

LUTTE BIOLOGIQUE AUX RAVAGEURS : APPLICABILITÉ AU QUÉBEC

Par

Noémie Lambert

Essai présenté au Centre Universitaire de Formation en Environnement en vue de l'obtention
du grade de maître en environnement (M. Env.)

CENTRE UNIVERSITAIRE DE FORMATION EN ENVIRONNEMENT
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Sherbrooke, Québec, Canada, juillet 2010

IDENTIFICATION SIGNALÉTIQUE

APPLICABILITÉ DE LA LUTTE BIOLOGIQUE AUX RAVAGEURS AU QUÉBEC

Noémie Lambert

Essai effectué en vue de l'obtention du grade de maître en environnement (M.Env.)

Sous la direction de Josée Doyon

Université de Sherbrooke

Juillet 2010

Mots clés : agriculture, lutte biologique, lutte intégrée, lutte conventionnelle, pesticides, auxiliaires, ravageurs.

La lutte biologique, qui est le contrôle d'un ravageur par un ennemi naturel, est naturellement présente dans la plupart des écosystèmes. Elle peut être utilisée volontairement, en agriculture, entre autres, en remplacement des pesticides conventionnels. En comparaison à ces derniers, la lutte biologique est beaucoup plus écologique mais a également des coûts d'application substantiellement plus élevés. De nombreuses applications de la lutte biologique ont eu lieu dans le passé, avec succès ou non. Au Québec, elle est de plus en plus utilisée mais il est légitime de se demander si elle est applicable dans les conditions particulières de la province, soit environnementales, sociales et économiques. Bien que certaines lacunes soient présentes, surtout au niveau économique, la lutte biologique semble applicable au Québec. Il reste néanmoins du travail à faire, surtout au niveau de la sensibilisation et des ressources disponibles pour les agriculteurs. Il est finalement recommandé de mettre sur pied un organisme gouvernemental provincial pour encourager la lutte biologique et en faciliter l'applicabilité.

SOMMAIRE

Depuis que le monde est monde, des organismes minent la vie de l'Homme, qui tente souvent de combattre ces insectes, acariens, bactéries, champignons, et autres. Dans les milieux perturbés comme en milieu agricole, les ravageurs des cultures peuvent avoir des effets très importants. Ceci est expliqué en partie par l'absence de leurs ennemis naturels, qui en contrôlent naturellement l'abondance. En réponse à ces problèmes, l'Homme met au point des pesticides mais il se rend rapidement compte qu'ils amènent leur lot de complications, comme le développement de résistance chez les organismes visés et des effets nocifs sur la santé et l'environnement.

Le contrôle des ravageurs par l'utilisation d'autres organismes vivants, ennemis naturels, est nommée lutte biologique. Elle peut être utilisée en remplacement à la lutte conventionnelle, avec les pesticides. Il peut s'agir de l'introduction d'un organisme pour lutter contre un ravageur exotique (lutte biologique classique), de l'augmentation de l'occurrence d'un ennemi naturellement présent en rajoutant dans le milieu (lutte biologique par augmentation) ou en protégeant son milieu (lutte biologique par protection). Sont principalement utilisés des insectes, bactéries, nématodes et champignons.

Cette méthode de phytoprotection est de plus en plus étudiée et a été appliquée avec succès en plusieurs occasions. Mais est-elle applicable au Québec, dans toute sa singularité environnementale, sociale et économique ? L'essai tente de répondre à cette question, dans une optique de développement durable.

La première utilisation référencée de la lutte biologique a été effectuée dans les vergers chinois, aux environs de l'an 300 avant Jésus-Christ. Les fermiers utilisaient alors des fourmis tisserandes pour lutter contre les ravageurs des fruits. Depuis, d'autres utilisations ont été effectuées avec succès, au Québec comme ailleurs dans le monde.

Néanmoins, le Québec a de nombreuses particularités qui peuvent favoriser ou nuire à l'implantation de la lutte biologique. L'importante différence de températures entre l'hiver et l'été peut limiter les organismes pouvant être introduits et la sensibilité des nombreux milieux aquatiques aux pesticides en limite l'utilisation. Aussi, l'agriculture est un domaine très important au Québec et y réside là tout le potentiel de la lutte biologique : de nombreuses

cultures se prêtent bien à la lutte biologique et de nombreux laboratoires en font l'étude. Au niveau social, bien que les québécois semblent prêts à accueillir la lutte biologique, certains problèmes sont à prévoir.

Les principaux avantages de la lutte biologique sont son innocuité, sa spécificité, son acceptabilité sociale potentielle, l'absence de développement de résistance chez les ravageurs, son adaptabilité aux cultures québécoises et la potentielle valeur ajoutée aux produits ainsi cultivés. Les principaux inconvénients sont le risque d'effet sur des organismes non dirigés, son irréversibilité, les appréhensions de certains consommateurs, son coût actuel élevé, la complexité de production de certains auxiliaires et son effet restreint. Il est important de préciser qu'autant ces avantages que ces inconvénients sont variables selon l'auxiliaire, le ravageur et les conditions d'utilisation.

L'analyse de l'applicabilité est faite en suivant librement la grille d'analyse de la Chaire de recherche et d'intervention *ÉCO-Conseil*, de l'université du Québec à Chicoutimi. Elle est faite à partir des études de cas et des avantages et inconvénients mis en évidence. Les critères d'analyse sont présentés sous la forme d'objectifs à atteindre, divisés en objectifs environnementaux, économiques et sociaux. Par contre, l'analyse est sommaire, sans pondération. Ceci la rend adaptable à plusieurs applications, facilite l'évaluation et permet d'entamer une réflexion, le tout permettant ultimement d'augmenter l'applicabilité de la lutte biologique.

Globalement, les lacunes de la lutte biologique au Québec semblent se trouver au niveau économique. Un seul objectif est peu atteint, bien qu'il soit notable : l'applicabilité à faible coût. Il est par contre important de noter que la plupart des objectifs sont au moins moyennement atteints, ce qui laisse place à l'amélioration. D'autant plus que le potentiel de recherche et innovation est grand avec cette technologie. Aussi, il faut considérer que l'atteinte de plusieurs des objectifs est variable ou difficile à évaluer. Ainsi, dans certains cas ou situations, il est possible que la lutte biologique ne soit pas applicable. De plus, la présence de nombreux objectifs difficiles à évaluer révèle certaines informations qui sont manquantes dans le domaine.

La lutte biologique semble, après analyse, applicable au Québec. De plus, comme ce domaine est très étudié, des développements sont à prévoir et certaines limites pourraient disparaître avec le temps et la recherche. Pour augmenter l'applicabilité de la lutte biologique au Québec,

plusieurs recommandations peuvent être faites. Premièrement, il est nécessaire d'encourager et financer la recherche de nouveaux auxiliaires contre les ravageurs des cultures québécoises et afin de produire des auxiliaires plus facilement et de manière économique. Il serait également important de continuer d'analyser avec rigueur les risques relatifs à l'utilisation d'un auxiliaire. Aussi, au niveau social, il est nécessaire d'offrir des formations pour les utilisateurs et d'informer les utilisateurs. Finalement, il serait intéressant et utile de former un organisme gouvernemental provincial afin d'encourager la lutte biologique.

En conclusion, le but de l'essai est somme toute atteint : après analyse et dans la mesure des connaissances actuelles, la lutte biologique semble applicable au Québec. Elle a fait ses preuves à de nombreuses reprises (pyrale du maïs, punaise terne et vers blancs, entre autres) et certaines compagnies offrent aux agriculteurs québécois auxiliaires et main d'œuvre pour de nombreuses cultures présentes sur le territoire. Aussi, les particularités du Québec ne nuisent pas à son utilisation. Néanmoins, du chemin reste à faire : les coûts d'utilisation souvent peu compétitifs peuvent en décourager plus d'un et il n'est pas assuré que la population acceptera de payer plus pour des produits souvent moins esthétiques, en apparence de moins bonne qualité. Il est également important de réaliser que les coûts plus élevés sont justifiés par une internalisation des coûts environnementaux.

REMERCIEMENTS

Je tiens premièrement à remercier ma directrice d'essai Josée Doyon pour sa patience et ses conseils et commentaires toujours judicieux. Je la connaissais déjà comme une personne généreuse et professionnelle et je suis très heureuse de lui avoir demandé d'être ma directrice et, surtout, qu'elle ait accepté.

Merci également à Judith Vien, responsable des essais pour le Centre Universitaire de Formation en Environnement, car même si je ne suis pas allé la voir souvent, quand je l'ai fait, elle m'a toujours grandement aidé.

Aussi, je tiens à remercier tout spécialement mon amoureux, Alexandre, qui m'a supporté tout au long du processus de l'essai, par son écoute, ses encouragements et sa compréhension, même quand j'étais moins facile à vivre. Finalement, merci à ma famille et mes amis qui m'ont aidé, diverti et encouragé dans les phases plus creuses, depuis le secondaire jusqu'à la maîtrise...

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
1 LA LUTTE BIOLOGIQUE.....	3
1.1 Définitions.....	3
1.1.1 Lutte biologique	3
1.1.2 Lutte conventionnelle.....	5
1.1.3 Lutte intégrée	6
1.2 Types de lutte biologique.....	7
1.3 Principaux organismes utilisés.....	8
1.4 Problématique	10
1.5 Historique de la lutte biologique.....	10
1.5.1 Dans le monde	10
1.5.2 Au Canada et au Québec	11
1.6 Principaux intervenants	12
1.6.1 Dans le monde	12
1.6.2 Au Canada et au Québec	14
2 ÉTUDES DE CAS DE LUTTE BIOLOGIQUE	17
2.1 La coccinelle asiatique contre les pucerons.....	17
2.2 Le <i>Bacillus thuringiensis</i> contre la spongieuse.....	19
2.3 Une guêpe parasite contre les aleurodes dans les serres.....	22
2.4 Les trichogrammes contre la pyrale du maïs	24
2.5 <i>Beauveria bassiana</i> contre la punaise terne dans la fraise	26
2.6 Les nématodes contres les vers blancs dans les pelouses.....	28
2.7 Lutte contre l'euphorbe ésole.....	30
3 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE LA LUTTE BIOLOGIQUE AU QUÉBEC	33
3.1 Particularités du Québec	33

3.2	Avantages, bienfaits et commodité	37
3.2.1	Environnementaux.....	38
3.2.2	Sociaux	38
3.2.3	Économiques.....	39
3.3	Inconvénients, risques et limites	41
3.3.1	Environnementaux.....	41
3.3.2	Sociaux	42
3.3.3	Économiques.....	43
4	ANALYSE DE L'APPLICABILITÉ DE LA LUTTE BIOLOGIQUE AU QUÉBEC	47
4.1	Méthode d'analyse	47
4.2	Analyse par objectifs	49
4.2.1	Pôle environnemental.....	49
4.2.2	Pôle économique.....	51
4.2.3	Pôle social.....	55
4.2.4	Vision globale	57
5	RECOMMANDATIONS	59
	CONCLUSION.....	65
	RÉFÉRENCES	67
	ANNEXE 1 CLASSES D'ORGANISMES LES PLUS UTILISÉES ET ÉTUDIÉES COMME AUXILIAIRES DE LUTTE BIOLOGIQUE.....	81
	ANNEXE 2 TABLEAU RÉSUMÉ DE L'ANALYSE PAR OBJECTIFS DE L'APPLICABILITÉ DE LA LUTTE BIOLOGIQUE AU QUÉBEC	85

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Représentation du seuil d'intervention en fonction du temps et de l'abondance du ravageur.	4
Figure 2.1	Utilisation de la coccinelle asiatique (<i>Harmonia axyridis</i> Pallas) (a) contre les pucerons (ici le puceron vert du pêcher, <i>Myzus persicae</i> Sulzer) (b).	18
Figure 2.2	Utilisation du <i>Bacillus thuringiensis</i> Berliner (a) contre la chenille du bombyx disparate (<i>Lymantria dispar</i> Linnaeus) (b).....	20
Figure 2.3	Utilisation de la guêpe parasitoïde <i>Encarsia formosa</i> Gahan (a) contre l'aleurode des serres (<i>Trialeurodes vaporariorum</i> Westwood, adultes et pupes présentés) (b).	23
Figure 2.4	Utilisation de la guêpe parasite <i>Trichogramma brassicae</i> Bezdenko contre les œufs de la pyrale du maïs (<i>Ostrinia nubilalis</i> Hübner) (a) et forme adulte de la pyrale (b).	25
Figure 2.5	Utilisation du champignon <i>Beauveria bassiana</i> Balsamo (a) pour lutter contre la punaise terne (<i>Lygus lineolaris</i> Palisot de Beauvois) (b).....	26
Figure 2.6	Domages faits par une punaise terne (<i>Lygus lineolaris</i> Palisot de Beauvois) sur la fraise.....	27
Figure 2.7	Utilisation de nématodes (ici <i>Steinernema carpocapsae</i>) (a) contre les vers blancs (ici la larve du scarabée japonais, <i>Popillia japonica</i> Newman) (b).	29
Figure 2.8	Utilisation d'une altise (<i>Aphthona lacertosa</i> Rosenheim) (a) contre l'euphorbe ésole (<i>Euphorbia esula</i> Linnaeus) (b).....	31
Figure 3.1	Répartition des ventes agricoles aux autres secteurs au Québec en 2008.	35
Figure 3.2	Répartition provinciale du revenu net comptant des exploitations agricoles du Canada en 2008.	35

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1	Analyse des objectifs environnementaux liés à l'applicabilité de la lutte biologique au Québec.	49
Tableau 4.2	Analyse des objectifs économiques liés à l'applicabilité de la lutte biologique au Québec.	52
Tableau 4.3	Analyse des objectifs sociaux liés à l'applicabilité de la lutte biologique au Québec.	55
Tableau 5.1	Recommandations en vue d'augmenter l'applicabilité de la lutte biologique au Québec.	59

LISTE DES ACRONYMES, SYMBOLES ET SIGLES

AAC	Agriculture et Agroalimentaire Canada
ARLA	Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire
BIREA	<i>Biocontrol information resource for ERMA New Zealand applicants</i>
<i>Bt</i>	<i>Bacillus thuringiensis</i>
<i>Btk</i>	<i>Bacillus thuringiensis variété kurstaki</i>
CAPE	<i>Canadian Association of Physicians for the Environment</i>
CDB	Convention sur la diversité biologique
CRAAQ	Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec
CRIACC	Centre de ressources en impacts et adaptation au climat et à ses changements
CRSNG	Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada
DDT	Dichlorodiphényltrichloroéthane
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
EPPO	<i>European and Mediterranean Plant Protection Organization</i>
IOBC	<i>International Organization for Biological Control of Noxious Animals and Plants</i>
IRBV	Institut de recherche en biologie végétale
IRDA	Institut de recherche et de développement en agroenvironnement
ISQ	Institut de la statistique du Québec
MAPAQ	Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation
MDDEP	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs
MDEIE	Ministère du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation
MEQ	Ministère de l'Environnement du Québec
ONU	Organisation des Nations unies
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>

LEXIQUE

Agroécosystème	Écosystème modifié par l'homme pour la culture de végétaux
Analyse de cycle de vie	Analyse de toutes les étapes du cycle de vie d'un produit, du berceau au tombeau, afin d'en réduire l'impact sur l'environnement
Chenille	Premier stade de développement après l'éclosion de l'œuf (larve) chez les papillons (ordre des Lépidoptères)
Délai avant récolte	Délais à respecter entre l'application d'un produit sur une culture et sa récolte, afin d'assurer l'innocuité pour le consommateur
Délai de réentré au champ	Délais entre l'application d'un produit sur une culture et le retour au travail sans risque
Entomopathogène	Micro-organisme causant une maladie chez les insectes
Entomophage	Organisme qui se nourri d'insectes, en entier ou en partie
Larve	Premier stade de développement après l'éclosion de l'œuf chez les espèces à développement indirect
Latex	Substance liquide produite par certaines plantes et champignons
Nymphe	Stade de développement, entre la larve et l'adulte, chez certaines espèces d'insectes
Phytopathogène	Micro-organisme causant une maladie chez les plantes
Phytophage	Organisme qui se nourri de plantes, en entier ou en partie
Phytoprotection	Mécanismes artificiels ou naturels de protection des végétaux
Phytotoxicité	Altération passagère ou permanente d'une plante, suite à l'exposition à un produit
Plante pérenne	Plante avec une durée de vie de plus de deux ans
Pupe	Stade de développement, entre la larve et l'adulte, chez certains insectes
Spores	Structure microscopique servant à la reproduction et à la dispersion chez les champignons

INTRODUCTION

Depuis que le monde est monde, des organismes minent la vie de l'Homme, qui tente souvent de combattre ces insectes, acariens, bactéries, champignons, et autres. Néanmoins, dans les environnements non-perturbés, la densité de ces ravageurs est normalement contrôlée par l'intervention de leurs ennemis naturels, chacun variant selon l'abondance de l'autre. La biodiversité permet de maintenir ces conditions d'équilibre.

Avec l'avènement de l'agriculture intensive des monocultures, les agroécosystèmes sont de plus en plus perturbés et simplifiés à leur maximum. La diversité des organismes présents, dont celle des ennemis naturels de ravageurs, est très faible. Pour cette raison, ces monocultures sont plus sensibles aux maladies et font parfois face à d'importantes attaques de ravageurs (Coderre et Vincent, 1992, Plant et Freudenberger, 2005). Aussi, l'introduction accidentelle de ravageurs exotiques, dans un contexte de mondialisation des échanges commerciaux, cause divers problèmes.

En réponse à ces problèmes, l'Homme invente certains pesticides, à l'époque souvent utilisés avec modération, conjointement à certaines pratiques culturales comme la rotation des cultures. Cependant, le développement de pesticides organiques comme le DDT (dichlorodiphényltrichloroéthane) pendant la seconde guerre mondiale et les années suivantes mène à une révolution dans les méthodes de contrôle des ravageurs. Par exemple, dans les cultures de coton, de blé et de maïs, l'utilisation de pesticides passe de 10 % des superficies en 1952 jusqu'à 95 % en 1980 (*U.S. Congress, Office of Technology Assessment, 1995*).

Ensuite, la découverte de résistance chez les ravageurs visés par les pesticides et des effets nocifs sur la santé humaine et les écosystèmes porte à réflexion sur ce qui semblait être une solution miracle. Existe-t-il des méthodes alternatives de lutte, plus écologiques? Revient alors à l'avant scène un concept qui avait été éclipsé par les pesticides : la lutte biologique. Présente naturellement dans la plupart des écosystèmes, elle peut être résumée par le contrôle d'un organisme problématique par un de ses ennemis naturels. Les organismes pouvant être problématiques sont nombreux et diversifiés : mauvaise herbe, insecte piqueur, bactérie causant une maladie dans une culture, insecte se nourrissant d'une plante cultivée, etc. Leurs ennemis peuvent être des microorganismes

causant des maladies ou des animaux, mais sont le plus souvent des bactéries et insectes.

Ce travail se veut une analyse de la lutte biologique à travers le monde et l'histoire afin de voir si cette panacée qui semble nouvelle mais n'est que plus étudiée, en est bien une. Cette analyse sera faite à partir de la documentation dont la pertinence et la validité seront évaluées en tenant compte leur auteur, but et année de publication. L'objectif principal de cet essai est de déterminer si la lutte biologique est applicable au Québec, dans toute sa singularité, des points de vue sociaux, économiques et environnementaux.

Afin de répondre à cet objectif, une mise en contexte présentera des définitions et généralités sur le sujet. Dans cette mise en contexte seront également présentées la lutte conventionnelle aux pesticides et la lutte intégrée aux ravageurs, approche plus multidisciplinaire comprenant la lutte biologique et l'utilisation modérée de pesticides, entre-autres (*U.S. Congress, Office of Technology Assessment, 1995*). Ensuite, un bref historique sur le sujet et une description des principaux intervenants dans le domaine seront faits afin de terminer la mise en contexte. Puis, plusieurs exemples de succès et échecs en lutte biologique seront présentés, au Québec et dans le monde. Cette étude de cas sera variée afin de donner une bonne vision des possibilités et limites de la méthode. Elle permettra également de mettre en évidence les principaux avantages, inconvénients et limites, qui seront présentées au chapitre 3.

En appliquant ces savoirs aux conditions québécoises, il sera possible d'extrapoler l'applicabilité de cette méthode. Pour terminer, des recommandations seront faites quant à l'applicabilité de la lutte biologique au Québec, dans une perspective d'agriculture durable, respectueuse de l'environnement.

1 LA LUTTE BIOLOGIQUE

Ce chapitre présente la problématique de l'essai, soit l'applicabilité de la lutte biologique au Québec. Elle introduit également la lutte biologique sous plusieurs aspects : les définitions et généralités importantes à la compréhension, un bref historique de cette méthode de lutte ainsi que les principaux intervenants impliqués dans la lutte biologique, au Canada comme ailleurs dans le monde.

1.1 Définitions

Certains concepts généraux importants doivent être définis et expliqués avant d'aller plus loin dans le travail. La lutte biologique, la lutte conventionnelle et la lutte intégrée seront présentés dans cette section ainsi que certains autres concepts liés.

1.1.1 Lutte biologique

Avant toute chose, il est primordial de bien définir le sujet ainsi que les termes associés, en grande partie parce que les définitions de ces termes varient selon les auteurs. La lutte biologique est ainsi définie : l'utilisation d'organismes vivants pour contrôler ou combattre un ravageur (AAC, 2009a). Cette définition simplifiée nécessite quelques précisions qui limitent l'étendue du sujet.

Tout d'abord, les organismes vivants utilisés sont restreints à quelques groupes taxonomiques. On retrouve entre autres certains arthropodes (insectes et arachnides), nématodes, protozoaires, bactéries et champignons. Ces organismes, ennemis naturels des ravageurs visés, sont aussi nommés auxiliaires de lutte. Bien que certains auteurs considèrent l'utilisation des vertébrés comme les poissons ou les oiseaux comme agents de lutte biologique (Raymond, 1992 et Brown, 2004), ils seront exclus en raison de la marginalité de leur utilisation et afin de faciliter l'analyse. Aussi, l'utilisation d'organismes vivants exclut l'utilisation de virus, de phéromones et de biocides inertes. Ces derniers sont des insecticides dont le composé actif est issu d'organismes vivants mais ne comprenant pas d'organismes capables de se répliquer (Cloutier et Cloutier, 1992). Par exemple, la bactérie *Bacillus thuringiensis* (*Bt*), dont il sera question plus loin, est souvent utilisée en lutte biologique mais sous deux formes principales bien différentes. Des

solutions à pulvériser comprenant le bacille lui-même, vivant, sont nommées biocides actifs et seront considérées dans ce travail. Par contre, des solutions ne comprenant que la toxine efficace, sans cellule capable de se répliquer, sont nommées biocides inertes et ne seront pas considérés comme des outils de lutte biologique.

Ensuite, la lutte biologique et la lutte conventionnelle ont des approches et des objectifs bien différents. Le but de la lutte conventionnelle est l'éradication de tous les ravageurs présents, sans considération de seuils tandis que le but de la lutte biologique est de réduire et de contrôler les populations de ravageurs en deçà d'un seuil d'intervention pour lequel les dommages sont économiquement et esthétiquement acceptables (Figure 1.1) (Waage, 2004 et *U.S. Congress, Office of Technology Assessment*, 1995). La notion d'équilibre est très importante : pour qu'il y ait maintien des populations de ravageur sous ce seuil, la quantité d'antagonistes doit être suffisante, cette proportion variant selon l'écologie des espèces concernées et les conditions externes comme le climat. Il est à noter que les agents de lutte biologique visent la mort des organismes à court ou moyen terme. De cette façon, les techniques utilisant des pièges à phéromones ou des mâles stériles afin de limiter la propagation ne sont pas considérées comme de la lutte biologique.

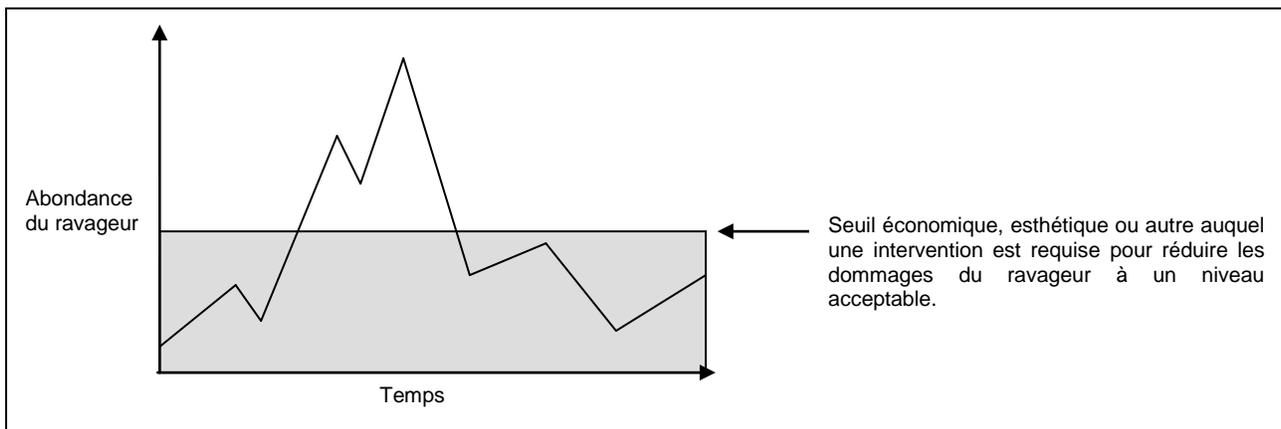


Figure 1.1 Représentation du seuil d'intervention en fonction du temps et de l'abondance du ravageur. Modifié de *U.S. Congress, Office of Technology Assessment* (1995, p. 36).

