
VertigO

VertigO - la revue électronique sur les sciences de l'environnement, Vol 2, No 2, Octobre 2001

ÉDITORIAL

L'IMMENSITÉ SILENCIEUSE

Par **Éric Duchemin**

Tout en s'enfonçant dans le continent, empruntant les veines de l'Amérique, on rencontre l'immensité. Cette immensité sculptée par les colons au fil des deux derniers siècles se conjugue en champs agricoles, de pâturage, de tournesols, etc... Dès que le climat le permet, le sol est couvert de maïs, de légumineuses. En d'autres lieux, il prend la teinte jaune du blé. Des paysages merveilleux qui sont considérés, à tort ou à raison, comme un patrimoine environnemental à protéger.

Cependant derrière ces paysages agricoles une problématique environnementale importante se camoufle. Bien que les impacts directs des pesticides sur la santé humaine et sur les écosystèmes soient connus -n'oublions pas que le DDT a été banni ou son utilisation restreinte dans les pays développés au cours des années 1970 - ils sont encore largement utilisés. Au Canada, 6000 pesticides chimiques sont actuellement autorisés. En outre, dans son dernier rapport de l'ONU recommande l'utilisation du DDT pour contrer le Paludisme. Un mal pour contrer un mal. Ce rapport illustre combien l'utilisation de ces agents chimiques est une réalité.

Bien que le principal utilisateur de pesticides soit l'agriculture, il est préoccupant de constater la place grandissante de ceux-ci en milieu urbain. En effet, on utilise largement les pesticides en horticulture, dans les jardins à usage personnel, pour contrôler les mauvaises herbes dans les cours d'école ou encore pour asperger les intérieurs d'avion. L'utilisation des pesticides se rapproche des lieux de vie et les impacts sur la santé humaine risquent de suivre. Les impacts sur la santé humaine par une absorption ou un contact direct avec les pesticides sont connus, ses impacts indirects par la consommation de fruits ou des légumes traités sont en revanche moins bien connus. Le gouvernement Québécois attend pour 2003 les résultats d'une vaste étude sur les impacts potentiels de ces agents sur la santé humaine et le développement des enfants.

Une telle utilisation rapprochée à toutefois le mérite de faire prendre conscience de la menace aux citoyens et aux gouvernements.



Les pâturages dorés du Wyoming

Dans ce numéro

Lettre de l'étranger :

Vision générale des activités environnementales en Bulgarie – M. Girard (Bulgarie)

Perspective:

- **Une invasion en Nouvelle-Calédonie – Faire face à la fourmi électrique (*Wasmannia auropunctata*).** - S. Pina

Dossier:

La lutte Biologique: une alternative viable à l'utilisation des pesticides?

- **Les possibilités de la lutte biologique – emphase sur le champignon enthomopathogène *B. bassiana*** – M. de Kouassi
- **Les méthodes de lutte physique comme alternatives aux pesticides** – C. Vincent et B. Panneton
- **Parasitoïde et lutte biologique: Paradigme ou panacée** – G. Boivin
- **La lutte intégrée pour la punaise translucide : Un auxiliaire prometteur pour la pomiculture au Québec** – A. Firlej et F. Vanoosthuysse
- **Prédation intraguilde et lutte biologique** – É. Lucas

Section J'ai lu :

L'électrification rurale décentralisée: une chance pour les hommes, des techniques pour la planète – restructured river; hydropower in the era of competitive markets- Parer aux risques de demain; le principe de précaution – Notre empreinte écologique.

Section Actualité

Est-ce que le développement hydroélectrique à petite échelle est environnementalement préférable? – É.. Duchemin

Les articles n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement la position de la revue VertigO et de son comité de rédaction.

Équipe de rédaction

Rédacteur en Chef Directeur de la publication

Éric Duchemin, Ph. D

Comité éditorial

Mathias de Kouassi (Rédacteur-adjoint)
Sophie Hamel-Dufour
Hugo Poirier
Sebastian Weissenberger

Concepteur WEB

Pierre Cayer

Pour rejoindre la rédaction

VertigO
2667 rue Knox
Montréal (Québec)
H3K 1R3, Canada
courriel: vertigoweb@hotmail.com
Internet: <http://unites.uqam.ca/vertigo>

ISSN – 1492 - 8442

Éditorial (suite)

Ainsi une municipalité québécoise (municipalité de Hudson) a récemment banni l'utilisation des pesticides sur son territoire, tandis que le gouvernement québécois désire imposer une "voie rapide" à l'homologation des insecticides biologiques (biopesticides).

Cependant avant d'effectuer des transformations législatives illusoires prenons le temps de comprendre ce qu'implique une telle "voie rapide". Avant tout, il est important de comprendre l'échec de la stratégie québécoise de réduction des pesticides en agriculture (en vertu de cette politique, les quantités utilisées en agriculture devaient avoir été réduite de 50% entre 1995 et 2000). Il est aussi important de développer l'idée d'imposer un quota régional à l'usage des pesticides, lequel serait ajusté selon la capacité des sols et des cours d'eau, et d'effectuer le dépôt du Code de gestion des pesticides que nous ont promis quatre ministres successifs.

Sans s'attaquer directement à la gestion environnementale des pesticides, le dossier de ce numéro illustre la complexité et le potentiel de la lutte biologique pour développer une alternative viable à l'utilisation des pesticides. Ceci est un premier pas vers une meilleure compréhension de cette approche et de son implantation futur dans la gestion du développement agricole et forestiers (les deux principaux utilisateurs de pesticides – au Québec l'agriculture compte pour près de 80% des achats annuels de pesticides).

LETTRE DE L'ETRANGER

VISION GÉNÉRALE DES ACTIVITÉS ENVIRONNEMENTALES EN BULGARIE

Martin Girard, M.Sc. Env., Conseiller en Environnement, Conseil d'affaires Canada-Bulgarie, Ministère de l'Environnement et des Eaux de Bulgarie, martingir@hotmail.com

La Bulgarie est située au Sud-Est de la Péninsule balkanique. Au Nord, le Danube lui sert de frontière naturelle avec la Roumanie tandis qu'à l'Ouest une région montagneuse sépare le pays de la Yougoslavie (Serbie) et de l'ancienne république yougoslave de la Macédoine. Au sud, ses voisins sont la Grèce et la Turquie. À l'Est, les plages du pays s'ouvrent sur la Mer Noire.

La Bulgarie est un des pays les plus pauvres d'Europe Centrale et de l'Est. La démocratie a fait son entrée dans le pays au début des années 1990 suite à la chute du communisme. Actuellement, le Gouvernement national travaille à tenter de stabiliser l'économie qui connaît beaucoup de basses périodes. Le récent changement de pouvoir (juin 2001) pourrait avoir un impact majeur sur l'ensemble des réformes en cours dans le pays.

L'environnement est un des sujets de préoccupations. L'accent mis, dans le passé, sur le développement de l'industrie lourde a causé des dégâts substantiels à l'environnement. Dans quelques régions, les usines métallurgiques ont pollué le sol et l'eau avec le plomb, l'arsenic et le cadmium au point de les rendre inutilisables pour l'agriculture. Les récentes fermetures d'usines ont aidé à soulager l'environnement du poids des émissions de polluants mais ont aussi contribué à couper l'entrée de fonds (amendes de pollution) servant aux efforts d'assainissement et de protection de l'environnement.

Au niveau de l'eau, la fréquente absence ou le mauvais fonctionnement des équipements de traitement des eaux usées ont contribué à déclarer certaines rivières comme mortes ou presque mortes. La pollution de l'air est un constant sujet de discussion dans les grands centres de population et l'utilisation de l'essence au plomb menace encore la santé humaine. Dans certains secteurs miniers, les activités d'extraction montrent des niveaux de radioactivité plus élevés que ceux des réacteurs nucléaires. Plusieurs réformes politiques abordent ces questions et sont en développement mais les résultats demeurent incertains. Les progrès réalisés ont parfois été chaotiques mais les mesures adoptées soulagent les sociétés et les entreprises qui emploient des technologies environnementalement saines, d'une partie de leurs impôts.

La législation environnementale du pays repose sur l'Acte de la protection de l'environnement (APE) que le ministère de

l'Environnement et des Eaux (MEE) a adopté en 1991. Cette acte a été établi en parallèle avec un Fonds national pour l'environnement et un Fonds municipal de protection de l'environnement. L'APE a permis une révision du système d'établissement des standards environnementaux et l'incorporation du principe pollueur-payeur, du droit du public à être informé et de la prévention contre la pollution. L'acte appelle aussi à l'intégration de la protection de l'environnement dans d'autres secteurs de la politique nationale.

L'actuel MEE a été fondé en 1997. Il est le résultat de la fusion de l'ancien ministère de l'Environnement, du Conseil national de l'Eau et du Comité de Géologie. Cette fusion a permis de regrouper la gestion nationale de l'environnement sous une seule administration ministérielle.

Récemment, un nouveau Département de l'intégration environnementale a été créé au sein du Département de l'intégration européenne du Ministère. Le Département des eaux et les 15 inspectorats régionaux ont été renforcées. Une agence exécutive environnementale fait également partie des corps administratif constituant la structure du ministère de l'Environnement et des Eaux.

En 1999, la Bulgarie a été invité à débiter les négociations sur son accession à l'Union Européenne. Depuis, l'intégration dans l'Union européenne est devenue l'objectif principal du Gouvernement et un processus d'adaptation complet a été mis en branle. En raison de la démarche liée à ce processus, le Gouvernement a clarifié ses perspectives politiques et fait des progrès considérables dans l'harmonisation de ses lois et règlements environnementaux avec ceux de l'UE. La politique environnementale de l'état a été mise à jour par le Gouvernement, de manière à inclure la pleine transposition des directives cadres traitant avec l'air, l'eau, les déchets, la protection de la nature et les produits chimiques, et de manière à remplir les vides dans la législation sectorielle.

La politique et la gestion environnementale ont, sans aucun doute, profité de ce vaste changement dans l'orientation sociale. Le ministère de l'Environnement et des Eaux a accru et modernisé son rôle dans le pays et poussé pour l'adoption de plusieurs actes et lois spécifiques aux domaines de l'environnement tel que l'air, l'eau et les déchets. En

conséquence, malgré la crise économique, les objectifs des politiques environnementales semblent avoir gagné du terrain dans la société en général.

Aujourd'hui, les priorités environnementales de la Bulgarie sont axées vers les problèmes relatifs à la pollution de l'eau, de l'air et du sol, aux déchets nucléaires et des mines, à la gestion des déchets solides, à la pollution transfrontière de l'air et de l'eau (provenant de la Roumanie et des anciens pays yougoslaves) et aux niveaux élevés de contamination industrielle rendant certaines villes inhabitables. D'autres soucis environnementaux devant être pris en compte par le pays concernent le traitement des déchets dangereux, les menaces sur les régions côtières de la Mer Noire et les polluants industriels qui endommagent la couche d'ozone.

Enfin, la Bulgarie est une partie à plusieurs accords environnementaux internationaux incluant : la Convention sur la protection de la Mer Noire; la Convention sur pollution atmosphérique transfrontière à longue portée; la Convention sur la diversité biologique; la Convention sur les zones humides d'importance internationale; la Convention sur la sécurité nucléaire; la Convention sur protection de la couche d'ozone; la Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques.

UNE INVASION EN NOUVELLE-CALÉDONIE – Faire face à la fourmi électrique (*Wasmannia auropunctata*).

Par Samuel Pinna, Laboratoire de lutte biologique, Université du Québec à Montréal.

Laboratoire de Zoologie appliquée – US001 « Enbiopac » Institut de Recherche pour le Développement - Centre de Nouméa.

Appelée localement la fourmi électrique, *Wasmannia auropunctata* (Hymenoptera : Formicidae, Roger, 1863)) est présente depuis une trentaine d'années en Nouvelle-Calédonie. On ne connaît pas exactement son année d'introduction mais c'est en 1972, dans la commune de Dumbéa, qu'elle a été remarquée et collectée pour la première fois (Fabres & Brown 1978).



Son nom vernaculaire de fourmi électrique lui vient de son extrême agressivité et de sa piqûre irritante. L'expansion de cette fourmi vagabonde, appelée « little fire ant » par les Anglo-saxons, a des conséquences écologiques et humaines notables. Elle est considérée aujourd'hui comme la plus dangereuse peste introduite dans l'archipel Calidonien (Cochereau & Potiaora 1995); Jourdan 1997). Sa plasticité écologique lui permet de se développer dans tout type de milieu, même si on observe chez ses populations d'amples variations spatiales et temporelles. Elle a en particulier fortement envahi les forêts tropicales sèches (Jourdan 1999). La superficie très réduite de ces milieux originaux, patrimoine naturel unique, pose un problème aigu de conservation que l'introduction de cette fourmi amplifie encore.

L'envahisseur est une menace pour la diversité biologique et la nuisance qu'il induit a des conséquences sociales et économiques. De par son comportement agressif et la pénibilité de sa piqûre au venin puissant, elle a plusieurs impacts sur l'homme. Elle rend les chiens aveugles, décourage les éleveurs (stockmen) de faire pâturer leurs troupeaux dans certaines zones

très envahies, investit les jardins et les maisons et rend certaines cultures, comme le café, difficiles et très pénibles à conduire (Cochereau & Potiaora 1995). En 1978, les pouvoirs publics ont engagé l'opération « café soleil » pour fournir une culture de rente aux tribus mélanésiennes. Il apparaît aujourd'hui que cette opération est un échec. La présence de fortes populations de *Wasmannia* sur les caféiers a rendu les cultivateurs très réticents à accomplir les tâches d'entretien et de récolte. Elle est, comme on le verra plus loin, une des causes d'abandon de cette culture. Cet abandon tient probablement aussi à « l'inéquation de la logique du développement à la logique de la société mélanésienne » (David 1993).

