Université du Québec
Institut National de la Recherche Scientifique
Institut Armand-Frappier

# ÉLABORATION D'UNE STRATÉGIE DE LUTTE CONTRE LE SCARABÉE JAPONAIS *POPILLIA JAPONICA* (NEWMAN) (COLEOPTERA: SCARABAEIDAE) EN PÉPINIÈRES

Par

François Giroux-Quesnel

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en microbiologie appliquée

**Jury d'évaluation**

| | |
|---|---|
| Président du jury et examinateur interne | Dr Philippe Constant<br>INRS-Institut Armand-Frappier |
| Examinateur externe | Dre Caroline Provost<br>Centre de recherche agroalimentaire de Mirabel |
| Directeur de recherche | Dr Claude Guertin<br>INRS-Institut Armand-Frappier |
| Codirecteur de recherche | Dr Robert Lavallée<br>Centre de Foresterie des Laurentides |

# REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier toutes les personnes qui ont contribué à l'élaboration de mon projet de recherche sur le scarabée japonais. La première personne que je dois remercier est le Dr Claude Guertin, qui m'a donné la chance de pouvoir faire ma maîtrise avec lui dans son laboratoire. J'aimerais aussi remercier toutes les personnes qui ont travaillé avec moi, soit dans le laboratoire ou sur le terrain, Galen Guo, Narin Srei, Valentin Popa ainsi que Vincent Mayrand. De plus, j'aimerais remercier toutes les personnes qui m'ont aidé à la pépinière publique de Berthierville : Marie-Josée Gilbert ainsi qu'Anne Déziel. En dernier lieu, j'aimerais aussi remercier Robert Lavallée du centre de foresterie des Laurentides ainsi qu'Éric Beauce de l'université Laval pour leur aide lors de la rédaction.

# RÉSUMÉ

La forêt fait partie intégrante de l'histoire, de la culture ainsi que de l'économie québécoise. Afin d'effectuer le reboisement, un approvisionnement en plants de qualité est vital pour l'industrie. Ainsi, les gestionnaires doivent compter sur les pépinières publiques et privées afin de fournir ces plants. Cependant, de nombreux insectes ravageurs vont limiter la production des plants en causant des dommages importants aux cultures. Depuis son introduction en 1998 au Québec, le scarabée japonais (*Popillia japonica*) est la cause de dommages chez une grande variété de plantes indigènes. L'utilisation d'insecticides chimiques devient nécessaire afin de limiter les dégâts causés par ce ravageur. Afin de diminuer les risques environnementaux ainsi que ceux liés à la santé humaine, l'élaboration d'une stratégie de lutte intégrée phytosanitaire devient essentielle.

Pour ce faire, un projet de recherche a été élaboré sur le scarabée japonais en mettant l'emphase sur deux points principaux, sa répartition dans l'espace ainsi que sa susceptibilité à des champignons entomopathogènes. Premièrement, la répartition spatiale des adultes a été déterminée en relation avec différentes caractéristiques environnementales du substrat. Pour ce qui est de cet objectif, nous avons pu constater que la présence des adultes était significativement influencée par différentes caractéristiques environnementales, telles que le type de sol, la présence de pelouse, la présence d'arbres et d'infrastructures ainsi que la présence de routes et de bâtiments. Cela nous a permis d'identifier la répartition spatiale du scarabée japonais sur le territoire d'une pépinière.

Deuxièmement, des bioessais ont été effectués chez les larves et les adultes à l'aide de champignons entomopathogènes afin de trouver un outil de lutte biologique. Ces bioessais ont permis de constater que les adultes ainsi que les larves du scarabée japonais sont susceptibles aux champignons entomopathogènes. En effet, les taux de mortalité des adultes à des isolats de *B. bassiana* et de *M. anisopliae* avoisinent les 60% tandis que les résultats des bioessais chez les larves sont peu concluants mais des tendances positives sur la pathogénicité de ceux-ci semblent être observées. Ces deux objectifs nous ont permis de développer les connaissances sur la répartition spatiale ainsi que sur la susceptibilité à des champignons entomopathogènes du scarabée japonais et de permettre l'établissement d'une stratégie de lutte phytosanitaire efficace.

Mots-Clés : Forêt, pépinières, scarabée japonais, *Popillia japonica*, champignons entomopathogènes, hypocréales, épreuves biologiques, répartition spatiale, lutte phytosanitaire, susceptibilité.

François Giroux-Quesnel

Claude Guertin

# ABSTRACT

The forest is an important part of history, culture and economy of Quebec. To conduct reforestation, a supply of good quality trees is necessary to this industry. Thus, managers must rely on public and private nurseries to provide these plants. However, many insects will limit plant production by causing serious damage to crops. Since its introduction in 1998 in Quebec, the Japanese beetle (*Popillia japonica*) is the cause of damage in a wide variety of native plants. The use of chemical insecticides is necessary to limit the damage from this pest. To reduce the environmental risks as well as those related to human health, developing an integrated pest control strategy becomes essential.

To do this, a research project was developed by focusing on two main points, the distribution in space and susceptibility to entomopathogenic fungi of the Japanese beetle. First, the spatial distribution of adults was determined in relation to environmental characteristics of the substrate. We found that the presence of adults was significantly influenced by various environmental aspects, such as the soil type, the presence of turf, trees and infrastructures. These results allowed us to develop knowledge on the Japanese beetle and allow the establishment of an effective pest control strategy.

Second, different bioassays were performed in adults and larvae with entomopathogenic fungi. These bioassays have shown that adults and larvae of Japanese beetles are susceptible to entomopathogenic fungi. Results show that isolates of *B. bassiana* and of *M. anisopliae* can cause the mortality of up to 60% of Japanese beetle's adults. For the larvae, results are inconclusive but trends on the pathogenicity can be made. These two objectives have enabled us to develop knowledge on the spatial distribution as well as susceptibility to entomopathogenic fungi of the japanese beetle and allow the establishment of a strategy for effective pest control.

Key-Words: Forest, tree nurseries, Japanese beetles, *Popillia japonica*, entomopathogenic fungi, hypocreales, bioassays, spatial distribution, pest control strategy, susceptibility.

## TABLE DES MATIÈRES

# LISTE DES TABLEAUX

# LISTE DES FIGURES

# ÉLABORATION D'UNE STRATÉGIE DE LUTTE CONTRE LE SCARABÉE JAPONAIS *POPILLIA JAPONICA* (NEWMAN) (COLEOPTERA: SCARABAEIDAE) EN PÉPINIÈRES

## SYNTHESE

# CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

## 1.1 Présentation de la problématique

Le scarabée japonais, *Popillia japonica* (Newman) est un insecte ravageur s'attaquant à plusieurs espèces de plantes, telles que les rosacées, les acéracées ainsi que les graminées. Les adultes et les larves sont polyphages et peuvent causer des dommages à plus de 300 espèces de végétaux (Keathley, 1998, Ladd, 1986, Potter *et al.*, 2002). Ainsi, ces dommages varient en fonction du stade de développement de l'insecte. Dans le cas des larves, les dégâts se trouveront principalement aux racines des plantes, notamment chez certaines espèces de graminées. Aux États-Unis, les dégâts causés par les larves sur la pelouse entraînent des coûts liés aux pertes évalués à plus de 450 millions de dollars annuellement (USDA/APHIS, 2000). Pour les adultes, les dommages se situent principalement sur les feuilles des plantes constituant leur principale source de nourriture. Considérant que les adultes de *P. japonica* ont un comportement d'agrégation, le niveau de défoliation des feuilles dépend du degré d'infestation qui est étroitement lié à la production de composés volatils par les plantes (Keathley *et al.*, 1999). Au Québec, l'émergence de cet insecte est un problème grandissant et des mesures de phytoassainisement doivent être développées et mises en place afin de diminuer son impact sur les plants forestiers en pépinières.

Le scarabée japonais est un insecte indigène du Japon et qui a été recensé pour la première fois sur le continent nord-américain en 1916 dans une pépinière du New Jersey (Gyeltshen *et al.*, 2005). Son introduction s'est probablement faite par l'arrivée de larves s'étant attachées aux rhizomes d'iris japonais, *Iris japonica* (Dickerson *et al.*, 1918). Depuis, ce ravageur s'est répandu dans presque tout l'est des États-Unis et occupe maintenant plus de 30 états (Gyeltshen *et al.*, 2005) (figure 1.1). Au Canada, les premières populations importantes du scarabée japonais ont été répertoriées en 1998 dans le sud de deux provinces limitrophes des États-Unis, l'Ontario et le Québec. Depuis, l'aire de distribution de l'insecte s'étend de plus en plus vers le nord avec des individus repérés jusqu'à la région de Québec (A.C.I.A, 2009).

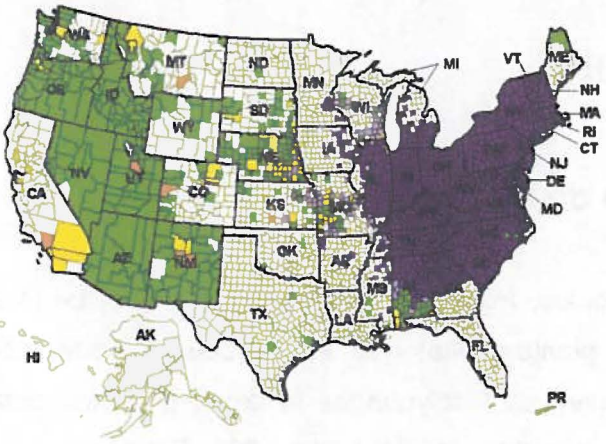


**Figure 1.1 Carte de distribution du scarabée japonais aux États-Unis (www.pest.ceris.purdue.edu).** La période de temps couvert par l'inventaire est en 2006. signifie une présence établie par consensus, signifie une présence établie par sondage, signifie que l'insecte a été éradiqué, signifie que l'insecte a été détecté, signifie que l'insecte n'a pas été trouvé, signifie que le sondage est en cours et signifie qu'aucun sondage a été effectué.

Mondialement, l'insecte est aussi présent au Portugal sur les îles Terceira où il se serait échappé d'une base militaire américaine (Potter *et al.*, 2002). Certaines sources affirment que l'aire endémique de ce coléoptère inclurait la Russie ainsi que la Chine (Allsopp, 1996). Toutefois, la partie continentale de l'Europe, le Royaume-Uni, l'Irlande, une partie de la Chine, l'ouest des États-Unis ainsi que d'autres régions offrent des conditions climatiques qui sont propices à l'établissement de ce ravageur (Smith *et al.*, 1997). La présence du scarabée japonais dans ces pays entraînerait des coûts économiques et environnementaux très importants afin de lutter contre celui-ci. L'établissement de ce ravageur au Canada force les gouvernements ainsi que les institutions en place à développer des programmes de lutte phytosanitaire afin de contrôler ce ravageur.

La forêt fait partie intégrante de l'histoire, de la culture ainsi que de l'économie canadienne et québécoise. Dans le contexte de l'exploitation de la ressource aux fins industriels et afin d'en assurer sa pérennité, la mise en place de programmes de sylviculture basés sur le reboisement a été effectuée. Ces programmes de régénération artificielle sont nécessaires afin de pallier aux carences des processus naturels de rétablissement des forêts et afin d'augmenter la production d'arbres par unité de surface. Cependant, le nombre de plants disponibles pour le reboisement est souvent un facteur limitant. Dans ce contexte, des investissements, tant du secteur privé que public, ont été consentis afin d'assurer un approvisionnement de plants de bonne qualité. Au Québec, les activités de reboisement impliquent près de douze pépinières forestières publiques

et une vingtaine de pépinières privées qui ont comme mandat d'assurer l'approvisionnement en plants forestiers. Les pépinières publiques québécoises sont situées dans différentes régions, notamment à Berthierville, à Grandes-Piles, à Normandin, à Sainte-Luce, à Saint-Modeste et à Trécesson. En 2003, pour ces pépinières, l'objectif annuel de production pour le reboisement avoisinait les 150 millions de plants résineux et feuillus (MNRF, 2003b). La pépinière de Berthierville est la plus importante productrice de plants avec en moyenne 4,2 millions de plants produits chaque année (MNRF, 2003a). De ce nombre, 3,2 millions de plants sont produits en récipients et un million en racines nues.

La présence d'importantes zones de monocultures dans ces plantations forestières augmente les risques de voir apparaître de nouvelles problématiques entomologiques. Ainsi, les productions forestières en pépinières peuvent être compromises par la présence de nombreux insectes ravageurs s'attaquant aux différentes espèces végétales présentes. Au Québec, les principaux insectes ravageurs en pépinières sont la chenille à houppes, *Orgyia leucostigma*, (s'attaquant principalement au sapin baumier), le charançon de la racine du fraisier, *Otiorhynchus ovatus*, (généraliste, mais ciblant différents conifères) ainsi que la punaise terne, *Lygus lineolaris,* qui peut s'attaquer à près de 385 espèces de plantes (Bonneau *et al.*, 1997). Étant donné les impératifs commerciaux de ces pépinières, les stratégies de lutte phytosanitaire s'appuient principalement sur l'utilisation d'insecticides chimiques. Toutefois, les risques pour la santé humaine, animale et environnementale liés à l'utilisation des pesticides chimiques sont la prémisse au développement d'alternatives biologiques. L'utilisation d'agents de lutte biologique est une option de recherche intéressante étant donné les faibles effets adverses sur l'environnement.

# CHAPITRE 2 :
# REVUE DE LA LITTÉRATURE

## 2.1 Biologie du scarabée japonais

Le scarabée japonais, *Popillia japonica* Newman, est un coléoptère faisant partie de la famille des Scarabaeidae et de la sous-famille des Melolonthinae. L'adulte mesure de 8 à 11 mm de long et de 5 à 7 mm de largeur. Son corps est vert métallique et ses élytres sont d'une couleur brun cuivre (Fleming, 1972) (Figure 2.1). Pour sa part, la larve est translucide avec une couleur blanc crème et elle adopte la forme caractéristique du « C » lorsqu'elle est au repos (Gyeltshen *et al.*, 2005). Les adultes ont une espérance de vie de 30 à 45 jours et leur activité de vol est favorisée lorsque la température environnante excède les 21 °C (Gyeltshen *et al.*, 2005). Aux États-Unis, ce coléoptère est univoltin (une génération par année) pour la majorité de son aire de distribution (Fleming, 1972). Cependant, dans certaines régions plus froides du nord-est des États-Unis, en Ontario et au Québec, l'insecte semblerait avoir un cycle de développement semivoltin (une génération à chaque deux ans) (Vittum, 1986). Son cycle de développement semble être influencé par la latitude, l'altitude et les variations climatiques annuelles (Fleming, 1972). Dans le sud des États-Unis, l'émergence des adultes a lieu au mois de mai, tandis qu'elle a lieu en juin et juillet pour les insectes se trouvant dans le nord des États-Unis (Potter *et al.*, 2002). Dans le sud du Québec, l'émergence des adultes prend place à la fin juin (F. Giroux-Quesnel, observations personnelles). Le ratio d'émergence des mâles et des femelles a été estimé à 1:1 (Potter *et al.*, 2002).

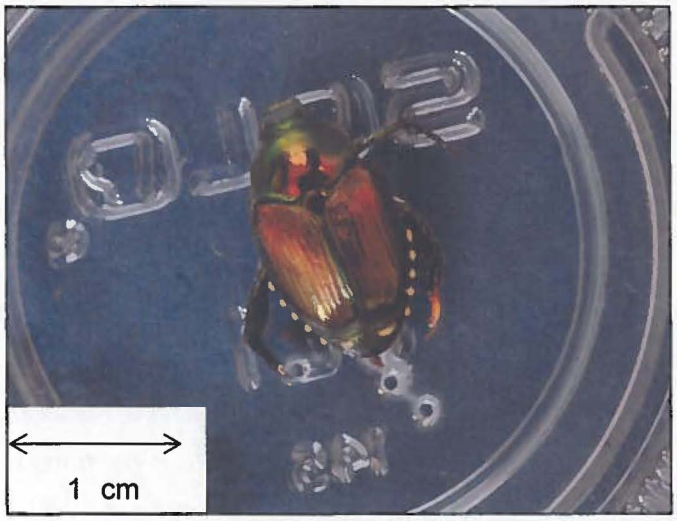


**Figure 2.1 Photographie d'un scarabée japonais récolté à la pépinière de Berthierville.**

## 2.2 Impact et dommages du scarabée japonais

Une des problématiques importantes avec l'arrivée du scarabée japonais réside dans le fait que les larves ainsi que les adultes causent des dégâts très importants à des plants d'importance économique. Sur la base du type de dommages que les adultes causent sur les feuilles, on classe cet insecte parmi les ravageurs squelettineux. En effet, après la défoliation, seules les nervures et les veines demeurent intactes donnant une forme de squelette aux feuilles (figure 2.2). Quant à elles, les larves causent d'importants dégâts aux racines de nombreuses plantes, notamment des graminées. Depuis son introduction sur le continent nord-américain, le scarabée japonais semble s'être très bien adapté aux conditions environnementales. Il est maintenant considéré comme un des plus importants ravageurs compte tenu de l'ampleur des dommages qu'il cause à plusieurs plantes d'importance économique. Aux États-Unis, *P. japonica* s'est vite retrouvé sur la liste des ravageurs causant le plus de dégâts aux pelouses ainsi qu'à plusieurs espèces de plantes ornementales (Vittum *et al.*, 1999). En effet, plus de 450 millions de dollars sont investis à chaque année dans ce pays, afin de lutter contre les populations de cet insecte et pour remplacer les plants endommagés (USDA/APHIS 2000). L'utilisation importante d'insecticides de synthèse est nécessaire afin de contrôler les populations de ce ravageur et cela tant pour les larves que pour les adultes (Potter *et al.*, 1991).

**Figure 2.2 Dégâts causés par des adultes s'alimentant sur une feuille de peuplier hybride.**

## 2.3 Alimentation du scarabée japonais

Le scarabée japonais est un insecte généraliste. En effet, les adultes et les larves ont une alimentation polyphage, puisqu'ils s'attaquent à une grande variété de plantes. Les adultes se nourrissent de fleurs, de fruits ainsi que de feuilles de plus de 300 espèces de végétaux (Potter *et al.*, 2002). Parmi les différentes familles de plantes affectées, on peut mentionner les acéracées, les graminées, les rosacées, les salicacées ainsi que les tiliacées. Cette capacité de s'alimenter sur plusieurs hôtes assurerait la survie de l'espèce et expliquerait sa capacité à s'adapter à de nouveaux environnements (Keathley, 1998, Ladd, 1986).

Le choix des plantes-hôtes par les adultes de *P. japonica* semble être lié à la composition phytochimique de certains composés volatils (Ahmad, 1982). En effet, les composés émettant une odeur florale ou de fruits seront généralement très attirants pour les adultes (Fleming, 1969). Les dommages foliaires causés par les insectes durant leur alimentation induiraient la

libération de composés volatils qui favoriseraient un comportement d'agrégation chez les adultes de *P. japonica*. Cela a été démontré par Loughrin et ses collaborateurs (1996) lors d'essais avec des feuilles saines et endommagées chez quatre cultivars de pommiers (*Malus* spp.). Différents composés ont été identifiés, dont des terpènes, des composés aliphatiques ainsi que des composés aromatiques. Chez les plantes affectées, ces composés seraient plus complexes que ceux émis par les plantes saines (Loughrin *et al.*, 1995, Loughrin *et al.*, 1996, Loughrin *et al.*, 1997b).

La sélection des plantes hôtes par les insectes serait aussi basée sur la perception de certains stimuli se trouvant à la surface des feuilles (Ladd, 1986). Selon cette étude, la chémioréception de certains sucres tels que le saccharose, le maltose, le fructose et le glucose seraient les principaux stimuli. La concentration de ces substances serait aussi un facteur influençant le choix d'une plante par rapport à une autre. Par contre, certaines substances peuvent avoir des propriétés répulsives chez le scarabée japonais. La cucurbitacine des cucurbitacées et la neriifoline chez le laurier rose (*Nerium oleander*) sont deux substances répulsives ayant été identifiées (Potter *et al.*, 2002). La concentration des différents répulsifs expliquerait pourquoi certaines plantes phylogénétiquement proches et certains cultivars résisteraient mieux aux attaques par *P. japonica*. En résumé, la concentration et la composition de certains composés phytochimiques initieraient ou inhiberaient le comportement alimentaire des adultes du scarabée japonais. Ainsi, cette composition du feuillage ferait en sorte qu'une plante aurait des propriétés attractives et d'autres répulsives pour l'insecte.

## 2.4 Cycle de développement

La connaissance du comportement de reproduction du scarabée japonais est un élément important à l'établissement d'un programme de lutte efficace. De façon générale, les mâles émergent du sol quelques jours avant les femelles. Peu de temps après leur sortie du sol, ces dernières produisent des phéromones sexuelles, substances volatiles très attractives pour les mâles (Fleming, 1972, Ladd, 1970). Ainsi, il n'est pas rare d'observer une agrégation de mâles autour d'une femelle afin de se reproduire. La phéromone émise par les femelles est la (Z)-5-(1-decenyl)dihydro-2(3H)-furanone. Lorsque les femelles sont accouplées, la production de cette phéromone cesse (Klein, 1981, Tumlinson *et al.*, 1977). Peu de temps après l'accouplement et cela avant même de s'alimenter, les femelles commencent leur comportement de ponte (Régnière *et al.*, 1979). L'oviposition dure trois jours et, par la suite, les femelles s'alimentent avant de reprendre le comportement d'accouplement avec d'autres mâles (Fleming, 1972,

Loughrin *et al.*, 1997a). Les femelles seraient en mesure de faire alterner les périodes d'alimentation et d'oviposition pendant quatre à six semaines. La capacité de ponte d'une femelle serait de 40 à 60 œufs par période de ponte. Les femelles pondent leurs œufs un par un dans le sol à une profondeur de 7,5 cm sur des sites caractérisés par une humidité moyenne à élevée, exposés au soleil et couverts de gazon (Fleming, 1972, Potter *et al.*, 2002).

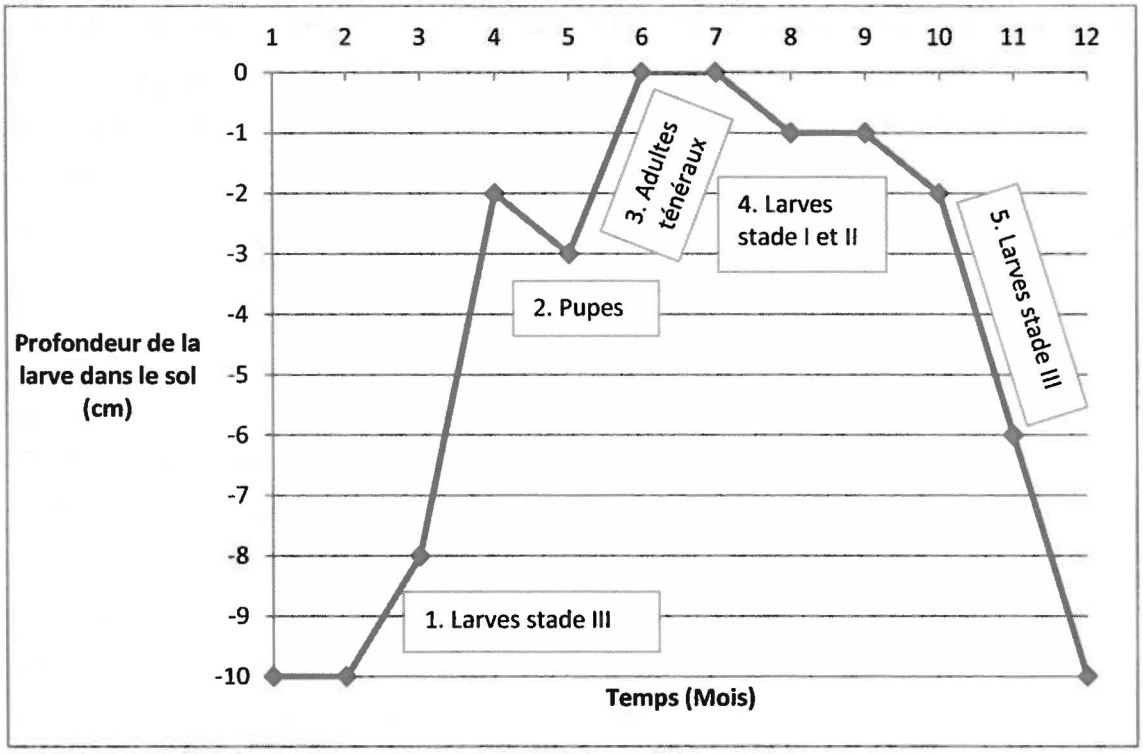


**Figure 2.3 Représentation graphique du cycle de vie larvaire du scarabée japonais (Fleming, 1972, Potter *et al.*, 2002).**

Le cycle de vie du scarabée japonais est relativement bien documenté (figure 2.3). Au printemps, lorsque les températures augmentent, les larves de troisième stade commencent à effectuer une remontée vers la surface (Fleming, 1972) (figure 2.3, *1. Larves stade III*). Elles reprennent alors leur alimentation durant quatre à huit semaines, après quoi elles s'enfoncent de nouveau dans le sol. C'est à ce moment que la métamorphose des larves est engagée et qui conduira à la formation des adultes (Fleming, 1972, Vittum, 1986) (figure 2.3, *2. Pupes*). Cette métamorphose des larves débutera par la formation d'un stade prépupal qui durera une dizaine de jours. Par la suite, le stade pupal s'étendra sur une période de 7 à 17 jours et culminera par

l'émergence des adultes ténéraux (figure 2.3, 3. *Adultes ténéraux*) (Fleming, 1972). Les adultes ténéraux se caractérisent par un exosquelette mou et pâle. La sclérification de la cuticule se fera dans les heures suivant la métamorphose en adultes. Ces derniers restent dans le sol de 2 à 14 jours avant d'émerger et d'entreprendre le comportement de reproduction. Après une période d'incubation des œufs, qui dure entre 10 à 14 jours, le premier stade larvaire du scarabée japonais éclot (Fleming, 1972). Le développement de ces derniers s'échelonne sur une période de deux à trois semaines avant qu'une mue se produise et qui donnera le deuxième stade qui prend place durant trois à quatre semaines (Fleming, 1972) (Figure 2.3, *4. Larves stade I et II*). Par la suite, ces larves subissent une autre mue qui donnera des larves de troisième stade, forme dans laquelle les insectes passeront l'hiver (Figure 2.3, *5. Larves stade III*). L'activité des larves cessera lorsque la température du sol atteindra près de 10 °C. Afin de se protéger du froid, les larves s'enfonceront dans le sol et certaines larves atteindront une profondeur de 25 cm (Gyeltshen *et al.*, 2005, Potter *et al.*, 2002).