Finalement, les ravageurs peuvent être des insectes, des arachnides (comme les tétranyques), des micro-organismes causant des maladies mais également des plantes comme certaines mauvaises herbes. Ils sont essentiellement des ravageurs de cultures

(agricole, sylvicole ou horticole) en champ et post-récolte mais n'y sont pas restreint. L'utilisation de la lutte biologique peut aussi viser d'autres ravageurs, comme par exemple les insectes piqueurs afin de limiter la propagation de maladies (ex : virus du Nil occidental ou malaria (Skovmand, 2004)) ou les plantes invasives pouvant menacer la biodiversité (ex : salicaire pourpre, *Lythrum salicaria* Linnaeus) (Bourchier, 2004 et *U.S. Congress, Office of Technology Assessment*, 1995).

1.1.2 Lutte conventionnelle

Avant d'aller plus loin avec la lutte biologique, il est nécessaire de mettre en contexte sa principale alternative, la lutte conventionnelle, c'est-à-dire la lutte avec les pesticides. Ces derniers sont définis comme étant des produits chimiques visant à détruire les ravageurs et autres organismes indésirables (Actu-Environnement, 2010). Certains auteurs incluent les auxiliaires de lutte biologique dans la définition des pesticides mais ils ne le seront pas dans le cadre de ce travail (EPA, 2009a). Les pesticides, tel que mentionné précédemment, ont pour principal but d'éradiquer complètement le ravageur visé.

Les pesticides sont nommés selon l'organisme visé : insecticides contre les insectes, fongicides contre les champignons, herbicides contre les mauvaises herbes, etc. Ils sont également classés en quatre groupes principaux selon leur structure et leur mode d'action, soit les carbamates (ex : carbaryl ou Sevin), organochlorés (ex : DDT), organophosphorés (ex : malathion) et pyréthrinoïdes (ingrédients actifs des insecticides domestiques Raids) (EPA, 2009a; S.C. Johnson, 2007).

C'est avec la synthèse et la découverte des propriétés insecticides du DDT lors de la deuxième guerre mondiale que les pesticides deviennent plus répandus. Plus tard à la même époque, de nombreux autres sont mis sur le marché et utilisés en grandes quantités. Néanmoins, de nombreux effets négatifs imprévus se font rapidement sentir et les pesticides sont de plus utilisés avec précaution, parcimonie et méfiance. Ces pesticides sont souvent efficaces sur de nombreuses espèces de ravageurs, ce qui est avantageux pour l'efficacité mais cause des impacts sur des espèces très éloignées génétiquement de la cible. En effet, plusieurs pesticides ont des effets aigus ou chroniques sur la santé d'organismes non visés, comme les humains. De plus, certains pesticides jouent un rôle dans le développement de cancers et certains organophosphorés

sont reconnus comme pouvant causer des dommages neurologiques (CAPE, 2000). Un autre exemple d'effet est palpable chez les populations d'abeilles, qui peuvent être grandement affectées par certains pesticides. Selon l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments (2008), plus de 5 000 pesticides peuvent potentiellement provoquer des dommages aux abeilles. Leur importance en tant que pollinisateurs des cultures est menacée, ce qui est un problème majeur considérant qu'elles sont essentielles pour plusieurs cultures du Québec, dont les bleuets, concombres, fraises, framboises, canneberges et pommes (ISQ, 2009). Aussi, les pesticides qui se dégradent lentement peuvent contaminer les milieux naturels et s'accumuler dans les animaux et le long de la chaîne alimentaire (Actu-Environnement, 2010). Par contre, il est important de noter que les pesticides plus récents sont plus efficaces, donc moins toxiques pour l'Homme, et peuvent être utilisés en plus petites quantités. Ils sont également majoritairement moins rémanents et plus spécifiques (*North Carolina State University – Department of Entomology, 1997*).

La recherche et le besoin de méthodes alternatives aux pesticides sont plus importants dans les cultures à grande valeur comme certaines cultures fruitières et maraîchères que dans d'autres. Premièrement, malgré la valeur de ces cultures, les homologations de pesticides sont parfois difficiles et lentes à obtenir, celles de plus grande surface comme le blé ou le maïs rapportant plus aux compagnies productrices de pesticides. Aussi, la production de ces végétaux de grande valeur est souvent plus visible pour le public, qui est en même temps de plus en plus sensibilisé aux méfaits possibles des pesticides (Weeden et al., 2007).

1.1.3 Lutte intégrée

La lutte intégrée est une stratégie multidisciplinaire de contrôle des ravageurs qui inclut plusieurs approches comme par exemple la lutte biologique, les méthodes culturales et l'usage judicieux et limité des pesticides chimiques. Cette méthode considère l'écosystème dans son ensemble, dont les interactions entre les organismes. Le but ultime est de réduire les dommages aux cultures économiquement, avec le moins de menaces à l'environnement et à la santé humaine possible (EPA, 2009b).

1.2 Types de lutte biologique

La lutte biologique peut être divisée en trois catégories bien distinctes : classique, par augmentation et par protection. La méthode classique vise l'implantation d'un antagoniste exotique dans un milieu où sévit un ravageur exotique (Cloutier et Cloutier, 1992). En l'absence du ou des ennemis qui contrôlent ses populations dans son aire de répartition d'origine, le ravageur n'a presque aucun obstacle à sa prolifération autre que la culture ou le milieu dont il dépend. C'est ainsi que plusieurs cas de lutte biologique ont été réalisés par l'introduction d'un ennemi naturel dans la nouvelle région, dans le but qu'il s'implante et se développe, pour contrôler le ravageur à long terme. Ce mode de lutte demande néanmoins beaucoup de recherche avant sa mise en place, surtout afin de s'assurer que l'espèce introduite s'acclimate et s'attaque spécifiquement au ravageur exotique et non aux organismes indigènes (Weeden et al., 2007). Un exemple de lutte biologique classique serait l'introduction de la coccinelle asiatique, *Harmonia axyridis* Pallas, contre les pucerons (hémiptères de la super-famille *Aphidoidea*), plusieurs espèces étant également exotiques (Roy et Wajnberg, 2008 et voir section 2.1).

Dans le cas de la lutte biologique par augmentation, le but est de contrôler un ravageur indigène en augmentant l'occurrence de son ou ses ennemis naturels, naturellement présents mais en quantité insuffisante (Cloutier et Cloutier, 1992) ou d'introduire à répétition un ennemi qui ne survivrait pas, par exemple, aux conditions hivernales (*U.S. Congress, Office of Technology Assessment*, 1995). De grandes quantités d'antagonistes sont libérées, le plus souvent à plusieurs reprises, pour contrôler les ravageurs. Un exemple de lutte biologique par augmentation serait la libération de grandes quantités d'un champignon parasite naturellement présent dans les sols, *Beauveria bassiana*, contre la punaise terne, *Lygus lineolaris* Palisot de Beauvois (Jamal, 2008).

Les ravageurs indigènes ont toujours des ennemis mais ces derniers sont parfois défavorisés par certaines conditions du milieu (utilisation de pesticides à large spectre, souvent). La lutte par protection vise à augmenter l'occurrence des ennemis naturels en changeant le milieu et les pratiques culturales. C'est sans doute le mode de lutte biologique le plus important et facilement disponible car il demande souvent peu d'efforts et que les ennemis sont adaptés à l'environnement visé (Weeden et al., 2007; *U.S. Congress, Office of Technology Assessment*, 1995)). Par exemple, certaines espèces d'insectes prédateurs comme les coccinelles du genre *Hyppodamia*, se nourrissent de

pollen quand les proies deviennent plus rares. Malheureusement, elles ne peuvent pas se reproduire sous cette diète, ce qui peut faire chuter les populations. Cette situation peut être évitée en pulvérisant sur les cultures une solution de sucre et d'hydrolysat de levures, ce qui remplace temporairement les pucerons (Johnson, 2000).

1.3 Principaux organismes utilisés

Plusieurs groupes d'organismes peuvent être utilisés en lutte biologique. Les principaux sont les micro-organismes, les nématodes, les insectes et les arachnides. Les organismes bénéfiques utilisés en lutte biologique doivent avoir un bon taux de reproduction, être spécifiques, avoir une bonne capacité d'adaptation et leur cycle de vie doit être synchronisé à celui du ravageur (Weeden et al., 2007). Les grandes classes d'organismes étudiés et utilisés en lutte biologique sont présentées à l'annexe 1.

Les entomopathogènes sont des micro-organismes (bactéries, champignons, protozoaires, etc.) causant des maladies mortelles chez les insectes. Les plus souvent utilisés sont des bactéries comme les variétés du *Bacillus thuringiensis* (*Bt*). Ils peuvent être transmis par l'air, l'eau ou un vecteur comme un insecte (Cloutier et Cloutier, 1992). Le but des entomopathogènes est de créer une épizootie (épidémie affectant les animaux) chez le ravageur visé (Weeden *et al.*, 2007). Ces pathogènes ont comme avantages d'être facile à produire en grande quantité, d'avoir une action rapide et d'être épandus de la même façon que les pesticides conventionnels (pulvérisation). Par contre, les gens ont souvent des craintes pour leur santé et pour celle des écosystèmes lorsqu'il est question de micro-organismes, qu'ils relient d'emblée à l'incidence de maladies.

Les nématodes peuvent également être inclus dans les entomopathogènes. Ce sont des vers ronds parasites qui infectent leurs hôtes par ingestion. Après avoir repéré son hôte, le nématode le pénètre, habituellement par un orifice naturel (bouche, anus ou autre). Une fois à l'intérieur, le nématode libère des bactéries qu'il transporte naturellement et ces dernières liquéfient la chair avoisinante, ce qui permet au ver de se nourrir. Le ravageur ne survit pas à ce traitement et, après quelques jours, des centaines de nématodes sont libérés et repartent à la recherche d'hôtes potentiels (Gaugler, s.d.). Certains nématodes transportent des bactéries qui leur permettent un effet très rapide (de 24 à 48 heures, Grewal, s.d.). Ils sont faciles à produire en grande quantité, faciles d'utilisation et sont peu

spécifiques (peuvent donc être plus rentables en s'attaquant à plusieurs insectes nuisibles). Par contre, ils demandent des conditions particulières (haut taux d'humidité) et leur faible spécificité les rend susceptibles de s'attaquer à certains insectes non visés utiles, comme certains pollinisateurs (Cloutier et Cloutier, 1992)).

Les insectes et arachnides prédateurs s'attaquent directement au ravageur en le consommant et en causant une mort quasi immédiate. Comme la prédation est moins spécifique que le parasitisme, certains de ces organismes ont une action plus étendue et s'attaquent à une variété d'organismes, ravageurs ou non, tandis que d'autres sont plus spécifiques (Cloutier et Cloutier, 1992). Ces auxiliaires de lutte ont l'avantage de se nourrir plus d'une fois au cours de leur vie et s'attaquent donc à plus d'un organisme, comparativement à d'autres et sont très mobiles (Weeden et al., 2007). Par contre, les prédateurs sont difficiles et coûteux à produire car ils nécessitent un apport constant en proies, elles mêmes devant être élevées en masse. Ils ont également un transport et une application difficiles et coûteux (Cloutier et Cloutier, 1992).

Souvent, les plantes exotiques invasives se multiplient rapidement à cause de l'absence d'ennemis naturels phytophage. Les phytophages peuvent également être considérés comme des prédateurs mais ils consomment des ravageurs végétaux, le plus souvent des mauvaises herbes. Ils s'y attaquent pour s'en nourrir entièrement ou en partie, ce qui peut mener à la mort de la plante et ainsi être très avantageux dans une optique de lutte biologique (Sforza, 2009). Par contre, l'utilisation des phytophage comporte les mêmes désavantages que celle des prédateurs.

Quant aux insectes parasitoïdes, ce sont leurs stades immatures qui se développent sur (ectoparasite) ou à l'intérieur (endoparasite) d'un insecte hôte (ravageur dans le cas de la lutte biologique). Leur cycle de vie tue ultimement l'hôte (Weeden et al., 2007). Ces organismes sont souvent privilégiés en lutte biologique contre d'autres insectes pour leur grande mobilité, spécificité et capacité de repérage des hôtes. Néanmoins, ils possèdent également plusieurs des désavantages des prédateurs, en plus de leur action relativement lente (Cloutier et Cloutier, 1992).

1.4 Problématique

Le sujet étant maintenant clairement défini, il est possible d'énoncer la problématique de l'essai sans ambiguïté. Ainsi, en tenant compte que la population, les agriculteurs et les décideurs sont tous les jours davantage conscients des impacts nocifs des pesticides sur l'environnement et la santé humaine, et que les ravageurs développent de plus en plus de résistances aux pesticides, une méthode alternative de lutte s'impose. De plus, en considérant toutes les particularités du Québec, dans sa singularité environnementale (climat, biodiversité, types de cultures, etc), politique, économique et sociale, il est nécessaire d'adopter une méthode adaptée. Donc, dans une optique de lutte intégrée et de développement durable, en considérant les définitions faites précédemment, est-ce que la lutte biologique aux ravageurs est applicable au Québec? Cet essai tentera de répondre à cette question.

1.5 Historique de la lutte biologique

L'Homme a toujours eu des ennemis dont il voulait réduire l'abondance, que ce soit d'autres hommes ou des ravageurs, dont l'importance et les impacts ont varié au cours de l'histoire. Aussi, depuis le début de l'agriculture, il y a environ 10 000 ans, les fermiers ont rencontré divers problèmes liés aux organismes nuisibles qui ont augmenté avec l'intensification des cultures. Sera présenté dans cette section un bref historique de la lutte biologique, en parallèle à celle des pesticides, dans le monde, au Canada et au Québec.

1.5.1 Dans le monde

La première utilisation référencée de lutte biologique a été effectuée par les Chinois, dans les environs de l'an 304 avant Jésus-Christ. Dans les vergers d'agrumes, les fermiers utilisaient des fourmis tisserandes (*Oecophylla smaragdina* Fabricius) indigènes qui consommaient une variété de ravageurs pour protéger les fruits (Peng, 1983). Comme les fermiers favorisaient également la dispersion de ces fourmis en installant des tiges de bambou entre les arbres, il s'agissait de lutte biologique à la fois d'augmentation et de protection.

Des recherches sur les prédateurs, parasitoïdes et maladies s'attaquant aux ravageurs jalonnent l'histoire mais c'est surtout vers la fin du XIX^{ième} et au XX^{ième} siècles que les

principales découvertes et expériences se font (Waage, 2004). En 1868, la cochenille australienne (*Icerya purchasi* Maskell), un insecte parasite qui suce la sève des arbres d'agrumes, a été accidentellement introduite en Floride. Suite aux dommages considérables à l'industrie et en l'absence d'autres moyens de lutte, un entomologiste introduisit une coccinelle naturellement prédatrice (*Rodolia cardinalis* Mulsant) de la cochenille en Australie, ce qui mena au premier grand succès de la lutte biologique classique (Jourdeuil et al., 1991). Les scientifiques croient alors que la lutte biologique est la solution à tous les problèmes et de nombreux insectes sont introduits en Amérique de façon maladroites, sans études préliminaires sérieuses ni période de quarantaine (Turnbull et Chant, 1961). Heureusement, aucun de ces organismes n'a causé de tort sérieux à l'environnement. Des cas de lutte biologique seront analysés plus à fond à la section 2.

Après la deuxième guerre mondiale, le DDT est développé et sont découvertes ses propriétés insecticides. L'élaboration de d'autres pesticides chimiques puissants et peu coûteux a diminué l'intérêt pour la lutte biologique et c'est seulement quand des problèmes se sont présentés qu'elle est revenue au goût du jour (Waage, 2004). Le livre de Rachel L. Carson, *Silent spring* (1962), sonne l'alarme et mène au bannissement du DDT en 1972. Le développement de résistances de la part des organismes visés, l'émergence de nouveaux prédateurs jusque là secondaires et les impacts des pesticides de synthèse sur des organismes non visés et l'humain ont mené à des questionnements sur l'avenir des pesticides tels qu'utilisés à cette époque (Jourdeuil et al., 1991). C'est au même moment que se développe la lutte intégrée et que reprennent les recherches en lutte biologique, qui n'ont pas cessé depuis (*U.S. Congress, Office of Technology Assessment*, 1995). Cependant, la protection des cultures et le contrôle de la majorité des ravageurs sont encore dépendants de l'usage des pesticides, bien que certaines pratiques aient été modifiées.

1.5.2 Au Canada et au Québec

La lutte biologique est dans l'air au Canada depuis la fin du XIX^{ième} siècle. Les premiers parasitoïdes exotiques destinés à la lutte antiparasitaire arrivent en 1882 pour lutter contre un ravageur des groseilles et du cassis. Des œufs de mouche à scie du groseillier (*Nematus ribesii* Scopoli) infestés de trichogrammes (minuscules guêpes parasitoïdes)

sont importés de l'Europe par l'état de New-York (Turnbull et Chant, 1961) pour stopper ses dommages.

Contre une mauvaise herbe, la première réussite a eu lieu en 1951 contre le millepertuis commun (*Hypericum perforatum* Linnaeus) par l'introduction de deux espèces de chrysomèles (coléoptère herbivore) (Bourchier, 2004). Depuis, plus de 75 agents ont été introduits pour lutter contre une vingtaine d'espèces de mauvaises herbes (AAC, 2009a).

Dans les serres, milieu plus facile à contrôler qu'un champ à aire ouverte ou qu'une forêt, le premier cas à succès de la lutte biologique canadienne a lieu en 1935. Le parasitoïde *Encarsia formosa* Gahan qui s'attaque aux mouches blanches (famille des Aleurodoidés), fléau de nombreuses plantations en serres, est introduit. Plus de 18 millions de parasitoïdes sont introduits jusqu'à l'ascension du DDT dans les années 1950 mais la production a repris au début des années 1970 (Elliott, 2005).

Au Québec et en Ontario, depuis 1984, le *Bt* est le seul produit qui est recommandé pour l'usage en forêt contre la tordeuse et d'autres insectes, soit certains lépidoptères, diptères et coléoptères, selon la variété de *Bt* (Smirnof, 1991). Ainsi, en 1986, l'Ontario décide de bannir l'utilisation de pesticides sur les forêts. Une telle initiative aurait pu avoir de graves impacts sur la forêt mais elle a plutôt incité la recherche sur le *Bt* et la production à grande échelle de trichogrammes contre la tordeuse de l'épinette (*Choristoneura* sp.) en créant un marché important (*U.S. Congress, Office of Technology Assessment, 1995*).

1.6 Principaux intervenants

Les succès et échecs de la lutte biologique au Canada ne l'ont pas empêché d'avoir une place toujours importante en recherche. De nombreux organismes et réseaux s'intéressent au sujet et ces principaux intervenants seront présentés dans la section suivante avec un accent plus grand sur ceux québécois et canadiens.

1.6.1 Dans le monde

Aux États-Unis, c'est principalement l'*Environmental Protection Agency* (EPA) et l'*United States Department of Agriculture* (USDA) qui s'occupent de la lutte biologique. L'EPA a

pour mission la protection de l'environnement américain, celui-ci étant lié à la lutte biologique comme aux pesticides (EPA, 2009c). Cette agence est également responsable dans une certaine mesure de la recherche partout dans le monde à travers différents laboratoires en Europe, Australie, Amérique du sud et Asie qui étudient leurs ravageurs et les moyens de les combattre (USDA, s.d.). Quant à l'USDA, il effectue des recherches et régit l'homologation, donc l'utilisation, des pesticides et des agents de lutte biologique (USDA, 2005).

En Europe, l'Organisation Européenne et Méditerranéenne pour la protection des plantes (EPPO pour *European and Mediterranean Plant Protection Organization*) est un organisme intergouvernemental de protection des végétaux, cultivés et sauvages, qui encourage l'utilisation de méthodes de lutte aux ravageurs modernes, sécuritaires et efficaces. Elle a formé un panel d'experts afin d'étudier l'utilisation sécuritaire de la lutte biologique. Ce panel propose également une liste d'organismes bénéfiques indigènes, introduits et établis (n'incluant pas les micro-organismes, qui sont couverts par une directive de l'Union Européenne) (EPPO, 2008).

Au niveau mondial, l'Organisation internationale de lutte biologique contre les animaux et plantes nuisible (*International Organization for Biological Control of Noxious Animals and Plants*, IOBC) est une organisation de travailleurs du domaine de la lutte biologique qui promeut le développement des connaissances et leur partage internationalement (IOBC, s.d.). Elle présente également le périodique BioControl, qui présente les résultats de recherches dans le domaine (*Id*, s.d.). Le président actuel est un québécois, le chercheur et professeur universitaire Jacques Brodeur basé à l'Institut de recherche en biologie végétale (IRBV) à Montréal.

À ces institutions s'ajoutent de nombreux instituts et associations qui militent et recherchent, en faveur ou non de cette technique de lutte. De plus, différents paliers gouvernementaux (pays, province ou état et villes) peuvent entériner des projets de lutte biologique et avoir une importance dans leur application. Finalement, certaines compagnies mettent sur le marché des auxiliaires de lutte biologique et d'autres offrent leurs services afin de les implanter.

1.6.2 Au Canada et au Québec

Au niveau fédéral, les principaux ministères responsables de la lutte biologique sont Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) et Santé Canada. La mission d'AAC est d'assurer la sécurité alimentaire, la santé environnementale et la croissance par la recherche et l'élaboration de politiques et programmes (AAC, 2009b). Santé Canada, par l'Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire (ARLA), gère les ressources et la réglementation en matière de lutte antiparasitaire avec les pesticides, la lutte biologique et d'autres méthodes, utilisées de façon durable. Le plus important de tout, cette agence est responsable de l'homologation des pesticides, des produits utilisés en lutte biologique et de l'inspection de tout agents non-indigènes avant une tentative d'introduction (AAC, 2009a). Un autre intervenant, le Réseau Biocontrôle (créé en 2001), est un organisme canadien de recherche et développement. Son but est de réduire la dépendance aux pesticides dans les serres et pépinières, essentiellement par l'application de la lutte biologique. Ce réseau réunit différents chercheurs, universités, et intervenants publics et privés et ses fonds proviennent de subventions du CRSNG (Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada) (Réseau Biocontrôle, s.d.).

Au niveau gouvernemental québécois, le principal ministère responsable de la lutte biologique est le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ). Dans une perspective de développement durable, ce ministère réalise des interventions dans tous les domaines liés à l'agriculture et encourage la recherche (MAPAQ, 2010). Ce ministère, avec l'Union des producteurs agricoles (UPA), le ministère de l'Environnement, du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) et le ministère du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation (MDEIE) a créé l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) en 1998. L'IRDA a pour mission de favoriser le développement durable de l'agriculture par des actions en recherche, ou encore par le développement et le transfert des connaissances, entre autres en lutte biologique (IRDA, 2010). Une autre action du MAPAQ, en collaboration cette fois-ci avec le Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), est la création d'Agri-réseau. Cette organisation tente de faciliter la diffusion et l'accès aux plus récents développements en agriculture et agroalimentaire en offrant des milliers d'articles sur son site Internet, approuvés par différents experts, dont des applications québécoises de lutte biologique. Elle offre également des bulletins d'avertissements aux

agriculteurs pour les tenir au courant, tout au long de la saison de croissance des cultures, du développement des populations de ravageurs.

Différents intervenants offrent des produits de lutte biologique au Canada et au Québec. La compagnie d'origine belge Biobest, ayant des distributeurs au Canada, offre différents outils de lutte biologique, des insectes aux nématodes, en passant par les bactéries (Biobest, 2009a). La compagnie néerlandaise Koppert, active depuis 1967, a également des distributeurs au Canada (Koppert, s.d.). Au Québec, AEF Global Inc., une compagnie Sherbrookoise, développe, produit et vend différents produits de lutte et fertilisation écologique, dont des auxiliaires de lutte biologique. C'est la première entreprise canadienne à produire un biopesticide à partir de bactérie, soit le *Bt var. kurstaki* en 1997, et elle ne cesse de se développer depuis (AEF Global, 2008). Pour le contrôle biologique des insectes piqueurs, la compagnie québécoise Groupe GDG Environnement a réalisé plusieurs projets et est la plus importante au Canada. Elle affirme même n'avoir connu aucun échec depuis 1980 (Groupe CDG Environnement, 2008). Finalement, le Groupe Cameron avec ses succursales à travers le Québec, offre différentes options écologiques de gestion parasitaire dont l'utilisation d'organismes vivants dans une optique de lutte biologique. Cette compagnie, également sherbrookoise d'origine, est omniprésente et offre ses services dans les institutions, industries, commerces, résidences et dans le domaine agroalimentaire (Groupe Cameron, 2009). Il est à noter que, bien que les intervenants présentés soient surtout liés à l'utilisation de la lutte biologique en milieu agricole, l'analyse est ouverte à d'autres utilisations.