Vue sur la Nouvelle-Calédonie

À 1500 km de l'Australie et à 1000 km de la Nouvelle Zélande, la Nouvelle-Calédonie a vécu longtemps un isolement qui n'était pas que géographique. Il y a environ 3000 ans les premiers hommes s'y installèrent et la colonisation du territoire par les Français date de 1853. Son statut de territoire d'outre mer (TOM) a évolué récemment et elle a aujourd'hui le statut de pays d'outre mer, suite aux Accords de Nouméa. Les rapports politiques et sociaux de la Nouvelle-Calédonie avec la métropole sont donc relativement complexes et la question de son indépendance reste toujours au cœur du débat politique local. On distingue classiquement les « Kanaks » (les autochtones) et les « Caldoches » (descendant de migrants français, colons libres ou transportés de la pénitencière, qui y ont fait souche), les « métros » ou « zoreilles » qui sont des français de métropole installés depuis peu ou qui occupent temporairement un emploi en Nouvelle-Calédonie (certains fonctionnaires en particulier). Mais le pays est en fait une mosaïque d'ethnies de diverses origines. Actuellement, sa population compte environ 50% de Mélanésiens, 30% d'Européens, et 20% issus d'autres ethnies (Indonésiens, Vietnamiens, Tahitiens, Wallisiens, Futuniens...). La société Kanak, dont la transformation est indéniable, conserve un enracinement coutumier très profond, qui se retrouve dans l'organisation du travail et le particularisme fort de la question foncière. En terme de développement, c'est donc un territoire jeune avec une grande diversité culturelle.

Au plan de la géographie, la Nouvelle-Calédonie est une grande île de 19 000 km². Soumise le plus souvent au courant des

alisez, elle bénéficie d'un climat relativement tempéré que l'on peut qualifier de « tropical océanique ». De décembre à mars c'est la saison chaude, suivie d'une intersaison d'avril à mai où les pluies et les températures diminuent. La saison fraîche s'étend de juin à août (hiver austral) qui précède d'une belle intersaison de septembre à novembre, la période la plus sèche.

Un élément marquant de l'environnement insulaire de la Nouvelle-Calédonie est son endémisme botanique voisin de 75% (Jaffré & Veillon 1994). Cet endémisme et l'originalité de la Nouvelle-Calédonie en font une des 10 « hot spots » de la diversité tropicale (Myers, 1988 in Bouchet et al. 1995). Cet environnement est donc unique, mais il est aussi fragile et particulièrement sensible aux invasions biologiques.

La multiplicité de substrats et des nuances climatiques a modelé et diversifié les milieux calédoniens. On distingue une végétation autochtone ou primaire avec plus de 3000 espèces dont 76% sont endémiques. Ses diverses formations couvrent plus de la moitié du territoire : ce sont les mangroves, les zones lacustres, les forêts denses humides sempervirentes, les maquis miniers, les forêts sclérophylles et les franges côtières. La végétation modifiée ou secondaire, compte une centaine d'espèces pantropicales. Ce sont les savanes herbeuses ou arborées (niaouli : *Melaleuca*), les fourrés à mimosa, à goyavier, à gaïac (*Acacia spirorbis*)... qui résultent d'une dégradation progressive des milieux natifs (Jaffré & Veillon 1994).

Près de la moitié du territoire est considérablement modifiée par les activités humaines, qui menacent sa diversité animale et végétale. Contrairement à d'autres régions du monde l'exploitation forestière n'est pas ici la menace principale, même si l'exploitation « sélective » du bois pratiquée en Nouvelle-Calédonie a eu aussi des conséquences. L'extension du pâturage et les feux de brousse fréquents ont été les causes majeures du recul des forêts, en particulier sur la côte Ouest. De ce fait la forêt dense humide recouvre encore 4000 km² (représentant 15% de la superficie totale, 22% en prenant en compte les formations de transition) tandis que la forêt sclérophylle, appelée aussi forêt sèche, ne recouvre plus que 350 km². Réduite à moins de 2% de sa superficie originale, la forêt sclérophylle est un patrimoine à préserver.

Les forêts tropicales sèches : conservation d'un patrimoine naturel

Les forêts sèches ou forêts sclérophylles sont des biotopes qui ont comme caractéristique principale une carence hydrique. Par définition, ce sont l'ensemble des formations végétales intactes ou plus ou moins dégradées, toujours vertes (sempervirentes), aux feuillages coriaces et vernis (Jaffré & Veillon 1994). La strate arborescente est de faible hauteur avec des individus dépassant rarement 15 mètres de haut et 40 centimètres de diamètre, alors que la strate arbustive est dense et accompagnée de nombreuses lianes. La strate herbacée est constituée de

graminées pour l'essentiel. La pluviométrie annuelle est inférieure à 1000 mm et les températures sont élevées. Originellement, ces formations se trouvaient sur des substrats variés mais leur régression les cantonne aujourd'hui généralement sur roches sédimentaires.

La diversité de la flore actuelle de ce milieu est relativement faible par rapport aux forêts tropicales humides de la côte Est : on n'y rencontre que 13% des espèces autochtones connues du territoire. On recense 410 espèces végétales (246 genres et 91 familles) avec un taux d'endémisme de 56% et plusieurs espèces rares, qui ne se retrouvent que dans une ou deux stations (Jaffré & Veillon 1994). Notre méconnaissance des invertébrés nous laisse supposer une grande originalité de la faune (Bouchet et al. 1995).

Les forêts sclérophylles occupaient jadis l'ensemble des plaines de la côte Ouest, depuis le littoral jusque sur les premières pentes à environ 300m d'altitude. C'est donc la moitié de la superficie forestière de la Nouvelle-Calédonie qui a disparu. Avant l'arrivée de l'homme, on estime que la forêt sèche recouvrait 4000km² : il n'en reste que 350km². Les formations primaires représentent 100km² et le reste est plus ou moins dégradé, comprenant une proportion variable de gaïac (*Acacia spirorbis*) ou de niaouli (*Melaleuca quinquenervia*) (Bouchet et al. 1995). Il ne subsiste en fait de cette forêt que des lambeaux reliques (entre 1 et 10 ha) isolés par les savanes et d'autant plus vulnérables que l'abrutissement et le piétinement de nombreux animaux sauvages ou domestiques (cerfs, bovins, chèvres, cochons...) inhibent la régénération de sa flore.

La problématique *Wasmannia*

Expansion sur l'archipel néo-calédonien

Originaire d'Amérique du Sud, *W. auropunctata* connaît maintenant une dispersion mondiale : Bermudes, Californie, Floride, Cameroun, Congo, archipel des Galápagos, Île Cocos au large du Mexique, Wallis et Futuna, Îles Salomon, Îles Banks au nord de Vanuatu, récemment Hawaï. On l'a même trouvée dans des serres en Angleterre et au Canada. (Jourdan 1999).

La propagation de cet insecte est principalement anthropique. On estime le début de l'invasion de la Nouvelle-Calédonie aux années 60 - 70, ce qui coïncide avec l'introduction du pin Caraïbe (*Pinus cariboea* var *hondurensis*) (Chazeau et al. 2000). L'implantation de cette essence forestière est l'hypothèse la plus convaincante pour expliquer l'introduction de la fourmi électrique.

Initialement, *W. auropunctata* était confinée aux zones anthropisées. Actuellement elle est présente dans tout les types de milieu naturels : forêt sclérophylle, forêt tropical humide, maquis minier. Toute la grande terre est infestée, mis à part quelques zones encore indemnes et qui mériteraient de le rester (Cochereau & Potiaora 1995) ; (Chazeau et al. 2000). Le

reboisement en pin caraïbe, la relance de la filière café, les travaux de terrassement, forestiers ou agricoles, qui induisent le transport de terre ou de matériaux susceptibles de fournir un site de nidification (comme de simples parpaings) sont autant d'activités qui propagent l'envahisseur si les plus grandes précautions ne sont pas prises (Chazeau et al. 2000). *Wasmannia* a ainsi été transportée jusqu'aux îles Loyauté, à l'île des Pins, et même à la très isolée île Walpole. Pourtant, sans vol nuptial, *W. auropunctata* n'étend son implantation que par bourgeonnement des nids, donc à courte distance. L'homme est le principal vecteur de son déplacement sur de longues distances, même si un déplacement passif de sexués peut se produire naturellement, par exemple lors de fortes averses où on observe des fourmis « embarquées » sur des feuilles filant le long de cours d'eau.



Une fourmi vagabonde : Les raisons biologiques de son succès

Avec des ouvrières lentes et de très petite taille (1.2 à 1.5 mm), sans combattants spécialisés (espèce monomorphe), on peut se demander quels sont les avantages de cette espèce face à d'autres fourmis, d'autres insectes prédateurs ou des araignées, tous beaucoup plus gros qu'elle. En fait, les ouvrières possèdent un aiguillon et un venin très puissant, mais sa réussite vient aussi de ses caractéristiques biologiques générales. La « fourmi électrique » est une fourmi vagabonde (« tramp species »). On désigne ainsi des espèces qui partagent des caractères biologiques particuliers (groupement fonctionnel, non taxinomique ou phylogénétique). Selon Passera (1994) ils sont au nombre de huit : *absence de vol nuptial*, accouplement intranidal et développement par bourgeonnement des nouvelles colonies ; *polygynie fonctionnelle*, c'est à dire cohabitation de plusieurs reines sans dominance hiérarchique ; *unicolonialité*, formant une supra-colonie interconnectée ; *tendance à la migration* ; *grande agressivité interspécifique* ; *brève durée de vie des reines* ; *stérilité des ouvrières* ; *petite taille et monomorphie des ouvrières*.

W. auropunctata est une espèce principalement terricole (litière). Dotée d'une grande plasticité écologique, elle est

capable de coloniser une vaste gamme d'habitats. Sa tolérance aux conditions abiotiques est d'autant plus grande qu'elle ne construit pas de véritable fourmilière ou nid et qu'elle déménage facilement lorsque nécessaire. Elle est opportuniste quant au choix des sites de nidification et on trouve des colonies dans la litière entre des feuilles agglomérées, dans du bois en décomposition, sous des pierres, et même quelque fois à l'aisselle des branches de certains arbres (Jourdan 1999).

Sa polyphagie est un atout supplémentaire. Elle est là encore opportuniste, avec une alimentation basée à 60% de miellat d'homoptères (Clark et al. 1982) et elle consomme occasionnellement de la matière organique ; du nectar floral, des graines, des fleurs. Elle est en activité 24 heures par jour, même quand il pleut (Tennant 1994), son agressivité interspécifique est forte, son agressivité intraspécifique quasiment inexistante, son recrutement en masse très rapide et continu et sa capacité à monopoliser les ressources pourrait être amplifiée par l'utilisation de phéromones répulsives (Jourdan 1999).

Malgré l'absence de compétiteurs, prédateurs ou parasites notables, l'extension de l'envahisseur est un phénomène assez lent, impliquant la progression par fronts pour la conquête des territoires adjacents. Mais l'adéquation de sa plasticité écologique et des activités humaines lui confère la possibilité d'être facilement déplacée dans toute la ceinture tropicale. Quand elle trouve des conditions favorables, elle peut saturer le biotope, formant « un véritable tapis vivant de fourmi » (Hölldobler & Wilson 1990).

Dominance écologique et menace sur la biodiversité

Une centaine d'espèces de fourmis est inventoriée en Nouvelle-Calédonie et on peut estimer l'effectif de la myrmécofaune à 155 espèces avec environ 65 % d'endémisme (Jourdan 1999). *W. auropunctata* n'est pas la seule fourmi exotique du territoire : 23 espèces, dont 14 autres « tramp species » ont été accidentellement introduites.

Avec des taux d'endémisme allant de 100% pour les Epheméroptères, les Trichoptères et jusqu'à 35% pour les Lépidoptères (Delsinne 2000), la Nouvelle-Calédonie offre une richesse et une diversité entomologiques élevées. Le risque que le déséquilibre engendré par l'action de l'envahisseur induise une forte perte de biodiversité est donc grand, car la fourmi électrique est omniprésente. On la croyait restreinte aux plaines mais elle est aussi active en altitude : à 400 mètres au sud (Mts Koghis), à 600 mètres au nord-est (Mt Panié) (Jourdan 1997). Dans les forêts sclérophylles fortement infestées, on observe une nette diminution des populations de reptiles et de geckos (Jourdan 1997). Dans ce milieu les effectifs de *W. auropunctata* sont impressionnants et sa dominance est écrasante (Chazeau et al. 2000). Elle peut représenter jusqu'à 60% des arthropodes récoltés (Jourdan 1997).

La petite fourmi de feu semble avoir un impact beaucoup plus grand en milieu insulaire qu'en milieu continental. En effet son impact reste local en Floride et au Cameroun. Au Brésil (sa zone d'origine), elle n'est notable qu'en culture et spécialement en culture de cacao (Majer et al, 1994 in Jourdan 1997). Les niches écologiques qui peuvent être occupées par des Formicidae dans la ceinture tropicale semblent n'être que partiellement occupées dans les îles du Pacifique. Cela pourrait être une raison de sa spectaculaire réussite (Jourdan 1997).

Impacts humains et économiques

La réputation de cet insecte n'est plus à faire en Nouvelle-Calédonie. Sa nuisance est perceptible jusque dans les jardins de Nouméa, seule vraie ville de l'île. Mais, au plan humain, le problème n'est pas là où la disponibilité des produits de traitement et le pouvoir d'achat permettent de le traiter. Ce sont les populations rurales qui sont vraiment affectées au quotidien. (Chazeau et al. 2000). Elle envahit les jardins, parfois des installations électriques, les habitations traditionnelles (où elle peut installer ses nids dans la toiture). Elle interfère directement avec la vie quotidienne des « broussards » et particulièrement des mélanésiens. La piqûre de *Wasmannia* provoque une réaction cutanée qui peut durer plusieurs jours avec de fortes démangeaisons. Les piqûres répétées aux yeux des chiens provoquent des kératites qui engendrent la cécité (très fréquente chez les chiens en tribu). Les troupeaux sont dérangés par l'irritante piqûre et les « stockmen » évitent des zones très envahies. En absence d'enquête zootechnique on ne connaît cependant pas l'importance des nuisances dans le domaine de l'élevage et la question reste posée quant aux herbivores sauvages, comme les cerfs.