Il est important de mentionner quelques particularités du comportement sexuel du scarabée japonais. Ainsi, l'activité sexuelle des femelles peut être considérée comme de la polyandrie puisque les femelles peuvent s'accoupler avec plusieurs mâles (Barrows *et al.*, 1978, Fleming, 1972). Du même coup, les mâles ont un comportement dit de polygynie puisqu'ils peuvent s'accoupler avec plusieurs femelles. De plus, les mâles démontrent un comportement de protection de l'investissement génétique après l'accouplement. En effet, les géniteurs restent agrippés aux femelles pendant plusieurs heures après la copulation afin de s'assurer que leurs spermes ne soient pas déplacés par d'autres mâles (Saeki *et al.*, 2005a). Par contre, ce temps de garde serait réduit lorsque la température est élevée et la lumière est présente (Saeki *et al.*, 2005a, Saeki *et al.*, 2005b). Ces facteurs augmenteraient la température thoracique interne des insectes et diminueraient leur contenu en eau obligeant les mâles à libérer les femelles afin d'assurer leur protection. Dans le cas où un combat éclaterait entre deux mâles afin de se reproduire avec la même femelle, Kruse et Switzer (2007) ont identifié deux facteurs qui en détermineraient l'issue. Premièrement, si un mâle était déjà en train de protéger son sperme en montant la femelle, il a de fortes chances de sortir victorieux du combat. Deuxièmement, la taille du mâle semblerait aussi jouer un rôle dans l'issue du combat. Cependant, ce facteur serait moins important que le premier.

## 2.5 Activité du scarabée japonais

L'activité et le temps de vol du scarabée japonais semblent être influencés par les conditions environnementales. En effet, la température, l'humidité, la radiation solaire et le vent sont autant de facteurs pouvant affecter le vol des adultes (Fleming, 1972, Lacey *et al.*, 1995a). Les conditions optimales pour le vol seraient une température se situant entre 29 et 35 °C, une humidité relative supérieure à 60 %, une vitesse des vents inférieure à 20 km/h et une radiation solaire supérieure à 25 kJ $m^{-2}$ $min^{-1}$. À l'inverse, une couverture nuageuse dense, des vents importants et de la pluie empêcheront les insectes de prendre leur envol (Fleming, 1972, Lacey *et al.*, 1995a, Vittum, 1986). Selon Kreuger et Potter (2001), les insectes seraient plus actifs du début de la matinée jusqu'au milieu de l'après-midi, et ce, tant que la température excède les 15 °C. Sur le terrain, les plants situés en plein soleil subissent plus de dommages que ceux situés à l'ombre (Rowe *et al.*, 2000). Cependant, même si ce ravageur s'alimente sur les plants situés en plein soleil, les insectes se tiennent sur la partie inférieure ou abaxiale des feuilles afin de réguler leur température, notamment lorsque les températures sont élevées (Kreuger *et al.*, 2001). De plus, les adultes du scarabée japonais seraient en mesure d'autoréguler leur température thoracique, soit par la production de chaleur endogène ou par un refroidissement par évaporation (Kreuger *et al.*, 2001, Oertli *et al.*, 1990).

## 2.6 Répartition spatiale du scarabée japonais

Lors de l'élaboration et la mise en place d'un programme de lutte intégrée contre un insecte ravageur, la distribution de celui-ci sur le territoire est un élément important à considérer. Ainsi, l'application d'insecticides biologiques ou chimiques pourra être plus efficace en ciblant les endroits où se retrouvent les ravageurs. Cela permettrait de limiter les impacts environnementaux à la faune et la flore, notamment en ce qui concerne les espèces non ciblées (Potter *et al.*, 2002).

L'information disponible sur la répartition spatiale du scarabée japonais est peu abondante. Parmi les quelques rares études disponibles, Hamilton et ses collaborateurs (2007) ont étudié les populations du scarabée japonais en milieu semi-urbain. Ils ont pu constater que la population de ce ravageur est plus importante sur les terres agraires comparées à d'autres types de terrain tels que la forêt ou les terrains résidentiels. De plus, ils ont montré que les adultes de *P. japonica* avaient tendance à pondre leurs œufs dans le sol près des cultures présentant des espèces végétales qui favoriseraient leur alimentation. En effet, les femelles sembleraient

démontrer une préférence pour les sols où poussent le seigle et le trèfle comme sites de ponte assurant un développement optimal des larves. Par contre, Szendrei et Isaacs (2005), ont démontré que les plus grandes densités d'adultes seraient associées aux cultures du sarrasin, tandis que les plus faibles densités seraient associées aux cultures du seigle. On peut constater que le scarabée japonais va favoriser une espèce de plante pour son oviposition et une autre pour son alimentation. Ainsi, le sarrasin, qui est une plante beaucoup plus grande (50-60 cm) comparée au seigle et au trèfle (10-30 cm), pourrait créer une barrière entre les adultes et le sol empêchant par le fait même l'oviposition. Il est important de mentionner que le sol nu n'était presque jamais choisi par les femelles comme site d'oviposition (Szendrei *et al.*, 2005). Les données provenant de cette étude nous permettent de comprendre la répartition spatiale du scarabée japonais dans un cas particulier où différentes espèces de cultures sont utilisées. Donc, il serait possible d'expliquer et de prédire la présence du scarabée et d'orienter les traitements vers les cultures les plus infestées.

## 2.7 Stratégie de lutte contre les populations de *P. japonica*

La lutte contre le scarabée japonais est relativement difficile. Plusieurs facteurs peuvent constituer des obstacles à l'élaboration d'une stratégie phytosanitaire efficace. Premièrement, la quantité d'insectes présents sur les sites ferait en sorte que le traitement des adultes, que ce soit par capture ou traitement chimique, est pratiquement impossible et peu efficace. De plus, les adultes sont très mobiles comparés aux larves ce qui entraîne des difficultés afin de contrôler les deux stades au même endroit (Potter *et al.*, 2002). Deuxièmement, la difficulté à localiser les larves rend difficile le traitement compte tenu du temps requis et de l'énergie devant être investis pour lutter contre ce stade de l'insecte.

Devant l'explosion démographique de cet insecte dans différentes régions à travers le monde, de nombreux efforts de recherche sont déployés afin de développer des stratégies de lutte chimique et biologique capables de limiter les dégâts.

### 2.7.1 Pièges et phéromones

La surveillance des populations du scarabée japonais se fait à l'aide de pièges appelés « *Yellow Japanese Beetle Trap* » (figure 2.4). Afin d'attirer le scarabée japonais, ces pièges doivent être combinés à des phéromones d'attraction. Ces phéromones émettent des molécules qui seront transmises par le vent. À l'aide des chémorécepteurs présents sur leurs antennes, les

insectes captent ces odeurs et remonteraient le panache d'odeur jusqu'au piège. Plusieurs molécules ont été synthétisées afin de reproduire des phéromones spécifiques naturelles du scarabée japonais et celles-ci ont été testées en laboratoire et sur le terrain (Held *et al.*, 2012). Ainsi, on a pu observer que le scarabée japonais était attiré principalement par des odeurs florales ou par des odeurs de fruits (Potter *et al.*, 1992). Selon Ladd et ses collaborateurs (1981), des études ont permis d'identifier une combinaison de substances ayant une influence sur deux comportements de l'insecte, soit le comportement alimentaire avec un composé favorisant l'attraction et le comportement de reproduction avec une substance attirant les mâles. L'attraction nutritive serait induite par un mélange de propionate phénéthyle, d'eugénol et de géraniol dans une proportion de 3:7:3. Pour sa part, l'attraction reproductive serait induite par une molécule synthèse similaire à la phéromone sexuelle du scarabée japonais appelée Japonilure (Ladd *et al.*, 1980). Ces deux phéromones combinées agissent en synergie et permettent de capturer plus d'individus que les deux phéromones séparées (Ladd *et al.*, 1981).

**Figure 2.4 Pièges pour capturer le scarabée japonais. La partie supérieure est de couleur jaune afin d'attirer les adultes. Ceux-ci vont frapper la partie supérieure et tomber dans le récipient aéré vert.**

L'utilisation de pièges visant la protection de certaines cultures d'importance économique a été évaluée dans certaines études (Fleming, 1976, Klein, 1981). Cela a permis de constater que l'utilisation de pièges aurait peu d'effets sur la protection des plantes si la population du scarabée japonais est déjà établie. De même, une étude suggère que la défoliation de certains plants pourra être plus élevée en présence de pièges (Potter *et al.*, 2002, Switzer *et al.*, 2009). Sur la base des informations connues, les pièges devraient être utilisés pour le monitorage des populations et pourraient s'avérer efficaces pour maintenir au plus bas les populations endémiques. En effet, certaines régions, telles que la Californie, mettent en place un réseau de plus de 10 000 pièges chaque année afin de pouvoir détecter l'arrivée possible du scarabée japonais et de contrer son établissement (Potter *et al.*, 2002). Selon cette même étude, des pièges pourraient aussi être utilisés en combinaison avec des agents biologiques, notamment avec des champignons entomopathogènes, afin de permettre l'autodissémination des spores et par le fait même l'autocontamination et le contrôle des populations de *P. japonica.*

### 2.7.2 Lutte intégrée

Il existe plusieurs moyens de contrer les insectes ravageurs. La lutte intégrée peut être définie comme le contrôle des insectes ravageurs par une utilisation rationnelle et écologiquement responsable de méthodes biologiques, chimiques, biotechnologiques, physiques ou culturales en ayant comme objectif de limiter les pertes économiques au niveau des plants ayant une importance agriculturale (Potter *et al.*, 2002). Un total de cinq principales méthodes de lutte contre le scarabée japonais seront abordées, à savoir la stérilisation massive, le contrôle cultural, l'utilisation d'antiappétant produits par les plantes, l'utilisation d'insecticides et la lutte biologique et microbiologique. Toutefois, dans le cas du scarabée japonais, deux types d'approches à risque réduit pour l'environnement peuvent être considérés soit la lutte biologique et la lutte mécanique. Une attention particulière sera accordée à la lutte biologique et microbiologique, puisqu'elle est en lien avec l'un des objectifs de cette étude.

### 2.7.3 Stérilisation des individus

La stérilisation est une méthode qui intervient sur la capacité de reproduction d'une population d'insectes. Cette méthode de lutte consiste à empêcher la reproduction des ravageurs en les stérilisants à l'aide de produits chimiques ou de moyens physiques. La fumigation et l'application topique de chimiostérilisateurs sur les insectes, ainsi que l'exposition à

des rayons gamma sont les techniques communément utilisées (Fleming, 1976, Ladd, 1966). Une des approches consiste à mettre les femelles de *P. japonica* en contact direct avec un produit chimiostérilisateur (Ladd, 1966). Les œufs de ces femelles seront alors non viables. Selon cette même étude, des mâles peuvent aussi être soumis à ces mêmes produits. Lorsqu'ils s'accoupleront avec des femelles non exposées, la reproduction sera impossible. Par contre, si ces mêmes femelles s'accouplent de nouveau avec des mâles non exposés, elles pourront pondre des œufs viables

Un exemple de ce type de lutte contre le scarabée japonais a été effectué aux États-Unis. Un relâchement de 235 000 mâles stériles a été effectué au Tennessee afin de tenter de contrôler une petite population établie de *P. japonica* (Ladd *et al.*, 1972). Un des effets de cette introduction s'est traduit par une augmentation du ratio de mâles stériles par rapport aux mâles normaux avec, comme conséquence, une augmentation du nombre de femelles stériles au sein de la population. Cependant, malgré cette intervention, la progression de l'infestation des populations du scarabée japonais s'est poursuivie.

### 2.7.4 Contrôle cultural

Le contrôle cultural regroupe différentes approches de luttes mécaniques qui sont basées sur la biologie du scarabée japonais en fonction des cultures environnantes. Il existe plusieurs exemples de méthodes simples pouvant avoir des impacts significatifs sur les populations locales de *P. japonica*. Ainsi, sachant que les femelles préfèrent des sites humides pour l'oviposition, une diminution de l'irrigation sur les sites propices à la ponte des œufs pourrait détourner les femelles vers d'autres secteurs (Potter et al., 1996). Cela permettrait éventuellement de réduire la présence de larves dans le sol et ainsi diminuerait les dégâts sur des cultures comme la pelouse.

Un autre exemple de contrôle cultural consisterait à augmenter la taille de la coupe du gazon à 18 cm et à l'application de sulfate d'ammonium afin d'acidifier le sol (Potter et al., 1996). Ces pratiques simples pourraient avoir un impact en diminuant l'abondance des larves dans le sol. Selon Smitley (1996), la diminution de la surface gazonnée aux pourtours des pépinières pourrait aider à diminuer les dégâts sur les cultures. En effet, l'abondance des larves du scarabée japonais était beaucoup plus importante sur les sites recouverts de pelouse que dans les autres champs. Il est aussi intéressant de constater que ce ravageur peut être influencé par l'historique des cultures au champ (Potter *et al.*, 2002). Le labourage ainsi que la présence de plusieurs espèces de plantes dans le champ réduiraient le nombre d'insectes. Ainsi, on a

remarqué que dans les champs de fèves de soya, les adultes du scarabée japonais étaient plus abondants si la culture précédente était du maïs (Hammond *et al.*, 1987). On a aussi constaté que la densité des adultes était plus faible dans les champs de fève de soya, s'ils étaient entrecoupés de plants de sorghos (Holmes *et al.*, 1997). Ces résultats mettent en évidence une capacité des scarabées japonais à identifier les meilleurs sites pour s'alimenter et se reproduire.

### 2.7.5 Substances dissuasives

Bien que ce ravageur soit généraliste dans son alimentation, la susceptibilité de certaines plantes peut varier en fonction de l'espèce. Différentes expériences ont été réalisées afin de documenter l'hypothèse voulant que certaines plantes puissent être résistantes. Des essais de criblage ont permis d'identifier certains composés phytochimiques pouvant avoir des effets dissuasifs sur les adultes et les larves de scarabée japonais (Potter *et al.*, 2002). Parmi ces composés, certains peuvent avoir des effets toxiques chez les adultes et les larves. Par exemple, des extraits de neem (*Azadiracha indica*) contenant le limonoïde azadirachtine ont démontré une capacité à repousser ce coléoptère de façon très importante (Ladd *et al.*, 1978). De même, l'application topique de ce limonoïde a causé la mort ou des difformités chez les larves ainsi que des problèmes de développement chez les adultes (Ladd *et al.*, 1984). Toutefois, l'application sur le terrain de ce composé ou de toutes autres substances provenant de plantes (poivre de Cayenne, extraits d'ail) n'a démontré aucun effet significatif sur la réduction des populations d'adultes et de larves du scarabée japonais (Witt *et al.*, 1999).

### 2.7.6 Lutte chimique

La lutte contre les populations du scarabée japonais en pépinières s'appuie presque exclusivement sur l'utilisation d'insecticides chimiques. Ceux-ci sont principalement utilisés lors d'infestations du ravageur afin de réduire rapidement les populations et de limiter les dégâts aux plants. Pour le contrôle des populations larvaires qui se trouveraient dans le sol, une application à la surface est préconisée suivie d'une irrigation afin de permettre aux produits insecticides de pénétrer profondément (Potter, 1998, Potter *et al.*, 1991). Aux États-Unis, les principaux insecticides utilisés contre les larves sont l'imidaclopride, un analogue de la chloronicotinyle ainsi que l'halofenozide, un antagoniste de l'ecdystéroide bisacylhydrazine (Potter *et al.*, 2002). Ces produits sont persistants dans l'environnement et peuvent être appliqués en prophylaxie, car ils sont très actifs contre les premiers stades larvaires (Cowles *et al.*, 1999, Potter, 1998). Il

semble que ces composés ne soient pas toxiques pour les vertébrés et cela pourrait les rendre intéressants pour l'utilisation sur les pelouses (Cowles *et al.*, 1999). Un autre insecticide est parfois utilisé contre les larves, il s'agit du RH 5849 qui agit comme antagoniste de l'ecdysone diacylhydrazine et qui entrainerait une perte de poids et un arrêt de l'alimentation chez les individus (Monthean *et al.*, 1992). Pour lutter contre les adultes, l'application précoce du Carbaryl est préconisée sur les feuilles ou les fleurs affectées par l'insecte (Potter, 1998). Ce produit est notamment utilisé à la pépinière de Berthierville pour tenter de lutter contre le scarabée japonais.

Cependant, l'utilisation de ces insecticides comporte de nombreux désavantages. Du point de vue économique, l'utilisation des insecticides chimiques est très dispendieuse, car elle se doit d'être répétée à chaque infestation avec des volumes relativement élevés. De plus, l'utilisation des produits chimiques peut exercer une pression sélective sur les adultes de *P. japonica*, ce qui augmenterait le risque du développement d'une résistance aux insecticides chez certains individus. Pour ce qui est de la santé environnementale, plusieurs de ces produits chimiques sont persistants et peuvent causer des dégâts à long terme sur des plantes et des arthropodes non visés. Finalement, du côté de la santé humaine, le nombre de maladies causées par l'utilisation de ces produits chimiques est relativement important et des pressions sont exercées afin de permettre le développement de produits de lutte qui auraient moins d'impact sur les humains (Alarcon *et al.*, 2005).

### 2.7.7 Lutte biologique

La lutte biologique consiste en l'utilisation d'agents biologiques afin de permettre le contrôle des populations d'insectes ravageurs ou nuisibles. Différents agents biologiques peuvent être utilisés dont les parasitoïdes, les prédateurs et les pathogènes (Jourdheuil *et al.*, 1992). Les pathogènes comprennent tous les agents microbiologiques, notamment les champignons, les bactéries, les virus ou les protozoaires. Pour ce qui est du scarabée japonais, presque toutes ces catégories d'agents biologiques ont été étudiées et de nombreux exemples existent dans la littérature quant à leur efficacité.

### 2.7.8 Parasitoïdes

Aux États-Unis, les premières tentatives de lutte biologique contre le scarabée japonais ont été effectuées à l'aide de parasitoïdes, notamment par l'utilisation d'insectes et de nématodes

(Fleming, 1968). Ainsi, dans le nord des États-Unis, il y a eu un relâché de 49 ennemis naturels du scarabée japonais afin de vérifier si une espèce serait en mesure de s'établir et de contrer ce ravageur. Parmi les individus relâchés, trois ont été en mesure de persister et de s'établir, notamment deux guêpes tiphiidées et une mouche tachiniidée (Fleming, 1968). *Tiphiia vernalis* et *T. popilliavora* sont deux parasitoïdes capables respectivement de s'attaquer aux larves présentes dans le sol au printemps et à la fin de l'été. Pour sa part, la mouche *Istocheta aldrichi* peut parasiter les adultes qui viennent d'émerger. Bien qu'elles aient été identifiées, aucune de ses espèces n'a fait l'objet d'études afin de démontrer leur efficacité à réduire les populations de *P. japonica.* Il semble que leur action soit périodique et inopinée ce qui complexifie leur intégration dans des stratégies de lutte.

D'autre part, des études ont démontré l'efficacité de certains nématodes dans la lutte contre les populations du scarabée japonais. Les nématodes *Steinernema glaseri* et *Heterorhabditis bacteriophora* se sont révélés utiles dans la lutte contre les larves se trouvant dans des pelouses et dans des plants en récipients en pépinières (Alm *et al.*, 1992, Wright *et al.*, 1988). Cependant, les larves sont en mesure de se défendre contre ces parasitoïdes. Ainsi, on a pu observer qu'elles pouvaient se nettoyer les pattes, les appendices buccaux et les différents poils lorsqu'elles perçoivent la présence des nématodes sur leur cuticule (Gaugler *et al.*, 1994). L'alcalinité du tractus digestif chez les larves de *P. japonica* et la présence de protéases pourrait affecter l'établissement des nématodes. De plus, les larves auraient développé un comportement d'évitement suggérant qu'elles sont en mesure de percevoir la présence des parasitoïdes. Finalement, il y aurait une forme de réponse immunitaire dans l'hémolymphe des larves de *P. japonica*, puisque l'on y retrouve des stigmates qui formeraient une barrière morphologique qui empêcherait l'établissement des nématodes.

L'utilisation de nématodes sur le terrain est assujettie à plusieurs facteurs qui peuvent compromettre leur efficacité. Premièrement, du point de vue commercial, le coût élevé, la faible disponibilité, le court temps de résidence sur les tablettes ainsi que le manque de connaissances des utilisateurs par rapport à l'entreposage font en sorte que la commercialisation et l'utilisation est difficile (Georgis *et al.*, 1991, Klein, 1993). Deuxièmement, du point de vue pratique, l'utilisation sur le terrain des nématodes peut être compromise par la température élevée, l'humidité du sol et l'exposition aux radiations solaires (Georgis *et al.*, 1991, Gilmore *et al.*, 1993). Cependant, il existe des isolats qui pourraient être relativement persistants dans l'environnement ainsi qu'efficaces contre les larves telles que *Steinernema kushidai* (Koppenhofer *et al.*, 2000b). En somme, l'utilisation de nématodes seuls pour lutter contre les populations du scarabée japonais serait une option peu intéressante. Cependant, son utilisation

combinée à d'autres moyens de lutte biologique ou chimique semble intéressante étant donné l'action synergique qui semble exister (Koppenhofer *et al.*, 2000a).

### 2.7.9 Utilisation de prédateurs

L'utilisation de prédateurs afin de lutter contre le scarabée japonais a aussi été considérée. En effet, différents prédateurs généralistes peuvent être en mesure de causer des diminutions dans les populations du scarabée japonais. Certaines espèces de fourmis, de carabidés, de staphylinidés ainsi que certains mammifères (ratons laveurs, taupes) seraient en mesure de trouver les larves de ce coléoptère afin de s'en alimenter (Lopez *et al.*, 2000, Zenger *et al.*, 2001a, Zenger *et al.*, 2001b). Cependant, ces différents prédateurs n'ont jamais été considérés comme des outils de lutte biologique. En effet, les connaissances sur le sujet relèvent davantage en tant qu'observations sur la susceptibilité du scarabée japonais face à ces différents prédateurs.

### 2.7.10 Agents de lutte microbiologique

La lutte microbiologique contre le scarabée japonais comprend un grand nombre d'agents répartis parmi les bactéries et les champignons. Plusieurs bactéries ont été étudiées afin de déterminer si certaines étaient en mesure de contrôler les populations du scarabée japonais. Parmi celles-ci, deux ressortent pour leur potentiel, soit *Paenibacillus popillae* et *Bacillus thuringiensis*. Deux bactéries, *P. popillae* et *P. lentimorbus* faisant partie de la famille des paenibacillacées, sont responsables de la maladie laiteuse (*Milky Spore Disease*) chez les larves du scarabée japonais (Klein, 1992). La bactérie *P. popillae* entrerait dans le système digestif des larves lorsqu'elles s'alimentent et qu'elles ingèrent des particules du sol. Une fois dans le tractus digestif, ces bactéries germent et les cellules végétatives migrent vers l'hémocoele, la cavité interne des insectes. Le symptôme de la maladie se traduit par une diminution de la teneur en gras chez les larves et éventuellement l'établissement d'une bactériémie. La maladie laiteuse doit son nom au fait que la larve une fois infectée va devenir d'une couleur blanc translucide. Cette couleur particulière de l'hémolymphe est due aux spores réfringentes et aux corps parasporal qui se forment durant les derniers stades de l'infection (Potter *et al.*, 2002). Aux États-Unis, des applications de ces bactéries ont déjà été effectuées afin d'évaluer la possibilité de les utiliser comme agents de contrôle des populations larvaires. De façon générale, la bactérie *P. popillae* s'est montrée efficace pour lutter contre les larves.

Cependant, les effets à moyen terme de ces applications demeurent limités, puisque l'on observe le retour des populations aux mêmes densités durant les années subséquentes (Potter *et al.*, 2002). Ces résultats suggèrent une perte de la virulence ou à une diminution de la persistance des bactéries dans l'environnement des insectes (Potter *et al.*, 2002). De plus, le manque de connaissances sur les méthodes de sporulation *in vitro* de la bactérie *P. popillae* limite grandement la production. En fait, les bactéries du genre *Paenibacillus* sont considérées comme des outils pouvant affecter les populations larvaires. Elles pourraient s'intégrer dans un programme de lutte intégré contre ce ravageur.