2 ÉTUDES DE CAS DE LUTTE BIOLOGIQUE

Depuis que l'homme a réalisé l'importance des ennemis naturels dans la lutte aux ravageurs et qu'il a développé une certaine méthodologie, des essais de lutte biologique ont eu lieu, fructueux ou non. Des recherches se font à chaque année et il peut être difficile de suivre les plus récents développements. La présente section se veut donc un aperçu des utilisations possibles, dans différents domaines, de cette méthode, dont les applications sont presque infinies. Néanmoins, il est certain que d'autres applications auraient mérité mention mais certains aspects de d'autres applications seront utilisés dans la section 3 afin d'établir les avantages et inconvénients de la lutte biologique.

Cette section présente donc certaines applications, passées, présentes et projetées de lutte biologique au Canada, au Québec et dans le monde. Dans la mesure du possible, des projets variés seront présentés. Cela signifie qu'il y aura moins un exemple pour chaque type d'agent et autant des réussites que des échecs, considérant que les échecs ne sont pas tous nécessairement très documentés.

2.1 La coccinelle asiatique contre les pucerons

Une des utilisations les plus connues de lutte biologique est l'utilisation des coccinelles contre les pucerons (voir figure 2.1). Les coccinelles sont des coléoptères de la famille des Coccinellidés, prédateurs généralistes de plusieurs espèces de pucerons et de cochenilles, entre autres (Ahmad Pervez, 2006). Par exemple, contre le puceron vert du pêcher (*Myzus persicae* Sulzer) sur des plants de pomme de terre, deux espèces de coccinelles (*Coleomegilla maculata* DeGeer et *Coccinella septempunctata* Linnaeus) ont réussi à réduire les populations de 85 % (Obrycki *et al.*, 2009). La plupart des coccinelles ont l'avantage relatif de pouvoir se nourrir de proies alternatives. Une proie alternative permet à la coccinelle de survivre en l'absence de sa proie de préférence, qu'elle recommence à consommer aussitôt que possible. Ainsi, ces prédateurs généralistes peuvent survivre à une baisse de l'occurrence du ravageur visé et mieux s'implanter (Ahmad Pervez, 2006). Par contre, elles peuvent également se manger entre elles (prédation intragilde), se nourrir d'insectes non visés ou même de végétaux, comme il sera présenté plus loin. Les pucerons, quant à eux, sont des hémiptères de la super-famille *Aphidoidea*. Ce sont des ravageurs de nombreuses cultures : ils sucent la sève, ce qui affaiblit les plantes et peut

aussi transmettre des maladies virales (Santé Canada, 2009a). Les pucerons produisent également du miellat, substance collante et sucrée, qui peut attirer d'autres ravageurs (fourmis, mouches, etc.) et favoriser le développement de fumagine, maladie causée par un champignon (*Id.*, 2009). Le développement des populations peut être très rapide chez certaines espèces : les femelles peuvent donner naissance à plus de dix autres nymphes femelles, à chaque jour (*Id.*, 2009).



Figure 2.1 Utilisation de la coccinelle asiatique (*Harmonia axyridis* Pallas) (a) contre les pucerons (ici le puceron vert du pêcher, *Myzus persicae* Sulzer) (b). Modifié de Labrie (2008, p. 1) et de Joshi et Poorani (s.d.).

En Amérique du nord, c'est plus précisément la coccinelle asiatique (*Harmonia axyridis* Pallas) qui fait les manchettes depuis des décennies. Cette coccinelle japonaise a été introduite aux États-Unis en 1916 pour combattre différentes espèces de pucerons mais n'est devenue répandue que dans les années 1980 et est considérée depuis comme une espèce invasive (Roy et Wajnberg, 2008). Une coccinelle asiatique adulte s'attaque à 30 espèces de pucerons et peut en consommer jusqu'à 270 par jour, dépendant entre-autres de l'espèce (Weeden et al., s.d.a.; Labrie, 2008). Sa grande voracité, sa fécondité élevée, son comportement agressif et sa capacité de survivre aux hivers rigoureux, comme ceux du Québec, en font à la fois un agent efficace de lutte biologique et une espèce invasive, même un ravageur pour certains. Elle a été observée la première fois au Québec à Frelisghburg, Cantons-de-l'est, en 1994 et est maintenant observée plus au nord, soit jusqu'en Abitibi. Au Canada, les coccinelles asiatiques sont considérées comme des insectes nuisibles depuis cette même année car, à l'approche de l'hiver, elles se

regroupent en grand nombre à l'intérieur des maisons et des immeubles par les fentes et ouvertures pour se garder au chaud. Bien qu'elles ne causent pas de dommages en tant que tel, leur présence cause des tracas pour de nombreux propriétaires, surtout en milieu agricole car elles y sont plus fréquentes (Santé Canada, 2009b). Ce problème peut être évité en calfeutrant toutes les fentes autour des fenêtres et des portes. De plus, en entrant en compétition avec les espèces prédatrices de pucerons et d'autres phytophages, les coccinelles asiatiques réduisent l'occurrence des coccinelles indigènes, comme la coccinelle maculée (*Coleomegila maculata lengi* Timberlake), menaçant ainsi la biodiversité (Guay, 2009; Roy et Wajnbern, 2008). Aux États-Unis, d'autres facteurs sont référencés pour justifier le statut de ravageur de cette espèce de coccinelle. Certains sembleraient avoir développé des rhino-conjonctivites allergiques liées à la présence de coccinelles dans les habitations (Ahmad Pervez, 2007). De plus, en absence de pucerons en automne, certaines coccinelles peuvent se nourrir de fruits dans les vergers, fruits endommagées le plus souvent. Dans les vignes, le problème est d'autant plus important car les coccinelles broyées avec le raisin lors de la fabrication du vin lui donne un mauvais goût (*Id.*, 2007).

Mentionnons également que la coccinelle asiatique s'est aussi rapidement répandue en Europe, soit en Allemagne, France et Belgique, entre autres, ayant causé en Belgique le recul de nombreuses espèces indigènes de coccinelles (Ahmad Pervez, 2007). La progression a débuté dans les années 1980 et n'est pas terminée (Roy et Wajnberg, 2008).

Malgré tout, il est difficile de déterminer si la coccinelle asiatique est un ravageur ou un auxiliaire de lutte efficace. Peut-être la réponse se situe-t-elle entre ces deux statuts. Il reste qu'elle consomme de grandes quantités de pucerons et est l'un des agents de lutte biologique les plus utilisés mais des études comparant les coûts et les bénéfices de son utilisation pourraient être nécessaires (Ahmad Pervez, 2007).

2.2 Le *Bacillus thuringiensis* contre la spongieuse

La spongieuse, ou le bombyx disparate (*Lymantria dispar* Linnaeus), est un lépidoptère de la famille des Lymantriidés originaire d'Eurasie (voir figure 2.2 (b)). Il est présent sous deux formes en Amérique du nord : la variété asiatique et l'européenne (Service Canadien

des Forêts, 2001). La chenille de ce papillon est un important ravageur de plusieurs espèces d'arbres des régions tempérées, autant en Eurasie que sur le nouveau continent. Au Canada, la variété européenne s'attaque surtout, mais non exclusivement, aux chênes, cerisiers, érables, aulnes, bouleaux à papier et peupliers faux-trembles (*Id.*, 2001). Quant à la variété asiatique, elle préfère les conifères, est plus résistante au froid et plus mobile. Seul le stade larvaire, la chenille, se nourrit d'importantes quantités de feuilles au cours de son développement : une seule peut consommer en moyenne un mètre carré en superficie totale de feuillage (Santé Canada, 2009c). Les arbres ainsi défoliés peuvent mourir ou, étant affaiblis, sont plus sensibles aux maladies (Service Canadien des Forêts, 2001). Dans des conditions idéales, les populations peuvent avoir une croissance très rapide : une femelle peut pondre jusqu'à 1000 œufs (*Id.*, 2001). La spongieuse menace donc la biodiversité indigène et l'industrie forestière.

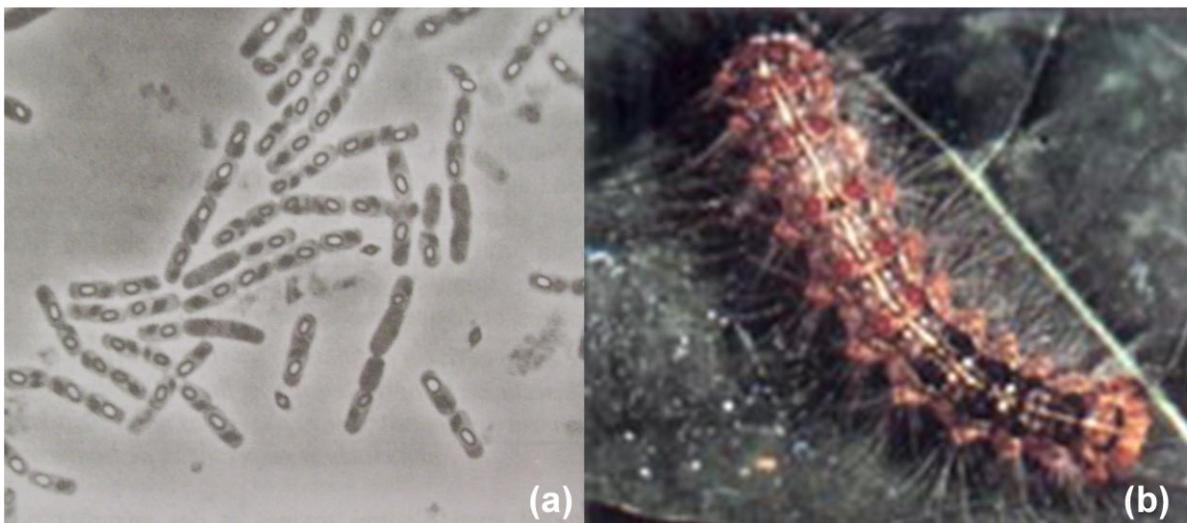


Figure 2.2 Utilisation du *Bacillus thuringiensis* Berliner (a) contre la chenille du bombyx disparate (*Lymantria dispar* Linnaeus) (b). Modifié de Volkoff (2009, p.108) et de Humble et Stewart (1994).

Intervient ici une bactérie très connue en lutte biologique : *Bacillus thuringiensis* Berliner (*Bt*) (voir figure 2.2 (a)). Cette bactérie qui est présente naturellement dans les sols s'attaque spécifiquement aux larves de lépidoptères mais certaines souches s'attaquent également à certains moustiques et mouches (Dunpht et Tibelius, 1992). Elle a été isolée pour la première fois en 1902, au Japon et est étudiée depuis. Une grande variété de souches sont maintenant connues, chacune spécifique à une seule espèce ou à des espèces très proches. Le *Bt* variété *kurstaki* (*Btk*) est efficace pour tuer les jeunes larves

de la spongieuse lorsque ces dernières consomment des feuilles préalablement traitées. Elle produit une toxine qui, lorsque ingérée par la chenille, détruit son système digestif. La chenille cesse ainsi de se nourrir et meure dans les jours suivants (Santé Canada, 2009d).

L'utilisation de solutions de *Btk* ne présente aucun risque pour la santé humaine ou animale. Le seul risque d'effet sur des organismes non visés est lié aux autres lépidoptères. Il a été démontré que l'épandage de *Btk* affecte la richesse et l'abondance de certaines espèces de papillons indigènes (Lynch et al., 2001; Wagner et al., 1996; Guay, 2009). Par contre, il est prédit que ces espèces se rétablissent et que l'épandage de *Btk* contre la spongieuse est bénéfique à long terme en diminuant la compétition (Lynch et al., 2001). Le *Btk* est dégradé rapidement (1 à 4 jours), une fois épandu, par la lumière et les microorganismes (Santé Canada, 2009d). Il est épandu sous forme de pulvérisation liquide, par avion ou au sol, dépendant de la surface à traiter.

L'introduction de la spongieuse européenne en Amérique est volontaire et accidentelle en partie, en plus d'être assez cocasse. En 1869, au Massachusetts, un scientifique français importe aux États-Unis des œufs du lépidoptère en vue d'utiliser la soie sécrétée par les chenilles pour l'industrie textile (Gauden, 2009). Ce qui dû arriver arriva : des spongieuses s'échappèrent et se répandirent tranquillement dans l'est des États-Unis. Il paraîtrait même que des œufs se sont envolés par une fenêtre ! Ce n'est qu'en 1924 qu'elle apparaît au Québec, pour s'établir dans les années 1960 (*Id.*, 2009). Une espèce établie peut difficilement être éradiquée : des méthodes de lutte visent surtout la limitation des dommages. Elle est également établie en Ontario et dans certaines provinces maritimes.

L'histoire est différente en Colombie-Britannique : certains épisodes d'apparition de spongieuse européenne inquiètent mais sont rapidement stoppés, par des traitements ponctuels. Par contre, des cargaisons en provenance de Sibérie transportant avec elles des œufs de la variété asiatique de spongieuse arrivent en 1991 à Vancouver (*Canadian Forest Service*, 2007). L'introduction de cette variété est d'autant plus inquiétante du fait qu'elle peut se nourrir d'une plus grande variété d'arbres que la variété européenne, dont les conifères canadiens, et est plus mobile, donc peut efficacement se disperser (Humble et Stewart, 1994). Par la menace écologique et économique présente, la province agit rapidement afin d'éviter l'établissement.

Ainsi, la découverte de milliers d'œufs et de larves de la variété asiatique à Vancouver en 1991 démarre un large programme d'éradication (Winston, 1997). En Colombie-Britannique, la participation du public a été grandement nécessaire à la réussite de ces traitements. En plus des programmes de dépistage par les citoyens, toujours en place, il a été à l'époque essentiel d'avoir l'aval des citoyens avant d'épandre le *Btk* sur des milliers d'hectares en milieu urbain. Les traitements antiparasitaires font partie du quotidien en milieu rural et ces gens sont moins inquiétés. En milieu urbain par contre, des craintes, justifiées ou non, peuvent être présentes et les programmes de communication, information et sensibilisation ont une importance majeure (Joung et Côté, 2000). À Vancouver, en 1992, quelques groupes environnementaux marginaux affirment que le *Btk* a des effets néfastes sur la santé, accusations non fondées, et militent contre son utilisation, alertant d'un même coup les citoyens et les médias internationaux (Winston, 1997). Heureusement, une équipe de communication réussie à apaiser le public et les traitements ont lieu. Au cours du printemps de la même année, 20 000 hectares sont arrosés avec des solutions de cet entomopathogène, trois fois, pour un coût total de 6 000 000 de dollars (Myers et al., 2000). L'invasion est stoppée mais des réintroductions à chaque année, en plus de l'occurrence grandissante de la spongieuse européenne, forcent à effectuer d'autres traitements. La surveillance est donc constante, autant pour la variété asiatique que pour l'europpéenne mais aucune n'est pour l'instant considérée établie en Colombie-Britannique.

2.3 Une guêpe parasite contre les aleurodes dans les serres

Les aleurodes, aussi nommées mouches blanches, sont des hémiptères de la famille des Aleyrodidés. Leur origine est incertaine mais probablement moyen-orientale (McAuslane, 2009). Ces insectes ont beaucoup en commun avec les pucerons, membres du même ordre : ils sucent la sève de nombreuses plantes en serres, dont le concombre, la tomate et le poinsettia, causant ainsi leur flétrissement, pouvant aller jusqu'à la mort (*University of California*, 1999). Ils produisent également du miellat, liquide sucré qui favorise le développement de maladies fongiques et peuvent transmettre jusqu'à 111 différents types de virus (*Global Invasive Species Database*, 2005). Les mouches blanches ont une impressionnante capacité de développer des résistances contre les insecticides (*University of California*, 1999). Un moyen de lutte biologique pouvant être appliqué contre les mouches blanches est l'utilisation de guêpes parasitoïdes comme *Encarsia formosa*

Gahan, dont le pays d'origine n'est pas connu (Biobest, 2009b). Elle a une très bonne capacité de repérage et s'attaque à plus de 15 espèces de mouches blanches : elle est donc efficace et relativement spécifique. Cette guêpe se nourrit des stades immatures des mouches et pond huit à dix œufs par jour, un par larve (Weeden *et al.*, s.d.b). Une dizaine de jours après avoir été parasitées, les larves s'enpupent et noircissent. Les stades immatures de la guêpe se nourrissent des organes et fluides de l'hôte jusqu'à le tuer et sortent, 25 jours après la ponte, sous forme adulte (Weeden *et al.*, s.d.c). Ainsi, selon Biobest, une femelle *E. formosa*, au cours de sa vie, peut parasiter jusqu'à 450 larves d'aleurodes des serres (*Trialeurodes vaporariorum* Westwood) et en tuer de 30 à 70 pour son alimentation (voir figure 2.3) (Biobest, 2009b).

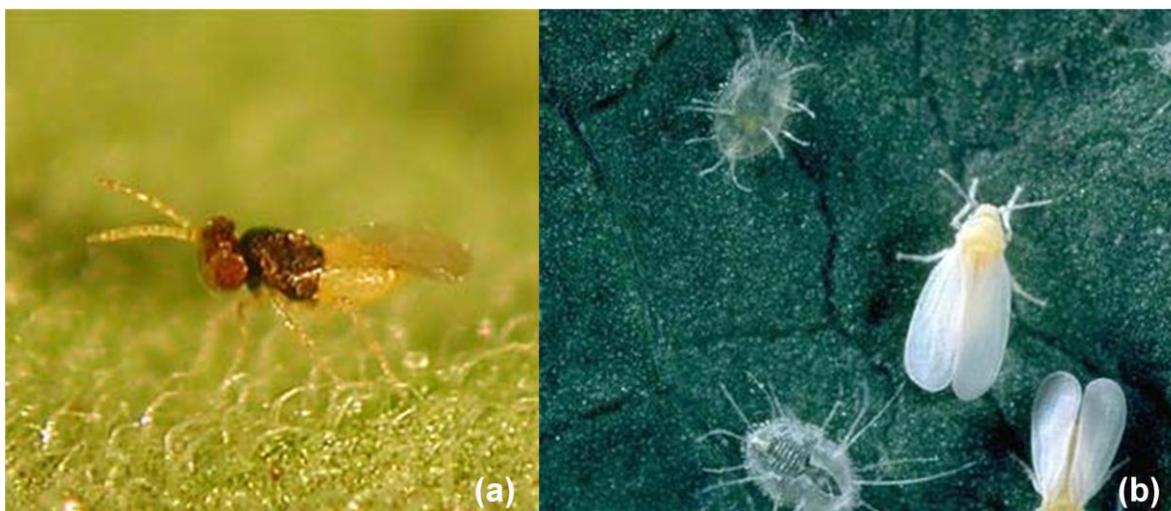


Figure 2.3 Utilisation de la guêpe parasitoïde *Encarsia formosa* Gahan (a) contre l'aleurode des serres (*Trialeurodes vaporariorum* Westwood, adultes et pupes présentés) (b). Modifié de Biobest (s.d.) et de University of California (1999).

Ces guêpes sont utilisées commercialement dans les serres d'Europe depuis les années 1920, surtout contre l'aleurode des serres mais aussi contre l'aleurode du tabac (*Bemisia tabaci* Gennadius) et l'aleurode du poinsettia (*Bemisia argentifolii* Bellows et Perring). Ce parasitoïde est également disponible commercialement en Amérique du nord (Biobest, 2009b). Il est conseillé de les utiliser en prévention, même avant l'apparition des premières aleurodes, en dispersant dans la serre des plaques contenant des pupes parasitées car les parasitoïdes peuvent ne pas agir assez rapidement dans des grandes populations de ravageurs (Ferguson *et al.*, 2003). Malheureusement, il est possible que

des parasitoïdes s'échappent des serres et s'attaquent à des espèces indigènes d'aleurodes, compétitionnant d'un même coup avec les espèces de parasitoïdes indigènes. Peu de choses sont connues sur l'écologie d'*E. formosa* en milieu naturel, malgré des décennies de recherche sur son comportement en serre (Lynch *et. al.*, 2001). Aussi, *E. formosa* est très sensible aux pesticides : il est important de s'assurer de l'absence de pesticides résiduels lors des introductions sinon ils ne s'établiront pas (Lambert, 2000a).

2.4 Les trichogrammes contre la pyrale du maïs

La pyrale du maïs (*Ostrinia nubilalis* Hübner) est l'un des plus importants ravageurs des cultures du Québec. En quantité de pesticides utilisés pour le combattre, il s'agit du cinquième plus important problème agricole (Ferland et Lauzon, 2000). La pyrale du maïs est un papillon (ordre des Lépidoptères) de la famille des Crambidés, originaire d'Europe, où il s'attaque au millet. Arrivée au Canada dans les années 1900, elle est maintenant présente dans tout le centre et l'est. En Amérique du nord, il s'attaque à plusieurs cultures dont le maïs sucré, le poivron, le pois mange-tout, la pomme de terre et la tomate (Hagerman, 1997). Deux variétés sont retrouvées au Québec : la variété univoltine (une seule génération par année) et la variété bivoltine (deux générations par année). Dans le maïs sucré, le papillon femelle pond ses œufs, une vingtaine à chaque fois, sous la surface des feuilles, pour un total de 50 à 200 œufs par papillon. Lorsque les œufs éclosent, les chenilles voraces mangent tout ce qui est à leur portée : feuilles, tiges et épis, ce qui peut mener à la chute du plant. Les épis ainsi endommagés sont impropres à la vente et, de plus, les chenilles attirent certains oiseaux, les quiscales, qui les mangent et grignotent les épis (Hamerman, 1997).



Figure 2.4 Utilisation de la guêpe parasite *Trichogramma brassicae* Bezdenko contre les œufs de la pyrale du maïs (*Ostrinia nubilalis* Hübner) (a) et forme adulte de la pyrale (b). Modifié de Fatouros (2008) et de Couture (2007, p. 1).

Contre la pyrale, la seule option disponible était auparavant l'utilisation de pesticides mais des alternatives sont de plus en plus disponibles. Il existe même maintenant des variétés de maïs modifiées génétiquement qui contiennent des gènes du *B. thuringiensis* et qui peuvent permettre de lutter contre ce ravageur (voir figure 2.4) (*Iowa State University*, 2006). En lutte biologique classique, les trichogrammes, dont *Trichogramma brassicae* Bezdenko, sont de plus en plus utilisés. *T. brassicae* est une minuscule guêpe parasitoïde qui explore le plant de maïs et pond ses œufs dans ceux de la pyrale du maïs qu'elle découvre (Couture, 2007).

Au Québec, des essais sur l'utilisation de ce parasitoïde contre la pyrale ont été effectués à partir de 1995. Dans les parcelles témoin, 12,7 % des épis étaient endommagés, contre 4,8 % dans les parcelles traitées aux insecticides. Dans les parcelles traitées aux trichogrammes, seulement 0,8 % des épis étaient endommagés : ces résultats ont été si intéressants que cette alternative est commercialisée depuis 1996 (Ferland et Lauzon, 2000). L'application des trichogrammes est effectuée à l'aide de trichocartes qui sont des cartons sur lesquels se trouvent des œufs parasités de *T. brassicae*. Les œufs utilisés pour l'élevage sont des œufs d'un autre lépidoptère, la pyrale de la farine (*Ephestia kuehniella* Zeller). Dans la culture du maïs sucré, c'est maintenant 10 % des cultivateurs

qui utilisent cette méthode de lutte plus écologique (Boisclair, 2007). Le coût d'achat est relativement élevé et le choix de la période d'application est crucial pour favoriser la rencontre entre les œufs et les trichogrammes. Par contre, l'application ne nécessite pas de personnel qualifié, ni d'équipement encombrant. De plus, le risque de développement de résistances par les pyrales est nul et la diminution de l'utilisation des pesticides augmente l'occurrence des auxiliaires naturels (Ferland et Lauzon, 2000).

2.5 *Beauveria bassiana* contre la punaise terne dans la fraise

La punaise terne (*Lygus lineolaris* Palisot de Beauvois) est un hétéroptère de la famille des Miridés (voir figure 2.5 (b)). Elle s'attaque à de nombreuses plantes, plusieurs à importance économique notable, comme de nombreux arbres fruitiers, légumes et petits fruits, dont la fraise. La punaise terne est présente dans toutes les provinces et territoires canadiens et aux États-Unis (Maund, 1999). Les stades immatures de la punaise, les nymphes, se nourrissent des fleurs (des futures graines et de parties adjacentes), ce qui peut mener à des déformations du fruit, de légères à importantes, jusqu'à en empêcher la vente (Cermak et Walker, 1992). Les graines endommagées cessent de produire les hormones qui stimulent la croissance du fruit, ce qui mène à des agglomérations de graines et à une déformation de la fraise (voir figure 2.6). La punaise adulte peut également causer des dommages mais ils sont de moindre importance (*Id.*, 1992).



Figure 2.5 Utilisation du champignon *Beauveria bassiana* Balsamo (a) pour lutter contre la punaise terne (*Lygus lineolaris* Palisot de Beauvois) (b). Modifié de *Integrated Pest Management of Alaska* (2003) et de Cermak et Walker (1992).