Cette fourmi a aussi un impact sur les productions agricoles (maraîchage, arboriculture, caféiculture). Sa piqûre n'encourage pas les travaux d'entretien et de récolte. On assiste ainsi à l'abandon progressif d'une culture de rente comme la caféerie familiale mélanésienne (Chazeau et al. 2000). D'autre part, sa présence interfère avec les complexes parasitaires : elle entretient une relation de mutualisme avec des cochenilles (notamment *Coccus viridis*) qui sont pour elles de véritables « vaches à miellat » et qu'elles élèvent et protègent (Cochereau & Potiaora 1995). Insectes piqueurs de sève, les cochenilles prolifèrent alors l'abondant miellat qu'elles secrètent forme un excellent substrat nutritif pour un champignon (*Meliola sp.*), qui en proliférant noircit les feuilles d'un feutrage qu'on appelle la fumagine. Cette nuisance secondaire altère la fonction chlorophyllienne, peut faire dépérir les plants et dégrade sensiblement le paysage (Cochereau & Potiaora 1995).

Lutte contre l'envahisseur

Le programme de lutte intensif mené entre 1975 et 1976 sur l'île de Santa-Fé (Galápagos) illustre l'inefficacité des **méthodes chimiques** les plus drastiques. Durant ce programme l'arrachage de la strate herbacée, le retournement de pierres

susceptibles d'abriter des nids, le brûlage et le traitement à base de pyréthrinés et de DDT ont été pratiqués. Le tout pour un échec, puisque *Wasmannia* a été de nouveau détectée 6 ans plus tard (Abedrabbo 1994). En outre, les mesures de fortune contre ces fourmis, qui sont souvent les seules que des populations à faible pouvoir d'achat et à faible technicité peuvent adopter, n'ont jamais apporté que de très brefs soulagements. Aux îles Banks (Vanuatu) récemment envahies (vers 1995), on a tenté de les brûler, de les ébouillanter, de protéger les abords des habitations en répandant de l'huile de vidange ou du pétrole ; mais les zones ainsi traitées ont toujours été rapidement réenvahies (Chazeau & Bonnet de Larbogne 1999).

En Nouvelle-Calédonie, quelques tentatives de traitement du sol à l'aide de Diazinon® ont été réalisées en liaison avec la Direction de l'Économie Rurale : les zones traitées ont encore une fois été réenvahies (Chazeau et al. 2000). En fait, on admet qu'un contrôle efficace de population de fourmi n'est jamais obtenu à l'aide d'insecticides de contact. Cela tient à l'organisation sociale des fourmis : ce type d'insecticide ne tue que les ouvrières, non les reines et les couvains sexués (Chazeau et al. 2000). De plus, ces insecticides manquent totalement de spécificité. L'application ponctuelle est impossible, puisque les nids de *Wasmannia* sont diffus, et leur usage impose une application par épandage, avec toutes ses conséquences induites sur l'environnement. On a cependant utilisé en caféerie une technique qui consiste à placer un chiffon à la base des troncs, en le badigeonnant d'huile de coco additionnée de Diazinon (Cochereau & Potiaora 1995). Elle limite efficacement l'accès au feuillage mais ne peut éradiquer les populations, car l'opportunisme alimentaire de *Wasmannia*, lui permet facilement de compenser la perte de ressource, en utilisant la diversité des ressources disponibles dans les caféeries sous ombrage peu ou pas entretenues (Chazeau et al. 2000).

Si le principe de la **lutte biologique** est assez simple (introduire l'antagoniste de l'espèce nuisible pour réguler naturellement ses populations), les critères nécessaires pour sa mise en place sont plus difficiles à réunir : spécificité, efficacité, praticabilité, durabilité. Aucune forme de lutte biologique contre les Formicidae n'a encore connu de succès (Ulloa Chacón & Cherix 1994).

Mais les agents qui régulent les populations de *Wasmannia* existent évidemment dans sa région d'origine. On connaît un Hyménoptère Eucharitidae, *Oraesema minutissima* (Heraty 1994), mais tout reste à apprendre sur cet insecte avant d'envisager une possible exploitation : spécificité parasitaire, capacité et longévité d'action, impact réel. Il existe aussi des Diptères Phoridae, qui influencent plus le fourrageage et la récolte de ressources que les effectifs des populations. Leur utilisation pourrait être efficace pour les zones de front en réduisant la capacité compétitive de *W. auropunctata* (Jourdan 1999). Mais aujourd'hui aucun ennemi naturel ne semble capable d'un contrôle efficace. Il n'y a donc pas de « solution miracle » pour lutter contre *Wasmannia auropunctata*. Le

déplacement de son cortège parasitaire pour la mise en œuvre d'un programme de lutte intégrée semble un idéal encore très lointain. Nos lacunes sur la biologie même de *Wasmannia* dans son milieu naturel d'origine sont d'ailleurs flagrantes.

Une autre méthode de contrôle consisterait à favoriser des fourmis compétitrices, de préférence choisies parmi les espèces natives de Nouvelle-Calédonie. Il existe dans les milieux anthropisés une *Pheidole* introduite (*P. megacephala*) qui est capable de résister à *Wasmannia* : un front stable en caférie a ainsi été suivi (Bangou) pendant plus d'un an (Chazeau et al. 2000). Mais, même si elle offre l'avantage de ne pas piquer, elle est aussi une « tramp specie » et les expériences australienne et hawaïenne n'incitent pas à la déplacer dans les milieux naturels. La compétitivité des espèces natives est en cours d'étude (J. Le Breton, com pers.)

Applicabilité d'un contrôle à l'aide d'appâts empoisonnés

L'équipe du laboratoire de zoologie appliquée de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD, Centre de Nouméa) mène actuellement des essais de lutte à l'aide d'appâts toxiques. Cette recherche n'a pas comme finalité de trouver une solution unique au problème *Wasmannia*, mais d'apporter un élément de contrôle pragmatique en l'attente d'une solution globale. Contrairement aux insecticides de contact, ces appâts ne tuent pas immédiatement les ouvrières qui ramènent l'insecticide au nid pour détruire reines et couvains. L'utilisation simultanée d'insecticides de contact et d'appâts empoisonnés est donc à proscrire (Chazeau et al. 2000). On cherche à savoir si la destruction locale complète (ouvrières, reines et couvains) des populations de *Wasmannia* est possible par cette méthode dans les conditions de terrain. Les essais ont lieu dans la caférie familiale de la tribu de Paouta (commune de Pouembout), dans une forêt sèche totalement envahie de la presqu'île de Pindaï et sur un front d'invasion au sein de cette forêt.

Aucun appât ciblant spécifiquement *Wasmannia* n'a été mis au point. On est donc réduit à utiliser des produits ciblés contre d'autres espèces (Chazeau et al. 2000), en l'occurrence de l'Amdro® (maïs concassé, comme attractif huile de soya, matière active hydraméthylnon). L'Amdro a originalement été développé contre la fourmi de feu *Solenopsis invicta* qui est aussi une « tramp specie », mais de taille plus grande. Il a été testé avec succès contre *Wasmannia* en laboratoire (Williams & Whelan 1992) et a offert des résultats probants sur le terrain aux Galápagos (Abedrabbo 1994).

Chazeau et al (2000) ont déjà mené des essais similaires dans une caférie familiale de la tribu de Bangou (commune de Païta) entre avril 1998 et mai 1999. L'expérimentation n'a pas atteint l'objectif recherché d'une diminution significative des populations. Les raisons possibles de cet échec sont multiples : conditions climatiques défavorables (fortes pluies lessive le produit, contrairement aux conditions sèches au Galápagos) ;

pression de traitement insuffisante ; produit d'origine mal adapté à la cible *Wasmannia* (granulométrie).

Les essais sont donc repris dans des conditions qui paraissent optimum, afin de clarifier l'intérêt de cette technique dans les conditions de terrain de la Nouvelle-Calédonie. Pour la caférie, la question est de savoir si on peut retrouver des conditions d'exploitation « normales » (suppression de la nuisance). Pour la forêt sèche, la question est double : savoir si on peut éliminer *Wasmannia* d'une zone naturelle envahie, en espérant le retour des espèces locales ; et savoir si on peut endiguer, voire faire reculer un front d'invasion.

On ne connaît pas précisément le jeu des facteurs abiotiques qui commandent la dynamique annuelle des populations de *Wasmannia* (Chazeau et al. 2000). Néanmoins il est clair que l'expérimentation doit avoir lieu pendant la saison sèche. Mis en œuvre depuis le début septembre 2001, pour une durée de 8 à 10 semaines, les essais ont commencé quand les populations étaient à leur plus bas niveau, avant la remontée des températures (sortie de l'hiver austral) et avant l'augmentation des ressources. On utilise une granulométrie plus fine (réalisée de façon artisanale) et les traitements sont plus intensifs (une application hebdomadaire). L'évolution quantitative des populations de *Wasmannia* est suivie par un échantillonnage au moyen de pièges de Barber ou "pitfall traps".

Perspectives d'actions futures

Les fourmis sont souvent discrètes dans leur phase initiale d'introduction mais certaines sont devenues de véritables pestes en région tropicale (Jourdan 1997). L'étude en cours veut mettre en relief l'applicabilité ou non des appâts toxiques dans le contexte calédonien. Elle ne prétend pas trouver l'unique et miraculeuse solution. La prévention reste plus que jamais nécessaire pour essayer de protéger les milieux encore indemnes.

Les appâts toxiques n'ont pas les conséquences néfastes des produits chimiques largués dans l'environnement, mais ils ne sont certainement pas sans effets pervers. S'ils s'avèrent efficaces, ces appâts pourraient conduire à une amélioration de la situation, mais seulement pour une gestion à court ou à moyen terme du problème. Le retour à un équilibre écologique est nécessaire pour espérer une gestion durable de l'environnement. La poursuite des recherches pour trouver une solution de contrôle biologique plus adéquate est donc essentielle. De plus, la problématique *Wasmannia* ne représente pas seulement une question de « gestion de l'environnement ». Sa dimension humaine va plus loin. Pour la prévention, et encore plus pour l'appropriation par les populations locales de nouvelles techniques de lutte, la sensibilisation et l'éducation sont primordiales.

Le maintien de la biodiversité insulaire de la Nouvelle-Calédonie et la baisse des nuisances induites chez l'homme par

la *Wasmannia auropunctata* sont des enjeux majeurs. Cette invasion montre les interactions complexes entre la dimension naturelle et la dimension humaine du problème, et le mythe du « *One best way* » pour résoudre les problématiques environnementales se trouve bien malmené par cette irritante fourmi électrique...

Williams, D. F. & Whelan, P. M. (1992): Bait attraction of the introduced pest ant, *Wasmannia auropunctata* (Hymenoptera: Formicidae) in the Galapagos Islands. *J. Entomol. Sci.* **27**, 29-34.

Références

- Abedrabbo, S. (1994):** Control of the little fire ant *Wasmannia auropunctata* on Santa Fe Island in the Galapagos Islands. In: Exotic ants: Biology, impact, and control of introduced species (Williams, D. F. ed). *Westview Press, Boulder, CO.* 332 p. pp. 219-227.
- Bouchet, P., Tanguy, J. & Veillon, J. (1995):** Plant extinction in New Caledonia : protection of sclerophyll forests urgently needed. *Biodiversity and conservation* **4**, 415-428.
- Chazeau, J. & Bonnet de Larbogne, L. (1999):** The invasion of the little fire ant *Wasmannia auropunctata* in Vanuatu. *Report to the Pacific Community.*, pp. 1-10, IRD, Nouméa.
- Chazeau, J., Potiaroa, T., Bonnet de Larbogne, L., Konghouleux, D. & Jourdan, H. (2000):** Etude de la "fourmi électrique" *Wasmannia auropunctata* (Roger) en Nouvelle-Calédonie : expressions de l'invasion, moyens d'une maîtrise de la nuisance en milieu agricole, praticabilité d'une préservation des milieux naturels., pp. 1-27, Annex., IRD, Nouméa.
- Clark, D. B., Guayasamín, C., Pazmiño, O., Donoso, C. & Páez de Villacís, Y. (1982):** The tramp ant *Wasmannia auropunctata*: autecology and effects on ant diversity and distribution on Santa Cruz Island, Galapagos. *Biotropica* **14**, 196-207.
- Cochereau, P. & Potiaora, T. (1995):** Caféculture et *Wasmannia auropunctata* (Hymenoptera, Formicidae) en Nouvelle-Calédonie, pp. 20, IRD, Nouméa.
- David, G. e. S., P. (1993):** Terre, culture et développement en Nouvelle-Calédonie, la caféculture en milieu mélanésien. Paper pres. La Terre. *Actes du sixième Collque C.OR.A.I.L.*, Nouméa.
- Delsinne, T. (2000):** Etude de l'invasion en forêt sclérophylle néo-calédonienne de la fourmi peste *Wasmannia auropunctata* (Roger), 1863 (Hymenoptera : Formicidae). Maîtrise de Biologie des Populations et des Ecosystèmes, Université des Sciences et Technologies de Lille, Villeneuve d'Asq.
- Fabres, G. & Brown, W. L., Jr. (1978):** The recent introduction of the pest ant *Wasmannia auropunctata* into New Caledonia. *J. Aust. Entomol. Soc.* **17**, 139-142.
- Heraty, J. M. (1994):** Biology and Importance of Two Eucharitid Parasites of *Wasmannia* and *Solenopsis*. In: Exotic ants: Biology, impact, and control of introduced species (Williams, D. F. ed). *Westview Press, Boulder, CO.* 332 p. pp. 104-120.
- Hölldobler, B. & Wilson, E. O. (1990):** The ants. *Harvard University Press, Cambridge, Mass.*
- Jaffré, T. & Veillon, J. (1994):** Les principales formations végétales autochtones en Nouvelle-Calédonie : caractéristiques, vulnérabilité, mesures de sauvegarde., pp. 1-7, Annex., IRD, Nouméa.
- Jourdan, H. (1997):** Threats on Pacific islands : the spread of the tramp ant *Wasmannia auropunctata* (Hymenoptera : Formicidae). *Pacific Conservation Biology* **3**, 61-64.
- Jourdan, H. (1999):** Dynamique de la biodiversité de quelques écosystèmes terrestres néo-calédoniens sous l'effet de l'invasion de la fourmi peste *Wasmannia auropunctata* (Roger), 1863 (Hymenoptera : Formicidae). *Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse.*
- Tennant, L. E. (1994):** The Ecology of *Wasmannia auropunctata* in primary tropical rainforest in Costa Rica and Panama. In: Exotic ants: Biology, impact, and control of introduced species (Williams, D. F. ed). *Westview Press, Boulder, CO.* 332 p. pp. 80-90.
- Ulloa Chacón, P. & Cherix, D. (1994):** Perspectives on control of the little fire ant (*Wasmannia auropunctata*) on the Galapagos Islands. In: Exotic ants: Biology, impact, and control of introduced species (Williams, D. F. ed). *Westview Press, Boulder, CO.* 332 p. pp. 63-72.