D'autre part, des souches de la bactérie *B. thuringiensis* sont reconnues pour être efficaces contre de nombreuses espèces d'insectes. Un isolat, *B. thuringiensis* serovar *japonenesis* souche Buibui, est actif contre les larves du scarabée japonais et pourrait permettre de lutter contre les populations larvaires (Potter *et al.*, 2002). Bisby et collaborateurs (2007) ont fait la démonstration de son efficacité lors d'applications de différentes concentrations variant entre 300 à 593 g/ha sur différents sites infestés par l'insecte. Selon ces auteurs, la commercialisation de ce produit est retardée par la présence sur le marché d'insecticides chimiques synthétiques aussi efficace, mais relativement moins cher.

### 2.7.11 Champignons entomopathogènes

Plusieurs espèces de champignons entomopathogènes pourraient théoriquement être en mesure de contrôler les populations du scarabée japonais. Les champignons entomopathogènes faisant partie de la classe des hypocréales, tels que les genres *Beauveria, Metarhizium, Tolypocladium, Lecanicillium, Verticillium* et *Paecilomyces* pourraient être de bons candidats. Certaines études ont démontré l'efficacité de *B. bassiana* et de *M. anisopliae* contre les adultes et les larves de *P. japonica* (Hanula *et al.*, 1988, Hanula *et al.*, 1991, Lacey *et al.*, 1995a, Lacey *et al.*, 1995b). De plus, dans le cas de *M. anisopliae*, les individus inoculés ne mourraient pas avant quelques jours, ce qui permettait d'envisager le développement d'une technique d'autodissémination des spores et, par conséquent, l'autocontamination des individus au sein d'une population (Klein *et al.*, 1999, Lacey *et al.*, 1995a, Lacey *et al.*, 1994b). Toutefois, compte tenu du nombre élevé d'isolats, des tests de criblage doivent être effectués afin d'identifier les candidats, parmi les différentes espèces d'hypocréales (Klein *et al.*, 1999, Lacey *et al.*, 1995a), les plus efficaces.

### 2.7.12 Caractéristiques générales

Les champignons entomopathogènes sont des eucaryotes qui possèdent une paroi cellulaire chitineuse. Ils se présentent sous forme de cellules individuelles ou plus couramment sous forme d'hyphes formant le mycélium où les cellules sont rangées les unes près des autres. Les champignons utilisés en lutte biologique font partie des deutéromycètes et plus particulièrement des hypocréales. Ceux-ci peuvent se reproduire par des spores asexuées ou sexuées, mais la reproduction asexuée est la plus fréquente chez les hypocréales (Rossman, 1996).

*B. bassiana* est le champignon entomopathogène le plus répandu à travers le monde et peut infecter un très grand nombre d'espèces d'insectes (Lozano-Gutiérrez *et al.*, 2008). Ce champignon a été notamment utilisé pour lutter contre les populations de scarabée japonais, de doryphores de la pomme de terre (*Leptinotarsa decemlineata*) ainsi que chez les hannetons européens (*Rhizotrogus majalis*) (Krueger *et al.*,1990, Potter *et al.*, 2002, Todorova *et al.*, 2000). Ce champignon entomopathogène se reproduit de façon asexuée et les spores produites sont supportées par des hyphes d'un diamètre de 2,5 à 25 µm (Sabbahi, 2008). En conditions aérobies, il y aura production de conidiospores sphériques (1-4 µm) et lorsque les conditions sont anaérobies, il y aura production de blastospores ovales (2-3 µm) (Lipa, 1975). Il est toutefois important de mentionner que ces deux formes sont aussi infectieuses l'une que l'autre.

*B. brongniartii* est un autre hypocréale largement distribué, toutefois moins commun que *B. bassiana* (Zimmermann, 2007). En Europe, certains isolats sont retrouvés naturellement chez le hanneton commun, *Melolontha melolontha*, ainsi que chez le hanneton des bois, *M. hippocastani*. Toutefois, différents isolats ont été trouvés chez plusieurs ordres, tels que les homoptères, les lépidoptères, les coléoptères, les hyménoptères, et chez les orthoptères.

*M. anisopliae* est un champignon très abondant dans le sol et qui affecte un grand nombre d'insectes (Zimmermann, 1993). En effet, les conidies aériennes sont en mesure d'infecter et de contrôler plusieurs espèces d'insectes fouisseurs, notamment l'otiorhynque de la vigne (*Otiorhynchus sulcatus*), le charançon des agrumes (*Diaprepes abbreviatus)* et certains chrysomelidées (*Diabrotica* spp.) (Krueger *et al.*, 1992, Krueger *et al.*, 1997). Il est important de mentionner que la pathogénicité de *M. anisopliae* est affectée par la température et le contenu en eau du sol (Krueger *et al.*, 1991).

*V. lecanii* est un des champignons entomopathogènes les plus utilisés pour le contrôle des populations de certains hémiptères de la famille des Aleyrodidés (mouche blanche) et des

homoptères, tels que les pucerons (Fatiha *et al.*, 2008). En effet, *V. lecanii* a été testé chez plusieurs espèces de pucerons et son efficacité a été notamment démontrée chez le puceron noir de la luzerne (*Aphis craccivora*) ainsi que chez le puceron du merisier à grappes (*Rhopalosiphum padi*) (El-Gawad *et al.*, 2008, Hsiao *et al.*, 1992).

### 2.7.13 Mode d'infection des hypocréales

Les champignons entomopathogènes hypocréales peuvent causer la mort des insectes de deux façons, soit par asphyxie ou par inanition (Boucias *et al.*, 1988). L'asphyxie est causée par la multiplication du champignon dans la cavité thoracique de l'insecte. Lorsque le mycélium se multiplie, il est en mesure de prendre toute la place dans l'hémocoele de l'insecte. Cela a comme effet de diminuer la place disponible pour les fonctions physiologiques de l'insecte et lorsque toute la place est prise par le champignon, l'insecte ne sera pas en mesure de survivre.

Le deuxième facteur pouvant causer la mort des insectes est l'inanition. Une combinaison de facteurs tels que la déplétion des nutriments, l'invasion des organes ainsi que la toxicose causée par différents métabolites peuvent mener à la mort des insectes (Boucias *et al.*, 1988). Les différents métabolites toxiques produits par les hypocréales sont nombreux. Ainsi, la beauvericine, la bassianolide, la cyclosporine, l'isarolide, le beauverolide et l'oosporéine ont déjà été identifiés et certains de ces composés peuvent avoir des effets antibactériens, antifongiques et insecticides. Ces différents métabolites vont aider le champignon à s'établir dans son hôte en inhibant les mécanismes de défense immunitaire, accélérant ainsi le processus d'infection (Hajek *et al.*, 1994).

Contrairement aux différents agents de lutte biologique tels que le *B. thuringiensis*, les nématodes, les virus et les protozoaires qui doivent être ingérés afin d'être activé, l'infection par les hypocréales est dite de contact puisqu'ils requièrent uniquement l'attachement des conidies à la cuticule de l'insecte (Clarkson *et al.*, 1996). Les différentes phases de contamination peuvent être résumées en quatre étapes : l'adhésion, la germination, la pénétration ainsi que la dissémination (Figure 2.5).

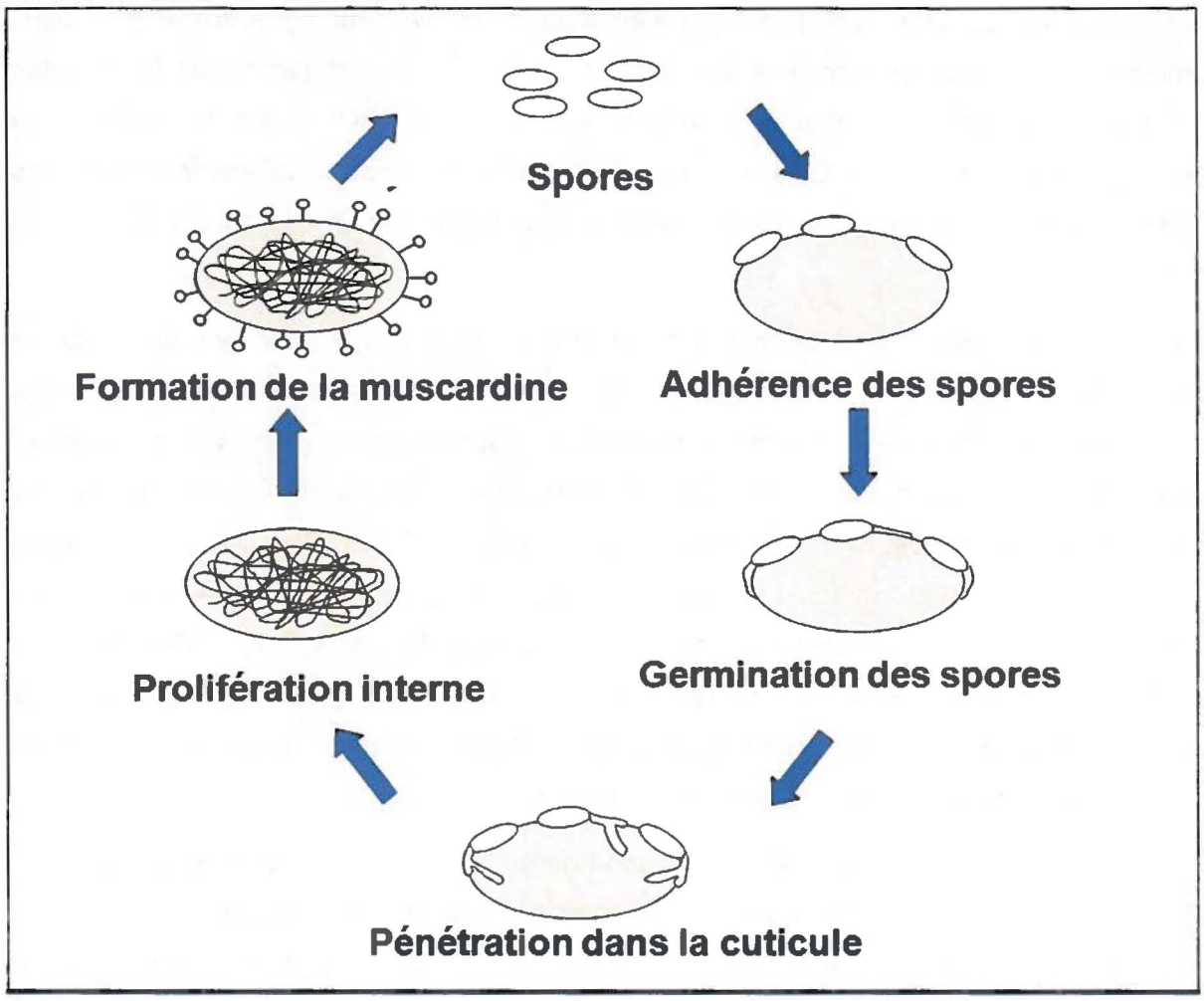


**Figure 2.5 Schéma d'infection chez les hypocréales.**

L'adhésion est la première étape du processus de contamination des insectes par les hypocréales. Elle se déroule de façon passive avec des agents de transport tels que l'eau ou l'air. Il est nécessaire de rappeler que les particules permettant l'infection chez les hypocréales sont des conidies aériennes ou des blastospores. Il semble exister des mécanismes de reconnaissance entre la spore et son hôte qui permettraient son adhésion sur le tégument de l'insecte. Les conidies et les blastospores auraient aussi la possibilité de pénétrer par les voies respiratoires et la cavité orale (Holder *et al.*, 2005). Une fois la spore adhérée à la cuticule de l'insecte, la prochaine étape sera la germination de celle-ci.

La germination est une étape par laquelle les spores commencent à préparer le processus de pénétration de la cuticule des insectes. En effet, cette étape va dépendre de la condition physique de l'hôte ainsi que des conditions environnementales telles que l'humidité et la température (Shah *et al.*, 2003). Cette étape conduit à la formation de structures terminales, les appressoria, chez les spores qui faciliteront l'ancrage sur la cuticule et joueront un rôle dans la pénétration.

La pénétration des spores permet à celles-ci de s'introduire à l'intérieur du corps de l'insecte à l'aide d'une pression mécanique ainsi que par activité enzymatique. Lorsque la spore est en présence d'un taux élevé d'azote et de carbone, l'appressorium va pouvoir s'allonger et formera un hyphe (St Leger *et al.*, 1992). Ce sont les hyphes fongiques qui seront en mesure de percer la cuticule de l'insecte avec différentes enzymes extracellulaires telles que des protéases, des lipases ainsi que des chitinases (Hajek *et al.*, 1994). Toutefois, ce sont les protéases qui semblent jouer le rôle le plus important dans ce processus (St Leger, 1993). Ces enzymes agiraient sur la structure de la cuticule, l'affaiblissant et facilitant le passage des hyphes qui atteindront l'hémocoele. Une fois la barrière physique de la cuticule passée, les champignons se développent avant d'atteindre la phase de dissémination.

La dissémination va permettre au champignon de se propager dans l'environnement. Pour ce faire, le champignon va proliférer dans les organes de l'insecte et se propager sous forme de blastospores. Lorsque le champignon va avoir colonisé tout le corps de l'insecte, il va tenter de chercher un moyen de sortir vers l'extérieur. Donc, le mycélium va tenter de sortir par les parties les plus molles de la cuticule de l'insecte. Une fois sorti de la cuticule, le mycélium va coloniser l'extérieur de l'insecte en formant un feutrage blanc, surnommé muscardine blanche pour ce qui est du *B. bassiana* (Figure 2.6). Par la suite, les hyphes produiront des conidies aériennes afin de permettre la poursuite du cycle de vie de ce champignon dans l'environnement.

**Figure 2.6. Scarabée japonais présentant les effets de la muscardine blanche.**

### 2.7.14 Utilisation des hypocréales

L'un des principaux avantages à l'utilisation d'hypocréales en lutte biologique est que ceux-ci sont considérés comme très généralistes en ce qui a trait à leurs hôtes. En effet, les hypocréales, tels que *B. bassiana,* peuvent affecter un grand nombre d'ordres d'insectes. Toutefois, il existe différents isolats qui possédant des caractéristiques qui leur sont très spécifiques. Effectivement, différents isolats d'hypocréales se démarquent par leur pathogénicité, la variabilité de leur hôte ainsi que par leurs effets sur les populations non ciblées. Afin de travailler avec ces isolats, il est nécessaire d'effectuer des épreuves biologiques, telles que des criblages, qui permettront de déterminer les caractéristiques propres de chacun. Cela permet de trouver des isolats qui auront peu d'effets adverses sur l'environnement tout en étant pathogène pour l'insecte cible.

Les champignons entomopathogènes possèdent très peu d'effets indésirables pour la santé humaine, animale et pour l'environnement (Althouse *et al.*, 1997, Faria *et al.*, 2001). L'innocuité de ces agents de lutte biologique est de plus en plus un facteur important pour les personnes responsables du contrôle des insectes ravageurs. En effet, il est très important que les produits utilisés possèdent le moins d'effets adverses pour les manipulateurs, car ils sont en contact direct avec ces produits. Un des derniers grands avantages à l'utilisation d'hypocréales réside dans le fait que le taux de développement de résistance par les insectes devrait être plus faible que pour les insecticides chimiques. Effectivement, étant donné que ces agents fongiques tuent les insectes de façon mécanique par pénétration à travers la cuticule, le risque de développement de résistance est beaucoup plus faible, car la pression de sélection évolutive est peu présente. Ce fait combiné à celui de l'évolution constante des champignons entomopathogènes, fait en sorte qu'ils sont une alternative viable à long terme comme agents de lutte (Potter *et al.*, 2002).

L'emploi d'hypocréales est associé à certains désavantages qui peuvent freiner leur intégration dans les régies de lutte contre le scarabée japonais. En effet, parmi ceux-ci, il existe d'importantes variations dans la pathogénicité et la virulence de certains isolats testés en laboratoire et sur le terrain. La pathogénicité peut être définie comme étant la capacité d'un pathogène de causer une maladie, tandis que la virulence va en définir le degré. En fait, les conditions sous-optimales, comme une humidité faible, une exposition aux rayons ultra-violets, la faible persistance sur le feuillage, qui peuvent se présenter en condition naturelle font en sorte que certains isolats peuvent voir leur pathogénicité diminuer et même être inactivée (Leland *et al.*, 2005). Toutefois, parmi tous ces facteurs, celui le plus important affectant le temps de persistance des conidies dans l'environnement est la quantité de rayons ultra-violets reçus. Le champignon est moins persistant s'il est constamment sous les rayons du soleil (Inglis, 1993, Sabbahi, 2008). En effet, les conidies de *B. bassiana* possèdent une demi-vie de deux jours lorsqu'elles sont directement exposées au soleil comparée à six jours en conditions de laboratoire (Inglis *et al.*, 2001, Sabbahi, 2008).

D'autres facteurs environnementaux tels que la température et l'humidité peuvent jouer des rôles importants pour trois fonctions physiologiques des hypocréales : le pourcentage de survie, le pourcentage de germination ainsi que le taux d'infection (Fargues *et al.*, 1997, Ouedraogo *et al.*, 1997, Vidal *et al.*, 1997). En effet, il semble qu'un taux d'humidité élevé favoriserait la conidiogenèse et la transmission horizontale des champignons entomopathogènes (Walstad *et al.*, 1970). De plus, la température idéale permettant l'activité optimale des hypocréales devrait se situer entre 20 °C et 25 °C (Inglis *et al.*, 2001). Tous ces facteurs devront être pris en compte

afin de déterminer si l'application et l'utilisation de champignons hypocréales pathogènes sont réalisables en conditions environnementales.

### 2.7.15 Production des champignons hypocréales pathogènes

Les hypocréales peuvent être produits de plusieurs façons, soit en milieu solide sur des grains de céréales enfermés dans des sacs en plastique, en fermentation liquide ou en fermenteurs semi-solides (Feng *et al.*, 1994). La production en milieu solide sera favorisée, car elle possède l'avantage de produire des conidies aériennes résistantes à la dessiccation. La fermentation liquide est moins dispendieuse à réaliser, cependant elle possède le désavantage de produire plus de blastospores qui seront moins résistants en conditions environnementales (Feng *et al.*, 1994).

## 2.8 Statistiques utilisées dans le projet

L'étude des variables environnementales pouvant influencer la présence ou l'absence des scarabées japonais sur un site implique l'acquisition d'une somme importante de données. En considérant le nombre important de caractéristiques descriptives pouvant être recueillies, il est nécessaire de recourir à des outils d'analyses statistiques permettant de réduire leur nombre en les intégrant à des composantes principales (variables artificielles) capables d'expliquer la majorité des variations observées. Ce type de traitement statistique est appelé analyse en composantes principales (SAS, 2011).

L'analyse en composante principale est une analyse permettant de réduire le nombre de variables en les présentant dans un espace réduit. Toutefois, ce type d'analyse ne peut être utilisé que si l'on croit qu'il existe un certain degré de redondance dans nos données. Cette redondance serait explicable par le fait que les données mesurées seraient corrélées ensemble et qu'elle représenterait un angle différent du même aspect. Donc, il serait possible de rassembler certaines de ces variables en composantes principales qui pourraient expliquer la majorité de la variation obtenue.

Toutefois, il est important de comprendre ce que représente une composante principale. Il s'agit d'une « combinaison linéaire de variables observées dont le poids statistique est optimal ». Cela veut dire que les variables possèdent un poids statistique et que les composantes principales vont expliquer le maximum de variance possible et qu'elles seront orthogonales les unes par rapport aux autres. L'expression « combinaison linéaire » veut simplement dire que les

scores des composantes sont créés par l'addition des scores des variables observées de façon linéaire (SAS, 2011).

Étant donné les différents exemples présents dans la littérature, on pourrait penser que le nombre de composantes principales retenues lors d'une analyse de ce type est de deux. Toutefois, le nombre total de composantes principales correspond au nombre de variables observées. Cependant, le nombre de composantes principales retenues afin de procéder à l'interprétation des données correspond à celles expliquant le plus de variance possible. Par conséquent, ce nombre correspond généralement à deux ou trois composantes principales.

La première composante principale est celle qui expliquera le maximum de variance possible pour les variables observées. Par conséquent, cette première composante principale sera corrélée avec quelques-unes des variables mesurées. Pour ce qui est de la deuxième composante principale, elle expliquera le restant de la variance qui n'était pas expliqué par la première composante principale. De plus, cette deuxième composante principale sera corrélée fortement avec des variables alors qu'ils ne l'étaient pas avec la première. Il est important que cette composante ne soit absolument pas corrélée avec la première composante (*i.e.* orthogonale). Donc, les composantes principales subséquentes vont expliquer le maximum de variance, mais elles ne devront jamais être corrélées l'une avec l'autre (SAS, 2011).

Afin d'aborder le côté plus pratique de l'analyse en composantes principales, certaines conditions doivent être respectées. Premièrement, il est préférable que chacune des composantes principales soit influencée par un minimum de trois variables. Cela permet d'assurer la validité du test statistique. De plus, l'augmentation du nombre de variables associé à une composante principale va, par le fait même, augmenter sa validité. Deuxièmement, étant donné que l'analyse en composantes principales est un test requérant un grand échantillon, il est nécessaire que celui-ci soit d'au moins 100 individus ou de cinq fois le nombre de variables mesurées. Ces recommandations agissent à titre de minimum absolu et une augmentation du nombre d'individus améliorera la validité de l'analyse en composantes principales (SAS, 2011).

## 2.9 Hypothèses et objectifs

L'objectif général de ce projet de recherche est de déterminer une stratégie de lutte efficace afin de contrer le scarabée japonais en pépinières. Afin de répondre à cet objectif général, deux hypothèses ont été émises et deux objectifs spécifiques tenteront d'y répondre. La première hypothèse de ce projet de recherche stipule que la répartition spatiale du scarabée japonais est

influencée par des variables environnementales. Cette première hypothèse sera testée par un premier objectif visant une meilleure compréhension des facteurs environnementaux pouvant influencer la répartition spatiale du scarabée japonais à la pépinière de Berthierville. La deuxième hypothèse stipule que les larves ainsi que les adultes du scarabée japonais sont susceptibles à des isolats de champignons hypocréales. Afin de répondre à cette hypothèse, le deuxième objectif de ce projet sera de déterminer la susceptibilité des adultes ainsi que des larves du scarabée japonais à différents isolats de champignons hypocréales en utilisant des épreuves biologiques telle que le criblage. Cette approche devrait permettre d'identifier les meilleurs candidats pour le développement d'outils de lutte sécuritaire et efficace contre ce ravageur à la pépinière de Berthierville qui est sérieusement affectée par cet insecte.

Pour ce qui est de notre premier objectif, nous avons installé 117 pièges répartis de façon systématique sur tout le territoire de la pépinière de Berthierville au courant de l'été 2008 afin de déterminer la densité de la population d'adultes du scarabée japonais. Par la suite, nous avons mesuré plusieurs variables environnementales entourant chacun de ces pièges afin de déterminer si certains facteurs environnementaux pouvaient avoir un effet sur la répartition de la population. Ces données ont ensuite été analysées à l'aide d'une analyse en composantes principales afin de pouvoir rassembler les variables similaires ensemble. Cela nous a permis de constater que les trois premières composantes principales permettent d'expliquer un total de 64.06 % de la variation totale présente dans nos données. Les principales conclusions nous permettent de constater que la présence de forêts, d'infrastructures ou de plants en récipients défavorisait la présence du scarabée japonais. Par ailleurs, les terres en jachère ainsi que les plants en racines nues favorisaient la présence des adultes.

Pour notre deuxième objectif, nous avons déterminé la susceptibilité des adultes ainsi que des larves du scarabée japonais à plusieurs hypocréales. Pour effectuer les épreuves biologiques, nous avons récolté les larves à même le sol de la pépinière et les adultes ont été prélevés dans les pièges déjà disposés. Un total de deux épreuves biologiques a été effectué, un sur les adultes et un sur les larves avec six espèces d'hypocréales *(B. bassiana, B. brongniartii, M. anisopliae, V. muscarium* et *V. longisporum)*. Les épreuves biologiques sur les adultes ont été effectuées avec 19 isolats et ceux sur les larves ont été réalisées avec 17 isolats. Ces épreuves biologiques nous ont permis de constater que les adultes sont susceptibles à des isolats d'hypocréales. En effet, les adultes sont susceptibles à certains isolats de *B. bassiana* et de *M. anisopliae*. Toutefois, les épreuves biologiques avec les larves n'ont pas permis d'établir avec précision la susceptibilité des insectes aux champignons hypocréales. L'intégration de ces

informations permettra éventuellement de développer des outils de lutte phytosanitaire efficaces contre les populations du scarabée japonais en pépinières.

# ÉLABORATION D'UNE STRATÉGIE DE LUTTE CONTRE LE SCARABÉE JAPONAIS *POPILLIA JAPONICA* (NEWMAN) (COLEOPTERA: SCARABAEIDAE) EN PÉPINIÈRES

## ARTICLES

# CHAPITRE 3 :

# SEASONAL FLIGHT AND SPATIAL DISTRIBUTION OF THE JAPANESE BEETLE ADULTS, POPILLIA JAPONICA (NEWMAN) (COLEOPTERA: SCARABAEIDAE) IN A TREE NURSERY.

# DISTRIBUTION SPATIALE ET VOL SAISONNIER DU SCARABÉE JAPONAIS (*POPILLIA JAPONICA* (NEWMAN) (COLEOPTERA : SCARABAEIDAE) DANS UNE PÉPINIÈRE.