Figure 2.6 Dommages faits par une punaise terne (*Lygus lineolaris* Palisot de Beauvois) sur la fraise. Tiré de Maund (1999).

Dans le but de trouver un agent de lutte biologique efficace contre la punaise terne, des scientifiques se sont tournés vers un champignon parasite, *Beauveria bassiana* Balsamo (voir figure 2.5 (a)). Ce champignon entomopathogène microscopique est fréquemment retrouvé dans les sols, partout sur la planète, ce qui en fait donc un agent de lutte par augmentation (voir section 1.2) (Jamal, 2008). Il est retrouvé sous différentes formes (isolats) qui s'attaquent à une grande variété d'insectes (707 espèces comprises dans 15 ordres) et d'acariens (13 espèces) (Zimmerman, 2007). Il tue les stades adultes et immatures confondus, et cause une maladie nommée la muscardine blanche (Barron, 2001; Groden, 1999). Il n'a pas besoin d'être ingéré pour faire effet : un simple contact suffit à débiter l'infection. Si le champignon, sous forme de spore, reconnaît l'insecte comme un de ces hôtes, il s'y attache et, dans des conditions environnementales idéales, germe (Jamal, 2008). Une fois germé, le champignon amolli la carapace de l'insecte pour pénétrer et tue éventuellement l'insecte par la production de toxines et la consommation de ses nutriments (Groden, 1999). Une fois l'insecte mort, le champignon couvre l'insecte d'une mousse blanche, d'où le nom de la maladie, produisant des millions de spores, prêtes à infecter d'autres insectes (Id, 1999).

La durée de vie des spores, une fois au champ, varie beaucoup selon les conditions du milieu et selon les auteurs, entre 24 heures et 26 jours (Jamal, 2008). Par contre, certaines formes résistantes peuvent survivre plus longtemps, ce qui assure un contrôle à long terme. Malheureusement, comme *B. bassiana* est peu spécifique, les risques d'effets sur les organismes non ciblés sont grands. Des effets négatifs ont été observés en laboratoire chez certains poissons mais pas chez les oiseaux entomophages ni les

mammifères (dont l'homme) (Zimmerman, 2007). Seules des réactions allergènes sont possibles chez les travailleurs en contact étroit avec le champignon. En fait, certains affirment même que la consommation d'extraits de *B. bassiana* aurait des effets positifs sur le système immunitaire (*Id.*, 2007). Dans tous les cas, il est important de faire attention à l'isolat utilisé, chacun pouvant être spécifique et permettre d'éviter les dommages collatéraux.

Aux États-Unis, dans l'état de New-York, des expériences testant l'efficacité d'application de *B. bassiana*, sous la formule commercialisée sous le nom de Mycotrol®, ont été effectuées dans des champs de fraises infestés de punaises ternes. Les résultats sont intéressants : le champignon a permis de réduire de 50 % les dommages aux fruits (Kovach et English-Loeb, 1997). De plus, l'application a été faite tardivement, quand les populations étaient déjà bien établies. L'efficacité pourrait donc augmenter avec le développement d'une méthodologie adaptée aux punaises ternes, et à la fraise. Aussi, des études effectuées dans des champs de fraises au Québec avec des isolats particulier ont permis d'obtenir des résultats très intéressants, durables et à des coûts compétitifs, en plus de la valeur ajoutée par l'utilisation de la lutte biologique. Les isolats testés n'avaient pas d'effets sur la mortalité des coccinelles maculées, qui peuvent être affectées par certaines formes de *B. bassiana* (Guertin et al., 2002). Il est intéressant d'ajouter que des études sont faites dans le but d'utiliser des abeilles à miel comme vecteurs de dispersion des spores dans les champs (Al-Mazra'awi et al., 2007). Comme quoi il est possible de faire d'une pierre deux coups : polliniser et combattre les ravageurs.

2.6 Les nématodes contres les vers blancs dans les pelouses

Les vers blancs sont le cauchemar des banlieusards et des propriétaires de terrains de golf. Au Canada, ceux qu'on appelle vers blancs sont principalement les larves de trois espèces de scarabées : le hanneton commun (*Phyllophaga anxia* LeConte), le hanneton européen (*Rhizotrogus (Amphimallon) majalis* Razoumowski) et le scarabée japonais (*Popillia japonica* Newman) (voir figure 2.7 (b)) (Jardin Botanique de Montréal, 2009). Le hanneton commun, aussi nommé « barbeau », est indigène mais les deux autres espèces ont été introduites accidentellement. Les larves de ces insectes se nourrissent des racines des graminées composant les pelouses. Conséquemment, cette étendue qui est voulue être verte et uniforme présente des taches où l'herbe est sèche et se soulève comme un

tapis. De plus, les vers blancs sont particulièrement appréciés des mouffettes, raton-laveurs et oiseaux, qui endommagent la pelouse en creusant afin de s'en nourrir (Réseau Biocontrôle, 2005).

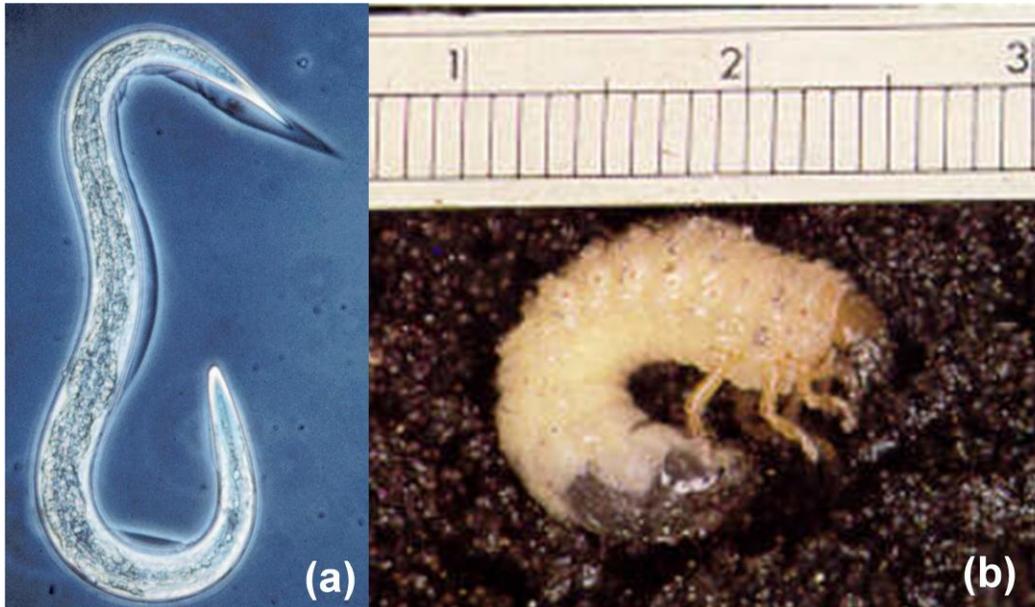


Figure 2.7 Utilisation de nématodes (ici *Steinernema carpocapsae*) (a) contre les vers blancs (ici la larve du scarabée japonais, *Popillia japonica* Newman) (b). Modifié de *University of Nebraska – Lincoln* (s.d.) et de Agence canadienne d'inspection des aliments (2009).

Originellement, des pesticides organophosphorés étaient utilisés pour lutter contre ces ravageurs mais leurs impacts néfastes sur l'environnement et la santé humaine ont poussé la recherche en vue de trouver des solutions alternatives (Réseau Biocontrôle, 2005). La problématique est d'autant plus importante socialement que les endroits affectés, soit les pelouses, sont fréquentées étroitement par l'homme. Les agents de lutte les plus fréquemment utilisés pour combattre les vers blancs sont les nématodes *Steinernema carpocapsae*, *Heterorhabditis bacteriophera* et *Heterorhabditis marilatus*, commercialisés au Canada sous les noms de Lawn Guardian, Scanmask et Hortscan (*Id.*, 2005). Ces nématodes entomopathogènes microscopiques cherchent activement leur proie en se déplaçant dans l'eau présente dans le sol. Une fois le ver blanc repéré, le nématode envahi son corps et libère une bactérie mortelle qu'il transporte naturellement en symbiose. Ce n'est pas le nématode mais bien la bactérie qui cause la mort de la larve dans un délai assez court, dépendant des conditions ambiantes (Weeden *et al.*, s.d.c).

L'efficacité de ces nématodes est discutée par les chercheurs mais certaines entreprises l'utilisent activement sur le terrain et sont satisfaites des résultats (Réseau Biocontrôle, 2005). L'application des nématodes est facile, peu coûteuse et ne requière pas de protection particulière car aucun effet sur l'humain n'est reporté. Par contre, les nématodes doivent être appliqués à une période particulière où le stade des larves est optimal, soit à la fin de l'été. De plus, il est nécessaire d'arroser fréquemment le terrain traité car les nématodes ont besoin d'humidité pour survivre. Finalement, la Stratégie de lutte intégrée pour les terrains de golf du Québec et de l'Ontario, initiative d'Agriculture et Agroalimentaire Canada, est mise en place depuis 2005 et vise à diminuer l'utilisation des pesticides sur les terrains de golf, en encourageant entre-autres la recherche et l'utilisation de la lutte biologique (Bélaïr et Simard, 2005). De plus, l'interdiction d'utilisation de pesticides dans de nombreuses municipalités, dont Montréal, risque d'en encourager plus d'un à envisager l'utilisation de la lutte biologique sur sa pelouse (Ville de Montréal, 2006).

2.7 Lutte contre l'euphorbe ésole

Il est facile de remarquer que les développements et recherches en lutte biologique concernent surtout la lutte aux ravageurs insectes mais cette importance semble plus ou moins justifiée. Bien que 70 % des pesticides utilisés aux États-Unis soient des insecticides (en 2002), seulement 15 % des recherches en lutte biologique étaient dirigées contre les mauvaises herbes (en 1995) (Kellogg et al., 2002; *U.S. Congress, Office of Technology Assessment*, 1995). Il reste néanmoins important de reporter une initiative en lutte biologique contre les mauvaises herbes, soit la lutte contre l'euphorbe ésole par une altise.

L'euphorbe ésole (*Euphorbia esula* Linnaeus) fait partie des plantes envahissantes introduite les plus nuisibles (voir figure 2.8 (b)). Cette euphorbiacée accidentellement introduite d'Europe ou d'Asie a été aperçue pour la première fois aux États-Unis en 1827, au Canada en 1889 et est maintenant présente dans toutes les provinces du sud du pays (Statistique Canada, 2008). En plus de menacer la biodiversité en entrant en compétition avec la flore indigène, cette plante produit un latex toxique pour les humains, les bovins, les chevaux et, dans une moindre mesure, les moutons (Système canadien d'information sur la biodiversité, 2009). Normalement, ces animaux ne mangent pas l'euphorbe ésole mais peuvent s'empoisonner si elle est mélangée au foin. Au Manitoba seulement, elle

causerait des pertes directes et indirectes de l'ordre de 19 millions de dollars à chaque année (AAC, 2007a). Cette plante est pérenne, a des racines profondes desquelles elle peut se régénérer si arrachée et produits de grandes quantités de graines qui peuvent être dispersées par les oiseaux, les humains et l'eau.

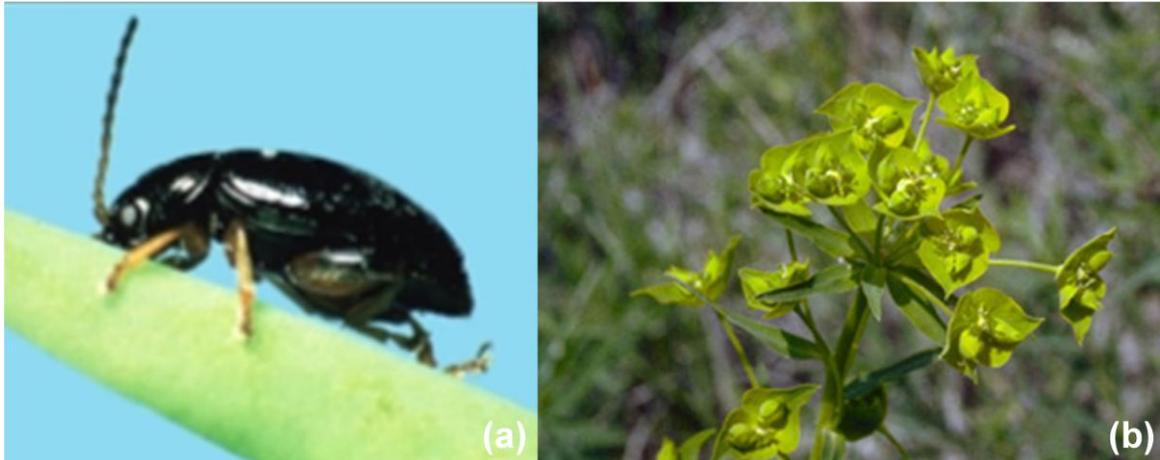


Figure 2.8 Utilisation d'une altise (*Aphthona lacertosa* Rosenheim) (a) contre l'euphorbe ésule (*Euphorbia esula* Linnaeus) (b). Modifié de AAC (2009c) et de USDA (2010).

Afin de réduire les populations d'euphorbe sous un seuil acceptable, des chercheurs d'Agriculture et Agroalimentaire Canada d'Alberta ont introduit 14 insectes exotiques, ennemis de l'euphorbe en Europe (AAC, 2009c). Il s'agit donc de lutte biologique classique. Il est important de préciser que ces espèces ont subi d'importants tests avant d'être relâchées, pour s'assurer de leur spécificité et ainsi éviter l'attaque de végétaux indigènes et de cultures. Aussi, les conditions des lâchers d'insectes sont étudiées afin de rendre le tout optimal et d'augmenter l'efficacité de l'agent. De ces insectes, l'espèce ayant eu l'impact le plus important sur les populations d'euphorbe de l'Alberta est une altise, *Aphthona lacertosa* Rosenheim (voir figure 2.8 (a)). Les altises sont un groupe de coléoptères phytophages ayant la particularité d'avoir des pattes arrière leur permettant de sauter (Duval, 1996). Les larves d'*A. lacertosa* se nourrissent des racines de l'euphorbe tandis que les adultes consomment les feuilles, avant la montée en graines (AAC, 2009c). Une introduction réussie d'altises peut faire passer le recouvrement d'euphorbe de 100 % à 5 % (*Leafy Spurge Stakeholders Group*, s.d.). Par contre, des efforts constants sont nécessaires : les altises ne sont pas très mobiles et il peut donc être nécessaire d'en déménager, une fois un pâturage bien infesté, vers d'autres euphorbes. Le seul risque

possible de l'utilisation d'*A. lacertosa* est qu'il s'attaque à d'autres espèces d'euphorbes, indigènes ou cultivées mais rien de tel n'a été observé pour l'instant (Weeden et al., s.d.d).

3 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE LA LUTTE BIOLOGIQUE AU QUÉBEC

La lutte biologique a autant d'adeptes que de détracteurs. Au Québec, des particularités environnementales, économiques et sociales permettent d'évaluer arbitrairement son applicabilité, par rapport à l'utilisation des pesticides conventionnels. À partir des études de cas présentées précédemment et de d'autres exemples triés sur le volet, la présente section exposera les principaux avantages et inconvénients de la lutte biologique. Malheureusement, ces avantages et inconvénients ne sont pas toujours documentés pour le Québec. Ainsi, tous ceux qui semblent applicables, même s'ils ne sont pas expérimentés ou documentés pour cette province, seront présentés dans cette section. Il est aussi important de noter que les avantages, tout comme les inconvénients, varient selon plusieurs facteurs comme l'agent de lutte étudié, le but de l'introduction et les conditions spécifiques. Ces avantages et inconvénients doivent être considérés afin d'évaluer l'applicabilité de la lutte biologique au Québec. Il est néanmoins nécessaire, dans tous les cas, d'évaluer le risque d'utiliser la lutte biologique comme le risque de ne pas l'utiliser, que ce soit en dommages à la culture ou en conséquences de l'utilisation des pesticides (Sforza, 2009).

3.1 Particularités du Québec

Le Québec possède certaines particularités qui mises ensembles en font un milieu unique, bien que très diversifié. Ces particularités peuvent autant bénéficier à l'application de la lutte biologique qu'y nuire. Il s'agit entre autres du climat, des ressources naturelles du territoire, de l'importance économique de l'agriculture, des types de cultures et de ravageurs présents, de la perception des citoyens et du potentiel en recherche et développement.

Un important facteur est la grande différence de températures entre l'hiver et l'été : dans une même année, les températures peuvent passer de -40 °C en hiver à 35 °C en été (CRIACC, 2008a; CRIACC, 2008b). De tels extrêmes limitent les organismes pouvant être introduits. Les organismes, pour s'établir, doivent survivre à ces températures extrêmes ou être en mesure de s'en protéger en trouvant un refuge. Par exemple, les coccinelles asiatiques ne survivent pas aux températures hivernales québécoises mais se cachent

dans les maisons pour survivre à cette saison (Santé Canada, 2009b). Dans le cas d'espèces incapable de tolérer l'hiver, des introductions répétées, coûteuses et nécessitant souvent d'importantes ressources humaines, peuvent être nécessaires à chaque année.

Le Québec contient une des plus importante réserve d'eau, soit 3 % de l'eau douce renouvelable de la planète, grâce à ses nombreux lacs, rivières et nappes d'eau souterraine (Québec, 2002). Bien que cette eau soit douce, elle n'est souvent pas directement potable à cause de nombreux polluants, dont les pesticides, ce qui menace également la qualité de l'environnement. Une part non négligeable des pesticides étendus en champ est lessivée par la pluie et se retrouve dans les réserves d'eau. Cette dernière étant l'une des plus importantes ressources naturelles québécoises, il est vital d'en protéger l'intégrité en mettant en place des moyens de diminuer sa pollution, par la réduction des pesticides entre autres. Il s'agit même d'un des engagements du gouvernement québécois fait dans le cadre de la Politique nationale de l'eau, publiée en 2002 (*Id.*, 2002). La lutte biologique pourrait contribuer à cette protection en diminuant l'usage des pesticides.

La lutte biologique est surtout utilisée en agriculture et ce domaine représente de nombreux emplois et d'importants revenus au Québec. En 2008, c'était plus de 60 000 emplois (incluant la production animale et végétale) avec une production végétale de plus de deux milliards de dollars (ISQ et MAPAQ, 2010). Environ 75 % des pesticides sont utilisés à des fins agricoles (Darier, 2007). La répartition des ventes de la production agricole, présentée à la figure 3.1, nous présente l'importance de la production végétale, bien que l'élevage représente une grande part des ventes au Québec. Aussi, à l'intérieur du Canada, le Québec produisait 17,6% des revenus agricoles du pays en 2008 (voir figure 3.2).

Les cultures du Québec se prêtent généralement bien à la lutte biologique. Les cultures fourragères, comme le foin (850 000 ha) et le maïs-fourrager (48 000 ha), occupent une part importante du territoire. Pour les céréales, en superficie cultivée, le maïs-grain (382 000 ha), l'avoine (94 000 ha), l'orge (97 500 ha) et le blé (53 000 ha) sont les plus importantes (ISQ et MAPAQ, 2010). Les principaux ravageurs de ces cultures, soit la pyrale du maïs (*Ostrinia nubilalis* Hübner) dans le cas du maïs (voir section 2.4) et le

champignon phytopathogène fusarium (*Fusarium graminearum* Schwabe) dans le cas du blé et de l'orge, peuvent être contrôlés par des agents de lutte biologique ou sont en voie de pouvoir l'être (AAC, 2007b). L'avoine, quant à elle, est rarement attaquée par des insectes ravageurs (Filière des plantes médicinales biologiques du Québec, 2010).

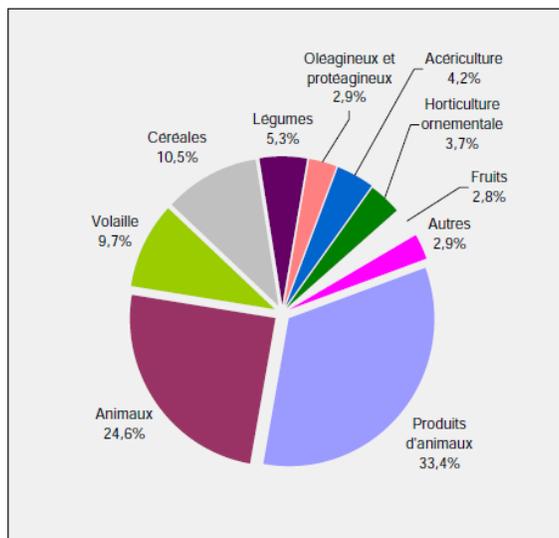


Figure 3.1 Répartition des ventes agricoles aux autres secteurs au Québec en 2008. Tiré de ISQ et MAPAQ (2010, p. 20).

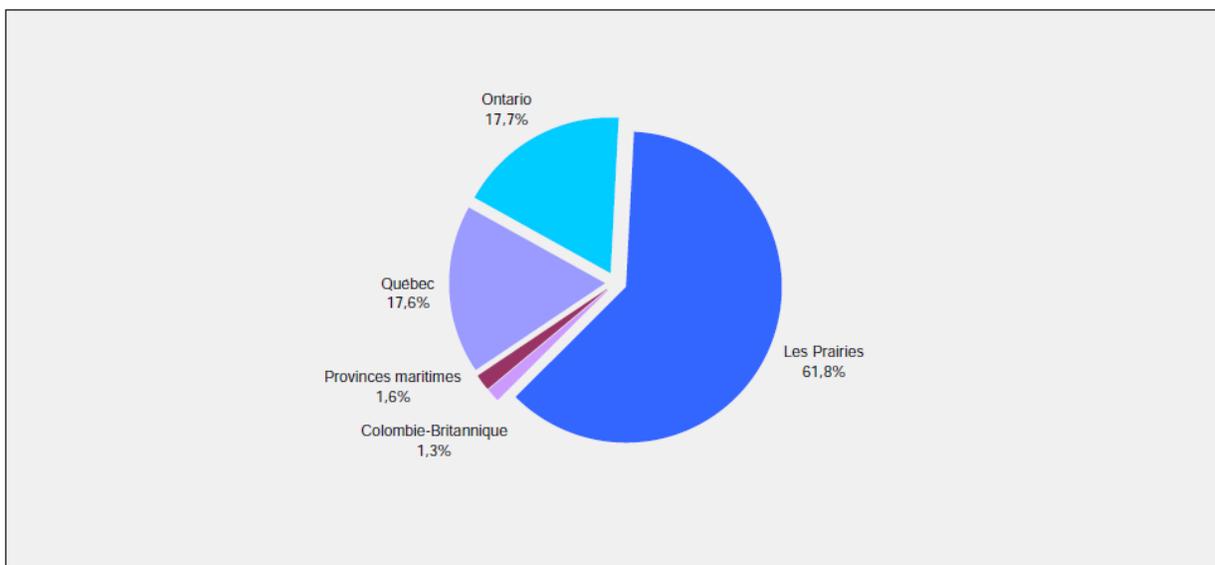


Figure 3.2 Répartition provinciale du revenu net comptant des exploitations agricoles du Canada en 2008. Tiré de ISQ et MAPAQ (2010, p. 22).

Pour les plantes à huile, c'est le soya (229 000 ha) et le canola (17 500 ha) qui sont les plus fréquentes (ISQ et MAPAQ, 2010). Le principal ravageur du soya est le puceron du soya (*Aphis glycines*), qui est contrôlé naturellement par différentes espèces de

coccinelles et pourrait être contrôlé par un parasitoïde, *Binodoxys communis* Gahan (des études sont présentement en cours, Brodeur, 2008). La culture de la pomme de terre occupe 17 200 ha, les légumes en champs, soit carottes, choux, laitues, oignons, échalotes et autres, occupent quant à eux plus de 37 000 ha, dont plusieurs peuvent être cultivés de façon plus écologique, avec la lutte biologique. Entre autres, le doryphore de la pomme de terre (*Leptinotarsa decemlineata* Say) pourrait être contrôlé par le champignon *Beauveria bassiana* Balsamo (Todorova et Weill, 2006). Pour les fruits, les principales cultures sont les pommes et les petits fruits (en ordre d'importance de superficie : bleuets, canneberges, fraises et framboises). Plusieurs produits de lutte biologique sont homologués dans ces cultures dont le biofongicide Serenade, poudre à dissoudre d'une souche de l'entomopathogène *Bacillus subtilis* Ehrenberg, qui est homologué contre plusieurs phytopathogènes. Il est efficace contre ceux causant la moisissure grise (*Botrytis cinerea*) et la brûlure bactérienne (*Pseudomonas syringae*) dans le bleuet et la framboise (AgraQuest Inc., 2010). Finalement, dans les serres, les principales cultures sont les tomates, laitues, concombres, fines herbes et poivrons, pour un total de 77 ha en 2008. Un entomopathogène est homologué pour l'utilisation dans toutes ces cultures, contre différents ravageurs, *Bacillus thuringiensis* ssp. *Kurstaki*. Il est vendu sous le nom commercial de DiPel et contrôle la fausse-arpenteuse du chou (*Trichoplusia ni* Hübner), la noctuelle de la tomate (*Helicoverpa armigera* Hübner), le sphinx de la tomate (*Manduca quinquemaculata* Haworth) et le duponchelia (*Duponchelia fovealis* Zeller) (Valent BioSciences, 2008). Dans les serres du Québec, la lutte biologique est très utilisée. L'application est plus facile dans ces milieux fermés, où tous les paramètres sont plus faciles à contrôler qu'en champ. En 2000, seule ou en combinaison avec la lutte chimique conventionnelle, elle était présente sur 76 % de la surface cultivée de légumes (Lambert, 2000a).