LA "LUTTE BIOLOGIQUE" : une alternative viable à l'utilisation des pesticides?

Ces dernières décennies, la protection de l'environnement s'impose de plus en plus comme une préoccupation mondiale majeure. Dans le domaine de l'agriculture, il est indéniable que l'expansion et la productivité agricole doivent dorénavant passer par une gestion optimale des insectes nuisibles et des mauvaises herbes en minimisant les effets sur l'environnement. La méthode classique de lutte chimique contre les insectes ravageurs des récoltes et des mauvaises herbes, jadis considérée comme panacée, fait de plus en plus place à la lutte intégrée et à la lutte biologique par utilisation de micro-organismes, de prédateurs, de parasitoïdes et de méthodes dites physiques. Il est admis maintenant par tous que la lutte chimique a des conséquences néfastes sur l'environnement; entre autres, par la toxicité dans la chaîne trophique, la pollution des eaux de surface et souterraine (Vereijken et Viaux, 1990; Rudd, 1974; Mellanby, 1977; Roberts, 1989; Tooby, 1989)¹, sur la santé humaine par les résidus de pesticides sur les aliments et les intoxications par inhalation (Foschi, 1989; Izraillet et al., 1975; Pimentel et al.; 1980) et surtout la résistance acquise par les insectes ravageurs et les vecteurs de maladies infectieuses chez les humains, suite à l'utilisation intempestive, inconditionnelle et irrationnelle des pesticides chimiques (Georghiou et Mellon, 1983; Poiré et Pasteur, 1991; Starnes et al., 1993; Knight et Norton, 1989).

Malgré le développement d'autres molécules de synthèse très efficaces, l'histoire des pesticides aura démontrée qu'une gestion strictement basée sur l'emploi des insecticides chimiques restera toujours fragile à plusieurs égards quel que soit l'insecticide, car l'acquisition de résistance chez les nuisibles, la pollution environnementale et les résidus de ces molécules chimiques sur les aliments demeurent possibles. Selon Tingey, (1992) les insecticides chimiques ont une durée de vie active commerciale très éphémère, soit seulement en moyenne 3,5 années.

Ce numéro consacré à la lutte biologique fait un état de l'immense potentiel de la lutte biologique comme alternative viable à la lutte chimique. Dans ce dossier Docteur Guy Boivin, Chercheur à Agriculture et Agro-alimentaire Canada présente la faisabilité de la lutte biologique par utilisation de parasitoïdes. Les docteurs Charles Vincent et Bernard Panneton chercheurs à Agriculture et Agro-alimentaire Canada font un

descriptif des méthodes de luttés physiques. Le docteur Eric Lucas et les étudiants gradués Mathias Kouassi, candidat au doctorat en sciences de l'environnement, Annabelle Firlej et Frantz Vanoo, candidats à la maîtrise en Sciences biologiques, présentent respectivement, l'importance de la prédation Intra-guille, un survol de la prédation en lutte biologique et les possibilités de la lutte microbiologique avec emphase sur le champignon entomopathogène *B. bassiana*. Ces derniers sont tous du laboratoire de lutte biologique du docteur Daniel Coderre à l'UQAM (Université du Québec à Montréal).

Généralité sur le concept de lutte biologique

Clausen, (1972), cite Smith (1919) comme précurseur du terme « lutte biologique » pour expliquer l'utilisation d'ennemis naturels des insectes nuisibles pour leur contrôle. Cette définition offre deux options selon la nature de l'agent biocide répresseur utilisé; l'exploitation de biocides inertes (toxines dérivées de micro-organismes) et l'exploitation de biocides autonomes entomophages microbiens (champignons, virus, bactéries, protozoaires) ou animaux comme les prédateurs et les parasitoïdes. Ces biocides peuvent être utilisés selon deux stratégies; l'une curative, par la répression immédiate ou l'autre, préventive lorsque l'intervention n'est pas imminente. Les méthodes biologiques offrent des solutions viables à cause de l'automatisme des micro-organismes entomopathogènes ou phytopathogènes, de leur variété, de leur spécificité, de leur compatibilité intrinsèque avec la nature et de leur capacité d'évoluer avec et sans intervention humaine (Cloutier et Cloutier, 1992). Le concept de lutte biologique a subi une évolution au cours du temps et intègre dans sa définition actuelle toutes les formes non chimiques de contrôle des ravageurs des récoltes mais aussi des mauvaises herbes. Cette définition extensible permet d'intégrer à l'utilisation des biocides autonomes ou inertes, les méthodes culturales, la résistance variétale, les phéromones et juvénoides, les méthodes physiques de lutte, les insecticides botaniques. Il faut cependant mentionner que la définition large de la lutte biologique ne fait pas l'unanimité chez les spécialistes. D'ailleurs Monsieur Guy Boivin en fait mention dans son article.

Méthodes de lutte biologique

Dans la littérature il existe 7 méthodes de lutte biologique, dont certaines sont traitées dans le dossier de ce numéro. Afin de réaliser un rapide survol des concepts sous-jacent la lutte biologique, les différentes méthodes sont rapidement expliquées ci-dessous. Certaines seront spécifiquement traitées dans les articles du dossier.

1. La lutte biologique par utilisation de prédateurs

Les prédateurs tuent leur proie pour satisfaire leurs besoins nutritifs (Huffacker, 1976; Baker et Dunn, 1990). On distingue deux types de prédateurs à savoir les Sténophages et les Euryphages (Begon et al., 1990;

¹ Pour les références voir l'article de M. de Kouassi

Debach, 1973; Pedigo, 1988). Les premiers sont des spécialistes et leur cycle biologique est synchronisé à celui de leurs proies (Wratten, 1978). En lutte biologique, les familles les plus utilisées sont certaines espèces de Syrphidae, Cecidomyidae, Coccinellidae et Chamaeyiidae (Agarwala et Saha, 1984; Bishop et al., 1986, Clausen, 1972; Debach, 1973). Les seconds sont plutôt généralistes et peuvent utiliser d'autres sources de nutrition non-animale comme le pollen, champignon ou matière végétale (Begon et al., 1990; Debach, 1973). En lutte biologique, certaines espèces du groupe des acariens et des insectes appartenant à l'ordre des Coléoptères, Dermaptères, Hemiptères, Neuroptères sont les plus utilisés. (Voir articles du Dr Eric Lucas, Annabelle Firlej et Frantz Vanoosouyne)

2. La lutte biologique par utilisation de parasitoïdes

Les parasitoïdes sont les entomophages qui, pour compléter leur cycle de vie tuent leur hôte (Clausen, 1972; Huffacker, 1976; Debach, 1973). Ils ont de grandes capacités d'orientation, de repérage, de recherche active et sont très spécifiques à leurs hôtes. En lutte biologique, les trois ordres les plus utilisés sont les Hyménoptères (87,3 %), les Diptères (12.5 %) et les Coléoptères (0.2 %) (Debach, 1979; Bradford, 1994). Il existe aussi les Hyperparasitoïdes, lesquels sont parasitoïdes des précédents. (Voir article du Dr Guy Boivin)

3. La lutte biologique par utilisation de méthodes culturales

C'est l'ensemble des méthodes culturales défavorisant les ravageurs des récoltes (Herzog et Funderburk, 1986). Il existe toute une panoplie de lutte culturale comme les rotations de cultures, les bicultures ou plusieurs associations de plantes, l'anticipation ou le retardement des saisons de semis ou de récolte, l'assainissement des plantations après les récoltes, le sarclage des mauvaises herbes aux alentours des plantations, les jachères etc.

4. La lutte biologique par utilisation de la résistance variétale

Selon McKinley, (1988), la résistance variétale est la capacité pour une variété de plante d'obtenir une bonne productivité malgré la présence de ravageurs. Deux mécanismes sous-tendent à ce concept: l'antixénose, quand la plante par sa physiologie, sa morphologie ou sa phénologie (structures des organes, goût, odeur, couleur, longueur de son cycle de développement) repousse ou amoindrit les dommages causés par le

ravageurs (Benedict et al., 1983; Robert et Foster, 1983) et l'antibiose, quand la plante est capable de produire une substance pouvant empêcher le développement du ravageur (Van Edem, 1987; Smith, 1989).

5. La lutte biologique par utilisation d'insecticide botanique

Plus de 59 familles et 188 genres de plantes sont utilisées pour la répression des insectes ravageurs (Simmons et al., 1992). Ces plantes contiennent des substances qui ont des propriétés anti-appétantes, répulsives ou même insecticides. Généralement, à part quelques propriétés intéressantes comme la répulsion ou la dissuasion de prise alimentaire, cette méthode est similaire à la lutte classique par utilisation de substances chimiques.

6. Lutte Biologique par utilisation de Méthodes physiques

(Voir article de Dr Charles Vincent et Dr Benoît Panneton)

7. La lutte biologique par utilisation de micro-organismes

(Voir article de M. de Kouassi)

LES POSSIBILITÉS DE LA LUTTE MICROBIOLOGIQUE - emphase sur le champignon entomopathogène *B. bassiana*

Par M. de Kouassi, Doctorat en Sciences de l'environnement, Laboratoire de lutte biologique Université du Québec à Montréal, C.P. 8888, Succ. Centre-Ville, H3C 3P8, courriel : d231230@er.uqam.ca

La lutte biologique, précisément par utilisation de micro-organismes entomopathogènes est une alternative très prometteuse pour assurer une protection phytosanitaire performante de par l'ubiquité naturelle des agents microbiologiques dans les écosystèmes, leur grande variété, leur dissémination facile, leur spécificité d'action et aussi leur persistance dans l'environnement. Les micro-organismes utilisés en lutte microbiologique appartiennent à plusieurs taxons à savoir les virus, les bactéries, les micro-champignons, les nématodes et les protozoaires. À ce jour, plusieurs milliers de micro-organismes entomopathogènes et pathogènes des mauvaises herbes ont été décrits et plus d'une centaine d'espèces sont utilisées en champs (Ignoffo, 1970, 1973). Les formulations de biocides à base de micro-organismes deviennent de plus en plus performantes avec des prix compétitifs (Ahmed et al., 1994; Starnes et al., 1993). Selon Ahmed, (1994), l'utilisation des insecticides microbiens augmente rapidement, de 10 à 25 % par année. La lutte biologique par utilisation de micro-organismes offre une diversité d'agents de lutte microbiologique. Ces micro-organismes appartiennent à plusieurs taxons à savoir 1) les bactéries, 2) les virus 3) les micro-champignons, 4) les nématodes et 5) les protozoaires.

Ils sont naturellement présents dans l'environnement (sol, air, eau) et infectent généralement leur hôte soit par ingestion, par la cuticule ou par les orifices. Le pathogène se multiplie dans l'hôte en lui causant des dommages par destruction des tissus, par septicémie ou toxémie entraînant sa mort plus ou moins immédiate. Tous ces micro-organismes possèdent des formes de résistance leur permettant de persister dans l'environnement et de perpétuer leur cycle de vie (Jourdeuil et al., 1992). Cependant, les micro-organismes ont des spectres d'action assez étroits à cause de certains facteurs abiotiques qui peuvent être limitant pour leur développement optimal. Par exemple les UV (Ignoffo et Hostetter, 1977; Burges, 1981; Roberts et Campbell, 1977; Gardner et al., 1977; Fargues et al., 1988), les variations suboptimales de température (Roberts et Campbell, 1977; Doberski, 1981; Stathers et al., 1993) et de l'humidité (Fargues, 1972; Ramoska, 1984; Riba et Marcandier 1984; Khachatourians, 1987) sont détritantes pour la plupart des micro-organismes.