François Giroux[1], Robert Lavallée[2], Éric Bauce[3] and Claude Guertin[1,4]

[1] INRS-Institut Armand-Frappier, Laval, Quebec, H7V1B7

[2] RNCan, Canadian Forest Service, Quebec, Quebec, G1V 4C7

[3]Université Laval, Quebec, Quebec, G1V 0A6

[4] Corresponding author

La contribution de François Giroux à cet article comporte l'élaboration de la problématique, la mise en place du projet sur le terrain et en laboratoire et le traitement et l'interprétation des résultats avec l'aide du Dr Claude Guertin. Le Dr Robert Lavallée et le Dr Éric Bauce ont pu contribuer au projet avec l'ajout d'informations importantes au projet ainsi que de l'aide apportée lors de la correction de l'article.

## 3.1 Résumé

Le scarabée japonais, *Popillia japonica* (Newman) est un insecte ravageur s'attaquant à la pelouse, des plantes ornementales ainsi que des plants en pépinières. Les adultes et les larves sont polyphages et peuvent causer des dommages à plus de 300 espèces de végétaux. Cet article fait état de la relation entre la structure de l'habitat et la répartition spatiale d'une population de scarabée japonais dans une pépinière du Québec, Canada. Des pièges ont été installés et la capture des adultes a été surveillée au courant de l'été 2008. Par la suite, la caractérisation de l'environnement situé aux alentours des pièges a été effectuée afin de déterminer les facteurs pouvant expliquer la présence ou non des insectes. Il semblerait que la distribution du scarabée japonais à la pépinière soit expliquée par certaines composantes environnementales telles que le type de sol, la présence de pelouse, la présence d'arbres et d'infrastructures ainsi que les routes et les bâtiments.

## 3.2 Abstract

The Japanese beetle, *Popillia japonica* (Newman) is an important pest of turf, landscape plants and nursery crops in United States and Canada. This insect is a polyphagous, and both the adults and the larvae may feed on more than 300 species of plants. This paper reports the relationship between habitat structure and the spatial distribution of the Japanese beetle population in a tree nursery located in Quebec province, Canada. Traps were installed and adult captures were monitored over the course of the summer 2008. Characterization of the environment surrounding each trap was also performed to determine factors that could explain the abundance of adult captures. It seems that the distribution of Japanese beetles over the nursery was affected by environmental factors, mainly by the soil type, the presence of turf, trees and infrastructures such as greenhouse, pathway and building.

## 3.3 Introduction

The Japanese beetle, *Popillia japonica* (Newman), is a North American invasive species that was initially discovered in 1916 in a New Jersey's nursery (Gyeltshen *et al.*, 2005). This insect spread northward and was first recorded in southern Ontario and southern Quebec in 1998 (CFIA, 2009). This exotic beetle is considered to be one of the most important pests of the United States with over 460$ million invested each year to control the damage caused by adults and larvae (USDA/APHIS, 2000).

Adults are polyphagous and they can feed on fruits, leaves and flowers of more than 300 species of plants (Potter *et al.*, 2002). Roots of different grass species are the preferred food sources of larvae. The adult is metallic green and is around 8-11 millimeters in length and 5-7 millimeters wide. The larvae is creamy white and adopt the characteristic C-shape when resting (Gyeltshen *et al.*, 2005). This insect is considered univoltine throughout the majority of his native area but there have been reports of semivoltinism in colder regions (Fleming, 1972, Vittum, 1986). The emergence of this insect is primarily influenced by the temperature and will occur around May in southern USA and around June/July in northern USA (Potter *et al.*, 2002).

Japanese beetles are known to prefer sites located around agricultural lands rather than residential or woody areas (Hamilton *et al.*, 2007). Females lay their eggs on wet sites (without going over field capacity) with a moist texture, fully sunshine exposed and grassy (Potter and Held 2002). Moreover, females will almost never lay their eggs in or near bare ground. The presence of suitable plants for adult feeding seems to have an impact on the proximity of the oviposition site selection (Fleming, 1972). In fact, clover and rye crops are highly selected as oviposition sites, but not necessarily as food sources for adults. Rye and buckwheat are preferred food sources for adults. As suggested by Szendrei and Isaacs (2005), different crops provide specific stimuli to *P. japonica* adults, that may affect their feeding or oviposition behaviors.

In Quebec province, Japanese beetle is a serious pest in a provincial tree nursery located near Berthierville (A.C.I.A, 2009). Little information is available on the spatial distribution of the Japanese beetle population within tree nursery productions. Actually, the application of chemical insecticides is the only effective strategy used to reduce damages caused by this insect. The aim of the research is to determine if a relationship exists between abiotic and biotic factors and the spatial distribution and level of captures of the Japanese beetle population within a tree nursery. The application of an efficient management strategy must be based on a precise knowledge on

the spatial scale activity. It may contribute to reduce the amount of chemical insecticide used by targeting the area where insects are active. Moreover, it may contribute to improve the integration of new biological control agents to reduce damages cause by Japanese beetle populations.

## 3.4 Materials and Methods

This project was realized during the summer 2008 in a provincial tree nursery located near Berthierville, at about 50 km NE of Montreal, Quebec, Canada (46° 1.9000'N, 73° 10.930'W). This tree nursery covers an area of 155 ha. Most of the surface is allocated for the production of trees in containers and in naked roots. A natural forest surrounds the nursery, except for one side, which is boarded by the St-Lawrence River and an access road. Meteorological data (total precipitations, minimum and maximum temperature) were obtained from the meteorological station operated by the personnel of the tree nursery at Berthierville.

At the end of June, before the emergence of adults, 117 Japanese beetle traps (Trécé Inc., Adair, OK, USA) were installed all over the nursery area using a systematic experimental design (figure 3.1). The distance between each row (East/West axis) was about 80 meters, and about 130 meters separated each trap in a column (North/South axis). Traps were supplemented with a mixture of two compounds, the japonilure [(5R)-5-(1Z)-1-decenyldihydro-2(3H)-furanone], a sexual pheromone (Tumlinson *et al.*, 1977) and an attractant food-type lure [eugenol ($C_{10}H_{12}O_2$, CSA# 97-53-0), 2-phenylethyl propionate ($C_{11}H_{14}O_2$, CSA# 122-70-2) and geranol ($C_{10}H_{18}O$, CSA# 106-24-1) in a ratio of 7:3:3] (Ladd *et al.*, 1984). Twice a week, between July and mid-September, each trap was visited and insects were collected in a labeled plastic bag. Each bag was then weighed and the total number of adults was estimated based on the mean weight of five cohorts of ten adults randomly selected at each sampling day. For the analysis purposes, traps were grouped in four classes based on their insect density: (1) traps with capture counts less than 2000 captured insects; (2) traps with capture counts going from 2000 to 9999 insects; (3) traps with captures going from 10000 and 24999 individuals; and (4) traps with a capture count equal or higher than 25000 insects.

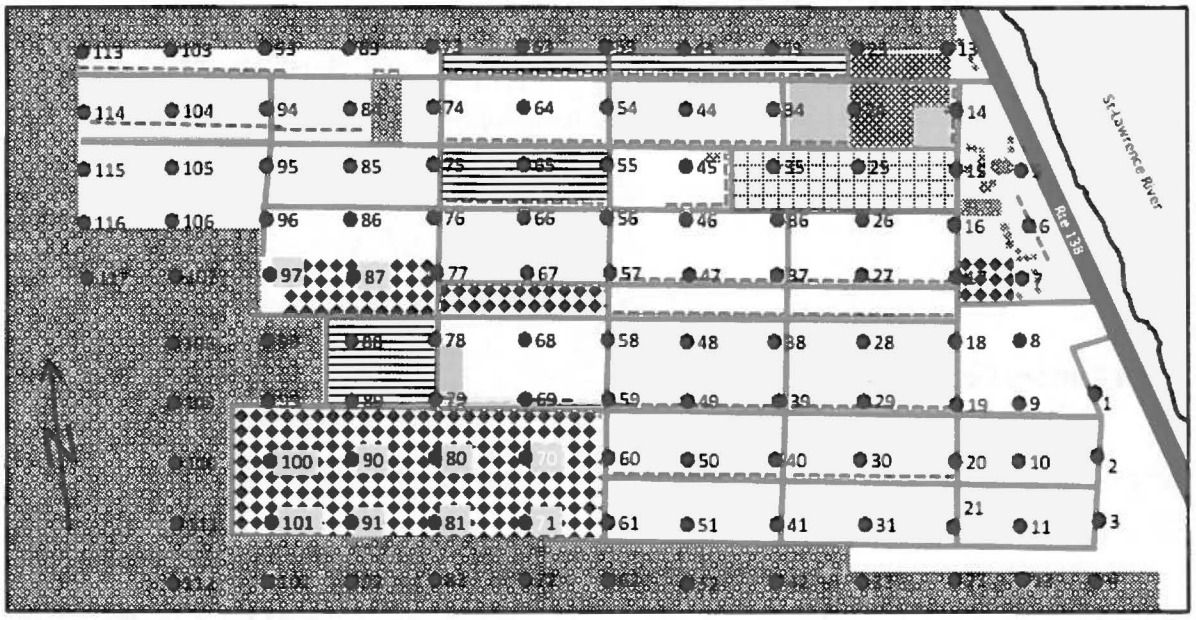


**Figure 3.1 Schematic representation of the distribution of Japanese beetles traps on the tree nursery of Berthierville in the summer of 2008.5 Trap position; Woody area; Seed orchard; Trees in container area; Parking lot; Building; Greenhouse; Area of production.**

In the meantime, a characterization of the environment surrounding each trap was performed. Eight variables were evaluated on a 100m$^2$ (10m x 10m) around each trap. For each variable, data were expressed as the percentage of the total surface surrounding a trap. Those variables are: (1) "lawn" was corresponding to the natural grass near a trap; (2) "cultivated fallow" was the surface take by green manure fields; (3) "naked root tree" was the area where trees are produced on bare ground; (4) "trees in container" was the zone where trees were cultivated in pots; (5) "permanent tree" referred to the space taken by natural trees; (6) "infrastructure" was the surface around a trap, where building, greenhouse, pathway and parking are found; (7) "litter" was corresponding to the surface covered by more than 5cm of dead leaves and branches (commonly found in forest); and (8) "uncovered soil" was the percentage of the area near a trap where a bare field was found.

The data were analyzed using a principal component analysis (SAS, 2011) to identify variables that account for a large portion of the variance within traps. Each principal component was computed based on a linear combination of the observed variables. The first component is the weighted linear combinations of variables that explained the largest amount of variance in the samples (Hutcheson *et al.*, 1999). The second component is the next combination of variables that explains the largest amount of variance in a dimension independent of the first

component, and so on. Components were selected based on their eigenvalue, which should be higher than 0.4. In order to understand the spatial distribution of the Japanese beetle within the tree nursery, the total number of insects captured during the season in each trap was superimposed over the components.

## 3.5 Results

### 3.5.1 Insect captures.

During the summer 2008, more than 1.1 million Japanese beetle adults were captured in the 117 traps (figure 3.2). This represents a mean capture per trap of 9 674 insects. However, variations in the total number of insects captured per trap were observed. During the experiment, the maximum number of *P. japonica* adults caught in one trap was of 50 580 insects in trap 87, which was located in a 15-year old ash orchard. Traps located in woody area were those capturing the smallest number of insects. In fact, less than 500 insects were counted in traps 72, 102, 108, 62, 110, 109 and 42 (see figure 3.1).

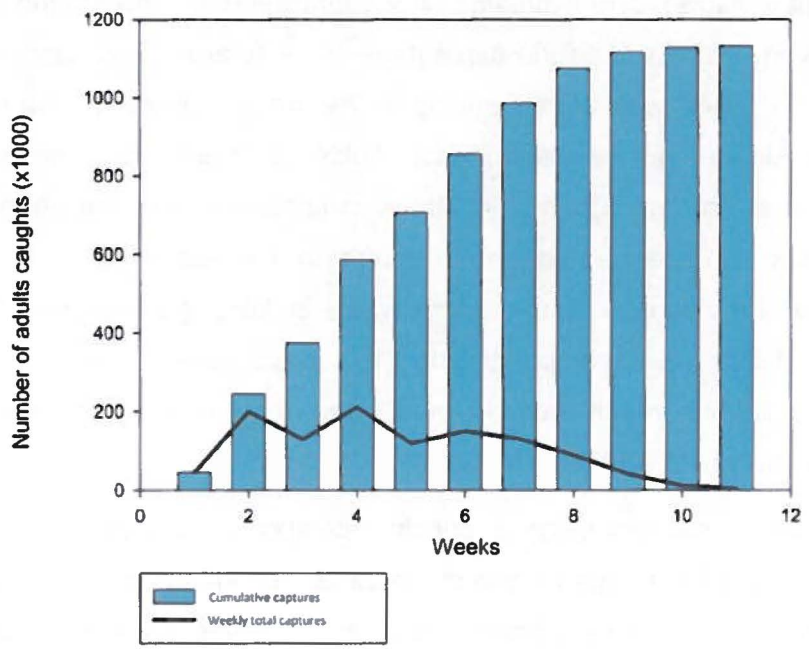


**Figure 3.2 Cumulative and total captures count per week of Japanese beetles throughout the 12 weeks of our experiment over the summer 2008.**

For all traps, the maximum capture per week occurred during the first four weeks, corresponding to July. During this period, about 586 000 individuals were caught, which represent about 51.8% of the total captures of 2008. However, a reduction of adult capture was observed during the third week and fifth week. These drops in adult captures might be associated with low precipitations (24.0 mm and 35.0 mm) from week three and five or low maximum temperature recorded from week five (22.0°C) (Figure 3.3). From mid-August, a decline in the number of captures was seen until the end of the experiment.

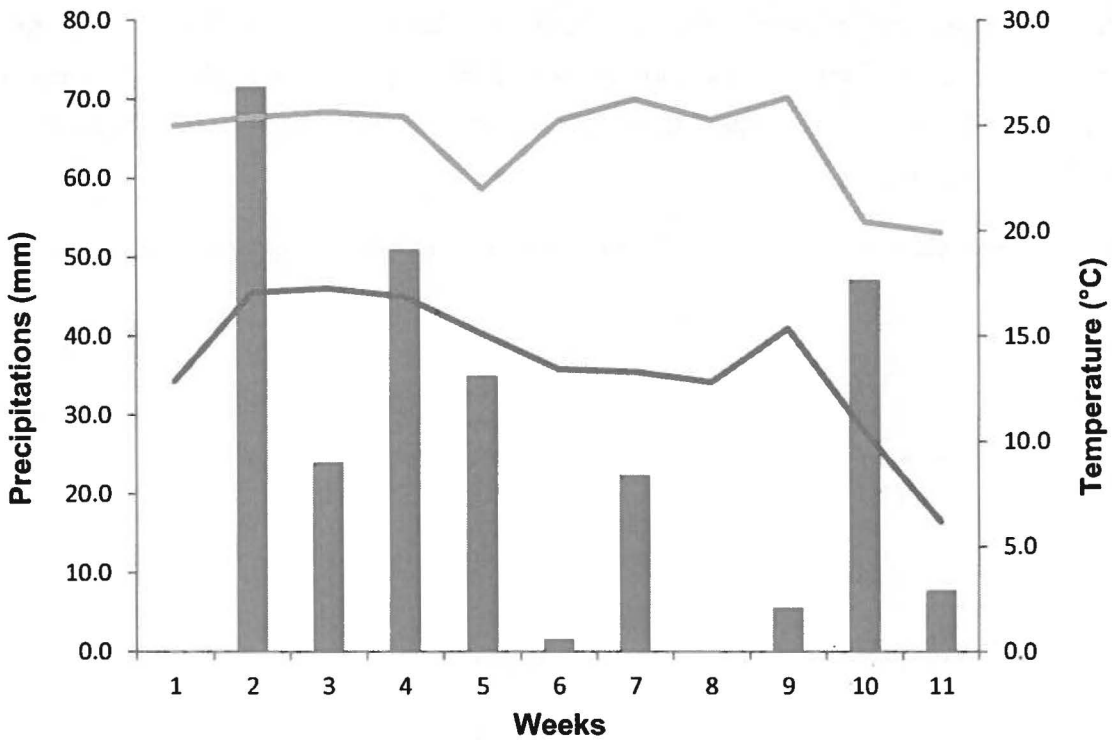


**Figure 3.3 Weekly rainfall and average weekly temperatures over the course of eleven weeks at the tree nursery of Berthierville. Histogram represents the average weekly precipitations, dark grey broken line represents the average weekly minimum temperature and light grey broken line represents the average maximum weekly temperature.**

## 3.6 Principal component analysis

A principal component analysis was used to identify the combination of environmental variables that may explain variance within traps. The eigenvalue indicate that three components were providing a good summary of the data (Table 3.1). Those principal components accounted for about 64% of the total variance. The first component was explaining about 25.9% of the variation, and was associated with two variables, the "permanent trees" (0.620) and the "litter" (0.590). The second component was contributing for about 19.8% of the total variance. This eigenvector had positive weighting on the variables "infrastructure" (0.538) and "trees in containers" (0.547) and negative loading on the variable "cultivated fallow" (-0.582). The third principal component was explaining 18.4% of the total variance and this component seems to consider the prevalence of new over well-established green substrates. The percentage of "lawn" (0.581) had positive influence on the vector and the percentage of "cultivated fallow" (-0.507) had negative weighting.

**Table 3.1.** Eigenvectors of the three principal components and their percentage of variance explained.

| | Component 1 (25.87 %) | Component 2 (19.81 %) | Component 3 (18.38 %) |
|---|---|---|---|
| Permanent trees | 0.620 | 0.067 | 0.097 |
| Infrastructures | -0.190 | 0.538 | -0.340 |
| Trees in containers | -0.054 | 0.547 | -0.305 |
| Naked root trees | -0.391 | -0.138 | 0.396 |
| Litter | 0.590 | -0.002 | 0.145 |
| Naked soil | -0.045 | -0.106 | 0.095 |
| Lawn | -0.234 | 0.195 | 0.581 |
| Cultivated fallow | -0.136 | -0.582 | -0.507 |

The superposition of Japanese beetle total capture per trap to the principal component analysis provides information that may explain the spatial distribution of the insect within the tree nursery. Using the first two components, the traps with higher captures are found on the negative sides of both axes (figure 3.4). This trend suggested that a large proportion of Japanese beetle adult's captures were associated to traps that were located in open sites without permanent trees and their associated litter. The presence of infrastructures and trees in containers seems to have detrimental effect on insect capture. On the other hand, the presence of cultivated fallows appears to improve the insect captures. However, two exceptions were noted. Traps 78 and 88 have a higher-than the average ratio of capture, although they were located on sites characterized by high percentages of infrastructure (see figure 3.1). These traps were surrounded with infrastructures but were located at less than 50 meters from the 15-year-old white ash (*Fraxinus americana*) plantation, where the ground is covered by well-established turf, which, as mentioned, seems to be attractive for *P. japonica* adults.

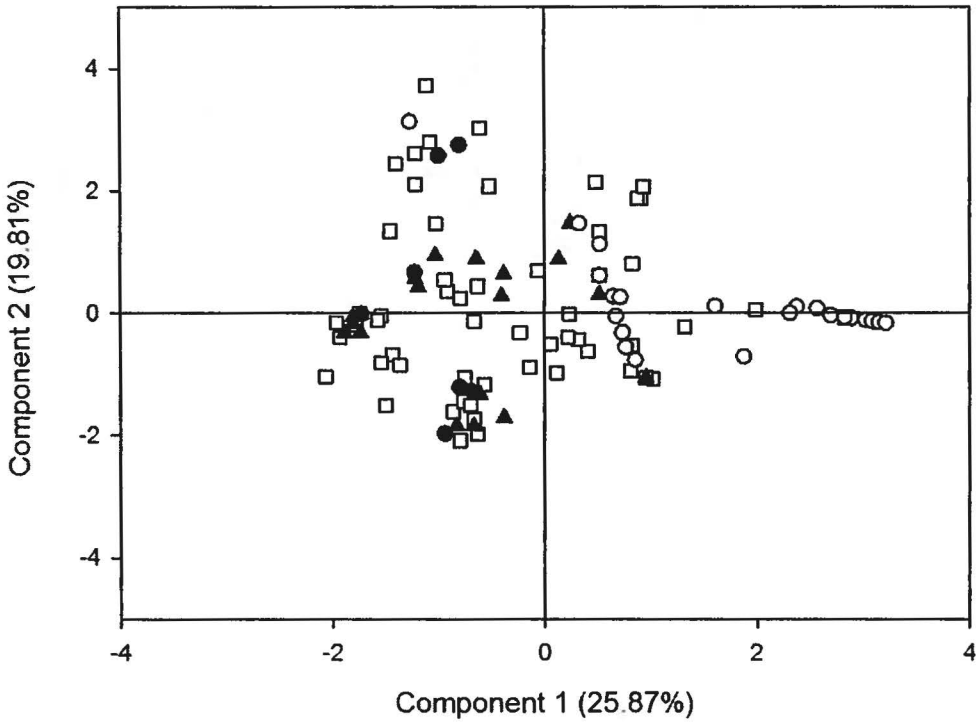


**Figure 3.4 Plot of the first and second components of the principal component analysis in relation to the total number of Japanese beetle caught per trap. White circles are traps with a capture count going from 0 to 2000 insects, white squares are traps with a capture count going from 2001 to 10 000 insects, black triangles are traps with a capture count of 10 001 to 25 000 insects and black circles are traps with a capture count higher than 25 000 insects.**

Data of insect captures were also superimposed over the first and third components (figure 3.5). As expected, the high insect-density traps are located at the negative part of the first component. As mentioned, this component was positively correlated with the presence of permanent trees and litter, which seems to have detrimental effect on insect captures. However, over the third component, traps showing high insect-densities were distributed to form two clusters. One was located in the negative part of the axis, where the other was found in the positive part. The percentage of lawn around a trap was correlated positively with the third component and the percentage of cultivated fallow was negatively correlated.

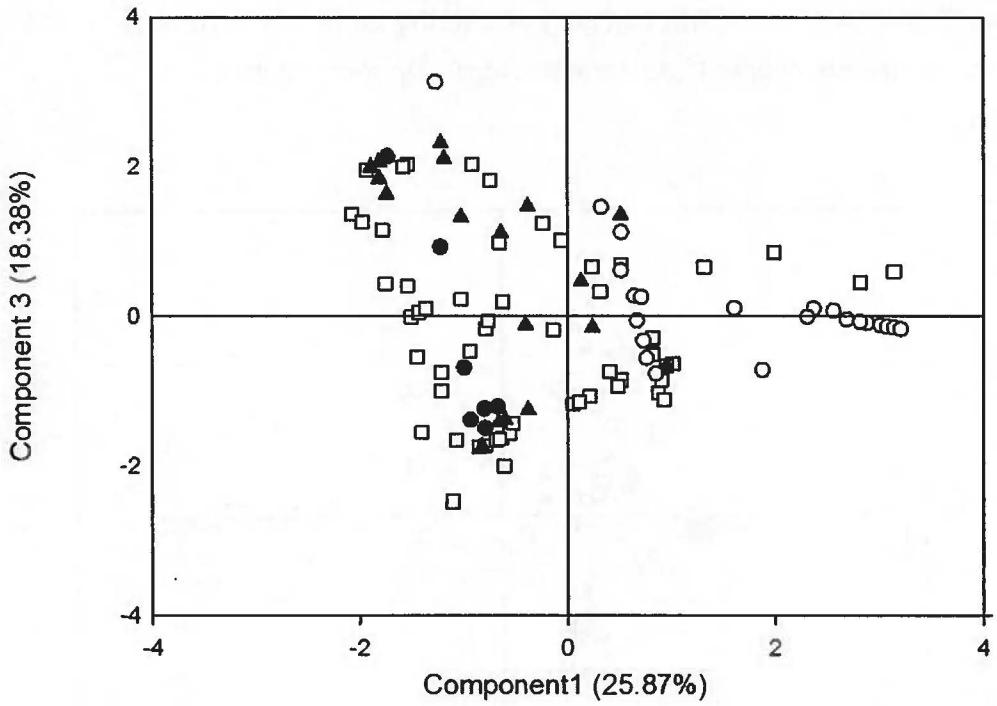


**Figure 3.5 Plot of the first and third components of the principal component analysis in relation to the density of Japanese beetles. White circles are traps which have capture counts less than 2 000 insects; white squares are traps with capture counts going from 2 000 to 9 999 insects; black triangles are traps with capture counts going from 10 000 to 24 999 insects; and black circles are traps with a capture count equal or higher than 25 000 insects.**

## 3.7 Discussion

Based on the results, the spatial distribution of *P. japonica* adults over the nursery seems to be correlated to the nature of the substrate found on the ground. Insect traps located in forest, where a large number of mature trees and an important percentage of litter on ground are found, were those providing fewer adult captures. This observation suggests that natural forests, which are mainly located at the edge of Berthierville nursery area, did not provide a suitable environment for alimentation and reproduction of this insect. Ladd (1987,1989) indicated that the Japanese beetle adults are highly polyphagous and could be captured in a forest habitat if no better choice is available. However, female will have a higher tendency to lay eggs in grassy areas where host plants are found in order to be able to feed and reproduce (Dalthorp *et al.*, 2000). Considering that only few adults have been captured in forest area, our results support this hypothesis. In the tree nursery, several suitable habitats with grassy area can use by *P. japonica* adults to achieve their feeding and reproductive behavior.