Au niveau social, les québécois sont prêts à des changements augmentant la qualité de l'environnement, entre autres par les méthodes de lutte aux ravageurs. Le Réseau Biocontrôle (2006) a sondé 1000 canadiens afin de connaître leur opinion sur la lutte biologique. De ce sondage, le Québec ressort comme étant la province où les gens appuyaient le plus la lutte biologique en remplacement des pesticides avec 81 % des répondants, tout en se considérant comme peu au courant. Le souci grandissant de la protection de l'environnement et des méfaits des pesticides contribuent à cette prise de conscience. De plus, il est important de noter que d'après des tests effectués en 2004-

2005, il a été démontré que le niveau de résidus de pesticides sur les aliments est plus élevé au Québec (à 1,5 % au dessus des normes permises) que dans le reste du Canada (0,23 % en moyenne) (Deglise, 2007). Bien que les effets nocifs des pesticides ne soient plus à démontrer, il peut être difficile de changer les habitudes des agriculteurs. Ils croient souvent qu'il s'agit de la solution la plus efficace et rapide et ne veulent pas nécessairement investir plus de temps ou d'argent dans de nouvelles technologies de lutte, plus écologiques mais pouvant demander plus d'efforts (*Id.*, 2007).

Le Québec, et le Canada, sont également d'importants centres de recherche et développement dans le domaine de la lutte biologique. Ceci permet des recherches et expérimentation sur le terrain, spécifiques aux conditions du Québec. Entre autres, des centres de recherche d'Agriculture et Agroalimentaire Canada et de nombreux laboratoires universitaires développent à chaque année de nouvelles méthodes de lutte aux ravageurs, ce qui contribue au rayonnement de la recherche canadienne dans le monde (AAC, 2009a). La recherche est surtout effectuée par des organismes du domaine public, en partie parce que les organismes privés y ont peu d'intérêt. La lutte biologique idéale ne demande qu'une seule introduction de l'auxiliaire de lutte, dont les populations se propagent et se régénèrent d'elles mêmes (Grenier, 2009). Comme les bénéfices ne sont pas nécessairement tous monétaires, le retour sur l'investissement peut être plus long, ce qui limite la recherche privée.

Malgré ses particularités, le Québec reste un territoire assez hétérogène. Ainsi, chaque utilisation de la lutte biologique contre un ravageur doit être analysée en elle-même car les organismes et les conditions peuvent varier. Aussi, il reste que des données spécifiques au Québec sont difficiles à trouver au sujet de la lutte biologique.

3.2 Avantages, bienfaits et commodité

La lutte biologique présente de nombreux avantages des points de vue environnementaux, sociaux et économiques. Cette section présente ces avantages, en tentant de les adapter au contexte québécois.

3.2.1 Environnementaux

Les avantages environnementaux de la lutte biologique ne sont plus à démontrer, surtout si on la compare à la lutte conventionnelle avec les pesticides chimiques (voir section 1.1.2). Ces derniers peuvent causer d'importants troubles à la santé humaine, de la stérilité aux cancers (*U.S. Congress, Office of Technology Assessment, 1995*). Ils ont également un impact nocif sur l'environnement et la biodiversité. Certains de ces impacts peuvent avoir de l'influence les uns sur les autres, comme la chute des pollinisateurs qui influence la reproduction de nombreuses plantes à fleur ou la chute d'une proie qui diminue l'occurrence d'un prédateur indigène.

La majorité de ces désavantages peuvent être évités si la lutte biologique est utilisée. Cet avantage est relatif à la spécificité des agents utilisés : bien que les pesticides soient de plus en plus spécifiques, les agents de lutte biologique s'attaquent souvent à un éventail étroit d'organismes, parfois un seul. Les effets sur les organismes non ciblés sont ainsi réduits en grande partie, sur le site comme plus loin. Comme les risques pour la santé humaine sont moindres, les risques à l'épandage le sont aussi. Également, contrairement aux pesticides, les auxiliaires de lutte ne laissent pas de résidus potentiellement toxiques sur les aliments, ce qui réduit encore plus les effets sur les consommateurs (*Greathead, 1995*).

Au Québec, du point de vue de la lutte biologique, la rudesse de l'hiver peut être considérée comme un avantage et un inconvénient car elle diminue le risque d'établissement des organismes, ravageurs comme auxiliaires. Ceci permet de diminuer les risques d'impacts à long terme sur l'environnement.

3.2.2 Sociaux

La lutte biologique, bien que moins présente que les pesticides, semble bien acceptée socialement par les québécois si l'on s'en tient au sondage du Réseau Biocontrôle de 2005 (*Réseau Biocontrôle, 2006*). La connaissance de plus en plus importante des impacts négatifs sur la santé de certains pesticides a certainement contribué à faciliter cette acceptation. Elle a également comme avantage de pouvoir être utilisée sans risque dans les endroits très fréquentés, comme en milieu urbain. C'est entre autres ce qui a motivé le choix de l'utilisation du *Bt* contre la spongieuse dans la région de Vancouver

(Winston, 1997). Les auxiliaires de lutte biologique étant très spécifiques, les effets sur les humains sont très faibles, voir nuls.

Un autre avantage social de la lutte biologique réside dans le potentiel de création d'emplois qu'elle implique. Dépendant de l'utilisation, elle peut nécessiter nombre de personnes, spécialisées ou non : chercheurs, éleveurs, dépisteurs et personnes pour la mettre en place. Une popularisation de la lutte biologique pourrait ainsi mener à la création de nombreux emplois au Québec mais cela reste à être démontré.

3.2.3 Économiques

Les auteurs ne s'entendent pas pour dire ce qui a le coût le plus élevé, entre la lutte biologique et l'utilisation des pesticides. Par contre, la lutte biologique offre certains avantages de plus que les pesticides qui sont difficilement monnayables. Une étude américaine de Pimentel (2005) affirme qu'aux États-Unis, l'utilisation des pesticides occasionne annuellement des coûts de l'ordre de 10 milliards de \$US. Ces coûts sont relatifs à la santé publique, au développement de résistances des ravageurs, aux pertes de cultures, aux effets sur la biodiversité et à la contamination de l'eau souterraine. Il est très plausible qu'une partie de ces coûts soient adaptables à la situation québécoise. Aussi, les agents de lutte biologique ne causent pas de phytotoxicité, contrairement à certains pesticides, ce qui augmente leur rendement (Cécyre, 2000). Bien que le coût d'utilisation de la lutte biologique soit en moyenne considéré plus élevé que celui de l'utilisation des pesticides, il importe de considérer les bénéfices indirects non monétaires.

Aussi, la lutte biologique nécessite souvent moins de matériel que les épandages de pesticides. Dans le pire des cas, elle nécessite la même machinerie, s'il s'agit d'un agent microscopique comme le *Bt* ou un nématode qui est épandu en solution. Cet avantage contribue à diminuer le prix de cette méthode de lutte.

Le développement de résistances par les ravageurs est un problème fréquemment rencontré avec l'utilisation de pesticides. Les ravageurs tués de façon physique par les agents de lutte (prédation, parasitisme) ont peu de chance de développer des résistances, ce qui est un avantage certain. Pour les biocides actifs, par contre, il a été démontré qu'il peut y avoir développement de résistance aux toxines.

Le récent regain de la population pour l'écologie et la santé permet également d'affirmer que l'utilisation de la lutte biologique, si indiquée lors de la vente des aliments, amènerait une valeur ajoutée aux aliments ainsi produits et du prestige aux producteurs. Rappelons que 81 % des québécois sondés en 2005 étaient en faveur de l'utilisation de la lutte biologique par rapport aux pesticides et que la population vieillissante de baby-boomers est de plus en plus soucieuse de sa santé (Réseau Biocontrôle, 2006).

Comme démontré précédemment dans la section 3.1, la lutte biologique se prête bien aux cultures québécoises. Le maïs, qui est la plus grande production végétale du Québec en 2008 en termes de valeur de production, peut être protégé des dommages de la pyrale par la lutte biologique (ISQ et MAPAQ, 2010). Aussi, les cultures en serre, où les conditions sont plus constantes et prévisibles que celles en champ, sont souvent de bonnes candidates. L'important bassin d'utilisations potentielles de la lutte biologique au Québec permet également de rentabiliser la recherche effectuée par les compagnies et les chercheurs locaux.

Idéalement, si l'introduction de l'auxiliaire est bien faite et qu'il est apte à survivre aux conditions hivernales, il s'implante et se reproduit, d'année en année. Cet avantage économique non négligeable freine pourtant la recherche privée sur la lutte biologique. Les compagnies préfèrent avoir des revenus fixes et stables à chaque année. Si un organisme survit et se reproduit de lui-même, le producteur n'achètera pas à nouveau l'année suivante. De plus, un auxiliaire assez mobile pourrait se propager jusqu'à d'autres champs et contrôler les populations des ravageurs sur tout le territoire, à moyen terme (Greathead, 1995).

Finalement, l'utilisation d'agents de lutte biologique permet un délai de ré-entrée au champ et un délai avant récolte plus courts (souvent nul) que la grande majorité des pesticides actuellement sur le marché (Cécycy, 2000). Ceci permet d'éviter toute perte de temps et d'optimiser le travail au champ.

3.3 Inconvénients, risques et limites

La lutte biologique n'est pas parfaite et présente des inconvénients non négligeables. Cette section présente ces inconvénients, risques et limites de cette alternative aux pesticides, en tentant de les adapter au contexte particulier de la province.

3.3.1 Environnementaux

Le principal inconvénient environnemental est plutôt un risque qui était plus présent anciennement mais qui perd de l'ampleur. Lors de l'introduction d'un organisme qui n'est naturellement pas présent dans un milieu à des fins de lutte biologique classique, il est essentiel de s'assurer qu'il ne s'attaque qu'au ravageur ciblé (*U.S. Congress, Office of Technology Assessment, 1995*). Si l'auxiliaire n'est pas spécifique, il risque de s'attaquer à des espèces indigènes, de menacer la biodiversité et, ainsi, de troubler l'équilibre écologique du milieu. De tels tests de spécificité sont aujourd'hui essentiels mais ne l'étaient pas aux premiers balbutiements de la lutte biologique, ce qui a mené à des erreurs importantes. Par exemple, avant l'introduction de l'altise contre l'euphorbe éssule (voir section 2.7), des tests ont été effectués par Agriculture et Agroalimentaire Canada afin de s'assurer de sa spécificité contre la mauvaise herbe ciblée (AAC, 2009c). Également, pour éviter tout effet indésirable, les auxiliaires spécifiques sont préférés aux prédateurs généralistes (Greathead, 1995).

Un autre risque réside dans la contamination possible des auxiliaires introduits par des pathogènes ou par leurs propres ennemis naturels (Greathead, 1995). Cette opération de « purification » des auxiliaires est maintenant chose commune et essentielle à l'introduction sécuritaire des auxiliaires. La présence de contaminants pourrait réduire l'efficacité de l'auxiliaire ou nuire aux organismes indigènes et à la biodiversité.

Il est également possible qu'en diminuant l'abondance du ravageur ciblé, la niche ainsi libérée soit recolonisée par un nouveau ravageur (Greathead, 1995). Par exemple, il est possible que l'espace laissé par une mauvaise herbe contrôlée par la lutte biologique soit repris par une autre mauvaise herbe. Il est important de tout considérer avant l'introduction et de s'assurer que le ravageur n'est pas remplacé par un autre.

Finalement, la lutte biologique a comme désavantage environnemental d'être difficilement réversible (BIREA, 2007). Une fois qu'un organisme est bien implanté, qu'il se reproduit et de disperse, peu de choses sont possible à faire afin de le stopper en cas d'effets indésirables. Heureusement, avec les efforts faits actuellement afin d'en connaître le plus possible sur la biologie et l'écologie de l'auxiliaire avant son introduction, les effets très négatifs sont rares.

3.3.2 Sociaux

Bien que la lutte biologique semble bien acceptée en général par la population, certains aspects sont moins tolérés que d'autres. L'utilisation de bactéries et de champignons provoquent parfois des craintes irraisonnées. Par exemple, dans le cas de du *Bt* contre la spongieuse à Vancouver, les gens avaient peur que la bactérie s'attaque aux personnes avec un faible système immunitaire alors que de nombreuses études ont démontré que c'était impossible (Winston, 1997). Des efforts ont alors été déployés afin d'informer la population et d'ainsi renverser la vapeur. Aussi, dans le sondage du Réseau Biocontrôle de 2005, 46 % des canadiens affirmaient hésiter à consommer des aliments identifiés comme cultivés avec des « microbes bénéfiques » pour lutter contre les organismes nuisibles (Réseau Biocontrôle, 2006). Il est important d'informer les consommateurs afin d'éviter un boycott sans fondement des aliments ainsi cultivés.

Aussi, l'utilisation de la lutte biologique peut demander plus de travail de la part des agriculteurs et de main d'œuvre que l'utilisation des pesticides. En fait, c'est surtout le fait de devoir changer d'habitudes et de mentalité qui peut causer des difficultés. Bien que les effets nocifs des pesticides sur la santé humaine ne soient plus à démontrer, ils sont parfois oubliés car sournois et subtils, plus chroniques qu'aigus. Aussi, l'utilisation de pesticides semble plus simple. Il est donc également important de former les producteurs, en plus des consommateurs et citoyens, des marches à suivre et de l'innocuité de la lutte biologique. Si un producteur essaie la lutte biologique sans être bien encadré ou formé, il risque de perdre son temps, son argent et d'abandonner la lutte biologique en ignorant son potentiel réel (Lambert, 2000b).

3.3.3 Économiques

Une des principales questions qui peut venir à la bouche d'un agriculteur qui entend parler de la lutte biologique est : « quel est le coût ? ». Dépendant de l'agent utilisé, du ravageur à combattre et des conditions, le coût de la lutte biologique peut varier grandement. Il est essentiel que le tout soit fait dans les règles de l'art pour que la lutte biologique soit efficace et rentable (connaissance approfondie de l'auxiliaire et du ravageur, dépistage adéquat pour introduire au bon moment, utilisation de pesticides non dommageables pour l'agent utilisé, etc.) (Cécycy, 2000). Une stratégie non optimale peut coûter jusqu'à 3 fois plus cher qu'une stratégie mieux planifiée (*Id.*, 2000). Le coût dépend également du niveau de dommage acceptable pour la culture. Moins les dommages sont tolérés, pour les cultures horticoles par exemple, plus il faudra introduire d'auxiliaires et plus le coût sera élevé (*Id.*, 2000). En 2000 par exemple, pour contrôler chimiquement les aleurodes sur les poinsettias, il en coûtait environ 0,27 \$ par plant. En utilisant un parasitoïde, *Eretmocerus eremicus* (Rose et Zolnerowich), il en coûtait 1,18 \$ par plant pour obtenir le même degré de contrôle (Cécycy, 2000). Néanmoins, le coût varie grandement selon l'agent et les conditions et peut parfois être plus avantageux que la lutte chimique conventionnelle. Aussi, avec l'expérience, les coûts peuvent diminuer : au départ, l'agriculteur peut avoir tendance à introduire une trop grande quantité d'auxiliaires, pour être certain du résultat, même si une plus petite quantité aurait eu le même résultat. Peu d'études sont actuellement disponibles sur les coûts et bénéfices de la lutte biologique au Québec.

Les coûts élevés peuvent souvent être expliqués par la complexité de l'élevage certains auxiliaires. Premièrement, l'élevage nécessite l'emploi de professionnel relativement spécialisé. Aussi, pour l'élevage d'un parasitoïde ou d'un prédateur, il est nécessaire de cultiver la plante à protéger pour nourrir le ravageur pour permettre la multiplication de l'auxiliaire. Idéalement, cette chaîne de production est raccourcie par l'utilisation d'aliments artificiels, pour la proie ou le prédateur ou de proies de substitution, pour le prédateur ou le parasitoïde (Grenier, 2009). Bien souvent, l'élevage des micro-organismes est moins complexe et moins coûteux par l'utilisation de substrats artificiels.

Bien que les protocoles d'utilisation de la lutte biologique soient de plus en plus perfectionnés et développés, les risques d'échecs sont toujours présents. De nombreux facteurs sont à considérer et si un seul est omis, tout le travail peut être inutile. La biologie

et l'écologie de l'espèce ciblée et de l'auxiliaire doit être connue à l'avance afin d'en optimiser l'effet. Les auxiliaires de lutte biologique ne sont pas compatibles avec tous les pesticides et leur utilisation doit être prise en compte lors de l'introduction. Malheureusement, il n'est pas toujours possible de savoir tout de l'origine de plantules achetées et la présence de résidus, sur les plants ou le matériel, peut affecter grandement les auxiliaires (Cécylre, 2000). Il est également important de dépister fréquemment et d'introduire les auxiliaires au bon moment, ni trop tôt (en absence de proies), ni trop tard (où l'auxiliaire ne peut fournir et les dommages à la culture sont trop importants). L'effet de la lutte biologique est souvent plus lent à se faire ressentir sur l'abondance de ravageurs que l'action des pesticides. Aussi, le cycle biologique de l'auxiliaire doit être synchronisé avec celui du ravageur. Par exemple, si un parasitoïde qui pond ses œufs dans les larves d'un insecte est introduit au moment où ils sont tous déjà en pupes, le contrôle du ravageur sera nul (Barlow et al., 2002). De plus, le développement de résistances aux agents de lutte est possible, bien que rarement rencontré. Il y a eu dans les années 1990 développement de résistance au *Bt* chez la teigne des crucifères (*Plutella xylostella* Linnaeus) aux États-Unis et en Asie. Le *Bt* était utilisé depuis plus de 20 ans sans que d'importantes résistances ne soient référencées mais d'autres organismes deviennent également de moins en moins affectés (Tabashnik, 1994). Cet effet peut néanmoins être limité par l'utilisation de souches de bactéries produisant des mélanges de toxines (Volkoff, 2009). Finalement, certains agents de lutte biologique nécessitent des conditions très particulières pour survivre et être efficaces. Les nématodes, tel que vu précédemment, nécessitent un milieu particulièrement humide et frais (Lambert, 2005). Il est à noter que plus l'utilisation de la lutte biologique est encadrée, moins les risques d'échec sont élevés.

La lutte biologique est très spécifique mais ceci peut causer problème : là où un seul pesticide à large spectre était utilisé pour contrôler plusieurs ravageurs, il faut utiliser plusieurs agents de lutte biologique. Ceci tend à faire augmenter les coûts et l'apparente complexité peut décourager certains producteurs. Par contre, comme l'utilisation des pesticides à large spectre est de moins en moins permise, ce problème perd de son importance.

Un désavantage de la lutte biologique actuelle est qu'il existe très peu d'option contre les mauvaises herbes. Pourtant, en 1999, plus de 50 % des ventes de pesticides au Québec

étaient constituées d'herbicides (MEQ, 2003). Le manque d'options contre les végétaux limite l'utilisation de la lutte biologique au Québec.

Finalement, l'hiver québécois peut impliquer des réintroductions à chaque année qui peuvent être complexes et coûteuses. Le fait qu'un ravageur soit implanté et survive aux hivers québécois ne veut pas nécessairement dire que son ennemi le peut. Ainsi, la lutte biologique peut être à reprendre à chaque année, ce qui peut coûter cher aux agriculteurs mais aussi justifier des recherches et développements du côté des investisseurs privés par l'apport constant de revenus (Grenier, 2009).

4 ANALYSE DE L'APPLICABILITÉ DE LA LUTTE BIOLOGIQUE AU QUÉBEC

Le but de cette section est d'analyser l'applicabilité de la lutte biologique au Québec à l'aide des avantages et inconvénients présentés précédemment dans une optique de développement durable. Tout d'abord, sera présentée la méthode d'analyse, puis elle sera appliquée aux différents critères utilisés, divisés en critères environnementaux, économiques et sociaux.

4.1 Méthode d'analyse

Comme il est possible de le constater, l'efficacité et les conditions d'application de la lutte biologique peuvent grandement différer, suivant plusieurs facteurs dont la culture, le ravageur visé, l'expérience de l'utilisateur et le climat. Ainsi, une analyse précise avec critères et pondération serait inefficace et inutilement complexe. L'analyse sera donc sommaire, sans pondération, basé librement sur la grille d'analyse de la Chaire de recherche et d'intervention ÉCO-Conseil, de l'université du Québec à Chicoutimi (2007). Cette méthode d'analyse évalue la performance d'un certain concept ou projet général (ici la lutte biologique au Québec) en fonction de certains objectifs, ou critères, du développement durable. Il est ainsi possible de mettre en évidence les aspects importants et les lacunes du concept, dans le but d'entamer une réflexion qui pourra permettre, ultimement, d'en améliorer la portée et l'applicabilité.

L'analyse est faite en considérant le développement durable. La définition de ce concept bien à la mode est présentée dans le rapport Brundtland comme suit:

« Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs. » (Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'ONU, 1987)

Il prend ainsi en compte plusieurs aspects relatifs au développement, soit l'environnement, l'économie et le côté social. Toute analyse d'un concept ou d'un projet devrait être faite en considérant ces aspects afin de permettre le maintien de l'environnement, incluant

l'espèce humaine. L'analyse de l'applicabilité de la lutte biologique au Québec est faite en suivant ce principe.

L'analyse sera présentée visuellement sous la forme d'un tableau avec les critères d'un côté et leur évaluation sommaire de l'autre. Les critères seront regroupés en fonction de leur appartenance à la sphère environnementale, économique ou sociale du développement durable. Une telle division facilite la compréhension et permet d'ajouter une évaluation plus globale, en plus d'une double pondération. Par exemple, si pour un agriculteur l'objectif le plus important par l'application de la lutte biologique est de maintenir des revenus élevés, puis de contribuer au maintien de la qualité de l'environnement avec une moindre importance aux critères sociaux, la pondération de ces sphères sera descendante dans cet ordre. Dans cette analyse, considérant que les buts visés par la lutte biologique sont de protéger l'environnement tout en produisant des résultats monétaires, les sphères environnementale et économique auront une importance relative supérieure à celle de la sphère sociale, bien qu'aucune pondération ne le présente clairement.

L'évaluation des critères est importante et peut être très subjective si elle est faite par un seul évaluateur. Par ailleurs, afin d'éviter le plus possible la subjectivité, l'évaluation est faite principalement à partir des avantages et inconvénients présentés plus tôt, tirés de la littérature. Les critères sont présentés sous forme d'objectifs à atteindre : idéalement, ils seront tous atteints ou à atteindre, même si certains peuvent être plus importants que d'autres. L'atteinte est présentée sur une échelle qualitative soit, du plus au moins atteint : atteint, globalement atteint, moyennement atteint et peu atteint. À cette échelle s'ajoute, selon le besoin, la difficulté d'évaluation et la variabilité. L'évaluation peut, pour certains objectifs, être faite en comparaison avec la lutte chimique conventionnelle, principale référence en phytoprotection. Aussi, ces objectifs, bien que surtout présentés comme étant applicables à la lutte biologique en agriculture, peuvent être adaptés pour d'autres applications (lutte contre les insectes piqueurs, foresterie, etc).

Bien que la grille d'analyse produite soit sommaire et sans pondération, elle pourrait être reprise et/ou légèrement modifiée pour analyser d'autres techniques (pesticides conventionnels, méthodes culturales, etc.) et des projets précis (ex : un auxiliaire X contre un ravageur Y dans culture Z) dans des contextes définis. Dans ce cas, une pondération

pourrait être liée à chaque critère pour permettre une analyse exhaustive et un résultat plus concret. Aussi, en ajoutant une pondération, la grille pourra être adaptée aux besoins de l'évaluateur, qu'il soit producteur d'auxiliaires, agriculteur, fonctionnaire fédéral ou autre. L'importance relative de chaque sphère de critères (environnementaux, économiques et sociaux) pourra aussi être modifiée en fonction des besoins et intérêts.

4.2 Analyse par objectifs

Les critères d'analyses seront présentés sous forme d'objectifs à atteindre. L'atteinte globale de ces objectifs sera évaluée en fonction de la description des avantages et inconvénients présentés plus tôt et en comparaison avec la lutte conventionnelle, dans le but d'évaluer l'applicabilité de la lutte biologique au Québec. Afin de faciliter la compréhension de l'analyse et la mise en évidence de lacunes, les objectifs sont divisés en trois sections : les pôles environnemental, économique et social.

4.2.1 Pôle environnemental

Les objectifs du pôle environnemental sont globalement plus atteints par la lutte biologique, reconnue comme plus écologique, que par la lutte conventionnelle. Ce pôle est important car il s'agit d'une des principales raisons qui justifie le changement vers la lutte biologique. Se référer au tableau 4.1 pour un résumé de l'analyse des objectifs sociaux.

Tableau 4.1 Analyse des objectifs environnementaux liés à l'applicabilité de la lutte biologique au Québec.