1. Les bactéries

Selon Starnes *et al.*, 1993, plus d'une centaine de bactéries ont été identifiées comme ayant un potentiel d'utilisation en lutte biologique. Ces bactéries entomopathogènes appartiennent surtout à trois grandes familles qui sont les Bacillaceae, Enterobacteriaceae et Pseudomonaceae (Greathead *et al.*, 1994). À l'heure actuelle, *Bacillus thuringiensis* Berliner et *B. sphaericus* sont les espèces les plus utilisées en lutte contre les ravageurs. Pour *B. sphaericus*, la toxine est localisée dans la paroi sporale et va être libérée par une digestion partielle de la bactérie dans le tube digestif de la larve de l'insecte. La toxine pénètre dans la membrane péritrophique du tube digestif et empoisonne la larve (Burgess, 1981; Singer, 1981). Les bactéries se développent dans l'hôte et le quittent quand celui-ci se désintègre. Nous développerons davantage le cas du *B.t.* à cause de sa grande utilisation tant en agriculture qu'en foresterie et en milieu aquatique. Certaines souches de *B.t.* possèdent une spore et une inclusion parasporale composée d'une ou plusieurs toxines protéiques. Quatre types de toxine peuvent être isolées du *B. thuringiensis*, les α -exotoxines (Heimpel, 1955; Heimpel, 1967; Kushner *et al.*, 1957; Toumanoff, 1953); β -exotoxines (Burgerjon, 1965; Heimpel, 1967; Heimpel et Angus, 1963); δ -endotoxines et γ -exotoxines (Heimpel, 1967; Heimpel et Angus, 1963). Dans le mésenteron de l'insecte, en présence d'un pH stomacal basique (8,9), le cristal va se désintégrer pour libérer une endotoxine, un polypeptide toxique qui va provoquer une rapide baisse de l'ATP au niveau des cellules stomacales, un gonflement de cellules épithéliales, une paralysie du tube digestif et un déséquilibre ionique dans l'hémolymphe. L'insecte meurt par inanition (Fast, 1981; Cloutier et Cloutier, 1992; Greathead *et al.*, 1992; Miller *et al.*, 1983) ou par une septicémie provoquée par la multiplication de la bactérie dans l'hémolymphe et les tissus.

Le *B.t.* est efficace contre certaines espèces de coléoptères, lépidoptères et diptères (Morris, 1983; Ahmed *et al.*, 1994). Cependant il ne serait pas efficace contre les acridiens en raison de l'acidité intestinale (Greathead *et al.*, 1994). Le *B.t.* ne doit pas oblitérer l'utilisation d'autres bactéries qui se sont révélées efficaces comme le genre *Xenorhabdus* (Enterobacteriaceae), très connu pour sa virulence contre les acridiens. Elles forment le plus souvent des symbiotes avec les nématodes qui agissent

comme vecteur. Libérées dans l'homocoele, elles tuent rapidement leur hôte (Greathead *et al.*, 1994). *B. popillae* est efficace contre les Scarabaeidae et a été utilisé avec succès contre le scarabée japonais *Popillia japonica* (Hutton et Burbutis, 1974; Miller *et al.*, 1983; Krieg, 1987). Dans le cas de *B. popillae*, les spores ingérées germent dans le tube digestif et traversent la membrane épithéliale, l'insecte meurt par septicémie (Burgers, 1982). *Pseudomonas aeruginosa* et *Serratia marcescens* (Saik *et al.*, 1990) sont des agents potentiels de lutte. L'utilisation répétée des bactéries peut toutefois, comme les pesticides chimiques, entraîner une résistance chez certaines espèces (Dunphy et Tibelius, 1992).

2. Les Virus

Les virus entomopathogènes se divisent généralement en deux grands groupes distincts, d'une part, ceux possédant des corps d'inclusion paracrystallin et ceux sans corps d'inclusion. On les regroupe en sept familles. Ce sont, les Baculoviridae, Reoviridae, Poxviridae (à corps d'inclusion); les Iridoviridae, Parvoviridae, Picornoviridae et les Rhabdoviridae (sans corps d'inclusion) (Faulkner et Boucias, 1985; Arata *et al.*, 1978). Ces familles renferment la plupart des 650 espèces de virus entomopathogènes connues (Khachatourians, 1986). Ce sont les Baculoviridae, les Reoviridae (Miller *et al.*, 1983) et les virus entomopox (poxviridae) qui sont les plus utilisés en lutte biologique, car ils sont bénins pour les vertébrés, les corps d'inclusion ne pouvant se développer que chez les insectes (Paynes, 1982). Les baculovirus ont depuis longtemps présenté un intérêt principalement pour leur spécificité. Ils n'ont en effet été observé que chez les invertébrés et en particulier chez les insectes (Devauchelle, 1993). Ce sont des virus en bâtonnet dont le génome est constitué d'une molécule d'ADN bicaténaire de haut poids moléculaire (70-85 10^6 daltons). Quant aux entomopox, ils sont parasites de plusieurs acridiens ravageurs de cultures (Purrini *et al.*, 1988) et sont comme les baculovirus, inoffensifs pour les vertébrés, d'où leur grand intérêt en lutte biologique (Street et Mc. Guire, 1990). Les virus sont des parasites obligatoires et ne peuvent se reproduire que dans les cellules animales ou végétales. Au cours du processus d'infection dans le noyau des cellules, ces virus forment des corps d'inclusion appelés polyèdres qui sont constitués de nombreuses particules virales dans une matrice protéinique composée principalement d'un simple polypeptide, la polyedrine. Les polyèdres ingérés vont être dégradés par les protéases du tube digestif de l'insecte et les virions libérés traversent les cellules intestinales pour se multiplier dans les hémocytes et dans les tissus adipeux. Il est rapporté par Meynadier *et al.*, (1993) que dans certains cas, les virus liquéfient les corps gras entraînant une turgescence de l'insecte suivi de sa mort. Les polyèdres formés dans le noyau provoquent la polyedrose nucléaire (NPV) et affectent principalement les lépidoptères et hyménoptères tandis que les baculovirus à corps d'inclusion granulaire (GV) causent la granulose et affectent surtout les lépidoptères.

Au niveau des rickettsies, les publications sont plus rares. Cependant Vago et Martoja (1963) ont mentionné qu'une rickettsie, *Rickettsiella grylli* existait chez les grillons et était capable de contrôler leur population.

Les caractéristiques principales des bioinsecticides viraux sont la spécificité, la haute virulence, la rapidité d'action et le niveau raisonnable de persistance dans l'environnement (Dent, 1991). La rémanence des virus est cependant affectée par les radiations UV. Par exemple les NPV et GV sont inactivés après quelques heures d'exposition au rayonnement solaire (Franz, 1971).

3. Les Protozoaires (Grégarines, Microsporidies et Amibes)

Les protozoaires appartiennent à sept phyla, dont quatre, les Ciliophora, Sarcocystophora, Apicomplexa et Microspora sont pathogènes des insectes (Dent, 1991). Les familles les plus utilisées en lutte biologique sont les Amoebidae et les Nosematidae (Greathead *et al.*, 1994). Par exemple *Braconia locustae* (Amoeba appartenant au phylum des Sarcocystophora) est très efficace pour le contrôle des locustes (Canning, 1982). Parmi les néogrégarines, ce sont les microsporidies qui offrent le plus de potentiel en lutte biologique en tant qu'organismes unicellulaires eucaryotes (Canning, 1982). Ce sont des parasites intra-cellulaires obligatoires qui forment des spores caractéristiques. Chez les microsporidies du genre *Nosema*, l'infection se réalise par ingestion des spores, celles-ci germent dans le tube digestif et traversent les tissus épithéliaux (Maddox, 1987). Dans le cytoplasme, l'agent infectieux se multiplie en produisant d'autres spores qui vont envahir l'insecte et peuvent par transmission verticale infecter la génération suivante. Les protozoaires provoquent des maladies chroniques à évolution lente ou des enzooties, qui affaiblissent et affectent la croissance ou la fécondité de leur hôte plutôt que d'entraîner une mort rapide (Poinar *et al.*, 1985; Cloutier et Cloutier, 1992). Cependant l'hôte infecté devient souvent plus sensible à d'autres infections d'origines virales, bactériennes ou mycoses (Khachatourians, 1986). L'espèce *Nosema locustae* a été utilisée avec succès dans la lutte contre les acridiens aux USA. Une mortalité de plus de 95% a été obtenue avec une infection précoce des larves (Greathead 1992b; Kevan, 1992). Des mortalités ont été obtenues avec *Vairimorpha necatrix* en infectant des larves de lépidoptères particulièrement des noctuidae. Dans les régions sahéliennes d'Afrique et les régions arides d'Asie, *N. locustae* Canning est très prometteur dans la lutte anti-acridienne en raison des possibilités de production et de dissémination par ultra bas volume et de son innocuité vis-à-vis des vertébrés. Les microsporidies *Nosema pyrausta* et *Vairimorpha necatrix* sont potentiellement exploitables contre les ravageurs des cultures localement importantes (Andreadis, 1987). La revue de littérature est ambiguë sur l'utilisation des microsporidies. Nous avons deux pôles divergeants; d'une part, ceux qui ne considèrent pas les microsporidies comme des agents de lutte biologique efficaces car n'entraînant pas la mort

de l'hôte mais plutôt des dommages tels les effets débilissants ou affaiblissants et d'autre part ceux qui soutiennent que ce sont des agents de lutte efficace. Il est donc nécessaire de lever cette équivoque. En tout état de cause, en tant que parasite intracellulaire obligatoire, les microsporidies tout comme les virus sont très difficiles à multiplier de façon massive pour la production de biopesticides (Khachatourians, 1986; Poinar et al., 1985). Cependant des formulations commerciales existent.

Parmi les Amoebidae, *Melameba locustae* King et Taylor est connu comme agent pathogène pouvant conduire à la mortalité des criquets et des grillons (Kevan, 1992). Il infecte principalement les tubes de Malpighi des criquets (Kevan, 1992) et de certains tétrigidés et gryllidés (Taylor et King, 1937; Lea, 1958; Prinsloo, 1960, 1961a; Dempster, 1963; McLaughlin, 1971; Henry et Oma, 1981; Braun et al., 1988; Streett et McGuire, 1990). *Melameba locustae* semble celui de tous les protozoaires amiboïdes entomophiles qui présente le plus d'intérêt en lutte microbologique (McLaughlin, 1971). Quant aux grégaires, on les retrouve particulièrement chez presque tous les groupes d'orthoptéroïdes (Steinhaus, 1949; 1963; Gunter et Herter, 1974). Ce sont les protozoaires intestinaux les plus répandus chez les insectes et particulièrement chez les criquets (Geathead, 1966a; Theodoridés et al., 1958; Steinhaus, 1949). Les dommages qu'ils infligent à l'épithélium intestinal permettent à d'autres bactéries entomopathogènes d'envahir l'hôte et de provoquer des septicémies (Dempster, 1963). Harry, (1970) a montré que l'eugrégarine *Gregarina garnhami*, empêchait les imagos de criquets pèlerins *Schistocerca gregaria* de prendre du poids. Pour McLaughlin, (1971), ces protozoaires sont potentiellement utilisables en lutte biologique bien que plusieurs auteurs ne soient pas de cet avis.

4. Les nématodes

Il existe plusieurs espèces de nématodes parasites d'insectes. Pour la plupart d'elles, l'infection se fait à partir d'œufs déposés sur les feuilles des plantes. Les œufs éclosent et les larves regagnent l'homocèle et au quatrième stade quittent l'hôte par perforation des tissus intersegmentaires. Il s'en suit la mort de l'insecte. Certaines espèces de Steinernatidae et Heterorhabditidae vivent en symbiose avec des bactéries du genre *Xenorhabdus*. Les larves pénètrent l'hôte par les orifices naturels et même par la cuticule ou elles libèrent les bactéries qui tuent rapidement l'hôte. Quoique de bons agents en lutte biologique, l'utilisation des nématodes en zone sèche est limitée par les facteurs abiotiques particulièrement les UV qui sont délétères pour tous micro-organismes (Ignoffo et Hostetter, 1977; Burges, 1981; Roberts et Campbell, 1977; Gardner et al., 1977) et peuvent entraver le processus d'infection de l'hôte (Greathead et al.1994).

5. Microchampignons

Parmi les micro-organismes utilisés en lutte biologique, plus de 700 espèces de microchampignons sont entomopathogènes (Starnes et al., 1993) et jouent un rôle important dans la régulation naturelle des populations d'insectes (Wraight et Roberts, 1987; Ferron, 1978). Ils appartiennent au sous-taxon des Mastigomycotina, Zygomycotina, Ascomycotina et Deuteromycotina. Le plus grand nombre de pathogènes se trouvent dans la classe des Zygomycètes, mais les plus utilisées en lutte biologique proviennent des Deuteromycètes (Fungi imperfecti). Les espèces des genres *Beauveria*, *Metharizium*, *Verticillium*, *Erynia*, *Hirsutella*, *Entomophthora* et *Entomophaga* sont les plus utilisées en lutte biologique (Wraight et Roberts, 1987; Goettel, 1992). Ils ont un intérêt agronomique considérable dans la lutte biologique contre les ravageurs de cultures et sont donc l'objet d'études de plus en plus poussées. La pathogénicité de l'inoculum sporal et la spécificité de l'hôte sont deux paramètres importants dans le choix de l'isolat fongique. Les microchampignons entomopathogènes sont des agents de lutte très intéressants du fait de leur aptitude à infecter l'hôte par ingestion ou par simple contact rendant tous les stades, œuf, larve, adulte sensibles ainsi que les succeurs-piqueurs (Carruthers and Soper, 1987). Ils peuvent être produits en masse à moindre coût et peuvent être appliqués avec les méthodes conventionnelles. Les principaux facteurs limitant l'utilisation en champ des microchampignons sont abiotiques et vont entraîner la perte d'efficacité de l'inoculum fongique sur le couvert végétal. Les effets de certains facteurs sur la viabilité des conidies ont été très étudiés comme la température (Roberts et Campbell, 1977; Doberski, 1981; Stathers et al., 1993), l'effet du rayonnement solaire sur la rémanence ou l'inactivation de l'inoculum infectieux (Ignoffo et Hostetter, 1977; Burges, 1981; Roberts et Campbell, 1977; Gardner et al., 1977), l'effet de l'humidité (Fargues, 1972; Hall et Papierok, 1982; Ramoska, 1984; Riba et Marcandier 1984; Khachatourians, 1987).