The spatial distribution of the adults over the nursery has been monitored using traps. Important variations in adult captures per trap have been found. Principal component analysis suggests that characteristic of the ground around the traps may contribute to explain these variations. Three principal components have been identified, which explain more than 64% of the caught variations between traps. The first components are positively associated to the presence of trees and litter around traps. The superposition of insect captures per trap show that most of the high insect-density traps are located in the negative part of the axis. This finding supports the previous observation suggesting that woody areas and their associated litters were not providing a favorable environment for feeding and reproduction of Japanese beetles.

The presence of cultivated fallow in the nursery is positively associated to a second component. It contributed to explain the high abundance of the Japanese beetle adults caught in some traps. Moreover, this component also suggests that the occurrence of infrastructures and trees in containers around a trap may have detrimental effects on the insect captures. The uncultivated areas like lawn found near roads and fallow seem to be more suitable for females to lay their eggs and may also provide an adequate food source for the grubs (Potter *et al.*, 1996). In the nursery, the cultivated fallow was regularly irrigated, which may be appropriate for female egg laying and may contribute to explain the high density of insects monitored in traps located near this habitat. Potter et al. (Potter *et al.*, 1996) indicted that irrigated fallow is a preferred oviposition site for female. In Berthierville nursery, higher *P. japonica* captures were found near

well-established fallow, especially those associated to seed orchards. On the other hand, less captures of the Japanese beetles adults in traps located near infrastructures and around trees in containers was observed. It seems clear that the environment associated to those sites did not attract adults. This finding reinforces the evidence of importance of physical characteristics of a site to attract or repel the Japanese beetle adults. The area surrounding the infrastructures and the production in containers did not provide any suitable conditions for feeding and reproductive behaviors, and may trigger migration of insects toward an appropriate site. Under adverse conditions, females unable to lay their eggs near the feeding site may migrate to find a more suitable area (Régnière *et al.*, 1983). The high levels of captures observed within the nursery are probably associated to more appropriate environments for insect success.

In fact, Japanese beetles will be more abundant in the grassy areas surrounding the nursery fields than the crops on which they feed (Smitley, 1996). This can be due since females will have a higher tendency to lay their eggs in short plant cover (Hawley, 1944, Potter *et al.*, 1996). The highest number of captures of the Japanese beetle is correlated with two clusters of traps, which represent the surface of lawn and of cultivated fallow. There is a gap between these two high-density clusters, and it is represented by variables such as surface of permanent trees, litter and bare soil.

## 3.8 Conclusions

Our main objective was to determine the factors that may affect the spatial distribution of the Japanese beetle within the tree nursery of Berthierville. Several environmental variables such as soil type, land use, presence of natural enemies, suitable oviposition sites and presence of host plants may influence the distribution of the Japanese beetles (Fleming, 1972, Hamilton *et al.*, 2007, Régnière *et al.*, 1983). A tree nursery can be recognized as a mosaic environment in which the different crop productions, soil nature and infrastructures may impinge on the repartition of the insects. The spatial variation of Japanese beetle within our nursery is possibly affected by several environmental factors explained mainly by three components.

Moreover, in each trap we could observe large variations in the number of insects caught bi-weekly. These variations could be related to factors, like weather conditions (rainfall), temperature, uneven insect development and adult emergence phenology and treatments done at the site (Fleming, 1972, Lacey *et al.*, 1994a). These results could be helpful to determine where insect density is higher and where control method could be used first.

Our study, conducted over a single season at one site, showed that the patterns of high and low insect density within a nursery are affected by the environmental factors. The results obtained may help nursery managers to deploy spatially targeted control strategies and consequently, reduce pesticides and protect beneficial insects.

# CHAPITRE 4 :
# SUSCEPTIBILITY OF THE JAPANESE BEETLE, POPILLIA JAPONICA (NEWMAN) (COLEOPTERA: SCARABAEIDAE)TO ENTOMOPATHOGENIC HYPOCREALES FUNGI.

# SUSCEPTIBILITÉ DU SCARABÉE JAPONAIS (POPILLIA JAPONICA (NEWMAN) (COLEOPTERA : SCARABAEIDAE) AUX CHAMPIGNONS ENTOMOPATHOGÈNES HYPOCRÉALES.

François Giroux[1], Robert Lavallée[2], Éric Bauce[3] and Claude Guertin[1,4]

[1] INRS-Institut Armand-Frappier, Laval, Québec, H7V1B7

[2] RNCan, Service canadien des forêts, Québec, Québec, G1V 4C7

[3]Université Laval, Québec, Québec, G1V 0A6

[4] Corresponding author

La contribution de François Giroux à cet article comporte l'élaboration de la problématique, la mise en place du projet sur le terrain et en laboratoire et le traitement et l'interprétation des résultats avec l'aide du Dr Claude Guertin. Le Dr Robert Lavallée et le Dr Éric Bauce ont pu contribuer au projet avec l'ajout d'informations importantes au projet ainsi que l'aide lors de la correction de l'article.

## 4.1 Résumé

Le scarabée japonais, *Popillia japonica* (Newman), est un ravageur important dans les pépinières des États-Unis et du Canada. Tant l'adulte que la larve causent des dégâts importants aux récoltes et peu d'agents de contrôle microbiologique existent pour lutter contre ce ravageur. Cet article étudie l'impact de champignons hypocréales sur la survivabilité des larves ainsi que des adultes du scarabée japonais. Des épreuves biologiques ont été effectués chez les larves ainsi que chez les adultes à l'aide de cinq espèces de champignons entomopathogènes, *Beauveria bassiana, Beauveria brongniartii, Metarhizium anisopliae, Verticillium longisporum* et *Verticillium muscarium*. Les résultats ont démontré que des isolats de *B. bassiana* et de *M. anisopliae* peuvent causer la mortalité de 60 % des adultes du scarabée japonais. Pour ce qui est des larves, les résultats sont peu concluants mais des tendances sur la pathogénicité peuvent être effectuées.

## 4.2 Abstract

The Japanese beetle, *Popillia japonica* (Newman), is an important pest of tree nurseries in United States and Canada. Both the adults and the larvae cause severe damage to the crops of tree nurseries and few microbiological agents exist to counter this pest. This paper examines the impact of hypocreales fungi on the survivability of larvae and adults of Japanese beetles. Both larvae and adults were used in bioassays in order to determine the pathogenicity of five species of entomopathogenic fungi, *Beauveria bassiana, Beauveria brongniartii, Metarhizium anisopliae, Verticillium longisporum* and *Verticillium muscarium*. Results show that isolates of *B. bassiana* and of *M. anisopliae* can cause the mortality of up to 60% of Japanese beetle's adults. As for the larvae, results are unconclusive but trends on the pathogenicity can be made.

The Japanese beetle, *Popillia japonica* (Newman) was first found in Canada in 1938 (CFIA, 2009). Since, this insect has never stopped spreading northward, and affects especially Ontario and Québec provinces. Adults feed on more than 300 species of plants and are considered among the most aggressive polyphagous plant-feeding insects (Potter *et al.*, 2002). Roots of turfs are the preferred host of the larvae (grubs), but other plants can also be attacked. This insect is becoming an increasing problem in tree nurseries in Canada and in particular in the provinces of Québec and Ontario.

Tree nurseries contribute to the success of reforestation programs by maintaining a steady supply of trees in good condition. In Québec province, total production of trees by tree nursery is estimated to be around 150 million annually (MNRF, 2003b). However, numerous pests can cause serious damages to crops and lead to a decrease in the number of trees produced. Chemical insecticides are necessary in order to reduce damage caused by the increasing population of Japanese beetle to crops, and to lower the risk of propagation of this pest. As populations of Japanese beetles will likely continue to increase in numbers, more environmentally acceptable approaches of control are required.

Several microbiological agents have been studied for their potential to regulate larval populations of the Japanese beetle, such as the bacteria *Bacillus thuringiensis* serovar *japonensis* strain *Buibui* (Alm *et al.*, 1997, Bixby *et al.*, 2007, Koppenhofer *et al.*, 2000b, Ohba *et al.*, 1992), *B. popilliae* (Bulla *et al.*, 1975, Klein, 1992, Matsuki *et al.*, 1997, Redmond *et al.*, 1995, Rippere *et al.*, 1998), nematodes such as *Steinernema glaseri* and *Heterorhabditis bacteriophora* and fungi such as *Metarhizium* anisopliae (Villani *et al.*, 1994) and *Beauveria bassiana* (Bixby *et al.*, 2007, Hanula *et al.*, 1988, Hanula *et al.*, 1991, Klein, 1992, Lacey *et al.*, 1995a, Lacey *et al.*, 1995b). However, there are few conclusive researches on the pathogenicity of biological insecticides on adult Japanese beetles (Klein *et al.*, 1999, Lacey *et al.*, 1995a, Lacey *et al.*, 1994b).

The objective of this study was to determine and compare the impact of five species of hypocreales fungi on the survivability of larvae and adults of Japanese beetles. In order to explore the pathogenicity of entomopathogenic fungi against Japanese beetles in Canada, a high number of indigenous species and isolates were investigated.

## 4.3 Materials and methods

### 4.3.1 Insects

Adults and larvae of the Japanese beetle were collected in 2009 from the public tree nursery located near Berthierville, at about 50 km NE of Montreal, Quebec, Canada (46° 1.9000'N, 73° 10.930'W).

At the end of April, about two months before the emergence of the adults, larvae were collected for bioassays. We collected larvae in the lawn near a plantation of ashes where there was a history of high damage to the culture. The extraction was facilitated with the use of a tractor that cut slices of ground (around 15 cm thick) and then those slices were moved up to a shaking conveyor in order to make the larvae fall to the ground. Then, we identified Japanese beetles' larvae from the other larvae in the ground with their characteristic creamy-white color and their typical c-shape, picked them up and brought them back to the laboratory. In order to assure the viability of the larvae before the bioassay, we kept them in boxes full of earth and lawn coming from the site where the extraction was done.

Adults were collected from Japanese beetle traps (Trécé Inc., Adair, OK, USA) already in place at the tree nursery of Berthierville for the bioassays. Traps were supplemented with a mixture of two compounds, the japonilure [(5R)-5-(1Z)-1-decenyldihydro-2(3H)-furanone], a sexual pheromone (Tumlinson *et al.*, 1977) and an attractant food-type lure [eugenol ($C_{10}H_{12}O_2$, CSA# 97-53-0), 2-phenylethyl propionate ($C_{11}H_{14}O_2$, CSA# 122-70-2) and geraniol ($C_{10}H_{18}O$, CSA# 106-24-1) in a ratio of 7:3:3] (Ladd *et al.*, 1984). Adults were caught the day before the bioassay.

### 4.3.2 Fungi

Fungi used for this study come from a fungal collection of the INRS-Institut Armand-Frappier. Selected fungi were associated to three different genera (*Beauveria, Metarhizium and Verticillium)* all related to the order of Hypocreales. A total of 19 isolates coming from five species, *B. bassiana, B. brongniartii, M. anisopliae, V. longisporum* and *V. muscarium* were used for the bioassays (Table 1). The isolates, which were maintained at -80°C, were inoculated on SDA (Sabouraud Dextrose Agar) in order to reactivate growth. After an incubation time of one week at 30°C, slices of mycelium were cut from the surface of the petri dishes and transferred in

10 mL of water in a test tube. This suspension of mycelia was then incorporated with cereal in order to act as a substrate in a solid fermentation production. Barley was the cereal of choice and was beforehand sterilized to make sure that no contaminants were present. Three bags of 200g of barley were used for each of our isolates. Then, these growth bags were incubated at 25°C for two weeks. Twice a week, bags were kneaded thoroughly in order to prevent the aggregation of the fungi and to improve the dispersion of the mycelia in the substrate. After the incubation period, 400mL of water was poured in each bags and vigorously agitated to liberate the conidia. For each bag, the suspension was filtrated through three layers of sterilized cheesecloth and the concentration of conidia was evaluated using a hemocytometer. All of the conidia suspensions were diluted with distilled water to reach a final concentration of $8 \times 10^{10}$ conidia/mL.

### 4.3.3 Bioassays

Bioassays were done to evaluate the virulence of our entomopathogenic fungi between adults and between larvae of the Japanese beetles. Both adults and larvae of the Japanese beetles were inoculated with conidia by immersion in 10mL of solution for 5 seconds. Afterwards, each insect was individually transferred onto filter papers and each filter was put in separate small cups and incubated at 25°C for 14 days. Being more sensible to desiccation than adults, larvae were put in cups with sterilized earth to provide a support and to avoid death by desiccation. Mortality of both adults and larvae were assessed each day by visual observation of each insect. The experiment was stopped when the mortality rates reach 90% in one of the replicates.

For the adults, a total of 1 200 insects were used for the screening assays of the 19 isolates of hypocreales fungi and the control group (3 replicates of 20 individuals for each bioassay) (Table 4.1). For the larvae, ten insects were employed to assays the 17 isolates. The isolates 3 and 4 of *B. bassiana* were not included in the experiments due to the low count of larvae available. Control groups for both larvae and adults were done in the same conditions as others replicates but they were not in contact with entomopathogenic fungi.

**Table 4.1**. Species of hypocreales fungi used in this study with the identification of the isolates used.

| Isolates | Species |
|---|---|
| Daom 210 569 | *Beauveria bassiana-1* |
| LRS 100 | *Beauveria bassiana-2* |
| Arsef 1956 | *Beauveria bassiana-3* |
| Daom 71 453 | *Beauveria bassiana-4* |
| Arsef 252 | *Beauveria bassiana-5* |
| CFL | *Beauveria bassiana-6* |
| IP | *Beauveria bassiana-7* |
| LRS 9 | *Beauveria brongniartii-1* |
| LRS 24 | *Beauveria brongniartii-2* |
| LRS 25 | *Beauveria brongniartii-3* |
| LRS 23 | *Beauveria brongniartii-4* |
| INRS 706 | *Metarhizium anisopliae-1* |
| INRS 701 | *Metarhizium anisopliae-2* |
| INRS 705 | *Metarhizium anisopliae-3* |
| INRS 707 | *Metarhizium anisopliae-4* |
| INRS 704 | *Metarhizium anisopliae-5* |
| INRS 700 | *Metarhizium anisopliae-6* |
| INRS 1105 | *Verticillium longisporum* |
| INRS 1106 | *Verticillium muscarium* |

Descriptive analysis of the data indicated that both adult and larval data didn't follow a normal distribution. Wilcoxon-Mann-Whitney non-parametric analyses were used to assess if one of the independent data is larger than the other. When the differences were statistically

significant, a Kruskal-Wallis one-way analysis of variance we used to determine which isolates were statistically different from the others.

## 4.4 Results and discussion

Bioassays on adults show that there is a lot of variability for the pathogenicity amongst the 19 isolates of entomopathogenic hypocreales fungi (Figure 4.1). Some isolates are highly pathogens to the adults while others are very resistant to the treatment. In fact, both isolates of *Verticillium* show no significant impact on the adults of the Japanese beetle. On the other hand, isolates of *B. bassiana (1)* and of *M. anisopliae (3),* show high level of pathogenicity against the adults with a mortality rate of over 60% for both isolates. These results are concordant with previous studies of the virulence of *M. anisopliae* and *B. bassiana* for adults of the Japanese beetles who had shown mortality rates around 60% and 79% for both of these hypocreales fungi at nine days (Klein *et al.*, 1999, Lacey *et al.*, 1995a, Lacey *et al.*, 1994b). However, these studies were done with the same isolates for *B. bassiana* and *M. anisopliae* for all individuals. Wilcoxon-Mann-Whitney test shows that a significant difference exists between all our isolates for a value of $p$=0.0023 (SAS, 2011).

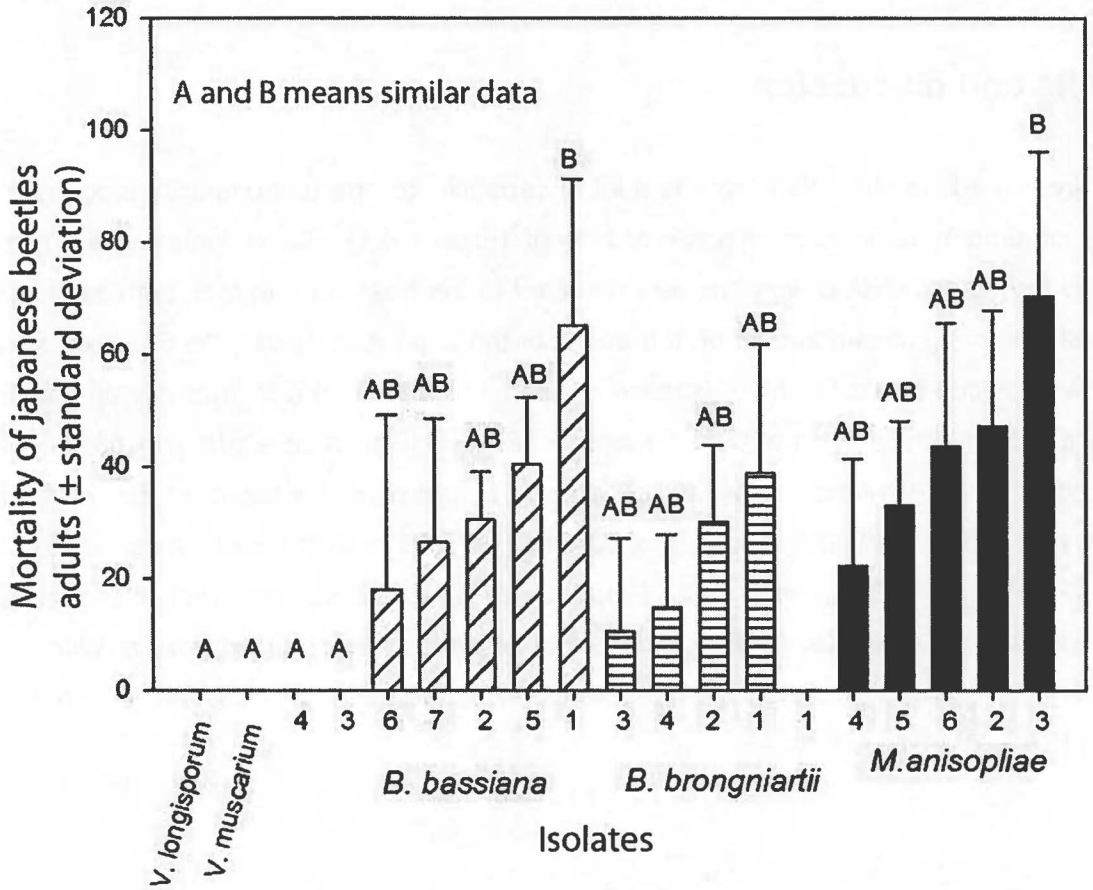


**Figure 4.1. Mortality rates of Japanese beetles adults when exposed to 19 species of hypocreales fungi (*Beauveria bassiana, Beauveria brongniartii, Metarhizium anisopliae, Verticillium longisporum and Verticillium muscarium*). Results with the same letters didn't show any significant difference between them and results with different letters showed significant difference between them.**

Due to the low mobility of larvae compared to adults, they are often better targets for entomopathogenic fungi (Potter *et al.*, 2002). Bioassays on Japanese beetles larvae show that there is a lot of diversity in pathogenicity amongst the 17 isolates of hypocreales fungi (Figure 4.2). Highest mortality rates average around 55% to 60% for isolates of *B. bassiana* (4 and 5) and of *M. anisopliae* (5 and 6). On the other hand, lowest mortality rates averaging around 0% and 5% can be seen with isolates of *V. longisporum*, *B. brongniartii* (1 and 2) and of *B. bassiana* (1). However, no significant differences could be observed within all our isolates with the Wilcoxon-Mann-Whitney test ($p \geq 0.05$).

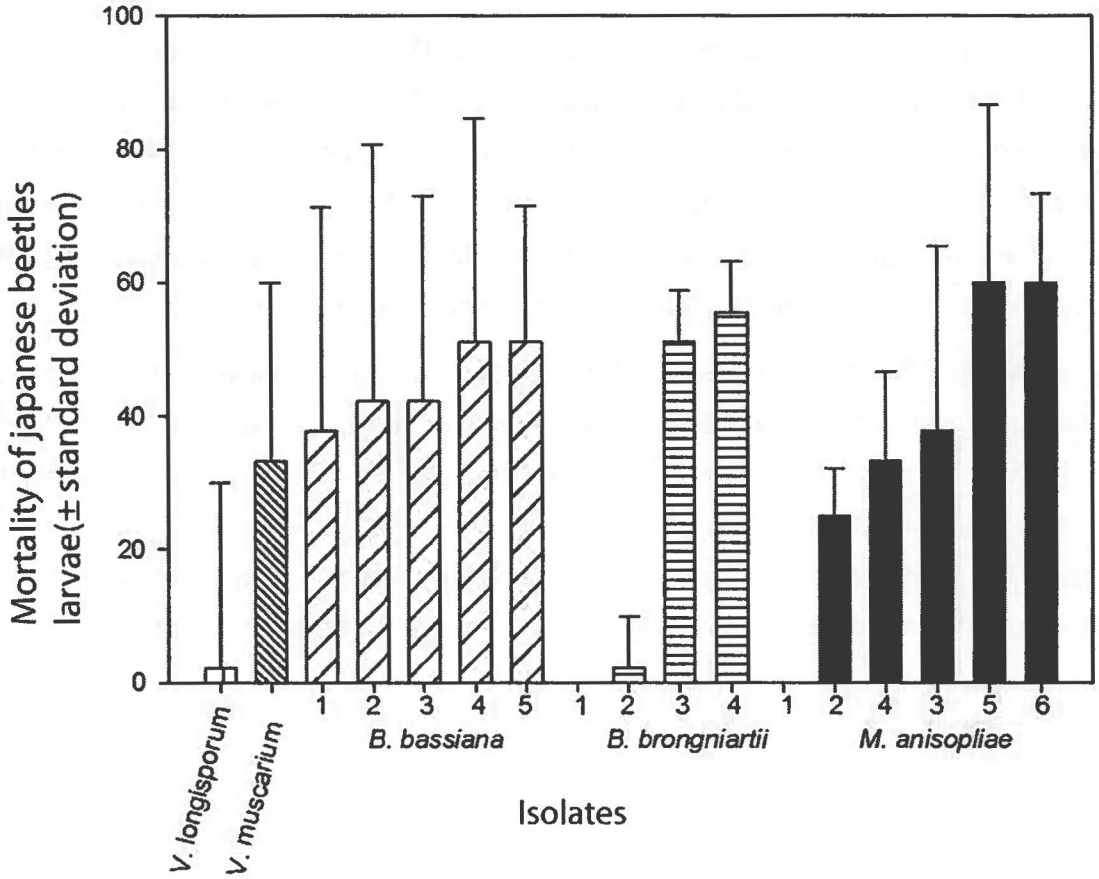


**Figure 4.2 Mortality rates of Japanese beetles larvae when exposed to 17 isolates of hypocreales fungi (*B. bassiana, B. brongniartii, M. anisopliae, V. longisporum and V. muscarium*). Isolates 6 and 7 of *B. bassiana* were not tested.**

Few studies have demonstrated the potential of management of grubs with hypocreales fungi (Krueger *et al.*, 1991, Villani *et al.*, 1994). Even if no statistical differences were found in our results, we can still see a positive trend in mortality rates of larvae in our bioassay. In fact, this positive trend may lead us to think that the development of hypocreales fungi for the control of the larvae of the Japanese beetle could be achieved (Held *et al.*, 2012). The lack of significant results can probably be attributed to the low number of larvae used for each replicates (n=10). This gave too much variation in our results, lead to higher than expected standard deviation and probably biased our experiment. We tried to compare the susceptibility of larvae to a high number of hypocreales fungi but it may have caused the lack of significant results. This

experiment could be easily repeated with a higher number of larvae and with a few selected isolates of *B. bassiana*, *B. brongniartii* or *M. anisopliae.*

Differences in pathogenicity between adults and larvae were anticipated based on the fact that such differences were found for other insects. Examples of such differences in pathogenicity can be found with the *Pecan weevil* (coleopteran: curculionidae) and the mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata* (Diptera : Tephritidae) (Gottwald *et al.*, 1983, Quesada-Moraga *et al.*, 2006). However, our results show that while there is variability amongst all the isolates for adults and larvae, differences in pathogenicity between adults and larvae are small.

Further studies will be needed to ascertain and confirm the pathogenicity of our isolates of hypocreales fungi against larvae and adults of the Japanese beetles. Comparison of virulence for specified isolates between adults and larvae will be crucial to be able to select a few isolates for bioassays in the field. Once the pathogenicity will be confirmed, methods of distribution, dispersion and autodissemination of entomopathogenic hypocreales fungi will need to be investigated in order to create an efficient integrated management program for this pest.

# CONCLUSION GÉNÉRALE

Les pépinières possèdent un rôle très important afin d'assurer la pérennité des programmes sylvicoles effectués à l'aide du reboisement. Toutefois, la présence d'insectes ravageurs cause d'importants problèmes aux gestionnaires et des moyens de lutte se doivent d'être utilisés. Un des problèmes majeurs dans la lutte aux insectes ravageurs en pépinières réside dans la surutilisation d'insecticides chimiques. Plusieurs solutions existent afin de régler ce problème, et une de celles-ci constitue à diminuer la quantité d'insecticides utilisés en ciblant mieux le traitement en connaissant l'aire de répartition de l'insecte. Une deuxième solution serait d'utiliser des alternatives biologiques aux insecticides chimiques. Depuis 1998, l'introduction du scarabée japonais au Québec impose aux pépinières de mieux connaître la biologie de ce ravageur, sa distribution sur le territoire ainsi que sa susceptibilité à certains insecticides biologiques afin de développer un programme de lutte intégrée efficace.