	Objectif	Atteinte
Pôle environnemental	Maintien de la biodiversité	Atteint
	Faible production de déchets et diminution de leurs impacts	Globalement atteint mais difficile à évaluer
	Faible production de gaz à effet de serre	Moyennement atteint mais difficile à évaluer
	Maintien ou amélioration de la qualité de l'air et de l'eau	Atteint
	Applicabilité et adaptation au climat québécois	Globalement atteint mais variable

Un des objectifs de la lutte biologique est de contribuer au maintien de la biodiversité, en minimisant les attaques et autres impacts sur les organismes non ciblés et en minimisant l'introduction d'espèces exotiques. Comme les auxiliaires de lutte biologique sont souvent très spécifiques, les risques d'attaques d'organismes non ciblés sont moins importants qu'avec les pesticides, souvent à plus large spectre d'action (*U.S. Congress, Office of Technology Assessment, 1995*). Au Québec comme ailleurs dans le monde, cet objectif est de plus en plus atteint. Les introductions d'espèces exotiques, s'il y a lieu, sont faites après d'importantes recherches et respectent un protocole sévère de l'Agence canadienne d'inspection des aliments et les risques que ces espèces nuisent à celles indigènes sont faibles (Agence canadienne d'inspection des aliments, 2007). Par contre, ces risques sont parfois difficiles à évaluer et ne sont connus qu'une fois l'agent introduit. Un suivi est nécessaire afin de s'en assurer pour toutes les espèces introduites au Québec. Aussi, bien que l'introduction d'un agent de lutte exotique puisse affecter des espèces indigènes, l'effet répresseur sur le ravageur exotique qu'il vise à combattre risque d'être de beaucoup supérieur. Il faut considérer le risque d'agir, mais également le risque de ne pas agir (Sforza, 2009). Le maintien de la biodiversité est donc atteint en grande partie par la lutte biologique au Québec.

Bien que cet objectif puisse facilement être oublié, il est important que la méthode de lutte ne produise pas ou peu de déchets et que ces déchets aient un faible impact sur l'environnement. Aucune information précise n'est actuellement disponible à ce sujet mais certaines informations peuvent être déduites. Premièrement, pour la production des auxiliaires, les substances utilisées pour l'élevage (nourriture, milieu de croissance, etc.) sont biodégradables et non toxiques. Pour l'application ou les relâchés au champ, par contre, les matériaux utilisés peuvent grandement varier, passant des gros contenants de plastique pour les auxiliaires pouvant être pulvérisés, aux trichocartes de carton pour les guêpes parasites du genre *Trichogrammes* et à des simples tubes (Biobest, 2009a). Bien que certains déchets risquent d'être produits à l'application, comme dans le cas des contenants de pesticides conventionnels, ils représentent une part minime des déchets générés. Ces déchets sont constitués en majorité des paillis, recouvrement de serres et bâches. Cet objectif est donc globalement considéré comme atteint par la lutte biologique, bien qu'il puisse être intéressant de pousser plus à fond cet aspect et de faire une analyse de cycle de vie de la lutte biologique au Québec.

La production de gaz à effet de serre par la lutte biologique doit également être considérée. Bien qu'aucune information précise ne soit disponible à ce sujet pour la production des auxiliaires, il peut être déduit que les gaz à effet de serre liés au transport seront plus importants plus les producteurs sont éloignés du Québec. Certains producteurs et distributeurs d'auxiliaires sont au Québec ou à proximité, comme entre-autres Biobest et Koppert en Ontario, Plant-Prod à Laval et AEF Global à Québec. Par contre, il est possible que certains des produits aient voyagé avant de se rendre chez le distributeur. Ainsi, l'objectif de production minimale de gaz à effet de serre semble moyennement atteint.

Le maintien d'une bonne qualité de l'air et de l'eau est primordial si la lutte biologique veut s'implanter de façon durable au Québec. Les agents de lutte biologique ont comme avantage par rapport aux pesticides conventionnels de ne produire pour ainsi dire aucune pollution atmosphérique, ni aquatique. La majorité des pesticides conventionnels, quant à eux, polluent l'air et l'eau et menacent la santé humaine, souvent de façon durable, dépendant de leur durée de vie dans l'environnement. Ces objectifs sont donc atteints par la lutte biologique.

Il est également vital que la méthode de lutte aux ravageurs soit adaptée et adaptable au climat québécois. Comme il a été démontré par certains exemples d'application à la section 2, la lutte biologique peut être très efficace au Québec. Il faut cependant bien étudier la biologie de l'auxiliaire et du ravageur afin d'en assurer l'efficacité. Le climat québécois, bien que particulier, se prête bien à la méthode et cet objectif est donc globalement atteint, bien que des recherches restent à faire afin de développer d'autres utilisations efficaces.

4.2.2 Pôle économique

Le pôle économique est important par le fait qu'il freine souvent le changement des pesticides conventionnels à la lutte biologique, malgré tout son côté plus écologique. Les objectifs économiques sont souvent plus difficiles à atteindre mais le sont de plus en plus, avec la recherche et le développement des technologies comme, par exemple, les pulvérisateurs à acariens qui augmentent la rapidité et l'uniformité de l'application

(Lambert, 2009). Se référer au tableau 4.2 pour un résumé de l'analyse des objectifs sociaux.

Une des principales craintes liées à la lutte biologique est que son coût d'application soit trop élevé. Cette inquiétude se mute ici en objectif d'applicabilité à faible coût. Ce dernier peut grandement varier selon plusieurs facteurs, dont le milieu (serre vs plein champ), l'application (auxiliaire, ravageur, culture, etc.), le mode d'application (le cultivateur fait tout le travail ou engage un employé supplémentaire pour le faire) et le distributeur chez lequel sont achetés les auxiliaires. Peu d'études comparant précisément les coûts de la lutte biologique à ceux de la lutte chimique sont actuellement disponibles pour le Québec, bien que les observateurs affirment en général que les coûts bruts sont plus élevés pour la lutte biologique (Lambert et al., 2002 et voir chapitre 3). Il serait intéressant de faire des analyses approfondies des coûts de la lutte biologique par rapport à la lutte chimique, en considérant les bénéfices environnementaux, difficilement quantifiables. Il semblerait également que le coût des auxiliaires soit généralement plus élevé au Canada qu'en Europe et aux États-Unis (Lambert, 2002). Ainsi, pour l'instant, il est difficile d'affirmer que la lutte biologique est accessible à un faible coût au Québec.

Tableau 4.2 Analyse des objectifs économiques liés à l'applicabilité de la lutte biologique au Québec.

	Objectifs	Atteinte
Pôle économique	Applicabilité à faible coût	Peu atteint mais difficile à évaluer et variable
	Accessibilité des auxiliaires	Globalement atteint
	Efficacité contre les ravageurs	Atteint mais variable
	Bon rendement des cultures (quantité)	Atteint
	Bonne qualité des cultures	Moyennement atteint mais variable
	Effet durable	Atteint mais variable
	Apport de revenus pour les producteurs et distributeurs d'auxiliaires	Globalement atteint
	Valeur ajoutée aux aliments produits	Globalement atteint mais difficile à évaluer

La disponibilité des agents de lutte est un autre objectif que la lutte biologique devrait atteindre au Québec. Comme plusieurs distributeurs sont présents sur le territoire québécois et canadien, ce but est atteint. Par contre, comme des agents de lutte biologiques ne sont pas disponibles pour tous les types de cultures et de ravageurs, de la recherche reste à faire afin de favoriser une véritable adoption de cette méthode de phytoprotection.

L'efficacité contre les ravageurs visés par les auxiliaires de lutte biologique est probablement l'objectif le plus important, pour ne pas dire vital. Même si les agents étaient disponibles facilement, à faible coût et écologiques, s'ils ne sont pas efficaces au Québec, la lutte biologique n'y aurait aucun avenir. Il est néanmoins évident que la lutte biologique peut être très efficace, comme en témoignent les nombreuses applications. De plus, comme les technologies et les techniques d'applications et d'introductions se développent rapidement, il est plus que probable que cette efficacité aille en augmentant.

L'utilisation d'un auxiliaire pour lutter contre un ravageur doit permettre la production d'une quantité comparable ou supérieure du produit cultivé, par rapport à la lutte conventionnelle. Certains pesticides produisent de la phytotoxicité sur la culture, surtout à des stades précoces, ce qui diminue les rendements à maturité. En comparaison, ce problème n'est pas observé avec la lutte biologique, ce qui mène à une augmentation des rendements (van Lenteren, 2008). Il faut néanmoins que l'auxiliaire soit efficace : s'il ne l'est pas, s'il est appliqué trop tard ou n'est pas synchronisé avec le ravageur, des dommages de ce dernier vont diminuer les rendements.

La quantité n'est pas la seule variable à surveiller pour le produit récolté : la qualité est également importante. Il est souvent nécessaire de supporter une légère baisse de la qualité des produits en utilisant la lutte biologique. Les auxiliaires de lutte contrôlent les ravageurs, sans les éradiquer. Ainsi, un certain dommage peut être présent, dépendant de l'efficacité de l'agent (Duval, 2006). Les consommateurs s'attendent à une certaine qualité esthétique des produits achetés et des dommages visuels plus importants peuvent occasionner des pertes de revenus pour le producteur. Aussi, si la lutte biologique est utilisée, il est possible que l'auxiliaire soit présent sur le produit, ce qui peut rebuter certains consommateurs. Cet objectif est donc moyennement atteint, dépendant de ce

qu'on qualifie comme la qualité du produit (goût ou apparence). Néanmoins, de l'éducation pourrait être faite chez les consommateurs pour éviter ce problème.

La méthode de phytoprotection idéale serait durable : peu d'applications nécessaires et pas besoin de changer de produit après quelques années d'utilisation car il n'est plus efficace. Le risque de développement de résistances est beaucoup plus faible avec la lutte biologique qu'avec la lutte conventionnelle. Aussi, il y a une chance que l'auxiliaire utilisé s'implante au Québec et maintienne son effet répresser sur les ravageurs, année après année, sans nouvelles introductions. Par contre, le climat québécois est désavantageux pour cette condition : les hivers rigoureux peuvent freiner l'implantation, dépendant du climat de sa région d'origine (van Lenteren et al., 2006). La lutte biologique semble donc, au Québec, être une option durable par l'absence de développement de résistances mais de façon plus mitigée pour ce qui est de l'implantation.

L'apport de revenus pour les producteurs et distributeurs d'auxiliaires est également un objectif important à atteindre. Si les revenus ne sont pas suffisants, la vente de ses produits sera abandonnée au profit de technologies plus rentables. De même, les compagnies qui produisent des produits phytosanitaires préfèrent avoir des revenus constants (Grenier, 2009). Si l'auxiliaire s'implante de façon permanente après une ou deux applications, il n'y aura plus de ventes et s'il n'y a plus de ventes, il y aura encore moins de produits disponibles sur le marché. L'apport de revenu est donc un objectif primordial à atteindre pour la disponibilité des agents de lutte biologique. Comme il y a une gamme non négligeables de produits de lutte biologique disponibles sur le marché il est possible d'évaluer que les revenus ne sont pas négligeables, pour les compagnies bien implantées. Aussi, comme les distributeurs offrent une variété de produits, les revenus sont moins risqués.

Un dernier objectif un peu idéaliste serait que la méthode de lutte utilisée apporte une valeur ajoutée aux produits. C'est-à-dire que le fait que le produit ait été cultivé plus écologiquement permettrait de le vendre plus cher, en proportion de la volonté à payer plus des consommateurs. La lutte biologique pourrait atteindre cet objectif, pas seulement dans le cas des produits issus de l'agriculture biologique. L'intérêt grandissant pour l'écologie et les technologies plus respectueuses de l'environnement, au Québec comme ailleurs dans le monde, est en faveur de l'application de la lutte biologique (van Lenteren,

2008). Par contre, selon un sondage effectué par le Réseau Biocontrôle certaines personnes (47 % des gens sondés) hésiteraient à consommer des aliments qui ont été cultivés avec des « microbes bénéfiques ». Par contre, 73 % des gens sont favorables à l'utilisation des insectes pour protéger les cultures, par rapport à 25 % pour les pesticides (Réseau Biocontrôle, 2006). Ainsi, si l'utilisation de la lutte biologique était indiquée sur les produits, il est fort à parier qu'une bonne proportion des gens un tant soit peu informés les privilégient.

4.2.3 Pôle social

Bien que les objectifs liés au pôle social semblent avoir une importance moindre que ceux environnementaux et économiques, ils ne doivent pas être négligés dans une perspective de développement durable. Se référer au tableau 4.3 pour un résumé de l'analyse des objectifs sociaux.

Tableau 4.3 Analyse des objectifs sociaux liés à l'applicabilité de la lutte biologique au Québec.

	Objectifs	Atteinte
Pôle social	Retombées économiques locales	Globalement atteint
	Potentiel de recherche et d'innovation	Atteint
	Amélioration de la santé	Atteint
	Facilité d'utilisation et acceptabilité pour les agriculteurs	Moyennement atteint
	Acceptabilité par les consommateurs	Moyennement atteint mais difficile à évaluer

Au niveau social, il est important que les retombées économiques et les emplois créés par la méthode de phytoprotection soient, le plus possible, locaux. Bien que certains produits de lutte biologiques soient importés, des distributeurs sont installés au Québec et engagent des gens d'ici. De plus, certaines entreprises québécoises, comme le groupe Cameron, offrent des services de traitement, main-d'œuvre incluse (Groupe Cameron, 2009). De plus, de nombreux laboratoires de recherche étudient, au Québec, les tenants et aboutissants de la lutte biologique, ce qui amène également des retombées économiques. Cet objectif est donc globalement atteint.

Dans la même veine, le potentiel de recherche et innovation est important afin de déterminer si, malgré certaines lacunes, la lutte biologique peut s'améliorer et qu'il vaut la peine de persister. Les nombreux laboratoires de recherches et travaux en cours vont dans ce sens. De plus, les introductions étant faites avec plus de recherche et de soins que dans le passé, elles sont de plus en plus efficaces et entraînent moins de conséquences. Il est évident que la lutte biologique a un fort potentiel de développement grâce à la recherche.

L'amélioration de la santé est un des objectifs sociaux le plus important et justifie souvent le changement de la lutte conventionnelle aux pesticides vers la lutte biologique. Pour les consommateurs (par la consommation de produits traités et par l'environnement ambiant) mais surtout pour les agriculteurs, une diminution de l'exposition aux pesticides, souvent toxiques, est grandement favorable. Les effets sournois mais parfois mortels de nombreux pesticides ne sont plus à prouver mais ces produits sont souvent encore utilisés par manque d'alternatives efficaces. Aucun effet nocif important n'a été observé chez l'humain avec l'utilisation de la lutte biologique.

La méthode de lutte choisie doit être acceptée par les agriculteurs et doit donc être facile d'utilisation. Malheureusement, il faut être bien informé avant d'utiliser la lutte biologique afin d'éviter un abandon prématuré, qui peut être définitif. Pour l'instant, les cours et formations sur le sujet pour les professionnels sont peu disponibles (Lambert, 2002). Également, un suivi intensif des populations des ravageurs est nécessaire afin d'introduire les auxiliaires de manière efficace et au bon moment. Par contre, de nombreux avantages facilitent la vie des producteurs : les introductions d'ennemis naturels sont plus rapides et agréables que l'utilisation des pesticides et le délai de réentrée au champ est beaucoup plus court, souvent nul (van Lenteren, 2008). En considérant toutes ces facettes, l'objectif de facilité d'application et d'acceptabilité par les agriculteurs est moyennement atteint.

Finalement, il est important que les acheteurs acceptent cette technologie et achètent les produits cultivés à l'aide de la lutte biologique. Malgré l'engouement grandissant pour les produits écologiques, il pourrait être nécessaire d'informer les gens au sujet de la lutte biologique, afin qu'ils sachent qu'il n'y a aucun danger, malgré ce que certains pourraient penser de prime abord. Il est difficile d'analyser cet objectif car la lutte biologique est peu utilisée au Québec actuellement par rapport aux pesticides et, quand elle l'est, ce n'est pas

indiqué sur le produit vendu au détail. Par déduction et avec prudence, il est raisonnable d'affirmer que cet objectif est moyennement atteint.

4.2.4 Vision globale

Afin d'avoir une vue d'ensemble de l'analyse, les objectifs des trois sphères ont été réunis à l'annexe 2. Globalement, les lacunes de la lutte biologique au Québec semblent se trouver au niveau économique. Un seul objectif est peu atteint, bien qu'il soit notable : l'applicabilité à faible coût. Il est par contre important de noter que la plupart des objectifs sont au moins moyennement atteints, ce qui laisse place à l'amélioration. D'autant plus que le potentiel de recherche et innovation est grand avec cette technologie. Aussi, il faut considérer que l'atteinte de plusieurs des objectifs est variable ou difficile à évaluer. Ainsi, dans certains cas ou situations, il est possible que la lutte biologique ne soit pas applicable. De plus, la présence de nombreux objectifs difficiles à évaluer révèle certaines informations qui sont manquantes dans le domaine. Des recherches devraient être faites sur ces sujets précis afin de déterminer plus assurément l'applicabilité.

5 RECOMMANDATIONS

L'analyse précédente a permis de mettre en lumière certaines forces et lacunes de l'application de la lutte biologique au Québec. La présente section vise à discuter de son applicabilité et à élaborer certaines recommandations à l'endroit des décideurs quant à l'avenir de cette méthode. Un résumé des principales recommandations, énumérées dans l'ordre du texte, est présenté au tableau 5.1.

Tableau 5.1 Recommandations en vue d'augmenter l'applicabilité de la lutte biologique au Québec.

Recommandations
<ul style="list-style-type: none">• Limiter l'action de la Convention sur la diversité biologique en excluant les auxiliaires de lutte biologique
<ul style="list-style-type: none">• Encourager et financer la recherche de nouveaux auxiliaires contre les ravageurs des cultures québécoises
<ul style="list-style-type: none">• Encourager et financer la recherche afin de produire des auxiliaires plus facilement et de manière économique
<ul style="list-style-type: none">• Continuer d'analyser avec rigueur les risques relatifs à l'utilisation d'un auxiliaire
<ul style="list-style-type: none">• Encourager et financer la recherche sur les coûts de la lutte biologique par rapport à la lutte conventionnelle (pesticides)
<ul style="list-style-type: none">• Offrir du support technique et des formations pour les utilisateurs de la lutte biologique
<ul style="list-style-type: none">• Informer, sensibiliser et éduquer les consommateurs sur la lutte biologique
<ul style="list-style-type: none">• Former un organisme gouvernemental provincial afin d'encourager la lutte biologique

La lutte biologique semble, après analyse, applicable au Québec. De plus, comme ce domaine est très étudié, des développements sont à prévoir et certaines limites pourraient disparaître avec le temps et la recherche. Par contre, certains aspects qui n'étaient auparavant pas présents pourraient limiter ou modifier l'applicabilité de la lutte biologique.

Par exemple, l'importance croissante des changements climatiques pourrait affecter la lutte biologique en menant à l'introduction d'espèces qui ne survivent actuellement pas au climat québécois ou à la migration de certaines espèces, du sud au nord (Hokkanen et al., 1995). Aussi, la Convention sur la diversité biologique, adoptée en 1993, pourrait menacer l'utilisation de la lutte biologique (CDB, 2010 et Cock et al., 2009). Certains pays limitent fortement l'exportation d'organismes vivants, dont des auxiliaires, en vertu de cette Convention. Si de telles pratiques en venaient à se répandre, la lutte biologique pourrait être menacée. Il serait donc nécessaire d'exclure les auxiliaires de cette protection de la biodiversité, ou au moins de les mettre dans une catégorie à part pour encourager la lutte biologique mais éviter l'introduction d'auxiliaires aux effets nocifs. Il serait ironique qu'une convention visant à protéger la biodiversité favorise les pesticides au détriment d'une méthode plus écologique.

Au niveau de la recherche, certaines choses restent à faire pour améliorer l'applicabilité de la lutte biologique. Dans un Québec idéal, chaque ravageur aurait son agent de lutte biologique associé, disponible facilement et efficace. Par contre, la réalité est différente : certains ravageurs n'ont pas d'agents de contrôle connus, ou ces derniers ne sont pas disponibles commercialement. Plusieurs laboratoires au Québec, au Canada et ailleurs dans le monde découvrent à chaque année des auxiliaires et développent de nouveaux protocoles afin de les utiliser de façon efficace et de les élever plus facilement et plus économiquement (Brault, s.d.). De telles études pourraient mener à une chute des prix des auxiliaires et en augmenter l'accessibilité pour les agriculteurs québécois. Ces recherches doivent être financées afin de durer. Bien que la lutte biologique soit considérée par plusieurs comme sans risque, certains problèmes peuvent survenir (effets sur des espèces non ciblées) et ces derniers sont étudiés de plus en plus, afin de les éviter le plus possible (van Lenteren et al., 2006). Il est donc vital de bien continuer à analyser les risques relatifs à l'utilisation d'un auxiliaire et d'effectuer un suivi pendant et après utilisation. Par contre, il est important de considérer « le risque d'entreprendre comme son contraire » afin d'éviter de se faire arrêter par de petits désavantages (Sforza, 2009). D'autres domaines de recherche ont besoin de continuer à être développés, comme les aspects moins « biologiques » de la lutte biologique. Il serait adéquat de développer une analyse de cycle de vie de la méthode et d'effectuer des recherches sur la perception des gens face aux produits ainsi traités. Il pourrait également être très intéressant de faire une analyse approfondie des coûts de la lutte biologique par apport à

la lutte chimique, en considérant la valeur des bénéfices environnementaux, difficilement quantifiables. Il est également important pour le milieu public d'encourager ces recherches car les désavantages des pesticides (problèmes de santé et dégradation de l'environnement, entre autres) apportent majoritairement des coûts au système public. Il est donc essentiel que les coûts liés à la recherche pour la lutte biologique soient encouragés et financés, au moins en partie, par les fonds gouvernementaux (Greathead, 1995).

Pour le moment, malheureusement, peu de ressources sont disponibles relativement à l'utilisation de la lutte biologique. Cet aspect est considéré comme un très important manque au Québec par plusieurs auteurs (Lambert et al., 2002 et Murphy, 2000). Malgré certaines informations fournies par les compagnies productrices d'auxiliaires, il peut être difficile pour un agriculteur de les utiliser de façon optimale. L'agriculteur néophyte utilisant la lutte biologique pour une première fois pourrait se décourager et abandonner, alors qu'elle pourrait être une option très efficace. Ainsi, il serait avantageux, autant pour les producteurs, les agriculteurs et le gouvernement, que du support technique, des formateurs et formations soient disponibles pour les utilisateurs (Lambert et al., 2002 et Murphy, 2000). Les producteurs vendraient ainsi plus d'auxiliaires, les agriculteurs auraient un réel accès à cette méthode écologique et le gouvernement aurait moins de coûts liés aux problèmes environnementaux et de santé des pesticides. Il serait également intéressant d'inciter des producteurs d'auxiliaires à s'installer au Québec afin d'augmenter la disponibilité et de faire chuter les coûts liés au transport.

Un des problèmes de la lutte biologique au Québec est le manque d'information des consommateurs. Bien que, selon le sondage publié par le Réseau BioContrôle en 2006, 81 % des québécois soient en faveur de la lutte biologique, seulement 34 % se considèrent comme bien informés (Réseau Biocontrôle, 2006). La population est donc généralement peu au courant de ce que cette méthode implique, autant positivement que négativement. Par contre, pour que la lutte biologique soit considérée comme applicable au Québec, il faut que les produits qui en sont issus, plantes ornementales, légumes et fruits, entre autres, soit achetés par les consommateurs. Lorsque des produits sont cultivés avec cette technique de phytoprotection, certains facteurs pourraient le faire paraître de moins bonne qualité. Ainsi, des gens pourraient être réticents à manger des fruits et légumes traités avec des bactéries, aussi inoffensives pour l'Homme soit-elles

(Hokkanen et al., 1995). Aussi, la présence d'auxiliaires résiduels et de ravageurs, la lutte biologique n'étant pas efficace à 100 %, est possible. Visibles sur les produits, ces organismes peuvent faire qu'un consommateur préfère le produit semblable adjacent dans l'étalage, sans insectes parce que traité aux pesticides (Lambert et al., 2002). Finalement, tel que mentionné précédemment, la lutte biologique vise à maintenir les populations de ravageurs et les dommages en dessous d'un seuil. Ceci peut impliquer la présence de légers dommages sur le produit (Hokkanen et al., 1995). Les consommateurs doivent être prêts à accepter ce léger désavantage pour que la lutte biologique soit économiquement viable. Afin de contrer les pertes monétaires liées à ce manque d'information, il serait nécessaire de renseigner la population, dans les médias par exemple. Il pourrait également être avantageux d'indiquer sur les produits l'utilisation de la lutte biologique par un symbole particulier et unique. Encore selon le sondage du Réseau Biocontrôle, 87 % des canadiens souhaiteraient que l'utilisation de la lutte biologique soit indiquée sur les produits (Réseau Biocontrôle, 2006). De plus, comme pour l'instant la lutte biologique est généralement plus dispendieuse que la lutte conventionnelle, les produits qui en sont issus seront également plus onéreux. La population doit donc être au courant des avantages non monétaires comme les bienfaits sur la santé et l'environnement, pour être prêts à payer ce surplus.