Le champignon entomopathogène *Beauveria bassiana*

❖ Historique et taxonomie

Parmi les micro-organismes entomopathogènes ayant un potentiel d'agent de lutte biologique contre les insectes nuisibles, plus de 500 espèces de champignons sont susceptibles d'infecter des insectes (Starnes et al., 1993). *Metarhizium anisopliae* était le premier pathogène utilisé délibérément pour le contrôle d'insecte ravageur par le Russe Eli Metchnikoff (1880) (le père de la lutte microbologique) dans les années 1880. *B. bassiana* (Hyphomycète) est un microchampignon pathogène pour de nombreux insectes. Sa pathogénicité a été démontrée pour la première fois par Agostino Bassi de Lodi (1835), le précurseur des études des maladies infectieuses, en démontrant pour la première fois qu'un micro-organisme pouvait être responsable de maladie infectieuse chez l'animal. *Beauveria sp.* a été décrit par la suite par Jean Beauverie en

1911 sous le nom de *Botrytis bassiana*. Le genre a été établi par Vuillemin en 1912 et fut classé dans l'ordre des Hyphomycètes.

Il est important de mentionner que la classification des hyphomycètes a été sujette à plusieurs révisions. A l'heure actuelle, on regroupe sous le nom de Hyphomycetes plus de 10 000 espèces appartenant à plus de 1 800 genres (Subramanian, 1983). La caractéristique principale des hyphomycètes est qu'ils n'ont pas de reproduction sexuée, ce qui contraignait les taxinomistes à baser leur identification sur des caractéristiques morphoontogéniques.

Il existe deux systèmes de classification des hyphomycètes. Le premier préconisé par Saccardo (1886) est basé sur la morphologie et la pigmentation des conidies et conidiophores. Le second a été proposé par Hughes (1953) et s'appuie sur le développement et la morphologie, considérant la pigmentation et la septation des conidies comme des caractères secondaires. Pour Talbot (1971), les deux systèmes de classification ne seraient pas rigoureux dans la mesure où les caractéristiques peuvent varier et peuvent surtout changer avec les conditions de croissance et de maturité de ces champignons. Le genre *Tolypocladium* a été confronté très récemment au genre *Beauveria* (Von Arx, 1986) sur la base des similarités morphologiques. Selon lui, les variations morphologiques au niveau des phialides et des conidies ne sont pas suffisantes pour séparer les deux genres. Il a donc reclassifié toutes les espèces de *Tolypocladium* comme des synonymes de *Beauveria*. Todorova et al., (1997) à partir de tests biochimiques sur les profils d'utilisation de carbohydrates (API 50 CH) ont levé l'équivoque en démontrant que *Beauveria* et *Tolypocladium* sont deux genres distincts.



Figure 1. Unité infectieuse: Spore de *Beauveria bassiana*

Plusieurs corrections taxinomiques ont été apportées. Par exemple Petch (1926) et MacLeod (1954) ont distingué les espèces *B. bassiana* (Balsamo) Vuillemin et *B. tenella* (Delacroix) MacLeod, considérant notamment *B. densa* (Link: Fries) Picard et *B. Brongniartii* (Saccardo) comme des souches de *B. tenella*. De Hoog (1972) a proposé que les espèces *B. alba* (Limber) Saccas et *B. bassiana* sont deux espèces distinctes, considérant *B. brongniartii* comme identique à *B. tenella* et *B.*

densa comme une souche synonyme de *B. bassiana*. La classification la plus complète à l'heure actuelle est celle de Mugnai et al. (1989) issue d'études morphologiques et de tests enzymatiques décrivant six espèces de *Beauveria*. (*B. alba*, *B. amorpha* (Von Hönel) Samson & Evans, *B. bassiana*, *B. brongniartii*, *B. velata* Samson & Evans, *B. vermiconia* (Hoog & Rao)). Une autre espèce *B. caledonica* (Bissett & Widden) a été décrite par Bissett & Widden (1988).

❖ Morphologie

Les espèces de *Beauveria* produisent les colonies cotonneuses blanches à jaunâtre. Les conidies ou spores (fig. 1) sont soutenues par de long filament en zigzag qui sont des hyphes transparents et septaux (fig. 2) avec un diamètre de 2.5 à 25 µm. Les conidies sont produites sur des épis courts, donnant aux cellules conidiogènes un aspect épineux. En présence d'air le champignon produit des conidiospores de forme sphérique (1-4 µm de diamètre) ou ovales (1.55-5.5 x 1-3 µm d'envergure) mais en milieu anaérobie, il produit des blastospores de forme ovale (2-3 µm de diamètre et 7 µm de longueur). Les blastospores sont aussi infectieux que les conidies (Weiser, 1972, Lipa, 1975).

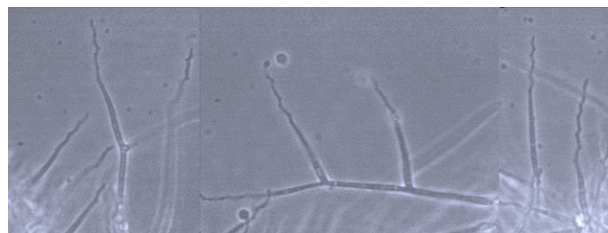


Figure 2. Hyphes et mycélium de *Beauveria bassiana*

Le mode d'infection de *B. bassiana* se divise en quatre étapes distinctes qui sont **l'adhésion, la germination, la différenciation; la pénétration**. L'adhésion est caractérisée par un mécanisme de reconnaissance et de compatibilité des conidies avec les cellules tégumentaires de l'insecte (Vey et al., 1982) (fig. 3). Cette phase se scinde en deux étapes distinctes, la première passive ou l'attachement à la cuticule est réalisée grâce à des forces hydrophobiques et électrostatiques (Fargues 1984; Butt, 1990, Boucias et al., 1988) et la seconde active caractérisée par la production d'un mucilage qui va engendrer une modification épicuticulaire (Wraight et al.; 1990) aboutissant à la germination (fig. 3). Après la phase d'adhésion, la germination va être dépendante des conditions environnantes et aussi de la physiologie de l'hôte; (composition biochimique de la cuticule de l'hôte) qui peut favoriser ou inhiber la germination (St-Leger et al., 1989; Butt et al., 1995, Smith et Grula, 1982, Butt, 1990; Butt et Becket, 1994). L'avant dernière phase est la différenciation caractérisée par la production d'appressorium, structures terminales qui vont servir de point d'encrage, de

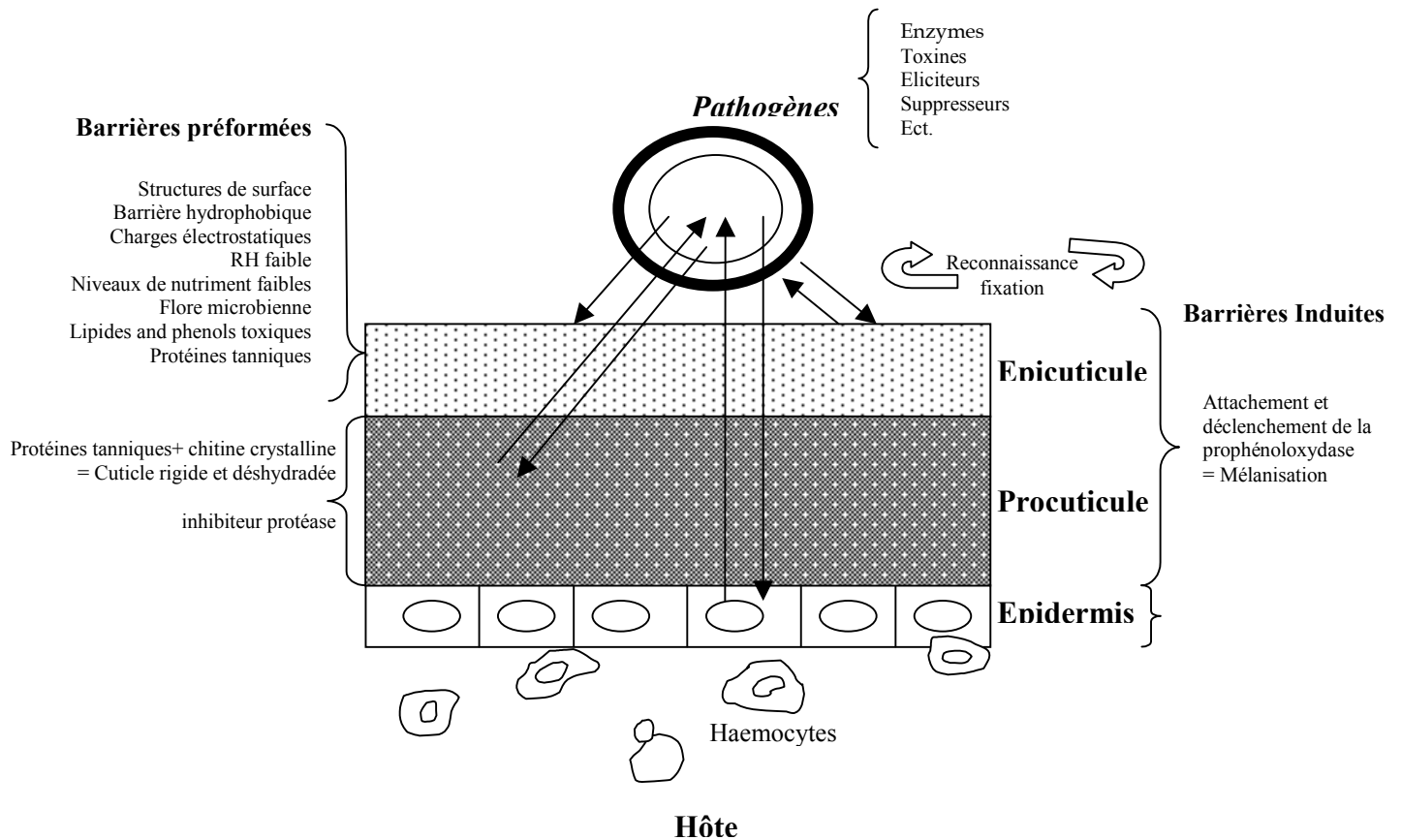


Figure 3. Schéma du mode d'infection illustrant les composantes majeures des interactions entre les insectes et les pathogènes durant la pénétration cutile (adaptée de St-Leger).

ramollissement de la cuticule et favoriser la pénétration. La production des appressoria est très dépendante de la valeur nutritive de la cuticule de l'hôte (St-Leger et al.; 1989; Magelhaes et al.; 1990). Une cuticule nutritive va stimuler la croissance myceliale plutôt que la pénétration (St-Leger et al.; 1989). La dernière phase est la pénétration de l'hôte qui se fait par la combinaison de pression mécanique (Pekrul et Grula, 1979) et enzymatique (Butt, 1990; Charnley, 1989; St-Leger 1993, 1995) telles que les lipases, les protéases et les chitinases (St-Leger, 1995; Segers et al., 1995; Kucera et Samsinakova 1968, Leopold et Samsinakova, 1970), la plus importante dans la pénétration étant les protéases. (St-Leger et al.; 1988; 1989; Butt et al.; 1990; Bidochka et Khachatourians; 1988). Certaines souches produisent des toxines non enzymatiques telles que la beauvericine, les beauverolides, les bassianolides, les isarolides qui accentuent et accélèrent le processus d'infection (Roberts 1981; Hajeck et St-Leger, 1994). La colonisation de l'hôte se

fait lorsque le champignon parvient à surmonter les mécanismes immunitaires de défense de l'insecte (Boman et Steiner, 1981; Soderhall, 1981) et envahit l'hémolymphe (Ferron et al., 1993). À la mort de l'insecte, le champignon produit un antibiotique Oosporin qui va lui permettre de surmonter la compétition des bactéries du tube intestinal de l'insecte. La phase saprophyte va être caractérisée par la mummification du cadavre transformé en sclérote. Les hyphes traversent le tégument préférentiellement au niveau intersegmentaire puis le recouvre d'un feutrage mycelien blanc cotonneux (fig. 4) qui va amorcer la formation des conidiospores (Weiser, 1972). On utilise le terme muscardine pour caractériser le feutrage mycelien blanc cotonneux en référence aux bonbons muscardines produit en France.

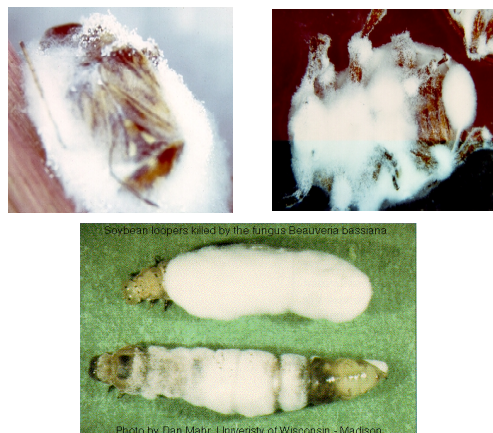


Figure 4. Feutrage mycélien blanc cotonneux suite à l'infection par *B. bassiana*

Conclusion - Avantage de *B. bassiana* par rapport aux autres agents de lutte microbiologique

Le large spectre d'action et la virulence de *B. bassiana* ont permis de l'utiliser avec succès en milieu agricole en Ex-URSS et en Europe de l'Est (Lipa, 1985). Les premiers résultats positifs dans la répression des ravageurs avec *B. bassiana* en Amérique ont été obtenus aux USA (Roberts et al.; 1981; Campbell et al., 1985). La pathogénécité de l'inoculum sporal et la spécificité de l'hôte sont deux paramètres importants dans le choix de l'isolat fongique. Le microchampignon entomopathogène *B. bassiana* est un agent de lutte très intéressant du fait qu'il peut infecter l'hôte par ingestion ou par simple contact contrairement aux autres agents de lutte micro-biologiques. Ce mode d'action particulier rend tous les stades (oeuf, larve, adulte) sensibles. *B. bassiana* peut être produit en masse à moindre coût et peut être appliqué avec les méthodes conventionnelles. Il n'est pas dangereux pour les vertébrés et certains isolats comme ceux utilisés dans cette thèse sont très virulents et spécifiques aux ravageurs visés, ce qui est un critère intéressant pour l'entomofaune non cible. De plus, les conidies ont une assez longue persistance dans l'environnement pouvant permettre naturellement des enzooties ou épizooties.