Ce projet a permis de conclure que la répartition spatiale des adultes du scarabée japonais sur le territoire d'une pépinière est influencée par certaines caractéristiques environnementales. Elle est influencée de façon positive par l'existence de pelouse et de terre en jachère et de façon négative par la présence de litière, de terre nue ainsi que d'arbres permanents. Ces résultats peuvent nous permettre d'établir la base d'une stratégie générale contre le scarabée japonais en pépinières. Afin de permettre une bonne compréhension du sujet, deux principaux cas seront étudiés. Premièrement, le cas où une pépinière ne serait pas infestée par le scarabée japonais et qu'elle voudrait s'assurer de protéger ses plants contre cet insecte qui viendrait de l'extérieur. Deuxièmement, le cas d'une pépinière déjà infestée par une population de scarabée japonais et dont l'objectif serait de cibler les endroits les plus favorables pour les traitements insecticides.

Dans le cas d'une pépinière non infestée par le scarabée japonais, la détermination des secteurs à risque aux environs du territoire de la pépinière est essentielle afin de déterminer le potentiel d'infestation. Parmi les secteurs à risque, nous avons pu déterminer que les terres en jachère ainsi que la présence de pelouse pouvaient causer d'importants problèmes étant donné la préférence des scarabées japonais à ces milieux. Donc, des endroits à proximité de la pépinière tels que des terres agricoles en jachère, des terrains de golf, des parcs et tout autre terrain avec une forte concentration de terre en jachère ou de pelouse seront à surveiller afin de détecter si le scarabée japonais est présent ou non. Si la présence de ce ravageur est détectée suffisamment tôt, des traitements peuvent être appliqués en collaboration avec les

administrateurs de ces terrains afin d'éradiquer l'infestation ou de diminuer la population présente dans le but de diminuer les chances qu'elle puisse s'établir sur les terrains voisins à importance économique.

Pour ce qui est d'une pépinière déjà infestée par le scarabée japonais, comme c'est le cas à Berthierville, une stratégie de lutte peut être développée en appliquant les connaissances acquises lors de nos expériences. Une pépinière est un endroit très hétérogène où coexistent plusieurs types de sol, plantations et constructions très près l'un de l'autre. Étant donné la complexité de l'environnement d'une pépinière, il pourrait être intéressant de proscrire ou de diminuer l'utilisation de certains milieux favorables aux scarabées japonais. Cela permettrait d'effectuer un contrôle de la population en diminuant les milieux offrant les conditions optimales pour la reproduction ainsi que l'alimentation du scarabée japonais (Potter *et al.*, 2002). Les deux principaux milieux à proscrire sont la pelouse et les terres en jachère. Pour ce qui est des terres en jachère, il est difficile de diminuer son utilisation, car ces terres s'introduisent dans la rotation des cultures afin de maintenir les sols en bonne condition (Held *et al.*, 2012).

Toutefois, pour ce qui est de la pelouse, il serait possible de diminuer son utilisation dans une pépinière. En effet, la pelouse est présente à de nombreux endroits afin d'agir comme surface de recouvrement, tels que dans les vergers à grains, sur le bord des plantations et près des routes. Il serait dans l'intérêt des pépinières de trouver un type de recouvrement alternatif afin de diminuer la présence du scarabée japonais. Notamment, cette pelouse pourrait être remplacée par du paillis, de la litière forestière ou d'autres types de végétaux défavorisant la présence des scarabées, et ce, sans avoir d'impact sur la qualité des plantations. Donc, l'établissement d'une stratégie de lutte contre le scarabée japonais force les administrateurs des pépinières à mettre en place de nouvelles méthodes ainsi que de nouvelles procédures afin de permettre un contrôle efficace de ce ravageur.

Afin de continuer à développer les connaissances sur la lutte intégrée contre le scarabée japonais en pépinières, plusieurs avenues de recherche sont envisageables. Tout d'abord, la poursuite des captures du scarabée japonais à la pépinière de Berthierville combinée à une caractérisation continue sur le terrain au courant des années pourrait nous donner des résultats plus précis quant à la répartition spatiale des populations à travers le temps. Toutefois, il serait important de répéter notre processus expérimental dans d'autres pépinières québécoises afin de confirmer les résultats obtenus. Quelques précisions pourront être apportées à la caractérisation des pépinières, telles que d'évaluer les données météorologiques ainsi que les différents traitements insecticides effectués sur le site.

De plus, nous avons pu déterminer la susceptibilité des adultes ainsi que des larves du scarabée japonais à différents isolats de champignons hypocréales à l'aide d'épreuves biologiques en laboratoire. Ces expériences ont permis de conclure que les adultes étaient susceptibles à certains champignons hypocréales (*B. bassiana* et *M. anisopliae*). En effet, les résultats ont démontré que des isolats de *B. bassiana* et de *M. anisopliae* peuvent causer la mortalité de plus de 60 % des adultes testés. Ces résultats sont encourageants, car ils concordent avec des études précédentes ayant démontré un taux de mortalité de 60 % et 79 % à neuf jours pour les adultes (Klein *et al.*, 1999, Lacey *et al.*, 1995a, Lacey *et al.*, 1994b). Par contre, les expériences avec les larves n'ont pas permis d'établir avec précision la susceptibilité des insectes aux préparations fongiques. Cependant, une tendance positive se dégage des résultats permettant d'entrevoir la possibilité d'utiliser les champignons entomopathogènes pour lutter contre les larves. En effet, nous avons pu constater que la mortalité des larves variait entre 40% et 60% mais malheureusement, les résultats des tests statistiques n'étaient pas significatifs, ne permettant pas d'identifier l'agent entomopathogène le plus efficace. Afin de préciser les résultats obtenus sur les larves et les adultes, la poursuite des épreuves biologiques serait de mise. En effet, les résultats obtenus lors de ces essais sur les larves ont été peu concluants étant donné le faible nombre d'individus testés par isolats. Une des solutions serait de répéter l'expérience avec un plus grand nombre de larves afin d'obtenir des échantillons plus grands pour chaque isolat de champignons entomopathogènes. Ces résultats démontrent l'existence d'alternatives biologiques efficaces à l'utilisation d'insecticides chimiques.

Après avoir été en mesure de sélectionner un isolat d'hypocréales pour continuer les expériences sur le terrain, la poursuite des recherches sur le scarabée japonais pourrait s'articuler autour de plusieurs axes. Premièrement, le développement des connaissances sur l'autodissémination des conidies d'hypocréales pathogènes ainsi que l'évaluation du potentiel d'autocontamination des adultes pourrait être considéré. En effet, l'utilisation de pièges permettant aux adultes d'être infectés par un champignon entomopathogène et de par la suite contaminer d'autres individus pourrait s'avérer efficace (Klein *et al.*, 1999). Le développement de tels pièges permettrait de faciliter le contrôle des populations adultes en créant une constante épizootie qui pourrait diminuer le nombre d'adultes sur un territoire donné.

Un autre axe de recherche pourrait concerner l'efficacité de l'application au sol d'une solution de champignons entomopathogènes afin de lutter contre les larves. Il serait intéressant de tester différents champignons ainsi que différents isolats répartis dans le temps afin de tester l'efficacité à pénétrer le sol et d'affecter les larves (Nielsen *et al.*, 2012). Ce genre d'expérience permettrait de diminuer l'impact de la mortalité des larves lors de la récolte de celles-ci pour les

épreuves biologiques. Toutefois, il faudrait s'assurer de choisir un site avec une présence de larves et il faudrait s'assurer de la similitude des sols entre les sites afin de diminuer les variations.

En conclusion, ce projet de recherche a permis de développer les connaissances sur la répartition spatiale des adultes du scarabée japonais ainsi que d'évaluer la susceptibilité des adultes et des larves à la présence de champignons entomopathogènes. Ces résultats permettront aux gestionnaires de pépinières d'élaborer des stratégies de lutte intégrée plus efficaces contre le scarabée japonais sur deux principaux points. Ils seront en mesure de mieux cibler les traitements insecticides biologiques ou chimiques et ils posséderont des alternatives aux insecticides chimiques avec les champignons entomopathogènes. De plus, la méthodologie de caractérisation utilisée dans ce projet de recherche pourra être appliquée dans d'autres pépinières afin de permettre de mieux cibler les traitements et de diminuer les effets adverses.

# REFERENCES


A.C.I.A (2009) *Questions et réponses Scarabée japonais (Popillia japonica).* http://www.inspection.gc.ca/francais/plaveg/pestrava/popjap/questf.shtml (Consulté le 5 mai 2009).

Ahmad S (1982) Host location by the Japanese beetle (*Popillia japonica*): evidence for a key role for olfaction in a highly polyphagous insect. *J Exp. Zool.* 220:117-120.

Alarcon WA, Calvert GM, Blondell JM, Mehler LN, Sievert J, Propeck M, Tibbetts DS, Becker A, Lackovic M, Soileau SB, Das R, Beckman J, Male DP, Thomsen CL & Stanbury M (2005) Acute illnesses associated with pesticide exposure at schools. *JAMA:* 294(4):455-465.

Allsopp PG (1996) Japanese beetle, *Popillia japonica* Newman (Coleoptera: Scarabaeidae): Rate of movement and potential distribution of an immigrant species. *Coleopt. Bull.* 50(1):81-95.

Alm SR, Yeh T, Hanula JL & Georgis R (1992) Biological control of Japanese, oriental, and black turfgrass ataenius Beetle (Coleoptera: Scarabaeidae) larvae with entomopathogenic nematodes (Nematoda: Steinernematidae, Heterorhabditidae). *J. Econ. Entomol.* 85(5):1660-1665.

Alm SR, Villani MG, Yeh T & Shutter R (1997) *Bacillus thuringiensis* serovar *japonensis* strain *Buibui* for the control of Japanese beetle larvae (Coleoptera: Scarabaeidae) *Appl. entomol. zool.* 32(3):477-484.

Althouse CM, Petersen BE & McEwen LC (1997) Effects on young American kestrels (Falco sparverius) exposed to *Beauveria bassiana* bioinsecticide. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 59(4):507-512.

Barrows EM & Gordh G (1978) Sexual behavior in the Japanese beetle, *Popillia japonica*, and comparative notes on sexual behavior of other scarabs (Coleoptera: Scarabaeidae). *Behav. Biol.* 23(3):341-354.

Bixby A, Alm SR, Power K, Grewal P & Swier SR (2007) Susceptibility of four species of turfgrass-infesting scarabs (Coleoptera: Scarabaeidae) to *Bacillus thuringiensis* serovar *japonensis* strain *Buibui. J. Econ. Entomol.* 100(5):1604-1610.

Bonneau G, Innes L, Lachance C, Marchand L & Paré D (1997) Maladies et insectes importants dans les pépinières forestières, au Québec. Québec.

Boucias DG, Pendland JC & Latge JP (1988) Nonspecific factors involved in attachment of entomopathogenic deuteromycetes to host insect cuticle. *Appl. Environ. Microbiol.* 54(7):1795-1805.

Bulla LA, Rhodes RA & St. Julian G (1975) Bacteria as insect pathogens. *Annu. Rev. Microbiol.* 29(1):163-190.

Clarkson JM & Charnley AK (1996) New insights into the mechanisms of fungal pathogenesis in insects. *Trends Microbiol.* 4(5):197-203.

Cowles RS, Alm SR & Villani MG (1999) Selective toxicity of halofenozide to exotic white grubs (Coleoptera : Scarabaeidae). *J. Econ. Entomol.* 92(2):427-434.

Dalthorp D, Nyrop J & Villani MG (2000) Spatial ecology of the Japanese beetle, *Popillia japonica. Entomol. Exp. Appl.* 96(2):129-139.

Dickerson E & Weiss H (1918) *Popillia japonica* Newmn., a recently introduced Japanese pest. *Can. Entomol.* 50:217-221.

El-Gawad HASA & Sayed AMM (2008) Evaluation of entomopathogenic fungus *Verticillium lecanii* (Zimmermann) Vieges and the predator *Chrysoperla carnea* (Stephens) against cowpea aphid, *Aphis craccivora* (Koch) on faba bean in Egypt. *EAJBS:* 1(2):5.

Fargues J, Goettel MS, Smits N, Ouedraogo A & Rougier M (1997) Effect of temperature on vegetative growth of *Beauveria bassiana* isolates from different origins. *Mycologia* 89(3):383-392.

Faria M & Wraight SP (2001) Biological control of *Bemisia tabaci* with fungi. *Crop Prot.* 20: 767-778.

Fatiha L, Huang Z, Ren SX & Ali S (2008) Effect of *Verticillium lecanii* on biological characteristics and life table of *Serangium japonicum* (Coleoptera: Coccinellidae), a predator of whiteflies under laboratory conditions. *J. Insect Sci.* 15(4):327-333.

Feng MG, Poprawski TJ & Khachatourians GG (1994) Production, formulation and application of the entomopathogenic fungus B*eauveria bassiana* for insect control: current status. *Biocontrol Sci. Tech.* 4(1):3-34.

Fleming W (1968) Biological control of the Japanese beetle. *USDA Technical Bulletin* 1383:78.

Fleming W (1969) Attractants for the Japanese beetle. *USDA Technical Bulletin* 1399:87.

Fleming W (1972) Biology of the Japanese beetle. *USDA Technical Bulletin* 1449:129.

Fleming W (1976) Integrating control of the Japanese beetle-a historical review. *USDA Technical Bulletin* 1545:65.

Gaugler R, Wang Y & Campbell JF (1994) Aggressive and evasive behaviors in *Popillia japonica* (Coleoptera: Scarabaeidae) larvae: defenses against entomopathogenic nematode attack. *J. Invertebr. Pathol.* 64(3):193-199.

Georgis R & Gaugler R (1991) Predictability in biological control using entomopathogenic nematodes. *J. Econ. Entomol.* 84(3):713-720.

Gilmore SK & Potter DA (1993) Potential role of collembola as biotic mortality agents for entomopathogenic nematodes. *Pedobiologia* 37(1):30-38.

Gottwald TR & Tedders WL (1983) Suppression of pecan weevil (Coleoptera: Curculionidae) populations with entomopathogenic fungi. *Environ. Entomol.* 12(2):471-474.

Gyeltshen J & Hodges A (2005) *Japanese beetle, Popillia japonica Newman (Insecta: Coleoptera: Scarabaeidae).* http://edis.ifas.ufl.edu/IN630 (Consulté le 25 mai 2009).

Hajek AE & St Leger RJ (1994) Interactions between fungal pathogens and insect hosts. *Annu. Rev. Entomol.* 39:293-322.

Hamilton RM, Foster RE, Gibb TJ, Sadof CS, Holland JD & Engel BA (2007) Distribution and dynamics of Japanese beetles along the Indianapolis airport perimeter and the influence of land use on trap catch. *Environ. Entomol.* 36(2):287-296.

Hammond RB & Stinner BR (1987) Soybean foliage insects in conservation tillage systems: effects of tillage, previous cropping history, and soil insecticide application. *Environ. Entomol.* 16(2):524-531.

Hanula JL & Andreadis TG (1988) Parasitic microorganisms of Japanese beetles (Coleoptera: Scarabaeidae) and associated scarab larvae in Connecticut soils. *Environ. Entomol.* 17(4):709-714.

Hanula JL, Andreadis TG & Blackwell M (1991) *Entoderma colletosporium* gen. and sp. nov., a unique cuticular fungus infecting japanese beetle, *Popillia japonica* (Coleoptera : Scarabaeidae). *J. Invertebr. Pathol.* 58(3):327-334.

Hawley IM (1944) Notes on the biology of the Japanese beetle.

Held DW & Potter DA (2012) Prospects for managing turfgrass pests with reduced chemical inputs. *Annu. Rev. Entomol.* 57(1):329-354.

Holder DJ & Keyhani NO (2005) Adhesion of the entomopathogenic fungus *Beauveria* (Cordyceps) *bassiana* to substrata. *Appl. Environ. Microbiol.* 71(9):5260-5266.

Holmes DM & Barrett GW (1997) Japanese beetle (*Popillia japonica*) dispersal behavior in intercropped vs. monoculture soybean agroecosystems. *Am. Midl. Nat.* 137(2):312-319.

Hsiao WF, Bidochka MJ & Khachatourians GG (1992) Effect of temperature and relative humidity on the virulence of the entomopathogenic fungus, *Verticillium lecanii*, toward the oat-bird berry aphid, *Rhopalosiphum padi* (Hom., Aphididae). *J. Appl. Entomol.* 114(1-5):484-490.

Hutcheson G & Sofroniou N (1999) The multivariate social scientist: Introductory statistics using generalized linear models. Sage Publications, Thousand Oaks CA. 288p.

Inglis G (1993) Persistence of the entomopathogenic fungus, *Beauveria bassiana*, on phylloplanes of crested wheatgrass and alfalfa. *Biol. Control* 3:258-270.

Inglis G, Goettel M, Butt T & Strasser H (2001) Use of Hyphomycete fungi for managing insects. *Fungi as biocontrol agents: progress, problems and potential,* Butt T, Jackson S & Magan N (Édit.) CABI Publishing, Wallingford, UK. p 23-69.

Jourdheuil P, Grison P & Fraval A (1992) La lutte biologique: un aperçu historique. *La lutte biologique. Dossier de la Cellule environnement de l'INRA.* 5:11-35.

Keathley CP (1998) *Determinants of host plant selection in the Japanese beetle.* Master of Science (University of Kentucky, Lexington).128 p.

Keathley CP, Potter DA & Houtz RL (1999) Freezing-altered palatability of Bradford pear to Japanese beetle: evidence for decompartmentalization and enzymatic degradation of feeding deterrents. *Entomol. Exp. Appl.* 90(1):49-59.

Klein M (1981) Mass trapping for suppression of Japanese beetles. *Management of Insect Pests with Semiochemicals*, Mitchell ER (Édit.) Plenum Press, New York. p 183-190.

Klein MG (1992) Use of *Bacillus popilliae* in Japanese beetle control. *Use of pathogens in scarab pest management*, Glare TR & Jackson TA (Édit.) Intercept Ltd., Andover, England. p 179-190.

Klein MG (1993) Biological control of scarabs with entomopathogenic nematodes. *Nematodes and the biological control of insect pests,* Bedding R, Akhurst R & Kaya H (Édit.) CSIRO, East Melbourne. p 49-58.

Klein MG & Lacey LA (1999) An attractant trap for autodissemination of entomopathogenic fungi into populations of the Japanese beetle *Popillia japonica* (Coleoptera : Scarabaeidae). *Biocontrol Sci. Techn.* 9(2):151-158.

Koppenhofer AM, Grewal PS & Kaya HK (2000a) Synergism of imidacloprid and entomopathogenic nematodes against white grubs: the mechanism. *Entomol. Exp. Appl.* 94(3):283-293.

Koppenhofer AM, Wilson M, Brown I, Kaya HK & Gaugler R (2000b) Biological control agents for white grubs (Coleoptera : Scarabaeidae) in anticipation of the establishment of the Japanese beetle in California. *J. Econ. Entomol.* 93(1):71-80.

Kreuger B & Potter DA (2001) Diel feeding activity and thermoregulation by Japanese beetles (Coleoptera : Scarabaeidae) within host plant canopies. *Environ. Entomol.* 30(2):172-180.

Krueger SRV, M. G.; Martins, A. S.; Roberts, D. W. (1990) Efficacy of *Metarhizium anisopliae* conidia and dry mycelium in soil against scarabaeid larvae. *International Colloquium on Invertebrate Pathology and Microbial Control* (Adelaide, Australia, 20-24 août 1990).

Krueger S, Villani M, Nyrop J & Roberts D (1991) Effect of soil environment on the efficacy of fungal pathogens against scarab grubs in laboratory bioassays. *Biol. Control* 1: 203-209.

Krueger SR, Villani MG, Martins AS & Roberts DW (1992) Efficacy of soil applications of *Metarhizium anisopliae* (Metsch.) sorokin conidia, and standard and lyophilized mycelial particles against scarab grubs. *J. Invertebr. Pathol.* 59(1):54-60.

Krueger SR & Roberts DW (1997) Soil treatment with entomopathogenic fungi for corn rootworm (Diabrotica spp.) larval control. *Biol. Control* 9(1):67-74.

Kruse KC & Switzer PV (2007) Physical contests for females in the Japanese beetle, *Popillia japonica*. *J. Insect Sci.* 7:10.

Lacey LA, Amaral JJ, Coupland J & Klein MG (1994a) The influence of climatic factors on the flight activity of the Japanese beetle (Coleoptera: Scarabaeidae): implications for use of a microbial control agent. *Biol. Control* 4(3):298-303.

Lacey LA, Martins A & Ribeiro C (1994b) The pathogenicity of *Metarhizium anisopliae* and *Beauveria bassiana* for adults of the Japanese beetle, *Popillia japonica* (Coleoptera: Scarabaeidae). *Eur. J. Entomol.* 91(3):313-319.

Lacey LA, Amaral JJ, Coupland J, Klein MG & Simoes AM (1995a) Flight activity of *Popillia japonica* (Coleoptera: Scarabaeidae) after treatment with *Metarhizium anisopliae*. *Biol. Control* 5(2):167-172.

Lacey LA, Kaya HK & Bettencourt R (1995b) Dispersal of *Steinernema glaseri* (Nematoda: Steinernematidae) in adult Japanese beetles, *Popillia japonica* (Coleoptera: Scarabaeidae). *Biocontrol Sci. Techn.* 5(1):121-130.

Ladd TL (1966) Egg viability and longevity of Japanese beetles treated with tepa, aphodate, and metepa. *J. Econ. Entomol.* 59:422-425.

Ladd TL (1970) Sex Attraction tn the Japanese Beetle. *J. Econ. Entomol.* 63(3):905-908.

Ladd TL, Petty DM, Coppinge Aj, Bruer HL, Hamilton DW & Harris RF (1972) Effects of releasing sterile male Japanese beetles on the fertility of ova of an isolated population in eastern Tennessee. *J. Econ. Entomol.* 65(5):1338-1340.

Ladd TL, Jacobson M & Buriff CR (1978) Japanese beetles: extracts from neem tree seeds as feeding deterrents. *J. Econ. Entomol.* 71(5):810-813.

Ladd TL & McGovern TP (1980) Japanese Beetle: a superior attractant, phenethyl propionate + eugenol + geraniol, 3:7:32,3,4. *J. Econ. Entomol.* 73:689-691.

Ladd TJ, Klein M & Tumlinson J (1981) Phenethyl propionate C eugenol C geraniol (3:7:3) and japonilure: a highly effective joint lure for Japanese beetles. *J. Econ. Entomol.* 74:665-667.

Ladd TL, Warthen JD & Klein MG (1984) Japanese Beetle (Coleoptera: Scarabaeidae): the effects of azadirachtin on the growth and development of the immature forms. *J. Econ. Entomol.* 77(4):903-905.

Ladd TL (1986) Influence of sugars on the feeding response of Japanese beetles (Coleoptera: Scarabaeidae). *J. Econ. Entomol.* 79(3):668-671.

Ladd TL (1987) Influence of food, age, and mating on production of fertile eggs by Japanese beetles (Coleoptera: Scarabaeidae). *J. Econ. Entomol.* 80(1):93-95.

Ladd TL (1989) Japanese beetle (Coleoptera: Scarabaeidae): feeding by adults on minor host and nonhost plants. *J. Econ. Entomol.* 82:1616-1619.

Leland JE & Behle RW (2005) Coating *Beauveria bassiana* with lignin for protection from solar radiation and effects on pathogenicity to *Lygus lineolaris* (Heteroptera: Miridae). *Biocontrol Sci. Techn.* 15(3):309-320.

Lipa J (1975) White muscardines (*Beauveria* sp.). *An outline of insect pathology*, Lipa J (Édit.) Foreign Sciences Publications, Warsaw, Poland. p 139-142.

Lopez R & Potter DA (2000) Ant predation on eggs and larvae of the black cutworm (Lepidoptera : Noctuidae) and Japanese beetle (Coleoptera : Scarabaeidae) in turfgrass. *Environ. Entomol.* 29(1):116-125.

Loughrin JH, Potter DA & Hamilton TR (1995) Volatile compounds induced by herbivory act as aggregation kairomones for the Japanese beetle (*Popillia japonica* Newman). *J. Chem. Ecol.* 21(10):1457-1467.

Loughrin JH, Potter DA, Hamilton TR & Byers ME (1996) Volatile compounds from crabapple (Malus spp) cultivars differing in susceptibility to the Japanese beetle (*Popillia japonica* Newman). *J. Chem. Ecol.* 22(7):1295-1305.

Loughrin JH, Potter DA, Hamilton TR & Byers ME (1997a) Diurnal emission of volatile compounds by Japanese beetle-damaged grape leaves. *Phytochemistry* 45(5):919-923.

Loughrin JH, Potter DA, Hamilton TR & Byers ME (1997b) Response of Japanese beetles (Coleoptera: Scarabaeidae) to leaf volatiles of susceptible and resistant maple species. *Environ. Entomol.* 26(2):334-342.

Lozano-Gutiérrez J & España-Luna MP (2008) Pathogenicity of *Beauveria bassiana* (Deuteromycotina: Hyphomycetes) against the white grub *Laniifera cyclades* (Lepidoptera: Pyralidae) under field and greenhouse conditions. *Fla. Entomol.* 91(4):664-668.

