamps, W., Woods, T., Linit, M. and Garrett, H.** (2002) Arthropod diversity in alley cropped black walnut (&i&tJuglans nigra L.) stands in eastern Missouri, USA. *Agroforestry Systems*, **56**, 167-175.
- Sutherland, J.P., Sullivan, M.S. and Poppy, G.M.** (2001) Distribution and abundance of aphidophagous hoverflies (Diptera: Syrphidae) in wildflower patches and field margin habitats. *Agricultural and Forest Entomology*, **3**, 57-64.
- Thies, C. and Tscharrntke, T.** (1999) Landscape Structure and Biological Control in Agroecosystems. *Science*, **285**, 893-895.
- Thomas, C.F.G. and Marshall, E.J.P.** (1999) Arthropod abundance and diversity in differently vegetated margins of arable fields. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **72**, 131-144.
- Thomas, C.F.G., Parkinson, L., Griffiths, G.J.K., Garcia, A.F. and Marshall, E.J.P.** (2001) Aggregation and temporal stability of carabid beetle distributions in field and hedgerow habitats. *Journal of Applied Ecology*, **38**, 100-116.
- Thomas, M.B., Sotherton, N.W., Coombes, D.S. and Wratten, S.D.** (1992) Habitat factors influencing the distribution of polyphagous predatory insects between field boundaries. *Annals of Applied Biology*, **120**, 197-202.
- Tscharrntke, T., Bommarco, R., Clough, Y., Crist, T.O., Kleijn, D., Rand, T.A., Tylianakis, J.M., Nouhuys, S.v. and Vidal, S.** (2007) Conservation biological control and enemy diversity on a landscape scale. *Biological Control*, **43**, 294-309.
- Ulber, B., Williams, I.H., Klukowski, Z., Luik, A. and Nilsson, C.** (2010) Parasitoids of Oilseed Rape Pests in Europe: Key Species for Conservation Biocontrol
- Biocontrol-Based Integrated Management of Oilseed Rape Pests(Williams, I.H. ed: Springer Netherlands, pp. 45-76.
- van Emden, H.F.** (1990) Plant diversity and natural enemy efficiency in agroecosystems. . In *Critical Issues in Biological Control* (Mackauer M., E.L.E., Roland J. ed. Andover, UK: Intercept Press, pp. 63-80.

- Veres, A., Petit, S., Conord, C. and Lavigne, C.** (2011) Does landscape composition affect pest abundance and their control by natural enemies? A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*.
- Wäckers, F.L.** (2001) A comparison of nectar- and honeydew sugars with respect to their utilization by the hymenopteran parasitoid *Cotesia glomerata*. *Journal of Insect Physiology*, **47**, 1077-1084.
- Wäckers, F.L., van Rijn, P.C.J. and Heimpel, G.E.** (2008) Honeydew as a food source for natural enemies: Making the best of a bad meal? *Biological Control*, **45**, 176-184.
- Wang, Z. and Ba, F.** (1998) Study of the optimum control of soybean aphid. *Acta Phytophylacica Sinica*, 151-155.
- Wilkinson, T.K. and Landis, D.A.** (2005) Habitat diversification in biological control: the role of plant resources. In *Plant Provided Food and Plant-Carnivore Mutualism* (F.L. Wäckers, P.C.J.v.R.J.B. ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, pp. 305-325.
- Zandstra, B.H. and Motooka, P.S.** (1978) Beneficial Effects of Weeds in Pest Management — A Review. *Tropical Pest Management*, **24**, 333-338.
- Zangger, A., Lys, J.-A. and Nentwig, W.** (1994) Increasing the availability of food and the reproduction of *Poecilus cupreus* in a cereal field by strip-management. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, **71**, 111-120.