BIBLIOGRAPHIE

Agarwala, K., et Saha, J. L. 1986. Larval voracity, développement and relative abundance of predator of *Aphis gossypii* on coton in India. In Ecology of aphidophaga 2, Proceeding of a symposium held at Zvikovské Podhradi, sept. 2 - 8, 1984. Academia Praha, sous la direction de Ivo Hodeck, p. 339-344.

Ahmed, S. I. et S. R. Leather. 1994. Suitability and potential of entomopathogenic microorganisms for forest pest management - some points for consideration. Intern. J. Pest Management 40: 287-292.

Afrikjan, E. G., V. A. Tchilingirln et L. A. Tchil-Akopln. 1969. Bakterialnii ineksticidnii preparat BIP-805. Biol. j. Armenii, t. 22, 3-7.

Aizawa, K. 1990. Registration requirements and safety consideration for microbial pest control agents in Japan. In: Safety of microbial insecticides.

Laird, M., L. A. Lacey & E. D. Davidson edd. CRC Press Inc., Florida: 32-40.

Allen, B. T. et Wilkinson, H. A. 1969. A case of meningitis and generalized Schwartzman reaction caused by *Bacillus sphaericus*, Johns Hopkins Med. J., 125, 8.

Altieri, M.A., 1991. Classical biological control and social equity. Bulletin of Entomological Research 81, 365-369.

Andreadis, T. G. 1980. *Nosema pyrausta* infection in *Macrocentus grandii*, a braconid parasite of the European corn borer, *Ostrinia nubilalis*. J. Invertebr. Pathol., 35: 229-223.

Andreadis, T. G. 1987. Horizontal transmission of *Nosema pyrausta* (Microsporidia: Nosematidae) in the European corn borer, *Ostrinia nubilalis*. Environ. Entomol. 16: 1124-1129.

Arata, T. A., Roberts, D. W., Shaddock, J. A., et Shope, R. E., 1978. Public health considerations for the use of viruses to control vectors of human diseases, in Viruses and Environment, Kurstak, E. and Maramorosch, K., Eds., Academic Press, New York, 593.

Armstrong, J. L., Rohrmann, G. F., et Beaudreau, G. S., 1985. Delta-endotoxin of *Bacillus thuringiensis* subsp. *Israelensis*, J. Bacteriol. 161, 39.

Bailey, M. J., Field, A. M., et Hunter, F. R., 1982. Environmental impact of spraying apple orchards with the granulosis virus of the codling moth (*Cydia pomonella*). I. Field studies, in Proc. 3rd Int. Coll. Invertebr. Pathol., University of Sussex, 182.

Baker, R.R., et Dunn, P.E. 1990. New direction in biological control: Alternatives for suppressing agricultural pests and diseases. Proceedings of UCLA colloquium held at Frisco in Colorado, January 20 - 27; 1989. Alan, R.L. press New York 837p.

Barjak, H. de et Y. J. Rion. 1969. Action de la toxine thermostable de *Bacillus thuringiensis* var. *thuringiensis* administrée à des souris. Extrait de la Revue de Pathologie comparée et de médecine Experimentale 69: 367-374

Beauverie, J. 1911. Notes sur les Muscardines. Sur une muscardine du ver à soie, non produite par le *Botrytis bassiana*. Étude du *Botrytis effusa* sp. nov. Rapp. Comm. administrative du lab. d'études de la soie, Lyon, 14:5-31.

Beegle, C.C et Oatman, E. E., 1975. Effect of a nuclear polyhedrosis virus on the relationship between *Trichoplusia ni* (Lepidoptera: Noctuidae) and the parasite, *Hyposoter exiguae* (Hymenoptera: Ichneumonidae). J. Invertebr. Pathol., 25: 59-71.

Begon, M., Harper, L.J. et Townsend, C.R. 1990. Ecology: individual population and communities. 2eme édition. Boston: Blackwell Scientific Publications. 945p.

Bell, M. R. et W. L. McGovern. 1975. Susceptibility of the ectoparasite *Bracon melliter* to infection by microsporidian pathogens in its host, *Anthonomus grandis*. J. Invert. Pathol. 25: 133-134.

Benedict, J.H., Leight, T.F. et Hyer, H.A. 1983. *Lygus Hesperus* (Heteroptera; Miridae) oviposition behavior, growth and survival in relation to cotton trichomes. Env. Entomol. 12: 331-335.

Betz, F. S., S. F. Forsyth et W. E. Steward. 1990. Registration requirements and safety consideration for microbial pest control agents in North America. In: Safety of microbial insecticides. Laird, M., L. A. Lacey & E. D. Davidson edd. CRC Press Inc., Florida: 3-11.

Bishop, A. L., Anderson, J. M. et Hales, D.F. 1986. Predator agents for biological control. In plant virus epidemics monitoring, modelling and predicting outbreaks, sous la direction de Georges D. Mclean, Ronald G. Garrett, et William G.R., p.75-94. Australie: Academic press.

Bisset, J. and P. Widenn. 1988. A new species of *Beauveria* isolated from Scottish moorland soil. *Can. J. Bot.* 66: 361-362.

Boman, H. G. et M. Steiner. 1981. Humoral immunity in *Cecropia pupae*. *Curr. Top. Microbiol Immunol* 94/95: 75-91.

Boivin, G. 1992. L'intégration des méthodes de lutte biologique: l'exemple du Charancon de la carotte. In, La lutte biologique, sous la direction de C. Vincent et D. Coderre, p.151-154., Chicoutimi, Québec, Canada: Gaétan Morin éditeur ltée.

Bond, R. P. M., Boyce, C. B. C., Rogoff, M. H., et Shieh, T. R., 1971. The thermostable exotoxin of *Bacillus thuringiensis*, in Microbial Control of Insects and Mites, Burges, H. D. and Hussey, N. W., Eds., Academic Press, New York, 275.

Borgatti, A. et Guyer, G., 1963. The effectiveness of commercial formulations of *B. thuringiensis* Berliner on house fly larvae, J. Insect Pathol., 5, 377.

Boucias, D. G. et J. C. Pendland. 1991. Attachment of mycopathogens to cuticle: The initial event of mycosis in arthropod host. In: The Fungal

- Spore and Disease Initiation in Plants and Animals. G. T. Cole and H. C. Hoch (eds.), Plenum, New York, pp. 101-128.
- Boucias, D. G. et J. C. Pendland. 1984. Nutritional requirements for conidial germination of several host range pathotypes of the entomopathogenic fungus *Nomurea rileyi*. *J. Invertebr. Pathol.* 43 : 288-292.
- Bradford, A.H. 1994. Pattern and process in host-parasite interaction. New York: Cambridge University Press. 190p.
- Braun, L. A. B. Ewen et C. Gillot 1988. The life cycle and ultrastructure of *Melameba locustae* (King and Taylor) (Amoebidae) in the migratory grasshopper *Melanoplus sanguinipes* (F.) (Acrididae). *Can. Entomol.* 120: 759-772.
- Burgerjon, A., 1965. Le titrage biologique des cristaux de *Bacillus thuringiensis* Berliner par réduction de consommation au Laboratoire de La Minière, Entomophaga, 10, 21.
- Burgess, H. D., Croizer, G., et Huber, J., 1980. A review of safety tests on baculoviruses, *Entomophaga*, 25, 329.
- Burgess, H. D. 1981. Microbial Control of Pests and Plant Diseases 1970-1980. Academic Press, London.
- Burgess, H. D. 1982. Control of insect by bacteria. *Parasitology* 84, 79-117.
- Butt, T.M. 1990. "Fungal infection processes. A mini-review" *Vth Int. Colloq. Invertebr. Pathol.* Adelaide. Soc. for Invertebr. Pathol. pp 121-124.
- Butt, T.M. et Beckett, A., 1994. "Structural studies on the infection processes of entomogenous fungi". International Colloquium for Invertebr. Pathol., August 28th-Sept. 2nd, 1994, Montpellier, France. Proceedings, p311-314.
- Butt, T. M., L. Ibrahim, B. V. Ball et S. J. Clark. 1994. Pathogenicity of the entomogenous fungi *Metharhizium anisopliae* and *Beauveria bassiana* against crucifer pests and the honey bee. *Biocontrol Sci. Techn.* 4: 207-214.
- Butt, T. M., L. Ibrahim, B. V., S. J. Clark et A. Beckett. 1995. The germination behavior of *Metarhizium anisopliae* on the surface of aphid and flea beetle cuticles. *Mycol. Res.* 99: 945-950.
- Canning, E. U. 1982. An evaluation of protozoal characteristics in relation to biological control pests. *Parasitology* 84, 119-49.
- Cantwell, G. E., Heimpele, A. M., et Thompson, M. J., 1964. The production of an exotoxin by various crystal-forming bacteria related to *Bacillus thuringiensis* var. *Thuringiensis* Berliner. *J. Insect Pathol.*, 6, 466.
- Cantwell, G. E. et Lehnert, T. 1979. Lack of effect of certain microbial insecticides on the honey bees. *J. Invert. Pathol.* 33: 381-382.
- Carbonell, L. F., Klowden, M. J. et Miller, K. K., 1985. Baculovirus-mediated expression of bacterial genes in dipteran and mammalian cells, *J. Virol.*, 56, 153.
- Carruthers, R. I. et Soper, R. S. 1987. Fungal diseases. In: Fuxa, J. R. and Tanada, Y. (eds), Epizootiology of Insect Diseases. Wiley-Interscience, New York, pp. 357-416.
- Chandler, F. W. et Watts, J. C., 1985. Mycotic, actinomycotic, and algal infections, in Anderson's Pathology, Vol. 1, 8th ed., Kissane, J. M., Ed., C.V. Mosby, St. Louis, 371.
- Charnley, A.K.; 1989. Mechanisms of fungal pathogenesis in insects. In: Biotechnology of fungi for improving plant growth (Whipps, J.M. and Lumsden, R.D. eds) pp 85-123. Cambridge Univ. Press.
- Chapman, H. C., Davidson, E. W., Laird, M., Roberts, D. W. et Undeen, A. H., 1979. Safety of microbial control agents to nontarget invertebrates, *Environ. Conserv.*, 6, 278.
- Charbonneau, S. 1992. La gestion de l'impossible, éd. Économica, p.120.
- Chauthani, A. R., D. Murphy, D. Claussen et C. S. Rehnord. 1968. The effect of human gastric juice on the pathogenicity of *Heliothis zea* nuclear polyhedrosis virus. *J. Invert. Pathol.* 12:145-147.
- Cheung, P. Y. K., Roe, R. M., Haddock, B. D., Judson, C. L. et Montague, M. A., 1985. The apparent *in vivo* neuromuscular effects of the delta endotoxin of *Bacillus thuringiensis* var. *israelensis* in mice and insects of four orders, *Pestic. Biochem. Physiol.*, 23, 85.
- Clausen, P.C. 1972. Entomophagous insects, New York: edition Hafner. 688 p.
- Cloutier, C., et Cloutier, C. 1992. Les solutions biologiques de lutte pour la répression des insectes et acariens ravageurs des cultures. In La lutte biologique, sous la direction de C. Vincent et D.Coderre, p.19-88. Chicoutimi, Québec, Canada: Gaétan Morin éditeur Ltée.
- Croft, B. A. et A. W. A. Brown, 1975. Responses of arthropod natural enemies to insecticides. *Ann. Rev. Entomol.* 20: 285-335.
- Davidson, E. W., 1982. Bacteria for the control of arthropod vectors of human and animal disease, in Microbial and Viral Pesticides, Kurstak, E., Ed., Marcel Dekker, New York, 289.
- Davidson, E. W., 1985. *Bacillus Sphaericus* as a microbial control agent for mosquito larvae. in Mosquito Control Methodologies, Vol. 2, Laird, M. and Miles, J., Eds., Academic Press. New York, 213.
- De Hoog, G. S. 1972. The genera *Beauveria*, *Isaria*, *Tritirachium* and *Acrodontium*. gen. nov. *Stud. Myc. (CBS)*. 1: 1-41.
- Dent, D. R. 1991. Insect pest management, ed. CAB International, UK.
- Debach, P. et B. Barlett 1951. Effects of insecticides on biological control of insect pest of citrus. *J. Econ. Entomol.* 44: 372-383.
- Debach, P. 1973. Biological control of insect pests and weeds. London: Chapman et Hall. 884p.
- Debach, P. 1979. Biological control by natural enemies, New York: Cambridge University Press, 323p.
- deBarjac, H., Dumanoir, V. C., Hamon, S., et Thiery, I., 1987. Safety tests on mice with *Bacillus sphaericus* serotype H-5a,5b, strain 2362, W.H.O. mimeographed document, WHO/VBC/87.948.
- Deacon, J. W. 1983. Microbial Control of Plant Pests and Diseases. Van Nostrand Reinhold (UK) Compagny Limited, Wokingham, UK.
- Dempster, J. P. 1963. The population dynamics of grasshoppers and locusts. *Biol. Revs.* 38: 490-529.
- Devauchelle, G. 1993. Les baculovirus des insectes intérêt et perspectives. La lutte biologique. Dossier de la Cellule environnement de l'INRA 5,97-101.
- Doberski, J. W. 1981. Comparative laboratory studies on three fungal pathogens of the elm bark beetle *Scolytus scolytus*: Effect of temperature and humidity on infection by *Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae* and *Paecilomyces farinosus*. *J. Invertebr. Pathol.* 37: 195-200.
- Doller, G., 1985. The safety of insect viruses as biological control agents, in Viral Insecticides for Biological Control, Maramorosch, K. and Sherman, K. E., Eds., Academic Press, New York, 399.
- Doller, G. et Huber, J., 1983. Sicherheitsstudie sur Prufung einer Vermehrung des Granulosevirus aus *Laspeyresia pomonella* in Saugern, *Z. Angew. Entomol.*, 95, 64.
- Donovan-Peluso, M., Wasti, S. S. et Hartmann, G. C., 1980. Safety of entomogenous fungi to vertebrate hosts, *Appl. Entomol. Zool.*, 15, 498.
- Dunphy, G. B. et Tibelius, K. H., 1992. Les progrès biotechnologiques augmentant l'efficacité de *Bacillus thuringiensis* et de *Bacillus sphaericus* en tant qu'insecticide microbien. In la lutte biologique, sous la direction de C. Vincent et D. Coderre, p. 305-322. Chicoutimi, Québec, Canada. Gaetan Morin éditeur Ltée.
- Egerton, J. R., Hartley, W. J., Mulley, R. C. et Sweeney, A. W., 1978. Susceptibility of laboratory and farm animals and two species of duck to the mosquito fungus *Culicinomyces* sp., *Mosq. News*, 38, 260.
- Elar, D. J., Thomas, W., Knowles, B. H., Ward, S., Todd, J., Drobniowski, F., Lewis, J., Sawyer, T., Last et Nichols, C., 1985. Biochemistry, genetics, and mode of action of *Bacillus thuringiensis* delta-endotoxins, in Molecular Biology of Microbial Differentiation, Hock, J. A. and Setlow, P., Eds., ASM Publications, Washington, D. C., 230.
- Emmons, C. W., Binford, C. H. et Utz, J. P., Eds., 1970. Medical Mycology, 2nd ed., Lea & Febiger, Philadelphia, 508.
- Fargues, J. 1972. Étude des conditions d'infection des larves de doryphore *Leptinotarsa decemlineata* Say par *Beauveria bassiana* (Bals.) Vuill. (Fungi imperfecti). *Entomophaga* 17: 319-337.
- Fargues, J. 1984. Adhesion of the fungal spore to the insect cuticle in relation to pathogenicity. In: Infection Processes of Fungi. D. W. Roberts and J. R. Aist (eds.). Rockefeller Foundation, pp. 90-110.
- Fast, P. G. 1981. The crystal toxin of *Bacillus thuringiensis*. In: Burgess, H. D. (ed.), Microbial Control of Pests and Plant Diseases 1970-1980. Academic Press, London, pp. 223-48.
- Faulkner, P. et Boucias, D. G. 1985. Genetic improvement of insect pathogens: emphasis on the use of baculoviruses. In: Hoy, M. A. and Herzog, D. C. (eds), Biological Control in Agricultural.
- Faust, R. M., 1973. The *Bacillus thuringiensis* beta-exotoxin: current status, *Bull. Entomol. Soc. Am.*, 19, 153. IPM Systems. Academic Press, Orlando and London, pp. 263-80.
- Ferron, P. 1978. Biological control of insects pests by entomogenous fungi. *Ann. Rev. Entomol.* 23: 409-442.
- Ferron, P., J. Fargues et G. Riba. 1993. Les champignons agents de lutte microbiologique contre les ravageurs. In: La lutte biologique. A. Fraval (ed.). Dossier de la Cellule environnement de l'INRA 5: 65-93.
- Foschi, S. 1989. Pesticide residues in food. *Difesa delle Piante* 12, 41-64.