Matsuki N, Asano S, Bando H & Iizuka T (1997) New Japanese isolates of *Bacillus popilliae* isolated from milky diseased larvae of *Popillia japonica*, *Anomala rufocuprea* and *Anomala daimiana* (Coleoptera: Scarabaeidae). *Appl. Entomol. Zool.* 32(4):583-588.

MNRF (2003a) *La Pépinière de Berthierville.* http://www.mrnf.gouv.qc.ca/forets/semences/semences-pepinieres-berthierville.jsp (Consulté le 20 mai 2010).

MNRF (2003b) Production de plants au Québec. in *http://www.mrnf.gouv.qc.ca/forets/semences/semences-production.jsp* (Consulté le 15 mai 2010).

Monthean C & Potter DA (1992) Effects of RH 5849, a novel insect growth regulator, on Japanese beetle (Coleoptera: Scarabaeidae) and fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) in turfgrass. *J. Econ. Entomol.* 85(2):507-513.

Oertli JJ & Oertli M (1990) Energetics and thermoregulation of *Popillia japonica* Newman (Scarabaeidae, Coleoptera) during flight and rest. *Physiol. Zool.* 63(5):921-937.

Ohba M, Iwahana H, Asano S, Suzuki N, Sato R & Hori H (1992) A unique isolate of *Bacillus thuringiensis* serovar *japonensis* with a high larvicidal activity specific for scarabaeid beetles. *Lett Appl Microbiol* 14(2):54-57.

Ouedraogo A, Fargues J, Goettel MS & Lomer CJ (1997) Effect of temperature on vegetative growth among isolates of *Metarhizium anisopliae* and M-flavoviride. *Mycopathologia* 137(1):37-43.

Potter DA & Braman SK (1991) Ecology and management of turfgrass insects. *Annu. Rev. Entomol.* 36:383-406.

Potter DA, Patterson CG & Redmond CT (1992) Influence of turfgrass species and tall fescue endophyte on feeding ecology of Japanese beetle and southern masked chafer grubs (Coleoptera: scarabaeidae). *J. Econ. Entomol.* 85(3):900-909.

Potter DA, Powell AJ, Spicer PG & Williams DW (1996) Cultural practices affect root-feeding white grubs (Coleoptera: Scarabaeidae) in turfgrass. *J. Econ. Entomol.* 89(1):156-164.

Potter DA (1998) *Destructive Turfgrass Insects. Biology, Diagnosis, and Control.* Ann Arbor Press, Chelsea, Michigan. 344 p.

Potter DA & Held DW (2002) Biology and management of the Japanese beetle. *Annu. Rev. Entomol.* 47:175-205.

Quesada-Moraga E, Ruiz-García A & Santiago-Álvarez C (2006) Laboratory evaluation of entomopathogenic fungi *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* against puparia and adults of *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae). *J. Econ. Entomol.* 99(6):1955-1966.

Redmond CT & Potter DA (1995) Lack of efficacy of in vivo- and putatively in vitro-produced *Bacillus popilliae* against field populations of Japanese beetle grubs in Kentucky. *J. Econ. Entomol.* 88:846-854.

Régnière J, Rabb R & Stinner R (1979) *Popillia japonica* (Coleoptera: Scarabaeidae):a mathematical model of oviposition in heterogeneous ecosystems. *Can. Entomol.* 111:1271-1280.

Régnière J, Rabb R & Stinner BR (1983) *Popillia japonica* (Coleoptera: Scarabaeidae) :Distribution and movement of adults in heterogeneous environments. *Can. Entomol.* 115 (3):287-294.

Rippere KE, Tran MT, Yousten AA, Hilu KH & Klein MG (1998) *Bacillus popilliae* and *Bacillus lentimorbus*, bacteria causing milky disease in Japanese beetles and related scarab larvae. *Int. J. Syst. Bacteriol.* 48:395-402.

Rossman AY (1996) Morphological and molecular perspectives on systematics of the hypocreales. *Mycologia* 88(1):1-19.

Rowe WJ & Potter DA (2000) Shading effects on susceptibility of *Rosa* spp. to defoliation by *Popillia japonica* (Coleoptera : Scarabaeidae). *Environ. Entomol.* 29(3):502-508.

Sabbahi R (2008) *Utilisation du champignon entomopathogène Beauveria bassiana dans une stratégie de gestion phytosanitaire des principaux insectes ravageurs en fraiseraies.* Thèse de doctorat en biologie (Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique, Laval). 162 p.

Saeki Y, Kruse KC & Switzer PV (2005a) Male preference for large females and female reproductive condition in the Japanese beetle, *Popillia japonica* Newman (Coleoptera : Scarabaeidae). *J. Kans. Entomol. Soc.* 78(1):13-19.

Saeki Y, Kruse KC & Switzer PV (2005b) Physiological costs of mate guarding in the Japanese beetle (*Popillia japonica* Newman). *Ethology* 111(9):863-877.

SAS (2011) *Overview of the Principal Component Analysis.* http://support.sas.com/documentation/cdl/en/imlsug/63546/HTML/default/viewer.htm#imlsug_ugmultpca_sect001.htm (Consulté le 5 février 2010).

Shah PA & Pell JK (2003) Entomopathogenic fungi as biological control agents. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 61(5):413-423.

Smith I, McNamara D, Scott P & Holderness M (1997) *Quarantine pests for europe.* CABI. 1440 p.

Smitley DR (1996) Incidence of *Popillia japonica* (Coleoptera: Scarabaeidae) and other scarab larvae in nursery fields. *J. Econ. Entomol.* 89(5):1262-1266.

St Leger R, Allee L, May B, Staples R & Roberts DW (1992) World-wide distribution of genetic variation among isolates of *Beauveria* spp. *Mycol. Res.* 96:1007-1015.

St Leger R (1993) Biology and mechanisms of insect-cuticule invasion by deuteromycete fungal pathogens. *Parasites and pathogens of insects*, Beckage Ne, SA Thompson & BA Federici (Édit.) Academics Press Inc, New York, USA Vol 2. p 211-225.

Switzer PV, Enstrom PC & Schoenick CA (2009) Behavioral explanations underlying the lack of trap effectiveness for small-scale management of Japanese beetles (Coleoptera: Scarabaeidae). *J. Econ. Entomol.* 102(3):934-940.

Szendrei Z & Isaacs R (2005) Do plant cues influence the oviposition behavior of Japanese beetles? *Entomol. Exp. Appl.* 117(2):165-174.

Todorova SI, Coderre D & Côté J-C (2000) Pathogenicity of *Beauveria bassiana* isolates toward *Leptinotarsa decemlineata* [Coleoptera :Chrysomelidae], *Myzus persicae* [Homoptera :Aphididae] and their predator *Coleomegilla maculata lengi* [Coleoptera :Coccinellidae]. *Phytoprotection* 81:15-22.

Tumlinson JH, Klein MG, Doolittle RE, Ladd TL & Proveaux AT (1977) Identification of the female Japanese beetle sex pheromone: inhibition of male response by an enantiomer. *Science* 197(4305):789-792.

USDA/APHIS (2000) Managing the Japanese beetle. A homeowner's handbook. *US Department of Agriculture.*

Vidal C, Fargues J & Lacey LA (1997) Intraspecific variability of *Paecilomyces fumosoroseus*: Effect of temperature on vegetative growth. *J. Invertebr. Pathol.* 70(1):18-26.

Villani MG & Krueger SR (1994) Soil application effects of *Metarhizium anisopliae* on Japanese beetle (Coleoptera: Scarabaeidae) behavior and survival in turfgrass microcosms. *Environ. Entomol.* 23:502-513.

Vittum PJ (1986) Biology of the Japanese beetle (Coleoptera: Scarabaeidae) in eastern Massachusetts. *J. Econ. Entomol.* 79(2):387-391.

Vittum PJ, Villani MG & Tashiro H (1999) *Turfgrass Insects of the United States and Canada.* Comstock Publishing Associates, Ithaca, New York. 512 p.

Walstad J, Anderson R & Stambaugh W (1970) Effects of environnemental conditions on tow species of muscardine fungi (*Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae*). *J. Invertebr. Pathol.* 1:221-226.

Witt J, Warren S, Ranney T & Baker J (1999) Biorational and conventional plant protectants reduce feeding by adult Japanese beetles. *J. Environ. Hort.* 17:203-206.

Wright RJ, Villani MG & Agudelosilva F (1988) Steinernematid and heterorhabditid nematodes for control of larval European chafers and Japanese beetles (Coleoptera: Scarabaeidae) in potted yew. *J. Econ. Entomol.* 81(1):152-157.

Zenger JT & Gibb TJ (2001a) Identification and impact of egg predators of *Cyclocephala lurida* and *Popillia japonica* (Coleoptera : Scarabaeidae) in turfgrass. *Environ. Entomol.* 30(2):425-430.

Zenger JT & Gibb TJ (2001b) Impact of four insecticides on Japanese beetle (Coleoptera : Scarabaeidae) egg predators and white grubs in turfgrass. *J. Econ. Entomol.* 94(1):145-149.

Zimmermann G (1993) The entomopathogenic fungus *Metarhizium anisopliae* and its potential as a biocontrol agent. *Pestic. Sci.* 37: 375–379.

Zimmermann G (2007) Review on safety of the entomopathogenic fungi *Beauveria bassiana* and *Beauveria brongniartii*. *Biocontrol Sci. Technol.* 17(6):553-596.

# ANNEXES

## Chiffrier de l'analyse en composantes principales

**Légende**

Strate A : Pourcentage de l'utilisation générale de l'aire pour 100 $m^2$ aux alentours des pièges

DENS : La densité de captures des adultes du scarabée japonais calculé comme étant le nombre total de captures par pièges au courant de la période d'échantillonnage.

EFF : Le pourcentage d'efficacité des pièges calculé en divisant le nombre total d'insectes capturés par pièges par celui d'individus totaux récoltés sur le territoire de la pépinière de Berthierville.

PEL : Pourcentage de pelouse naturelle et de pelouse en jachère présente aux alentours du piège.

PL : Pourcentage d'arbres en plantations, tels que les arbres présents dans les vergers à grains.

ARB : Pourcentage d'arbres naturels, c'est-à-dire les arbres non cultivés et d'arbres en production présents alentours du piège.

PROD : Pourcentage d'arbres en production en serre et en récipients.

CO : Pourcentage de constructions artificielles telles que les routes et les bâtiments aux alentours du piège.

INF : Pourcentage d'infrastructures calculées comme étant la somme des arbres en productions et des constructions artificielles.

Strate B : Caractéristiques topographiques pour 100 $m^2$ aux alentours des pièges

DIS : Distance à l'objet le plus près par rapport au piège calculée en mètres.

HAUT : Hauteur de l'objet le plus près par rapport au piège calculée en mètre.

LAR : Largeur de l'objet le plus près par rapport au piège calculée en mètre.

Strate C : Pourcentage de recouvrement de tout ce qui touche au sol dans une aire de 100 $m^2$

BA : Pourcentage de bâtiments présent aux alentours du piège.

RO : Pourcentage de routes présentes aux alentours du piège.

RE : Pourcentage de plants en récipients présent aux alentours du piège.

RAC : Pourcentage de plants en racines nues présent aux alentours du piège.

FE : Pourcentage de feuillus aux alentours du piège.

CO : Pourcentage de conifères présent aux alentours du piège.

VEG : Pourcentage d'obstacle végétal présent aux alentours du piège.

AR : Pourcentage d'obstacle artificiel présent aux alentours du piège.

LIT : Pourcentage de litière (couvert forestier) aux alentours du piège.

ME : Pourcentage de terre meuble aux alentours du piège.

NA : Pourcentage de pelouse naturelle aux alentours du piège.

JA : Pourcentage de pelouse en jachère aux alentours du piège.

| PIEGES | DENS | EFF | PEL | PL | ARB | PROD | CO | INF | DIS | HAUT | LAR | BA | RO | RE | RAC | FE | CO | VEG | AR | LIT | ME | NA | JA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 14642 | 1.29 | 60 | 0 | 15 | 20 | 5 | 25 | 2 | 6 | 3 | 5 | 0 | 0 | 20 | 20 | 0 | 35 | 5 | 0 | 0 | 60 | 0 |
| 2 | 4139 | 0.37 | 75 | 0 | 25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 25 | 0 | 25 | 0 | 0 | 0 | 75 | 0 |
| 3 | 2472 | 0.22 | 15 | 0 | 40 | 45 | 0 | 45 | 0 | 4 | 0.5 | 0 | 20 | 0 | 45 | 85 | 0 | 85 | 0 | 40 | 20 | 15 | 0 |
| 4 | 1808 | 0.16 | 50 | 0 | 50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 | 10 | 50 | 0 | 50 | 0 | 50 | 0 |
| 5 | 5869 | 0.52 | 70 | 0 | 20 | 0 | 10 | 10 | 0 | 10 | 0.75 | 0 | 10 | 0 | 0 | 15 | 5 | 20 | 10 | 0 | 0 | 70 | 0 |
| 6 | 22660 | 2.00 | 50 | 0 | 50 | 0 | 0 | 0 | 0.5 | 2 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 | 50 | 0 | 10 | 0 | 50 | 0 |
| 7 | 5175 | 0.46 | 70 | 0 | 10 | 20 | 0 | 20 | 0 | 10 | 1 | 0 | 5 | 0 | 20 | 20 | 10 | 30 | 0 | 0 | 0 | 70 | 0 |
| 8 | 7075 | 0.63 | 90 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | . | . | . | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 90 |
| 9 | 1921 | 0.17 | 50 | 0 | 40 | 0 | 10 | 10 | 0 | 10 | 10 | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 | 40 | 40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 |
| 10 | 5829 | 0.51 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | . | . | . | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 |
| 11 | 3762 | 0.33 | 15 | 0 | 0 | 85 | 0 | 85 | 1 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 85 | 85 | 0 | 85 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 |
| 12 | 1552 | 0.14 | 50 | 0 | 50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 | 0 | 50 | 0 | 50 | 0 | 50 | 0 |
| 13 | 4455 | 0.39 | 55 | 0 | 10 | 0 | 35 | 35 | 0 | 7 | 1 | 30 | 5 | 0 | 0 | 10 | 0 | 10 | 30 | 0 | 0 | 55 | 0 |
| 14 | 19784 | 1.75 | 50 | 0 | 20 | 0 | 30 | 30 | 1 | 10 | 1 | 5 | 25 | 0 | 0 | 0 | 20 | 20 | 30 | 0 | 0 | 50 | 0 |
| 15 | 9400 | 0.83 | 5 | 0 | 15 | 0 | 80 | 80 | 0.5 | 2.5 | 4 | 70 | 10 | 80 | 0 | 80 | 0 | 10 | 80 | 0 | 0 | 5 | 0 |
| 16 | 13670 | 1.21 | 30 | 0 | 15 | 20 | 35 | 55 | 0.5 | 6 | 10 | 0 | 35 | 10 | 10 | 10 | 15 | 35 | 35 | 5 | 0 | 30 | 0 |
| 17 | 10405 | 0.92 | 45 | 0 | 25 | 20 | 10 | 30 | 0 | 6 | 10 | 0 | 10 | 0 | 20 | 20 | 25 | 45 | 0 | 0 | 5 | 45 | 0 |
| 18 | 11465 | 1.01 | 75 | 0 | 10 | 0 | 15 | 15 | 2 | 1.5 | 1 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 0 | 5 | 0 | 0 | 75 |
| 19 | 1664 | 0.15 | 50 | 0 | 35 | 0 | 15 | 15 | 0 | 10 | 10 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 35 | 35 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 |
| 20 | 3356 | 0.30 | 85 | 0 | 5 | 0 | 10 | 10 | 7 | 1.5 | 1 | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 | 5 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 85 |
| 21 | 7112 | 0.63 | 20 | 0 | 0 | 70 | 10 | 80 | 1 | 1 | 10 | 0 | 10 | 0 | 70 | 70 | 0 | 70 | 0 | 0 | 5 | 0 | 20 |
| 22 | 1244 | 0.11 | 50 | 0 | 50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 | 0 | 50 | 0 | 50 | 0 | 50 | 0 |
| 23 | 715 | 0.06 | 10 | 0 | 50 | 0 | 40 | 40 | 0 | 10 | 10 | 30 | 10 | 0 | 0 | 0 | 50 | 50 | 40 | 0 | 0 | 10 | 0 |
| 24 | 6216 | 0.55 | 10 | 0 | 20 | 0 | 70 | 70 | 1.5 | 1 | 6 | 50 | 20 | 0 | 0 | 0 | 20 | 20 | 50 | 0 | 0 | 10 | 0 |
| 25 | 779 | 0.07 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 0 | 2.5 | 3 | 70 | 30 | 40 | 0 | 40 | 0 | 0 | 70 | 0 | 25 | 0 | 0 |
| 26 | 3532 | 0.31 | 10 | 0 | 30 | 20 | 40 | 60 | 0 | 1 | 2 | 20 | 20 | 20 | 0 | 20 | 30 | 50 | 20 | 0 | 20 | 0 | 10 |
| 27 | 4711 | 0.42 | 5 | 0 | 50 | 35 | 10 | 45 | 0 | 10 | 10 | 0 | 10 | 0 | 35 | 35 | 50 | 85 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 |
| 28 | 18846 | 1.66 | 50 | 0 | 50 | 0 | 0 | 0 | 5 | 10 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 | 50 | 0 | 50 | 0 | 5 | 45 |
| 29 | 1672 | 0.15 | 40 | 0 | 50 | 0 | 10 | 10 | 0 | 10 | 10 | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 | 50 | 50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **30** | 5937 | 0.52 | 90 | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 | 5 | 10 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 90 |
| **31** | 9847 | 0.87 | 30 | 0 | 10 | 60 | 0 | 60 | 1 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 60 | 60 | 10 | 70 | 0 | 0 | 5 | 0 | 30 |
| **32** | 872 | 0.08 | 30 | 0 | 70 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 60 | 10 | 70 | 0 | 70 | 0 | 30 | 0 |
| **33** | 7437 | 0.66 | 10 | 0 | 50 | 35 | 5 | 40 | 0 | 4 | 0.5 | 0 | 5 | 35 | 0 | 30 | 20 | 85 | 0 | 50 | 0 | 10 | 0 |
| **34** | 13708 | 1.21 | 80 | 0 | 10 | 0 | 10 | 10 | 5 | 10 | 10 | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 80 |
| **35** | 5664 | 0.50 | 0 | 0 | 0 | 50 | 50 | 100 | 0 | 1 | 0.25 | 25 | 25 | 50 | 0 | 0 | 50 | 50 | 50 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **36** | 13198 | 1.17 | 60 | 0 | 25 | 0 | 15 | 15 | 3 | 1 | 0.25 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 25 | 25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 60 |
| **37** | 8712 | 0.77 | 40 | 0 | 20 | 25 | 15 | 40 | 0 | 10 | 10 | 0 | 15 | 0 | 25 | 25 | 20 | 45 | 0 | 0 | 0 | 15 | 25 |
| **38** | 11900 | 1.05 | 80 | 0 | 10 | 0 | 10 | 10 | 0 | 1 | 1.5 | 0 | 10 | 0 | 0 | 5 | 5 | 10 | 0 | 5 | 0 | 5 | 75 |
| **39** | 2530 | 0.22 | 50 | 0 | 40 | 0 | 10 | 10 | 0 | 10 | 10 | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 | 40 | 40 | 0 | 0 | 0 | 5 | 45 |
| **40** | 4658 | 0.41 | 50 | 0 | 0 | 50 | 0 | 50 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 50 | 50 | 0 | 50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 |
| **41** | 5877 | 0.52 | 50 | 0 | 40 | 0 | 10 | 10 | 2 | 1 | 1 | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 | 40 | 40 | 0 | 0 | 0 | 5 | 45 |
| **42** | 462 | 0.04 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 80 | 20 | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| **43** | 10959 | 0.97 | 15 | 0 | 50 | 25 | 10 | 35 | 0 | 8 | 1 | 0 | 10 | 25 | 0 | 75 | 0 | 75 | 0 | 50 | 0 | 15 | 0 |
| **44** | 10624 | 0.94 | 80 | 0 | 10 | 0 | 10 | 10 | 7 | 10 | 10 | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 80 |
| **45** | 8334 | 0.74 | 5 | 0 | 10 | 0 | 85 | 85 | 3 | 3 | 3 | 20 | 65 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 85 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **46** | 14245 | 1.26 | 60 | 0 | 30 | 0 | 10 | 10 | 3 | 10 | 10 | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 | 30 | 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 60 |
| **47** | 1790 | 0.16 | 40 | 0 | 50 | 0 | 10 | 10 | 0 | 10 | 10 | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 | 50 | 50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| **48** | 15326 | 1.35 | 80 | 0 | 20 | 0 | 0 | 0 | 5 | 10 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 0 | 20 | 0 | 20 | 0 | 5 | 75 |
| **49** | 1510 | 0.13 | 40 | 0 | 50 | 0 | 10 | 10 | 0 | 10 | 10 | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 | 50 | 50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| **50** | 5680 | 0.50 | 50 | 0 | 0 | 50 | 0 | 50 | 1 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 50 | 50 | 0 | 50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 |
| **51** | 3767 | 0.33 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | . | . | . | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 |
| **52** | 2032 | 0.18 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0.25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 | 50 | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| **53** | 8322 | 0.74 | 5 | 0 | 55 | 30 | 10 | 40 | 0 | 3 | 0.5 | 0 | 10 | 30 | 0 | 55 | 30 | 85 | 0 | 55 | 0 | 5 | 0 |
| **54** | 6086 | 0.54 | 35 | 0 | 10 | 35 | 20 | 55 | 4 | 10 | 0.5 | 0 | 20 | 0 | 35 | 35 | 10 | 45 | 0 | 0 | 0 | 10 | 25 |
| **55** | 5061 | 0.45 | 0 | 0 | 5 | 45 | 50 | 95 | 2 | 1.5 | 0.5 | 5 | 45 | 0 | 45 | 45 | 5 | 50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **56** | 3584 | 0.32 | 35 | 0 | 15 | 30 | 20 | 50 | 1 | 8 | 10 | 0 | 20 | 0 | 30 | 30 | 15 | 45 | 0 | 0 | 0 | 5 | 30 |
| **57** | 4264 | 0.38 | 20 | 0 | 10 | 40 | 30 | 70 | 1 | 2 | 0.5 | 5 | 25 | 0 | 40 | 40 | 10 | 50 | 0 | 0 | 0 | 5 | 15 |
| **58** | 16666 | 1.47 | 60 | 0 | 25 | 0 | 15 | 15 | 0 | 1.5 | 5 | 5 | 10 | 0 | 0 | 15 | 10 | 25 | 5 | 25 | 0 | 60 | 0 |
| **59** | 1750 | 0.15 | 35 | 0 | 45 | 0 | 20 | 20 | 0 | 8 | 10 | 10 | 10 | 0 | 0 | 0 | 45 | 45 | 10 | 0 | 0 | 35 | 0 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **60** | 8165 | 0.72 | 5 | 45 | 45 | 0 | 5 | 5 | 0 | 3 | 2 | 0 | 5 | 0 | 45 | 0 | 90 | 90 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 |
| **61** | 7481 | 0.66 | 50 | 35 | 10 | 0 | 5 | 5 | 0 | 3 | 2 | 0 | 5 | 0 | 35 | 0 | 45 | 45 | 0 | 0 | 0 | 50 | 0 |
| **62** | 366 | 0.03 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 95 | 5 | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| **63** | 12115 | 1.07 | 0 | 0 | 50 | 40 | 10 | 50 | 0 | 3 | 0.5 | 0 | 10 | 40 | 0 | 50 | 40 | 90 | 0 | 50 | 0 | 0 | 0 |
| **64** | 12162 | 1.07 | 10 | 0 | 40 | 40 | 10 | 50 | 0 | 2 | 1 | 0 | 10 | 0 | 40 | 40 | 40 | 80 | 0 | 0 | 0 | 5 | 5 |
| **65** | 8854 | 0.78 | 10 | 0 | 0 | 80 | 10 | 90 | 0 | 2 | 0.5 | 0 | 10 | 0 | 80 | 80 | 0 | 80 | 0 | 0 | 0 | 10 | 0 |
| **66** | 6775 | 0.60 | 20 | 0 | 15 | 50 | 15 | 65 | 0 | 2 | 0.5 | 0 | 15 | 0 | 50 | 50 | 15 | 65 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| **67** | 8540 | 0.75 | 10 | 0 | 0 | 70 | 20 | 90 | 1 | 2 | 0.5 | 5 | 15 | 0 | 20 | 70 | 0 | 70 | 5 | 0 | 0 | 10 | 0 |
| **68** | 6433 | 0.57 | 20 | 0 | 0 | 40 | 40 | 80 | 0 | 1 | 10 | 15 | 25 | 40 | 0 | 0 | 40 | 40 | 0 | 0 | 0 | 20 | 0 |
| **69** | 2053 | 0.18 | 40 | 0 | 50 | 0 | 10 | 10 | 0 | 8 | 10 | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 | 50 | 50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| **70** | 23923 | 2.11 | 60 | 40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 40 | 0 | 40 | 40 | 0 | 0 | 0 | 60 | 0 |
| **71** | 20386 | 1.80 | 20 | 65 | 5 | 0 | 10 | 10 | 0 | 2 | 1 | 0 | 10 | 0 | 65 | 0 | 70 | 70 | 0 | 0 | 0 | 20 | 0 |
| **72** | 147 | 0.01 | 0 | 0 | 95 | 0 | 5 | 5 | 0 | 3 | 0.5 | 0 | 5 | 0 | 0 | 65 | 30 | 95 | 0 | 95 | 0 | 0 | 0 |
| **73** | 17726 | 1.57 | 5 | 0 | 75 | 10 | 10 | 20 | 0 | 1 | 0.5 | 0 | 10 | 10 | 0 | 60 | 25 | 85 | 0 | 75 | 0 | 5 | 0 |
| **74** | 8685 | 0.77 | 0 | 0 | 45 | 35 | 20 | 55 | 0 | 2 | 1.5 | 0 | 20 | 0 | 35 | 80 | 0 | 80 | 0 | 45 | 0 | 0 | 0 |
| **75** | 23470 | 2.07 | 55 | 0 | 15 | 15 | 15 | 30 | 0 | 2.5 | 0.25 | 0 | 15 | 0 | 15 | 20 | 10 | 30 | 0 | 0 | 0 | 20 | 35 |
| **76** | 20691 | 1.83 | 50 | 0 | 25 | 15 | 10 | 25 | 0 | 2.5 | 0.25 | 0 | 10 | 0 | 15 | 25 | 15 | 40 | 0 | 0 | 0 | 30 | 20 |
| **77** | 25391 | 2.24 | 35 | 25 | 10 | 15 | 15 | 30 | 0 | 2.5 | 0.25 | 0 | 15 | 0 | 15 | 45 | 5 | 50 | 0 | 0 | 0 | 35 | 0 |
| **78** | 26116 | 2.31 | 10 | 10 | 20 | 30 | 30 | 60 | 1 | 1 | 10 | 10 | 20 | 30 | 10 | 30 | 30 | 60 | 0 | 0 | 0 | 10 | 0 |
| **79** | 1743 | 0.15 | 5 | 0 | 45 | 5 | 45 | 50 | 0 | 8 | 10 | 5 | 40 | 5 | 0 | 0 | 45 | 50 | 5 | 0 | 0 | 5 | 0 |
| **80** | 22108 | 1.95 | 15 | 80 | 0 | 0 | 5 | 5 | 0 | 2 | 1 | 0 | 5 | 0 | 80 | 0 | 80 | 80 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 |
| **81** | 21139 | 1.87 | 20 | 70 | 0 | 0 | 10 | 10 | 0 | 2 | 1.5 | 0 | 10 | 0 | 70 | 0 | 70 | 70 | 0 | 0 | 0 | 20 | 0 |
| **82** | 879 | 0.08 | 0 | 0 | 95 | 0 | 5 | 5 | 0 | 2.5 | 0.25 | 0 | 5 | 0 | 0 | 95 | 0 | 95 | 0 | 95 | 0 | 0 | 0 |
| **83** | 13590 | 1.20 | 50 | 0 | 50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 | 0 | 50 | 0 | 50 | 0 | 0 | 50 |
| **84** | 22958 | 2.03 | 80 | 0 | 20 | 0 | 0 | 0 | 3 | 8 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 15 | 20 | 0 | 5 | 0 | 0 | 80 |
| **85** | 23223 | 2.05 | 70 | 0 | 15 | 0 | 15 | 15 | 4 | 8 | 10 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 15 | 15 | 0 | 0 | 0 | 5 | 65 |
| **86** | 19633 | 1.73 | 95 | 0 | 0 | 0 | 5 | 5 | . | . | . | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 95 |
| **87** | 50580 | 4.47 | 60 | 40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0.25 | 0 | 0 | 0 | 40 | 40 | 0 | 40 | 0 | 0 | 0 | 60 | 0 |
| **88** | 28900 | 2.55 | 25 | 15 | 5 | 35 | 20 | 55 | 2 | 1 | 10 | 0 | 20 | 35 | 15 | 15 | 40 | 65 | 0 | 0 | 0 | 25 | 0 |
| **89** | 2261 | 0.20 | 0 | 0 | 65 | 0 | 35 | 35 | 0 | 10 | 10 | 0 | 35 | 0 | 0 | 0 | 35 | 35 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **90** | 16976 | 1.50 | 25 | 75 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 0 | 0 | 0 | 80 | 0 | 75 | 75 | 0 | 0 | 0 | 25 | 0 |
| **91** | 16888 | 1.49 | 20 | 80 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 0 | 0 | 0 | 80 | 0 | 80 | 80 | 0 | 0 | 0 | 20 | 0 |
| **92** | 1626 | 0.14 | 0 | 0 | 80 | 0 | 20 | 20 | 0 | 3 | 0.25 | 0 | 20 | 0 | 0 | 50 | 30 | 80 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **93** | 17087 | 1.51 | 50 | 0 | 50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 45 | 5 | 50 | 0 | 50 | 0 | 0 | 50 |
| **94** | 21890 | 1.93 | 65 | 10 | 15 | 0 | 10 | 10 | 3 | 10 | 10 | 0 | 10 | 0 | 10 | 0 | 25 | 25 | 0 | 0 | 0 | 65 | 0 |
| **95** | 27483 | 2.43 | 65 | 15 | 10 | 0 | 10 | 10 | 2 | 0.5 | 0.25 | 0 | 10 | 0 | 15 | 0 | 25 | 25 | 0 | 0 | 0 | 65 | 0 |
| **96** | 29679 | 2.62 | 70 | 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0.5 | 0.25 | 0 | 0 | 0 | 30 | 0 | 30 | 30 | 0 | 0 | 0 | 70 | 0 |
| **97** | 14517 | 1.28 | 45 | 0 | 55 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0.25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 35 | 20 | 55 | 0 | 55 | 0 | 25 | 20 |
| **98** | 585 | 0.05 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 | 50 | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| **99** | 6356 | 0.56 | 15 | 10 | 75 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 10 | 35 | 50 | 85 | 0 | 75 | 0 | 15 | 0 |
| **100** | 14690 | 1.30 | 40 | 40 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1.5 | 0 | 0 | 0 | 40 | 20 | 40 | 60 | 0 | 20 | 0 | 40 | 0 |
| **101** | 9639 | 0.85 | 10 | 90 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1.5 | 0 | 0 | 0 | 90 | 0 | 90 | 90 | 0 | 0 | 0 | 10 | 0 |
| **102** | 226 | 0.02 | 20 | 0 | 70 | 0 | 10 | 10 | 0 | 2 | 0.25 | 0 | 10 | 0 | 0 | 60 | 10 | 70 | 0 | 70 | 0 | 20 | 0 |
| **103** | 8553 | 0.76 | 50 | 0 | 50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 | 0 | 50 | 0 | 50 | 0 | 0 | 50 |
| **104** | 18352 | 1.62 | 80 | 15 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0.5 | 0.15 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 20 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 80 |
| **105** | 25522 | 2.25 | 75 | 15 | 5 | 0 | 5 | 5 | 1 | 0.5 | 0.15 | 0 | 5 | 0 | 15 | 0 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 75 |
| **106** | 30758 | 2.72 | 85 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0.5 | 0.15 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 15 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 85 |
| **107** | 2480 | 0.22 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0.5 | 10 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 | 60 | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| **108** | 320 | 0.03 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 | 50 | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| **109** | 445 | 0.04 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.5 | 0.25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| **110** | 429 | 0.04 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.5 | 0.25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| **111** | 1080 | 0.10 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 95 | 5 | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| **112** | 622 | 0.05 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 90 | 10 | 100 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| **113** | 655 | 0.06 | 25 | 0 | 75 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 70 | 5 | 75 | 0 | 75 | 0 | 0 | 25 |
| **114** | 3032 | 0.27 | 25 | 10 | 55 | 0 | 10 | 10 | 0 | 8 | 1 | 0 | 10 | 0 | 10 | 30 | 25 | 55 | 0 | 50 | 0 | 0 | 25 |
| **115** | 1586 | 0.14 | 30 | 10 | 55 | 0 | 5 | 5 | 0 | 8 | 0.5 | 0 | 5 | 0 | 10 | 30 | 25 | 55 | 0 | 50 | 0 | 0 | 30 |
| **116** | 6416 | 0.57 | 40 | 10 | 50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 10 | 25 | 25 | 50 | 0 | 50 | 0 | 0 | 40 |
| **117** | 806 | 0.07 | 0 | 0 | 90 | 0 | 10 | 10 | 0 | 2 | 0.25 | 0 | 10 | 0 | 0 | 90 | 0 | 90 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 |