Afin d'appliquer ces recommandations, un organisme ou un comité gouvernemental provincial pourrait être mis en place. Le but principal de ce comité « lutte biologique » serait d'augmenter l'applicabilité de la lutte biologique au Québec. Il pourrait avoir un certain budget attribué à chaque année à allouer à la recherche et à des activités d'informations, sensibilisation et information. Ces activités auraient autant pour but de former les agriculteurs que d'inciter les consommateurs à acheter les produits issus de l'agriculture avec lutte biologique en les informant des avantages et des petits sacrifices à faire (coût, esthétique, etc.). Il pourrait également s'occuper d'homogénéiser l'étiquetage de ces produits en les présentant sous une certaine appellation. Il est important que cette appellation soit accessible à faible coût pour les producteurs afin d'en favoriser la diffusion. Il est également primordial qu'elle soit surveillée et vérifiable afin de protéger les consommateurs. Finalement, afin de faciliter la transition vers une phytoprotection écologique, le mandat pourrait être élargi à la lutte intégrée, soit la lutte biologique en association avec les pratiques culturales et l'utilisation limitée des pesticides chimiques.

Malheureusement, l'application de ces recommandations demanderait des ressources considérables, majoritairement du milieu public. Par contre, les avantages qu'une utilisation plus répandue de la lutte biologique apporterait à l'environnement et à la santé des québécois justifient quelques sacrifices.

CONCLUSION

Le développement d'une conscience collective plus écologique a mené à de nombreux questionnements dans les dernières décennies. L'utilisation de certains pesticides très controversés, en quantités de plus en plus grandes pour contrer le développement de résistances chez les ravageurs, est l'un des problèmes qui a soulevé des questionnements, autant de la part de la population que de celle des agriculteurs. Quiconque est au courant des défauts de l'utilisation des pesticides conventionnels se doit de songer à une autre option. En comparaison à la plupart de ces derniers, l'utilisation des auxiliaires est beaucoup plus écologique, plus sécuritaire et plus spécifique. La lutte biologique semble une alternative écologique aux pesticides chimiques, utilisés sérieusement depuis des dizaines d'années dans les champs et les serres québécois. Utilisable dans de nombreux contextes, elle a fait ses preuves partout dans le monde et comme elle est grandement étudiée, de nouvelles applications sont à prévoir.

Les développements en lutte biologique se sont fait parallèlement au développement de l'étude de la biologie : plus les auxiliaires ont été étudiés et les interactions entre espèces connues, plus les utilisations de la lutte biologique ont pu être efficaces et sécuritaires. Une vision holistique est maintenant utilisée et est essentielle en lutte biologique afin de considérer toutes les facettes et interactions entre l'auxiliaire, le ravageur et leur environnement. Les désavantages qui étaient auparavant imprévisibles, craints et fréquents, comme les effets sur les espèces non ciblées, sont de plus en plus connus et évités. Par contre, la recherche se poursuit et des développements restent à faire dans de nombreux domaines connexes afin d'en augmenter l'accessibilité et d'en diminuer les coûts.

Le but de l'essai est somme toute atteint : après analyse et dans la mesure des connaissances actuelles, la lutte biologique semble applicable au Québec. Elle a fait ses preuves à de nombreuses reprises (pyrale du maïs, punaise terne et vers blancs, entre autres) et certaines compagnies offrent aux agriculteurs québécois auxiliaires et main d'œuvre pour de nombreuses cultures présentes sur le territoire. Aussi, les particularités du Québec ne nuisent pas à son utilisation. Néanmoins, du chemin reste à faire : les coûts d'utilisation souvent peu compétitifs peuvent en décourager plus d'un et il n'est pas assuré que la population acceptera de payer plus pour des produits souvent moins esthétiques,

en apparence de moins bonne qualité. Il est également important de réaliser que les coûts plus élevés sont justifiés par une internalisation des coûts environnementaux. Sans généraliser, un pesticide X qui rend les gens malades et qui tue les insectes pollinisateurs engendre des coûts que les agriculteurs et les consommateurs n'ont pas à payer directement lors de l'achat des pesticides ou des produits mais qu'ils paieront par leurs taxes au gouvernement. Ces coûts sont évités si la lutte biologique est utilisée, ce qui apporte des bénéfices difficilement quantifiables monétairement et qui en diminue le coût net. Avec un peu de travail et de ressources, les obstacles à l'applicabilité de la lutte biologique au Québec pourront facilement être surmontés et il semble possible qu'un jour, à moyen ou long terme, elle prenne le dessus sur la lutte chimique.

Malgré tous leurs inconvénients, les pesticides sont bien ancrés dans la culture agricole québécoise et seront difficiles à déraciner. Il est nécessaire que la lutte biologique se développe encore plus et que les intervenants, autant consommateurs, agriculteurs, producteurs d'auxiliaires que gouvernements, comprennent bien les enjeux, et que de l'éducation soit faite. Sinon, la lutte biologique restera ce qu'elle est encore de nos jours, soit une méthode de lutte noble mais marginale, étouffée par un nuage de pesticides.

RÉFÉRENCES

- Actu-Environnement (2010). Définition de pesticide. *In* Actu-Environnement. *Dictionnaire environnement*, [En ligne]. http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/pesticide.php4 (Page consultée le 11 juin 2010).
- AEF Global (2008). L'entreprise. *In* AEF Global. *Accueil*, [En ligne]. <http://www.aefglobal.com/fr/index.html> (Page consultée le 4 février 2010).
- Agence canadienne d'inspection des aliments (2009). *Popillia Japonica* (Newman) - Scarabée japonais. *In* Agence canadienne d'inspection des aliments. *Phytoravageurs*, [En ligne]. <http://www.inspection.gc.ca/francais/plaveg/pestrava/popjap/tech/popjapf.shtml> (Page consultée le 2 juin 2010).
- Agence canadienne d'inspection des aliments (2007). Normes relatives au confinement des installations manipulant des phytoravageurs. *In* Agence canadienne d'inspection des aliments. *Confinement des biorisques et sécurité*, [En ligne]. <http://www.inspection.gc.ca/francais/sci/bio/plaveg/placonf.pdf> (Page consultée le 13 mai 2010).
- Agence française de sécurité sanitaire des aliments (AFSSA) (2009). Mortalités, effondrements et affaiblissements des colonies d'abeilles. *In* Agence française de sécurité sanitaire des aliments. *Autres publications*, [En ligne]. <http://www.afssa.fr/Documents/SANT-Ra-MortaliteAbeilles.pdf> (Page consultée le 12 juin 2010).
- AgraQuest Inc. (2010). Serenade® MAX™ - Un biofongicide sous forme de poudre mouillable (Étiquette). *In* Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire. *Information sur les produits*, [En ligne]. http://pr-rp.pmra-arla.gc.ca/PR_SOL/pr_web.ve2?p_ukid=12131 (Page consultée le 4 juin 2010).
- Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) (2009a). Lutte biologique : se servir de la nature pour lutter contre les organismes nuisibles des cultures. *In* Agriculture et Agroalimentaire Canada. *Publications du gouvernement du Canada*, [En ligne]. http://dsp-psd.tpsgc.gc.ca/collection_2009/agr/A72-67-2009F.pdf (Page consultée le 29 janvier 2010).
- Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) (2009b). Mandat. *In* Agriculture et Agroalimentaire Canada. *À propos d'Agriculture et Agroalimentaire Canada*, [En ligne]. <http://www4.agr.gc.ca/AAFC-AAC/display-afficher.do?id=1173965157543&lang=fra> (Page consultée le 4 février 2010).
- Agriculture et Agroalimentaire Canada (2009c). Gestion de l'euphorbe éssule à l'aide d'un insecte prédateur. *In* Agriculture et Agroalimentaire Canada. *Centre de lutte antiparasitaire*, [En ligne]. <http://www4.agr.gc.ca/AAFC-AAC/display-afficher.do?id=1243369144165&lang=fra> (Page consultée le 28 février 2010).

- Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) (2007a). Stratégies de lutte contre l'euphorbe érule dans les pâturages communautaires de l'Administration du rétablissement agricole des Prairies. In Agriculture et Agroalimentaire Canada. *Biodiversité*, [En ligne]. <http://www4.agr.gc.ca/AAFC-AAC/display-afficher.do?id=1186596698988&lang=fra> (Page consultée le 28 février 2010).
- Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) (2007b). BPI07-110 - Lutte biologique contre la brûlure de l'épi causée par fusarium et la contamination par mycotoxine du blé. In Agriculture et Agroalimentaire Canada. Programme de réduction des risques liés aux pesticides, [En ligne]. <http://www4.agr.gc.ca/aafc-aac/display-afficher.do?id=1187376337842&lang=fra> (Page consultée le 20 mars 2010).
- Ahmad Pervez, O. (2007). Ecology and biological control application of multicoloured Asian ladybird, *Harmonia axyridis*: A review. *Biocontrol science and technology*, vol. 16, no. 2, p. 111-128.
- Al-Marzra'awi, M.S.; Kevan, P.G. et Shipp, L. (2007) Development of *Beauveria bassiana* dry formulation for vectoring by honey bees *Apis mellifera* (Hymenoptera: Apidae) to the flowers of crops for pest control. *Biocontrol science and technology*, vol. 17, no. 7, p. 733-741.
- Barlow, N.D., Kean, J.M. et Goldson, S.L. (2002). Biological control lessons: modeling successes and failures in New Zealand. In USDA Forest Service, *International Symposium on Biological Control of Arthropods*, Honolulu, Hawaii, 14-18 janvier 2002, [En ligne]. <http://www.bugwood.org/arthropod/day1/barlow.pdf> (Page consultée le 22 mars 2010).
- Barron, G. (2001). *Beauveria bassiana*. In University of Guelph. *Georges Barron's website on fungi*, [En ligne]. <http://www.uoguelph.ca/~gbarron/MISCELLANEOUS/nov01.htm> (Page consultée le 24 février 2010).
- Bélaïr, G. et Simard, L. (2005). Stratégie de lutte intégrée pour les terrains de golf du Québec et de l'Ontario. In La Coalition pour un Golf Responsable. *Publications et documents*, [En ligne]. http://www.responsiblegolf.org/public/IS05sep_IPMStrategy_Fv11_sh.pdf (Page consultée le 26 février 2010).
- Biobest (2009a). Products : biological control. In Biobest Biological Systems. *Products*, [En ligne]. <http://www.biobest.be/productenalq/2/3/> (Page consultée le 5 février 2010).
- Biobest (2009b). Encarsia system. In Biobest. *Biological control: beneficial insects and mites*, [En ligne]. <http://www.biobest.be/v1/en/producten/nuttig/encarsia.htm> (Page consultée le 28 février 2010).
- Biocontrol Information Ressource for ERMA New Zealand Applicants (BIREA) (2007). Environmental risks of biological control. In Biocontrol Information Ressource for ERMA New Zealand Applicants, *Background information*, [En ligne]. http://www.b3nz.org/birea/index.php?page=background_risks (Page consultée le 25 mars 2010).

- Boisclair, J. (2007). Optimisation de la lutte biologique contre la pyrale du maïs et les pucerons dans la culture du maïs sucré frais. *In* Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des affaires rurales. *Aperçu du projet*, [En ligne]. <http://www.mapaq.gouv.qc.ca/NR/rdonlyres/B46117E6-3A14-4661-A2A5-3BD4F996BC92/0/806110.pdf> (Page consultée le 28 février 2010).
- Bourchier, R. (2004). Biocontrôles des plantes nuisibles et des espèces invasives. *Dossiers Biocontrôle*, décembre, p. 2.
- Brault, D. (s.d.). La recherche en agriculture biologique – qu'est ce qui se fait et comment avoir accès à l'information. *In* Agri-Réseau. *Agriculture biologique*, [En ligne]. <http://www.agrireseau.qc.ca/agriculturebiologique/documents/La%20recherche%20en%20agriculture%20biologique3.ppt> (Page consultée le 13 juin 2010).
- Brodeur, J. (2008). Lutte biologique classique au puceron du soya. *In* Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, *Productions animales et végétales*, [En ligne]. <http://www.mapaq.gouv.qc.ca/NR/rdonlyres/92625A81-BC7A-4514-87F7-EFE253EB1D36/0/807131.pdf> (Page consultée le 19 mars 2010).
- Brown, J.K. (2004). Tracing the Origin of Cryptic Insect Pests and Vectors, and their Natural Enemies. *In* Ehler, L.E., Sforza, R. et Mateille, T. (éd.), *Genetics, evolution and biological control* (chap. 6, 113-135). Wallingford (RU), CABI Publishing.
- Canadian Association of Physicians for the Environment (CAPE) (2000). Pesticides. *In* Canadian Association of Physicians for the Environment. *Toxics*, [En ligne]. <http://www.cape.ca/toxics/pesticides.html> (Page consultée le 9 juin 2010).
- Canadian Forest Service (2007). Gypsy moth. *In* Natural Ressources Canada. *Fact sheets*, [En ligne]. <http://cfs.nrcan.gc.ca/factsheets/gypsy-moth> (Page consultée le 25 février 2010).
- Carson, R.L. (1962). *Silent spring*. 40th anniversary edition, New York, Houghton Mifflin Books, 381 p.
- Cécyre, A. (2000). La lutte biologique : à quel prix ? *In* Agri-Réseau. *Horticulture ornementale – Serre*, [En ligne]. <http://www.agrireseau.qc.ca/horticulture-serre/documents/c%C3%A9cyre%20Lutte%20bi%E2%80%A6%20Agrir%C3%A9seau.pdf> (Page consultée le 15 mars 2010).
- Cermak, P. et Walker, G.M. (1992). La punaise terne : un ravageur important de la fraise. *In* Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des affaires rurales. *Fiche technique*, [En ligne]. <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/facts/92-109.htm> (Page consultée le 28 février 2010).
- Centre de Ressources en Impacts et Adaptation au Climat et à ses Changements (CRIACC) (2008a). Températures estivales 2008. *In* Centre de Ressources en Impacts et Adaptation au Climat et à ses Changements. *Suivi saisonnier*, [En ligne]. http://www.criacc.qc.ca/climat/suivi/ete08/temp_f.html (Page consultée le 18 mars 2010).

- Centre de Ressources en Impacts et Adaptation au Climat et à ses Changements (CRIACC) (2008b). Températures hivernale 2007-2008. *In* Centre de Ressources en Impacts et Adaptation au Climat et à ses Changements. *Suivi saisonnier*, [En ligne]. http://www.criacc.qc.ca/climat/suivi/hiver_temp_f.html (Page consultée le 18 mars 2010).
- Chaire de recherche et d'intervention Éco-Conseil de l'Université du Québec à Chicoutimi (2007). Guide d'utilisation de la grille d'analyse de développement durable pour l'évaluation de projets. *In* Éco-Conseil. *Documents*, [En ligne]. http://ecoconseil.ugac.ca/chaire/documents/analyse_dev_dur_2007.pdf (Page consultée le 29 avril 2010).
- Cloutier, C. et Cloutier C. (1992). Les solutions biologiques de lutte pour la répression des insectes et acariens ravageurs des cultures. *In* Vincent, C. et Coderre, D. (réd.), *La lutte biologique* (chap. 2, p. 19-88). Boucherville (Québec), Gaëtan Morin Éditeur.
- Cock, M.J.W.; van Lenteren, J.C.; Brodeur, J.; Barratt, B.I.T.; Bigler, F.; Bolckmans, K.; Cónsoli, F.L.; Haas, F.; Mason, P.G. et Parra, J.R.P. (2009). Do new Access and Benefit Sharing procedures under the Convention on Biological Diversity threaten the future of biological control? *BioControl*, vol. 55, p. 199-218.
- Coderre, D. et Vincent, C. (1992). La lutte biologique : toile de fond de la situation. *In* Vincent, C. et Coderre, D. (réd.), *La lutte biologique* (chap. 1, p. 3-16). Boucherville (Québec), Gaëtan Morin Éditeur.
- Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'ONU (1987). Notre avenir à tous. *In* Wikisource. *Notre avenir à tous – Rapport Brundtland*, [En ligne]. http://fr.wikisource.org/wiki/Notre_avenir_%C3%A0_tous_-_Rapport_Brundtland (Page consultée le 12 mai 2010).
- Commission sur la diversité biologique (CDB) (2010). Histoire. *In* Commission sur la diversité biologique. *À propos*, [En ligne]. <http://www.cbd.int/history/> (Page consultée le 23 mai 2010).
- Couture, I. (2007). Du maïs sucré sans insecticide? Oui, c'est possible! *In* Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. *Environnement – Horticulture*, [En ligne]. http://www.mapaq.gouv.qc.ca/NR/rdonlyres/5162ED87-4285-4121-81FE-063721633C66/0/GTA320417_mais_sucre_isabelle_couture_SI.pdf (Page consultée le 1er mars 2010).
- Darier, E. (2007). Pesticides et OGM au Québec - 2003 l'année de la fin du mythe des OGM ? *In* Green Peace. *Actualités*, [En ligne]. <http://www.greenpeace.org/canada/fr/actualites/pesticides-ogm-qc> (Page consultée le 20 mars 2010).
- Deglise, F. (2007). Pesticides : le portrait québécois est peu reluisant. *Le Devoir*, 18 août.
- Dunphy, G.B. et Tibelius, K.H. (1992). Les progrès biotechnologiques augmentant l'efficacité de *Bacillus thuringiensis* et de *Bacillus sphaericus* en tant qu'insecticides

- microbiens*. In Vincent, C. et Coderre, D. (éd.), *La lutte biologique* (chap. 15, p. 305-322). Boucherville (Québec), Gaëtan Morin Éditeur.
- Duval, J. (2006). Les besoins en phytoprotection des maraîchers biologiques. In Agri-Réseau. *Légumes de champ*, [En ligne]. <http://www.agrireseau.qc.ca/legumeschamp/documents/besoinproducteurbio%5D.pdf> (Page consultée le 15 mai 2010).
- Duval, J. (1996). Les altises. In McGill University. *Ecological; Agriculture Projects*, [En ligne]. <http://eap.mcgill.ca/agrobio/ab360-12.htm> (Page consultée le 1er mars 2010).
- Elliott, D. (2005). Histoire de la lutte biologique contre les ravageurs des serres au Canada. *Dossiers Biocontrôle*, juillet, p. 2.
- Environmental Protection Agency (EPA) (2009a). Types of pesticides. In Environmental Protection Agency. *About pesticides*, [En ligne]. <http://www.epa.gov/pesticides/about/types.htm> (Page consultée le 30 mai 2010).
- Environmental Protection Agency (EPA) (2009b). Integrated pest management (IPM) principe. In Environmental Protection Agency. *Health and Safety*, [En ligne]. <http://www.epa.gov/opp00001/factsheets/ipm.htm> (Page consultée le 1^{er} février 2010).
- Environmental Protection Agency (EPA) (2009b). Our mission and what we do. In Environmental Protection Agency. *About EPA*, [En ligne]. <http://www.epa.gov/epahome/whatwedo.htm> (Page consultée le 6 février 2010).
- European and Mediterranean Plant Protection Organization (EPPO) (2008). List of biological control agents widely used in the EPPO region. In European and Mediterranean Plant Protection Organization. *EPPO Standards on Safe use of Biological Control*, [En ligne]. http://archives.eppo.org/EPPOStandards/biocontrol_web/bio_list.htm (Page consultée le 4 février 2010).
- Fatouros, N.E. (2008). Cover image. In Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. *Table of contents – July 22, 2008*, [En ligne]. <http://www.pnas.org/content/105/29.cover-expansion> (Page consultée le 15 juin 2010).
- Ferguson, G.; Murphy, G. et Shipp, L. (2003). Lutte contre les aleurodes dans les cultures de serre. In Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des affaires rurales. *Fiche technique*, [En ligne]. <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/facts/03-068.htm> (Page consultée le 1er mars 2010).
- Ferland, C. et Lauzon, L. (2000). Lutte biologique contre la pyrale du maïs à l'aide de trichogrammes dans la culture du maïs sucré. In Agri-réseau. *Fiche technique*, [En ligne]. <http://www.agrireseau.qc.ca/legumeschamp/documents/VU041.pdf> (Page consultée le 26 février 2010).

- Filière des plantes médicinales biologiques du Québec (2010). L'avoine fleurie – Guide de production sous régime biologique. *In* Filière des plantes médicinales biologiques du Québec. *Publications*, [En ligne]. http://www.plantesmedicinales.qc.ca/images/_pdf/guide-avoine.pdf (Page consultée le 22 mars 2010).
- Food and Agriculture organization of the United Nations (FAO) (2009). Les ravageurs et les maladies transfrontières des animaux et des plantes. *In* Food and Agriculture organization of the United Nations. *FAO*, [En ligne]. <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/meeting/018/k6361f.pdf> (Page consultée le 7 février 2010).
- Gauden, S. (2009). Gypsy moth information. *In* Hamilton Conservation Authority. *Protecting land*, [En ligne]. <http://www.conservationhamilton.ca/protecting-land/hca/programs-services/protecting-land/gypsy-moth-information> (Page consultée le 27 février 2010).
- Gaugler, R. (s.d.). Nematodes (Rhabditida: Steinernematidae & Heterorhabditidae). *In* Cornell University. *Biological control : A guide to natural enemies in north America*, [En ligne]. <http://www.nysaes.cornell.edu/ent/biocontrol/pathogens/nematodes.html> (Page consultée le 9 juin 2010).
- Global Invasive Species Database (2005). Ecology of *Bemisia tabaci*. *In* Invasive Species Specialist Group. *Ecology*, [En ligne]. <http://www.issg.org/database/species/ecology.asp?fr=1&si=106> (Page consultée le 27 février 2010)
- Greathead, D. J. (1995). Benefits and risks of classical biological control. *In* Hokkanen, H.M.T et Lynch, J.M. (éd.), *Biological control benefits and risks* (Chapitre 5, p. 53-63).
- Grenier, S. (2009). Utilisation de prédateurs. *In* Pintureau, B. (éd.), *La lutte biologique : Application aux arthropodes ravageurs et aux adventices* (Chapitre VIII, p. 146-167). Paris, Ellipses Éditions.
- Grewal, P. (s.d.). Biology and ecology – Insect parasitic nematodes. *In* Ohio Agricultural Research and Development Center. *Using nematodes*, [En ligne]. <http://oardc.osu.edu/nematodes/biologyecology.htm> (Page consultée le 7 février 2010).
- Groden, E. (1999). Using *Beauveria bassiana* for insect management. *In* University of Connecticut. *Integrated Pest Management*, [En ligne]. <http://www.hort.uconn.edu/IPM/general/htms/bassiana.htm> (Page consultée le 26 février 2010).
- Groupe Cameron (2009). Secteurs d'activité. *In* Groupe Cameron. *Services*, [En ligne]. <http://www.groupecameron.com/fr/activites.php> (Page consultée le 29 janvier 2010).
- Groupe CDG Environnement (2008). À propos de nous. *In* Groupe CDG Environnement. *Accueil*, [En ligne]. <http://www.groupecdg.com/sections/aboutus/default.aspx> (Page consultée le 12 juin 2010).

- Guay, J.-F. (2009). Les effets non dirigés de la lutte biologique classique. *Antennae*, vol. 16, no. 1, p. 3-6.
- Guertin, C.; Sabbahi, R.; Trudel, R. et Jobin, E. (2002). Utilisation du champignon entomopathogène *Beauveria bassiana* contre les ravageurs des fraises. In Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des affaires rurales. *Faits saillants*, [En ligne]. <http://www.mapaq.gouv.qc.ca/NR/rdonlyres/8FDBC28A-996A-4417-9A73-9500EE834367/0/Fiche102075.pdf> (Page consultée le 27 février 2010).
- Hagerman, P. (1997). La pyrale du maïs dans le maïs sucré de d'autres cultures horticoles. In Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des affaires rurales. *Fiche technique*, [En ligne]. <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/facts/97-020.htm> (Page consultée le 1er mars 2010).
- Hokkanen, H.M.T.; Lynch, J.M. et Robinson, J. (1995). Preface: Overview of benefits and risks of biological control introductions. In Hokkanen, H.M.T et Lynch, J.M. (éd.), *Biological control benefits and risks* (Préface, p. xvii-xxii).
- Humble, L. et Stewart, A.J. (1994). Gypsy moth. In Service Canadien des Forêts – Librairie. *Forest pest leaflet*, [En ligne]. <http://warehouse.pfc.forestry.ca/pfc/3456.pdf> (Page consultée le 28 février 2010).
- Institut de la Statistique du Québec (ISQ) et Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) (2010). Profil sectoriel de l'industrie bioalimentaire du Québec – Édition 2009. In Institut de la Statistique du Québec. *Publications*, [En ligne]. http://www.stat.gouv.qc.ca/publications/ind_bioalimentaire/pdf/Profil_bio_2009.pdf (Page consultée le 17 mars 2010).
- Integrated Pest Management of Alaska (2003). Biological control for aphids. In Education and Research Center for Bio-Industrial Automation. *The problem: APHIDS*, [En ligne]. <http://www.ecaa.ntu.edu.tw/weifang/Hort/screens/The%20Problem%20Aphids.htm> (Page consultée le 15 juin 2010).
- International organization for biological control of noxious plants and animals (IOCB) (s.d.). Mission. In International organization for biological control of noxious plants and animals. *IOBC Global*, [En ligne]. <http://www.unipa.it/iobc/view.php?pg=mission> (Page consultée le 5 février 2009).
- Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) (2010). Mission et vision. In Institut de recherche et de développement en agroenvironnement. *À propos de l'IRDA*, [En ligne]. http://www.irda.qc.ca/apropos/plan_strategique.html (Page consultée le 6 février 2010).
- Institut de la statistique du Québec (ISQ) (2009). Statistiques relatives à l'allocation de colonies à des fins de pollinisation. In Institut de la Statistique du Québec. *Industrie bioalimentaire – Élevage – Miel*, [En ligne]. http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/econm_finnc/filr_bioal/elevage/miel/ (Page consultée le 14 juin 2010).