## Résultats de l'analyse en composantes principales

| | Prin1 | Prin2 | Prin3 | Prin4 | Prin5 | Prin6 | Prin7 | Prin8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| arbres | 0.619561 | 0.066658 | 0.096623 | 0.044823 | -0.023742 | -0.247350 | -0.619787 | 0.393032 |
| infra | -0.190011 | 0.538227 | -0.340098 | 0.081033 | 0.126361 | -0.599634 | 0.262970 | 0.327558 |
| reci | -0.054380 | 0.546737 | -0.305443 | 0.066122 | 0.043345 | 0.720026 | -0.201005 | 0.199334 |
| raci | -0.391303 | -0.137768 | 0.395670 | -0.047590 | 0.705625 | 0.056132 | -0.157068 | 0.378621 |
| liti | 0.590464 | -0.001991 | 0.144736 | -0.024985 | 0.240862 | 0.213853 | 0.678582 | 0.256036 |
| meu | -0.044971 | -0.106332 | 0.095132 | 0.985134 | -0.047573 | 0.031194 | 0.045891 | 0.042314 |
| nature | -0.234368 | 0.194906 | 0.581168 | -0.100342 | -0.615701 | 0.051592 | 0.127639 | 0.401518 |
| jacher | -0.135521 | -0.581952 | -0.507339 | -0.060056 | -0.210518 | 0.091104 | 0.052604 | 0.571473 |

Eigenvalues of the Correlation Matrix

| | Eigenvalue | Difference | Proportion | Cumulative |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2.06943197 | 0.48470331 | 0.2587 | 0.2587 |
| 2 | 1.58472865 | 0.11432308 | 0.1981 | 0.4568 |
| 3 | 1.47040557 | 0.47989099 | 0.1838 | 0.6406 |
| 4 | 0.99051458 | 0.16819009 | 0.1238 | 0.7644 |
| 5 | 0.82232449 | 0.12325274 | 0.1028 | 0.8672 |
| 6 | 0.69907176 | 0.33554878 | 0.0874 | 0.9546 |
| 7 | 0.36352298 | 0.36352298 | 0.0454 | 1.0000 |
| 8 | 0.00000000 | | 0.0000 | 1.0000 |

## Chiffrier du criblage pour les larves

| Isolats | Mortalité |
|---|---|
| Daom71453 | 47 |
| Daom71453 | 87 |
| Daom71453 | 20 |
| LRS23 | 47 |
| LRS23 | 60 |
| LRS23 | 60 |
| LRS100 | 20 |
| LRS100 | 87 |
| LRS100 | 20 |
| INRS707 | 33 |
| INRS707 | 20 |
| INRS707 | 47 |
| INRS701 | 20 |
| INRS701 | 60 |
| INRS701 | 7 |
| INRS704 | 33 |
| INRS704 | 87 |
| INRS704 | 60 |
| INRS706 | 0 |
| INRS706 | 0 |
| INRS706 | 0 |
| INRS705 | 60 |
| INRS705 | 7 |
| INRS705 | 47 |
| LRS9 | 33 |

| | |
|---|---|
| LRS9 | 0 |
| LRS9 | 0 |
| Arsef1956 | 60 |
| Arsef1956 | 60 |
| Arsef1956 | 7 |
| INRS1105 | 0 |
| INRS1105 | 33 |
| INRS1105 | 0 |
| LRS25 | 47 |
| LRS25 | 60 |
| LRS25 | 47 |
| LRS24 | 7 |
| LRS24 | 7 |
| LRS24 | 0 |
| Arsef252 | 33 |
| Arsef252 | 47 |
| Arsef252 | 73 |
| Daom210569 | 33 |
| Daom210569 | 7 |
| Daom210569 | 73 |
| INRS1106 | 33 |
| INRS1106 | 7 |
| INRS1106 | 60 |
| INRS700 | 60 |
| INRS700 | 73 |
| INRS700 | 47 |

## Chiffrier du criblage pour les larves

| Isolats | Mortalité |
|---|---|
| Daom71453 | 0 |
| Daom71453 | 0 |
| Daom71453 | 0 |
| LRS23 | 21 |
| LRS23 | 23 |
| LRS23 | 0 |
| LRS100 | 21 |
| LRS100 | 38 |
| LRS100 | 31 |
| INRS707 | 7 |
| INRS707 | 15 |
| INRS707 | 44 |
| INRS701 | 29 |
| INRS701 | 69 |
| INRS701 | 44 |
| INRS704 | 21 |
| INRS704 | 27 |
| INRS704 | 50 |
| INRS706 | 0 |
| INRS706 | 0 |
| INRS706 | 0 |
| INRS705 | 57 |
| INRS705 | 54 |
| INRS705 | 100 |
| LRS9 | 50 |
| LRS9 | 54 |
| LRS9 | 13 |
| Arsef 956 | 0 |

| | |
|---|---|
| Arsef1956 | 0 |
| Arsef1956 | 0 |
| INRS1105 | 0 |
| INRS1105 | 0 |
| INRS1105 | 13 |
| LRS25 | 14 |
| LRS25 | 0 |
| LRS25 | 25 |
| LRS24 | 14 |
| LRS24 | 38 |
| LRS24 | 38 |
| Arsef252 | 36 |
| Arsef252 | 54 |
| Arsef252 | 31 |
| Daom210569 | 93 |
| Daom210569 | 62 |
| Daom210569 | 41 |
| INRS1106 | 0 |
| INRS1106 | 8 |
| INRS1106 | 13 |
| INRS700 | 50 |
| INRS700 | 62 |
| INRS700 | 19 |
| IP | 50 |
| IP | 23 |
| IP | 6 |
| CFL | 0 |
| CFL | 54 |
| CFL | 0 |

## Résultats pour le criblage des larves

The NPAR1WAY Procedure

Wilcoxon Scores (Rank Sums) for Variable Mortalite
Classified by Variable isolats

| isolats | N | Sum of Scores | Expected Under H0 | Std Dev Under H0 | Mean Score |
|---|---|---|---|---|---|
| Daom7145 | 3 | 99.50 | 78.0 | 24.711226 | 33.166667 |
| LRS23 | 3 | 112.50 | 78.0 | 24.711226 | 37.500000 |
| LRS100 | 3 | 86.00 | 78.0 | 24.711226 | 28.666667 |
| INRS707 | 3 | 73.50 | 78.0 | 24.711226 | 24.500000 |
| INRS701 | 3 | 70.50 | 78.0 | 24.711226 | 23.500000 |
| INRS704 | 3 | 114.50 | 78.0 | 24.711226 | 38.166667 |
| INRS706 | 3 | 13.50 | 78.0 | 24.711226 | 4.500000 |
| INRS705 | 3 | 84.00 | 78.0 | 24.711226 | 28.000000 |
| LRS9 | 3 | 33.00 | 78.0 | 24.711226 | 11.000000 |
| Arsef195 | 3 | 93.00 | 78.0 | 24.711226 | 31.000000 |
| INRS1105 | 3 | 33.00 | 78.0 | 24.711226 | 11.000000 |
| LRS25 | 3 | 103.50 | 78.0 | 24.711226 | 34.500000 |
| LRS24 | 3 | 28.50 | 78.0 | 24.711226 | 9.500000 |
| Arsef252 | 3 | 102.50 | 78.0 | 24.711226 | 34.166667 |
| Daom2105 | 3 | 83.00 | 78.0 | 24.711226 | 27.666667 |
| INRS1106 | 3 | 76.50 | 78.0 | 24.711226 | 25.500000 |
| INRS700 | 3 | 119.00 | 78.0 | 24.711226 | 39.666667 |

Average scores were used for ties.

Kruskal-Wallis Test

| | |
|---|---|
| Chi-Square | 26.2103 |
| DF | 16 |
| Pr > Chi-Square | 0.0511 |

## Résultats pour le criblage des adultes

The NPAR1WAY Procedure

Wilcoxon Scores (Rank Sums) for Variable Mortalite
Classified by Variable isolats

| isolats | N | Sum of Scores | Expected Under H0 | Std Dev Under H0 | Mean Score |
|---|---|---|---|---|---|
| Daom7145 | 3 | 25.50 | 87.0 | 27.655116 | 8.500000 |
| LRS23 | 3 | 67.00 | 87.0 | 27.655116 | 22.333333 |
| LRS100 | 3 | 102.50 | 87.0 | 27.655116 | 34.166667 |
| INRS707 | 3 | 85.50 | 87.0 | 27.655116 | 28.500000 |
| INRS701 | 3 | 131.50 | 87.0 | 27.655116 | 43.833333 |
| INRS704 | 3 | 106.50 | 87.0 | 27.655116 | 35.500000 |
| INRS706 | 3 | 25.50 | 87.0 | 27.655116 | 8.500000 |
| INRS705 | 3 | 158.50 | 87.0 | 27.655116 | 52.833333 |
| LRS9 | 3 | 116.00 | 87.0 | 27.655116 | 38.666667 |
| Arsef195 | 3 | 25.50 | 87.0 | 27.655116 | 8.500000 |
| INRS1105 | 3 | 38.00 | 87.0 | 27.655116 | 12.666667 |
| LRS25 | 3 | 64.00 | 87.0 | 27.655116 | 21.333333 |
| LRS24 | 3 | 101.50 | 87.0 | 27.655116 | 33.833333 |
| Arsef252 | 3 | 122.00 | 87.0 | 27.655116 | 40.666667 |
| Daom2105 | 3 | 150.50 | 87.0 | 27.655116 | 50.166667 |
| INRS1106 | 3 | 48.50 | 87.0 | 27.655116 | 16.166667 |
| INRS700 | 3 | 125.00 | 87.0 | 27.655116 | 41.666667 |
| IP | 3 | 93.00 | 87.0 | 27.655116 | 31.000000 |
| CFL | 3 | 66.50 | 87.0 | 27.655116 | 22.166667 |

Average scores were used for ties.

Kruskal-Wallis Test

| | |
|---|---|
| Chi-Square | 39.7414 |
| DF | 18 |
| Pr > Chi-Square | 0.0023 |

## Données météorologiques pour l'été 2008 à la pépinière de Berthier

| Date | Température minimum (°C) | Température maximum (°C) | Précipitations totals (mm) |
|---|---|---|---|
| 10-Jul | 13.8 | 23.9 | 0.0 |
| 11-Jul | 12.4 | 23.7 | 0.0 |
| 12-Jul | 12.4 | 27.4 | 0.0 |
| 13-Jul | 19.6 | 23.9 | 20.0 |
| 14-Jul | 17.8 | 24.8 | 0.2 |
| 15-Jul | 16.8 | 25.1 | 0.0 |
| 16-Jul | 15.4 | 28.6 | 0.0 |
| 17-Jul | 15.9 | 27.4 | 0.0 |
| 18-Jul | 16.2 | 19.6 | 51.4 |
| 19-Jul | 17.8 | 28.4 | 0.0 |
| 20-Jul | 16.0 | 23.2 | 0.0 |
| 21-Jul | 15.2 | 25.4 | 4.0 |
| 22-Jul | 17.0 | 24.2 | 2.8 |
| 23-Jul | 17.5 | 24.9 | 10.6 |
| 24-Jul | 18.7 | 23.4 | 1.2 |
| 25-Jul | 17.4 | 27.3 | 3.4 |
| 26-Jul | 17.2 | 27.8 | 1.8 |
| 27-Jul | 17.9 | 26.5 | 0.2 |
| 28-Jul | 16.6 | 26.0 | 0.0 |
| 29-Jul | 16.8 | 26.0 | 0.0 |
| 30-Jul | 15.4 | 25.4 | 0.0 |
| 31-Jul | 17.8 | 24.9 | 31.0 |
| 1-Aug | 17.3 | 27.1 | 3.6 |
| 2-Aug | 16.8 | 23.5 | 4.8 |
| 3-Aug | 17.4 | 25.1 | 11.6 |
| 4-Aug | 17.2 | 23.1 | 0.8 |
| 5-Aug | 16.3 | 22.7 | 0.0 |
| 6-Aug | 15.2 | 20.3 | 30.2 |
| 7-Aug | 14.9 | 18.9 | 3.4 |
| 8-Aug | 15.2 | 20.6 | 0.4 |
| 9-Aug | 14.1 | 24.1 | 0.2 |
| 10-Aug | 12.9 | 24.4 | 0.0 |
| 11-Aug | 16.4 | 24.3 | 1.2 |
| 12-Aug | 13.7 | 25.3 | 0.0 |
| 13-Aug | 11.9 | 23.7 | 0.2 |
| 14-Aug | 10.5 | 24.4 | 0.2 |
| 15-Aug | 13.1 | 25.8 | 0.0 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 16-Aug | 12.7 | 26.4 | 0.0 |
| 17-Aug | 15.7 | 26.8 | 0.0 |
| 18-Aug | 13.8 | 28.6 | 22.2 |
| 19-Aug | 10.9 | 19.4 | 0.0 |
| 20-Aug | 9.3 | 23.4 | 0.0 |
| 21-Aug | 11.8 | 27.3 | 0.0 |
| 22-Aug | 13.9 | 28.8 | 0.0 |
| 23-Aug | 15.4 | 28.8 | 0.2 |
| 24-Aug | 18.0 | 27.4 | 0.0 |
| 25-Aug | 12.6 | 22.1 | 0.0 |
| 26-Aug | 9.6 | 22.7 | 0.0 |
| 27-Aug | 9.6 | 25.2 | 0.0 |
| 28-Aug | 13.2 | 26.6 | 0.0 |
| 29-Aug | 14.4 | 25.9 | 0.0 |
| 30-Aug | 16.9 | 28.6 | 0.0 |
| 31-Aug | 13.4 | 25.8 | 0.0 |
| 1-Sep | 12.2 | 29.4 | 0.0 |
| 2-Sep | 15.8 | 30.9 | 0.0 |
| 3-Sep | 18.0 | 27.4 | 0.0 |
| 4-Sep | 16.8 | 25.4 | 0.0 |
| 5-Sep | 14.4 | 28.9 | 0.0 |
| 6-Sep | 17.2 | 25.0 | 3.2 |
| 7-Sep | 13.2 | 17.3 | 2.4 |
| 8-Sep | 12.3 | 23.6 | 0.2 |
| 9-Sep | 11.0 | 18.9 | 8.6 |
| 10-Sep | 7.2 | 19.8 | 0.0 |
| 11-Sep | 4.8 | 20.4 | 0.0 |
| 12-Sep | 10.3 | 16.4 | 10.2 |
| 13-Sep | 13.9 | 21.1 | 0,2 |
| 14-Sep | 13.6 | 22.8 | 28.2 |
| 15-Sep | 9.1 | 25.2 | 7.4 |
| 16-Sep | 4.8 | 18.1 | 0.0 |
| 17-Sep | 7.5 | 22.3 | 0.4 |
| 18-Sep | 3.3 | 14.1 | 0.0 |

# Fiche de soumission à un journal scientifique

## Applied Entomology and Zoology

### Spatial distribution and habitat characterization of the Japanese beetle adults, Popillia japonica (Newman) (Coleoptera: Scarabaeidae) in a tree nursery

--Manuscript Draft--

| | |
|---|---|
| Manuscript Number: | |
| Full Title: | Spatial distribution and habitat characterization of the Japanese beetle adults, Popillia japonica (Newman) (Coleoptera: Scarabaeidae) in a tree nursery |
| Article Type: | Original Research Paper |
| Corresponding Author: | Claude Guertin, Ph.D.<br>Institut national de la recherche scientifique<br>Laval, Quebec CANADA |
| Corresponding Author Secondary Information: | |
| Corresponding Author's Institution: | Institut national de la recherche scientifique |
| Corresponding Author's Secondary Institution: | |
| First Author: | François Giroux-Quesnel, M.Sc |
| First Author Secondary Information: | |
| All Authors: | François Giroux-Quesnel, M.Sc |
| | Robert Lavallée, Ph.D. |
| | Éric Bauce, Ph.D. |
| | Claude Guertin, Ph.D. |
| All Authors Secondary Information: | |
| Abstract: | The Japanese beetle, Popillia japonica (Newman) is an important pest of turfgrasses, landscape plants and nursery crops in United States and Canada. Studies were conducted to understand the relationship that may exist between habitat structure and the spatial distribution of the Japanese beetle adults in a tree nursery located in Quebec province, Canada. Traps were installed, and adult catches were monitored over the course of the summer 2008. Characterization of the environment surrounding each trap was also performed to determine factors that could explain the adult catches. Data shown that the spatial distribution of Japanese beetle adults, over the nursery, was triggered by environmental factors, mainly by the soil type, the presence of turf and trees. The dispersal of insects was also affected by the occurrence of infrastructures, such as greenhouse, pathway and building. |
| Suggested Reviewers: | Caroline Provost, Ph.D.<br>Director, CRAM<br>provost.cram@yahoo.ca<br>Dr. Provost is doing research on pest insect in agriculture. She has a strong background in insect field experiments and may certainly be able to evaluate the manuscript. |
| | Graham Thurston, Ph.D.<br>Researcher, Atlantic Forest Center<br>graham.thurston@RRCan-RNCan.gc.ca<br>Dr. Thurston is a specialist in insect population and population dynamic. He is working with forest insects, but may evaluate a manuscript related to insect pest in a crop. |