- Iowa State University (2006). Transgenic corn. *In* Iowa State University. *Management*, [En ligne]. <http://www.ent.iastate.edu/pest/cornborer/manage/transgenic> (Page consultée le 2 mars 2010).
- Jamal, Z. (2008). Application de *Beauveria bassiana* contre la punaise terne *Lygus lineolaris* (palisot de beauvois) (hémiptères: miridés) dans les vignobles. Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec, 101 p.
- Jardin Botanique de Montréal (2009). Vers blancs. *In* Jardin Botanique de Montréal. *Ravageurs et maladies*, [En ligne]. <http://www2.ville.montreal.qc.ca/jardin2/voirRavageur.do?idMaladie=9#> (Page consultée le 28 février 2010).
- Johnson, M.W. (2000). Conservation of natural enemies. *In* College of Natural Ressources – University of California, Berkeley - Center for Biological Control. *Biological Control of Pests*, [En ligne]. <http://www.cnr.berkeley.edu/biocon/BC%20Class%20Notes/129-132%20Conservation.pdf> (Page consultée le 2 juin 2010).
- Joshi, S. et Poorani, J. (s.d.). *Myzus persicae*. *In* Aphidweb.com. *Fact sheets*, [En ligne]. <http://www.aphidweb.com/Aphids%20of%20Karnataka/Myzuspersicae.htm> (Page consultée le 12 juin 2010).
- Joung, K.-B. et Côté, J.-C. (2000). Une analyse des incidences environnementales de l'insecticide microbien *Bacillus thuringiensis*. *In* Centre de Recherche et de Développement en Horticulture. *Bulletin technique*, [En ligne]. <http://dsp-psd.pwgsc.gc.ca/Collection/A54-9-29F.pdf> (Page consultée le 25 février 2010).
- Jourdheuil, P., Grison, P. et Fraval, A. (1991). La lutte biologique, un aperçu historique. *In* Institut national de la recherche agronomique (INRA). *Le courrier de l'environnement de l'INRA*, [En ligne]. <http://www.inra.fr/dpenv/jourdc15.htm> (Page consultée le 2 février 2010).
- Kellogg, R.L.; Nehring, R.F.; Grube, A.; Gross, D.W. et Plotkin, S. (2002). Environmental indicators of pesticide leaching and runoff from farm fields. *In* Ball V.E. et Norton, G.W. (éd.). (Chapitre 9, p. 213-256). Norwell, Kluwer Academic Publisher.
- Koppert (s.d.). The Company. *In* Koppert Biological Systems. *Koppert Biological Systems and Natural Pollination*, [En ligne]. <http://www.koppert.com/company/> (Page consultée le 9 juin 2010).
- Kovach, J. et English-Loeb, G. (1997). Testing the efficacy of Mycotrol ES on Tarnished plant bugs. *In* Cornell University. *Publications*, [En ligne]. <http://www.nysipm.cornell.edu/publications/beauveria/> (Page consultée le 28 février 2010).
- Labrie, G. (2008). L'hivernation de la coccinelle asiatique: pourquoi et comment l'éviter. *In* Réseau d'avertissement phytosanitaire. *Bulletin d'information*, [En ligne]. <http://www.agrireseau.qc.ca/Rap/documents/b06gen08.pdf> (Page consultée le 1er mars 2010).

- Lambert, L. (2009). Outils innovateurs en PBI. *In* Agri-Réseau. *Horticulture ornementale – Serre*, [En ligne]. <http://www.agrireseau.qc.ca/horticulture-serre/documents/Innovative%20tools%20in%20IPM%20GREENSYS%2017juin09%20Final.pdf> (Page consultée le 12 juin 2010).
- Lambert, L. (2005). Des nématodes fort utiles en lutte biologique. *In* Agri-Réseau. *Horticulture ornementale – Serre*, [En ligne]. <http://www.agrireseau.qc.ca/horticulture-serre/documents/N%C3%89MATODES%20b%C3%A9n%C3%A9f%E2%80%A6ao%C3%BBt2005%20LL.pdf> (Page consultée le 25 mars 2010).
- Lambert, L. (2002). Le point sur l'utilisation de la lutte biologique et intégrée en serriculture ornementale au Québec. *Antennae*, vol. 9, no. 2, p. 16.
- Lambert, L. (2000a). Situation de la lutte biologique et intégrée au Québec. *In* Agri-Réseau. *Horticulture ornementale – Serre*, [En ligne]. <http://www.agrireseau.qc.ca/horticulture-serre/documents/LIETTE%20SITUATION%20LBIO%20QUEBEC%20COLL%202000%20Agrir%C3%A9seau.pdf> (Page consultée le 16 mars 2010).
- Lambert, L. (2000b). Partez gagnants. *In* Agri-Réseau. *Horticulture ornementale – Serre*, [En ligne]. <http://www.agrireseau.qc.ca/horticulture-serre/documents/PARTEZ%20GAGNANTS%20COL%20LBIO%202000%20Agrir%C3%A9seau.pdf> (Page consultée le 25 mars 2010).
- Lambert, L.; Cécylre, A.; Chouffot, T.; Johnson, S. et Roy, A. (2002). Survol de la lutte biologique et intégrée en serriculture ornementale au Québec. *In* Agri-Réseau. *Horticulture ornementale – Serre*, [En ligne]. <http://www.agrireseau.qc.ca/horticulture-serre/documents/IOBC%20Victoria%202002%20Situation%20de%20la%20lutte%20biologique%20.pdf> (Page consultée le 6 mai 2010).
- Leafy Spurge Stakeholders Group (s.d.). Control Methods. *In* Brandon University. *Leafy Spurge un Manitoba*, [En ligne]. <http://www2.brandonu.ca/organizations/rdi/LSSG/control.htm> (Page consultée le 28 février 2009).
- Lynch, L.D.; Hokkanen, H.M.T.; Babendreier, D.; Bigler, F.; Burgio, G.; Gao, Z.-H.; Kuske, S.; Loomans, A.; Menzler-Hokkanen, I.; Thomas, M.B.; Waage, J.K.; van Lenteren, J.C. et Zeng, Q.Q. (2001). Insect biological control and non-target effects: a European perspective. *In* Wajnberg, E.; Scott, J.K. et Quimby, P.C. (éd.), *Evaluating indirect ecological effects of biological control* (chap. 6, 99-125). Wallingford (RU), CABI Publishing.
- Maund, C. (1999). La punaise terne. *In* Ministère de l'Agriculture et de l'Aquaculture du Nouveau-Brunswick. *Agriculture pêche et Aquaculture*, [En ligne]. <http://www.gnb.ca/0171/20/0171200010-f.asp> (Page consultée le 2 mars 2010).

- McAuslane, H.J. (2009). *Bemisia tabaci* (Gennadius) or *Bemisia argentifolii* Bellows & Perring. In University of Florida Institute of Food and Agricultural Sciences. *Featured creatures*, [En ligne]. http://entomology.ifas.ufl.edu/creatures/veg/leaf/silverleaf_whitefly.htm (Page consultée le 25 février 2010).
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) (2010). Des actions pour le présent, une vision pour l'avenir. In Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. *Ministre et ministère*, [En ligne]. <http://www.mapaq.gouv.qc.ca/Fr/Ministere/> (Page consultée le 4 février 2010).
- Ministère de l'Environnement du Québec (MEQ) (2003). Synthèse des informations environnementales disponibles en matière agricole au Québec. In Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. *Milieu agricole*, [En ligne]. http://www.mddep.gouv.qc.ca/milieu_agri/agricole/synthese-info/synthese-info-enviro-agricole.pdf (Page consultée le 24 mars 2010).
- Murphy, G. (2000). État de la situation du contrôle biologique en serres en Amérique du nord. In Agri-Réseau. *Horticulture ornementale*, [En ligne]. <http://www.agrireseau.qc.ca/horticulture-serre/documents/Murphy%20Graeme%2000%E2%80%A6%20AGrir%C3%A9seau.pdf> (Page consultée le 30 juin 2010).
- Myers, J.H.; Simberloff, D.; Kuris, A.M. et Carey, J.R. (2000). Eradication revisited: dealing with exotic species. *TREE*, vol. 15, no. 8, p. 316-320.
- North Carolina State University – Department of Entomology (1997). Pesticide usage in the United States: history, benefits risks, and trends. In North Carolina State University. *Pesticide fact sheets*, [En ligne]. <http://ipm.ncsu.edu/safety/factsheets/pestuse.pdf> (Page consultée le 13 juin 2010).
- Obrycki, J.J.; Hardwood, J.D.; Kring, T.J. et O'Neil, R.J. (2009). Aphidophagy by Coccinellidae: Application of biological control in agroecosystems. *Biological control*, vol. 51, p. 244-254.
- Peng, S. (1983). Biological control - One of the fine traditions of ancient Chinese agricultural techniques. *Scientia Agricultura Sinica*, n° 1, p. 92-98.
- Pimentel, D. (2005). Environmental and economic costs of the application of pesticides primarily in the United-States. *Environment, Development and Sustainability*, vol. 7, p. 229-252.
- Pintureau, B. (2009). Utilisation de parasitoïdes. In Pintureau, B. (éd.), *La lutte biologique : Application aux arthropodes ravageurs et aux adventices* (Chapitre X, p. 175-189). Paris, Ellipses Éditions.
- Plant, R. et Freudenberger, D. (2005). Changes in Global Agriculture: A Framework for Diagnosing Ecosystem Effects and Identifying Response Options. In World Wildlife Fund. *WWF*, [En ligne]. http://assets.panda.org/downloads/wwf_mpo_final_submitted.pdf (Page consultée le 7 février 2010).

- Québec (2002). L'eau. La vie. L'avenir. Politique Nationale de l'Eau. *In* Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. *Eau*, [En ligne]. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/politique/politique-integral.pdf> (Page consultée le 22 mars 2010).
- Raymond, M. (1992). La lutte biologique contre les mammifères. *In* Vincent, C. et Coderre, D. (réd.), *La lutte biologique* (chap. 31, p. 573-583). Boucherville (Québec), Gaëtan Morin Éditeur.
- Réseau Biocontrôle (2006). Deux enquêtes sur l'attitude des canadiens. *Dossiers Biocontrôle*, janvier, p. 8.
- Réseau Biocontrôle (2005). Contrôle des vers blancs des pelouses à l'aide de nématodes. *Dossiers Biocontrôle*, mars, p. 5.
- Réseau Biocontrôle (s.d.). Qui sommes nous? *In* Réseau Biocontrôle. *Réseau Biocontrôle*, [En ligne]. http://www.biocontrol.ca/francais/start_s_f.html (Page consultée le 7 février 2010).
- Roy, H. et Wajnberg, E. (2008). From biological control to invasion: the ladybird *Harmonia axyridis* as a model species. *BioControl*, vol. 53, no. 1, p. 1-4.
- Santé Canada (2009a). Les pucerons. *In* Santé Canada. *Feuillets de renseignements sur les organismes nuisibles*, [En ligne]. http://www.hc-sc.gc.ca/cps-spc/pubs/pest/_pnotes/aphid-pucerons/index-fra.php (Page consultée le 23 février 2010).
- Santé Canada (2009b). Coccinelles. *In* Santé Canada. *Feuillets de renseignements sur les organismes nuisibles*, [En ligne]. http://www.hc-sc.gc.ca/cps-spc/pubs/pest/_pnotes/ladybug-coccinelle/index-fra.php (Page consultée le 23 février 2010).
- Santé Canada (2009c). La spongieuse. *In* Santé Canada. *Feuillets de renseignements sur les organismes nuisibles*, [En ligne]. http://www.hc-sc.gc.ca/cps-spc/pubs/pest/_pnotes/gypsy-spongieuse/index-fra.php (Page consultée le 24 février 2010).
- Santé Canada (2009d). *Bacillus thuringiensis* var. *kurstaki*. *In* Santé Canada. *Sécurité des produits de consommation*, [En ligne]. http://www.hc-sc.gc.ca/cps-spc/pubs/pest/_fact-fiche/btk/index-fra.php (Page consultée le 28 février 2010).
- S.C. Johnson (2007). Raid® – Insecticide pour la maison et le jardin (Étiquette). *In* Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire. *Information sur les produits*, [En ligne]. http://pr-rp.pmra-arla.gc.ca/PR_SOL/pr_web.ve2?p_ukid=6809 (Page consultée le 11 juin 2010).
- Service Canadien des Forêts (2001). La spongieuse. *In* Ressources Naturelles Canada. *Nouvelles express*, [En ligne]. <http://cfs.nrcan.gc.ca/nouvelles/264> (Page consultée le 25 février 2010).

- Sforza, R. (2009). Utilisation d'organismes phytophages. In Pintureau, B. (éd.), *La lutte biologique : Application aux arthropodes ravageurs et aux adventices* (Chapitre VII, p. 125-145). Paris, Ellipses Éditions.
- Skovmand, O. (2004). Le Bti pour contrôler les moustiques et les mouches noires. *Dossiers Biocontrôle*, décembre, p. 7.
- Smirnoff, W.A. (1991). Réflexion à propos de la lutte biologique contre les insectes nuisibles. In Essaid, A. (éd.), *La lutte anti-acridienne* (chap. 21, p. 279-287). Paris, Agence universitaire de la francophonie.
- Statistique Canada (2008). Espèces envahissantes très menaçantes au Canada. In Statistique Canada. *Publications*, [En ligne]. <http://www.statcan.gc.ca/pub/16-201-x/2007000/5212536-fra.htm> (Page consultée le 2 mars 2010).
- Système canadien d'information sur la biodiversité (2009). Informations sur l'intoxication : euphorbe ésole. In Système canadien d'information sur la biodiversité. *Système d'information sur les plantes toxiques*, [En ligne]. http://www.cbif.gc.ca/pls/pp/ppack.info?p_psn=38&p_type=all&p_sci=comm&p_x=p&p_lang=fr (Page consultée le 1^{er} mars 2010).
- Tabashnik, B.E. (1994). Evolution of resistance to *Bacillus thuringiensis*. *Annual review of entomology*, vol. 39, p. 47-79.
- Tailleux, P. (2009). Utilisation de nématodes parasites d'insectes. In Pintureau, B. (éd.), *La lutte biologique : Application aux arthropodes ravageurs et aux adventices* (Chapitre IX, p. 168-174). Paris, Ellipses Éditions.
- Todorova, S. et Weill, A. (2006). Production artisanale et utilisation du micro-champignon *Beauveria bassiana* pour le contrôle biologique des ravageurs de la pomme de terre. In Agri-Réseau. *Agriculture biologique*, [En ligne]. <http://www.agrireseau.gc.ca/agriculturebiologique/documents/Rapport%20final%20de%20recherche%20%20Beauv%C3%A9ria.pdf> (Page consultée le 11 juin 2010).
- Turnbull, A.L. et Chant, D.A. (1961). The practice and theory of biological control of insects in Canada. *Canadian journal of zoology*, vol. 39, p. 697-753.
- U.S. Congress, Office of Technology Assessment (1995). Biologically based technologies for pest control. In Princeton University. *Biologically based technologies for pest control*, [En ligne]. <http://www.princeton.edu/~ota/disk1/1995/9506/9506.PDF> (Page consultée le 20 janvier 2010).
- United States Department of Agriculture (USDA) (2010). Leafy spurge. In United States Department of Agriculture. *Species profile*, [En ligne]. <http://www.invasivespeciesinfo.gov/plants/leafyspurge.shtml> (Page consultée le 14 juin 2010).
- United States Department of Agriculture (USDA) (2005). USDA strategic plan for FY 2005-2010. In United States Department of Agriculture. *Office of the chief financial*

- officer*, [En ligne]. <http://www.ocfo.usda.gov/usdasp/sp2005/sp2005.pdf> (Page consultée le 5 février 2010).
- United States Department of Agriculture (USDA) (s.d.). Biocontrol research laboratories. In United States Department of Agriculture. *European biocontrol research laboratory*, [En ligne]. <http://www.ars-ebcl.org/PageUS/LinksBiocontrol.html> (Page consultée le 5 février 2010).
- University of California (1999). FAQs about whiteflies. In University of California. *Silverleaf whitefly information page*, [En ligne]. http://www.uckac.edu/whitefly/faqs_about_whiteflies.htm (Page consultée le 2 mars 2010).
- University of Nebraska – Lincoln (s.d.). Some *Steinernema carpocapsae* Images. In University of Nebraska – Lincoln. *Plant and Insect Parasitic Nematodes*, [En ligne]. <http://nematode.unl.edu/IMAGES/Scarp3j.jpg> (Page consultée le 12 juin 2010).
- Valent BioSciences (2008). DiPel® 2X DF Insecticide biologique (Étiquette). In Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire. *Information sur les produits*, [En ligne]. http://pr-rp.pmra-arla.gc.ca/PR_SOL/pr_web.ve2?p_ukid=5421 (Page consultée le 10 juin 2010).
- van Lenteren, J.C. (2008). IOCB Internet book of biological control. In International Organization for Biological Control. *Publications*, [En ligne]. <http://www.iobc-global.org/download/IOBC%20InternetBookBiCoVersion5January2008.pdf> (Page consultée le 12 mai 2010).
- van Lenteren, J.C.; Bale, J.; Bigler, F.; Hokkanen, H.M.T. et Loomans, A.J.M. (2006). Assessing risks of releasing exotic biological control agents of arthropod pests. *Annual review of entomology*, vol. 51, p. 609-634.
- Ville de Montréal (2006). Montréal sans pesticides : Combattre écologiquement les vers blancs. In Marketwire. *Press release*, 26 juillet, [En ligne]. <http://www.marketwire.com/press-release/Montreal-sans-pesticides-Combattre-ecologiquement-les-vers-blancs-605312.htm> (Page consultée le 2 mars 2010).
- Volkoff, A.-N. (2009). Utilisation des micro-organismes. In Pintureau, B. (éd.), *La lutte biologique : Application aux arthropodes ravageurs et aux adventices* (Chapitre VI, p. 92-124). Paris, Ellipses Éditions.
- Waage, J. (2004). La lutte biologique – Réaliser la promesse. *Dossiers Biocontrôle*, décembre, p. 1.
- Wagner, D.L.; Peacock, J.W.; Carter, J.L. et Talley, S.E. (1996). Field assessment of *Bacillus thuringiensis* on nontarget Lepidoptera. *Environmental entomology*, vol. 25, no. 6, p. 1444-1454.
- Weeden, C.R., Shelton, A.M. et Hoffman, M.P. (2007). *Biological Control: A Guide to Natural Enemies in North America*, [En ligne]. <http://www.nysaes.cornell.edu/ent/biocontrol/info/needstatus.html> (Page consultée le 3 décembre 2009).

- Weeden, C.R.; Shelton A.M. et Hoffmann, F.P. (s.d.a). *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae). In Cornell University. Biological control : A guide to natural enemies in north America, [En ligne].
<http://www.nysaes.cornell.edu/ent/biocontrol/predators/harmonia.html> (Page consultée le 24 février 2010).
- Weeden, C.R.; Shelton A.M. et Hoffmann, F.P. (s.d.b). *Encarsia formosa* (Hymenoptera : Aphelinidae). In Cornell University. Biological control : A guide to natural enemies in north America, [En ligne].
<http://www.nysaes.cornell.edu/ent/biocontrol/parasitoids/eformosa.html> (Page consultée le 26 février 2010).
- Weeden, C.R.; Shelton A.M. et Hoffmann, F.P. (s.d.c). Nematodes (Rhabditida: Steinernematidae & Heterorhabditidae). In Cornell University. Biological control : A guide to natural enemies in north America, [En ligne].
<http://www.nysaes.cornell.edu/ent/biocontrol/pathogens/nematodes.html> (Page consultée le 1er mars 2010).
- Weeden, C.R.; Shelton A.M. et Hoffmann, F.P. (s.d.c). Parasitoids. In Cornell University. Biological control : A guide to natural enemies in north America, [En ligne].
<http://www.nysaes.cornell.edu/ent/biocontrol/parasitoids/parasintro.html> (Page consultée le 26 février 2010).
- Winston, M.L. (1997). *Nature wars : people vs pests*. Cambridge, Harvard University Press, 210 p.
- Zimmermann, G. (2007). Review on safety of the entomopathogenic fungi *Beauveria bassiana* and *Beauveria brongniartii*. *Biocontrol Science and Technology*, vol. 17, no. 6, p. 553-596.

ANNEXE 1
CLASSES D'ORGANISMES LES PLUS UTILISÉES ET ÉTUDIÉES
COMME AUXILIAIRES DE LUTTE BIOLOGIQUE

(Compilation d'après Volkoff (2009, p. 102 et 110), Sforza (2009, p. 129-131), Grenier (2009, p. 147-152), Tailliez (2009, p. 169-170) et Pintureau (2009, p. 175-176))

Entomopathogènes

Bactéries (règne *Bacteria*)

- Ordre *Bacillales*
 - Famille *Bacillaceae*
- Ordre *Enterobacteriales*
 - Famille *Enterobacteriaceae*
- Ordre *Pseudomonadales*
 - Famille *Pseudomonaceae*

Champignons (embranchement *Ascomycota*)

- Ordre *Hypocreales*
 - Genres *Beauveria*, *Metarhizium*, *Nomurea*, *Verticillium*, *Paecilomyces*

Nématodes (embranchement *Nematoda*)

- Ordre *Rhabditida*
 - Familles : *Heterorhabditidae*, *Steinernematidae*

Prédateurs

Insectes (classe *Insecta*)

- Ordre *Coleoptera*
 - Familles : *Coccinellidae*, *Carabidae*, *Cicindelidae*, *Staphylinidae*, *Dytiscidae*
- Ordre *Heteroptera*
 - Familles : *Anthocoridae*, *Miridae*, *Pentatomidae*, *Nabidae*
- Ordre *Neuroptera*
 - Familles : *Chrysopidae*, *Hemerobiidae*, *Myrmeleontidae*
- Ordre *Diptera*
 - Familles : *Syrphidae*, *Cecidomyiidae*
- Ordre *Odonata*
- Ordre *Dermaptera*
- Ordre *Hymenoptera*
 - Familles : *Vespidae*, *Sphecidae*
- Ordre *Thysanoptera*
- Ordre *Dictyoptera*

Arachnides (classe *Arachnida*)

- Sous-classe *Acari*
 - Familles : *Phytoseiidae*, *Stigmaeidae*, *Trombidiidae*

Phytophage

Insectes (classe *Insecta*)

- Ordre *Coleoptera*
- Ordre *Lepidoptera*
- Ordre *Diptera*
- Ordre *Heteroptera*

Arachnides (classe *Arachnida*)

- Sous-classe *Acari*
 - Famille : *Eryophiidae*

Parasitoïdes

Insectes (classe *Insecta*)

- Ordre *Diptera*
 - Famille : *Tachinidae*
- Ordre *Hymenoptera*
 - Sous-ordre *Apocrita*
 - Super-familles : *Trygonalyoidea*, *Evanioidea*, *Ceraphronoidea*, *Chalcidoidea*, *Cynipoidea*, *Platygaстроidea*, *Ichneumonoidea*

ANNEXE 2

**TABLEAU RÉSUMÉ DE L'ANALYSE PAR OBJECTIFS DE
L'APPLICABILITÉ DE LA LUTTE BIOLOGIQUE AU QUÉBEC**

	Objectif	Atteinte
Pôle environnemental	Maintien de la biodiversité	Atteint
	Faible production de déchets et diminution de leurs impacts	Globalement atteint mais difficile à évaluer
	Faible production de gaz à effet de serre	Moyennement atteint mais difficile à évaluer
	Maintien ou amélioration de la qualité de l'air et de l'eau	Atteint
	Applicabilité et adaptation au climat québécois	Globalement atteint mais variable
Pôle économique	Applicabilité à faible coût	Peu atteint mais difficile à évaluer et variable
	Accessibilité des auxiliaires	Globalement atteint
	Efficacité contre les ravageurs	Atteint mais variable
	Bon rendement des cultures (quantité)	Atteint
	Bonne qualité des cultures	Moyennement atteint mais variable
	Effet durable	Atteint mais variable
	Apport de revenus pour les producteurs et distributeurs d'auxiliaires	Globalement atteint
	Valeur ajoutée aux aliments produits	Globalement atteint mais difficile à évaluer
Pôle social	Retombées économiques locales	Globalement atteint
	Potentiel de recherche et d'innovation	Atteint
	Amélioration de la santé	Atteint
	Facilité d'utilisation et acceptabilité pour les agriculteurs	Moyennement atteint
	Acceptabilité par les consommateurs	Moyennement atteint mais difficile à évaluer