- Franz, J. M. 1971. Influence of environment and modern trends in crop management on microbial control. In: Burgess, H. D. and Hussey, N. W. (eds), *Microbial control of Insects and Mites*. Academic Press, London, pp. 407-44.
- Fuxa, J. R.. 1987. Ecological consideration for use of entomopathogens in IPM. *Ann. Rev. Entomol.* 32: 225-251.
- Gardner, W. A., M. R. Sutton et R. Noblet. 1977. Persistence of *Beauveria bassiana*, *Nomuraea necatrix* on soybean foliage. *Environ. Entomol.* 6: 616-618.
- Georghiou, G. P. et Mellon, C., 1983. Pest resistance in time and space. p. 1-41 dans Georghiou, G. P & T, Saito (Edts). *Pest resistance to insecticides*, 1983. New York, 809p.
- Gill, S. S., Hornung, J. M., Ibarra, J. E., Singh, G. J. P. et Federici, B. A., 1987. Cytolytic activity and immunological similarity of the *Bacillus thuringiensis* subsp. *israelensis* and *Bacillus thuringiensis* subsp. *morrisoni* isolate PG-14 toxins, *Appl. Environ. Microbiol.*, 53, 1251.
- Goettel, M.S. 1992. Des champignons comme agents de lutte biologique. In *La lutte biologique contre les acridiens*, sous la direction de C.J. Lomer et C. Prior p.122-131. Ibadan, Nigeria: CAB International/IITA.
- Gordon, R. E., 1977. Some taxonomic observations on the genus *Bacillus*. In *Biological Regulation of vectors: The Saprophytic and Aerobic Bacteria and Fungi*, N1H-1180, U. S. Department of Health, Education and Welfare, Washington, D. C., 67.
- Gould F. 1984. Role of behavior in the evolution of insect adaptation to insecticide and resistant host plants. *Bull. Entomol. Soc. Am.* 30: 34-41.
- Greathead, D. J., Kooyman, C., Launois-Luong, M. H., et Popov, G. B. 1994. Les ennemis naturels des criquets du Sahel. Collection acridologie opérationnelle N° 8 CILSS/DFPV, Niamey, Bp 12625. Niger.
- Greathead, D. J. 1992b. La lutte biologique, arme prometteuse pour les acridiens. In *la lutte biologique contre les acridiens*, sous la direction de C. J. Lomer et C. Prior. p. 4-7. Ibadan, Nigeria : CAB International/IITA.
- Greathead, D. J. 1966a. A brief survey of the effects of biotic factors on populations of the desert locust. *J. Appl. Ecol.* 3: 239-250.
- Green, M., M. Heumann, R. Sokolow, L. R. Foster, R. Bryant et M. Skeels. 1990. Public health implication of the microbial pesticide *Bacillus thuringiensis*: an epidemiological study, Oregon, 1895-86. *Am. J. Public Health* 80, 848-852.
- Gunther, K. et K. Herter 1974. Ordnung Dermaptera (Ohrwurm), p 1-158 in *Kukenthal's Handbuch der Zoologie* (2^e ed.). Walter de Gruyter, New York 4(2)(2/11).
- Gulii, V. V., A. I. Leskova et V. I. Mursa. 1986. Voprocii besopastnosti microbiologiticheskikh preparatov dlia zdorovia tcheloveka i okruжайuchtchei sredi. *Inform. biull. VPS-MOBB* 17:19-46.
- Gulii, V. V., P. L. Talpalazkii et C. I. Ribina. 1978. Vliianie standartnih insektizidnih microbiologiseskih preparatov na medonosnih ptchel. *Biul. SibNIIZHim.*, vip. 30, 39-41.
- Gural, A. I., V. L. Vasileva et M. A. Ditchenko. 1979. Eksperimentalnie materiali k ozenke patogennosti virusov nasekomih dlia pozvonosnih jivotnih. V sb.: *Molekuliamaia biologii*, Kiev, vip. 23, 84-93.
- Hajek, A. E., and R. J. St. Leger. 1994. Interaction between fungal pathogens and insects host. *Ann. Rev. Entomol.* 39: 293-322.
- Hall, R. A. et Papierok, B. 1982. Fungi as biological control agents of arthropods of agricultural and medical importance. *Parasitology* 84, 205-40.
- Hamel, A. R. 1979. Effects of *Bacillus thuringiensis* on parasites and predator of *Yponomeuta evonymellus* Lep., Yponomeutidae. *Z. Angew. Entomol.*, 87: 294-311.
- Harcourt, D. G. et L. M. Cass. 1968. Persistence of a granuloses virus of *Pieris rapae* in soil. *J. Invert. Pathol.* 11: 142-143.
- Harry, O. G. 1970. Gregarina: Their effect on the growth of the desert locust (*Schistocerca gregaria*). *Nature (Lond.)* 225: 964-966.
- Hauffler, M. et Kunz, S., 1985. Laboratory evaluation of an exotoxin from *Bacillus thuringiensis* subsp. *morrisoni* to hornfly larvae (Diptera: Muscidae) and mice, *J. Econ. Entomol.*, 8, 613.
- Heimpel, A. M., 1955. Investigations of the mode of action of strains of *Bacillus cereus* Frankland and Frankland pathogenic for the larch sawfly, *Pristiphora erichsonii* (Htg.), *Can. J. Zool.*, 33, 311.
- Heimpel, A. M., 1967. A critical review of *Bacillus thuringiensis* var. *thuringiensis* Berliner and other crystalliferous bacteria. *Ann. Rev. Entomol.*, 12, 287.
- Heimpel, A. M., 1971. Safety of insect pathogens for man and vertebrates, in *Microbial Control of Insects and Mites*, Burges, H. D. and Hussey, N. W., Eds., Academic Press, New York, 469.
- Heimpel, A. M. et Angus, T. A., 1963. Diseases caused by certain spore forming bacteria, in *Insect Pathology: An Advanced Treatise*. Vol. 2, Steinhaus, E. A., Ed., Academic Press, New York, 21.
- Henry, J. E. et E. A. Oma 1981. Pest control by *Nosema locustae*, a pathogen of grasshoppers and crickets, p. 573-594 in H. D. Burges, *Microbial control of pests and plants diseases*, 1970-1980. Academic Press, New York.
- Herzog, D.C., et Funderburk, E.J. 1986. *Ecological bases for habitat management and pest cultural control*. In *Ecological theory and integrated pest management practice, sous la direction de Marcos Kogan*, p.217-250. New York: John Wiley & Son Press.
- Hodek, I. 1973. *Biology of Coccinellidae*. Academic Press, Prague, 260 pp.
- Hotchkin, P. B. et Kaya, H. K., 1983a. Interactions between two baculoviruses and several insect parasites. *Can. Entomol.*, 115: 841-846.
- Hotchkin, P. B. et Kaya, H. K., 1983b. Pathological response of the parasitoid, *Glyptanteles militaris*, to nuclear polyhedrosis virus-infected armyworm hosts. *J. Invertebr. Pathol.*, 42: 51-61.
- Huffaker, M. 1976. *Theory and practice of biological control*, New York: Academic press. 778p.
- Huger, A. M., 1984. Susceptibility of the egg parasitoid *Trichogramma evanescens* to the microsporidium *Nosema pyrausta* and its impact on fecundity. *J. Invertebr. Pathol.*, 44: 228-229.
- Hughes, S. J. 1953. Conidia, conidiophores and classification. *Can. J. Bot.* 31: 577-659.
- Hutchins, D. R. et Johnston, K. G., 1972. Phycomycosis in the horse, *Aust. Vet. J.*, 48, 269.
- Hutton, P. O. et Burbutis, P. P. 1974. Milky disease and Japanese beetle in Delaware. *Journal of Economic Entomology.* 67: 247-9.
- Ignoffo, C. M. 1973. Effects of Entomopathogens on Vertebrates. *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 217: 141-165.
- Ignoffo, C. M., 1973. Vertebrates and entomopathogens, *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, 217, 165.
- Ignoffo, C. M. et B. R. Rafajko. 1972. *In vitro* attempts to infect primate cells with nucleopolyedrosis virus of *Heliothis*. *J. Invert. Pathol.* 20: 321-325.
- Ignoffo, C. M. 1967. Proceedings of the International Colloquium on Insect Pathology and Microbial Control, Wageningen, The Netherlands, Sept. 5-10, 1966. P. A. Van der Laan, Ed.: North-Holland Publ. Co. Amsterdam, The Netherlands, 91-117.
- Ignoffo, C. M. 1968. Strategies to increase the use of entomopathogens. *J. Invertebr. Pathol.* 31:1-3.
- Ignoffo, C. M. 1970. Proceedings of the Tall Timbers Conference on Ecology of Animal Contributions by Habitat Management, Tallahassee, Florida. Tall Timbers Research Station: 47-57.
- Ignoffo, C.M. and D. L. Hostetter. 1977. Environmental stability of microbial insecticides. *Misc. Publ. Entomol. Soc. Am.* 10: 1-80.
- Irabagon, T. A. et Brooks, W. M., 1974. Interaction of *Campoletis sonorensis* and a nuclear polyhedrosis virus in larvae of *Heliothis virescens*. *J. Econ. Entomol.*, 67: 229-231.
- Ishibashi, Y., Kaufam, H. E., Ichinoe, M., et Kagawa, S., 1987. The pathogenicity of *Beauveria bassiana* in the rabbit cornea, *Mykosen*, 30, 115.
- Izrailet, L. I. et R. E. Kogai. 1978. Gigeniseskoe narmirovanie dendrobacillina v vozduhe proizvodstvennih pomechtenih i atmosfemom vozduhe. *Gigiena i sanitariia* 7, 32-34
- Izrailet, L. I., L. V. Drozdova et M. E. Eglite. 1975. Gigenicheskaia ozenka boverina i nekotorie perspektivi primeneniia microbiologiseskih sredstv zachtiti rastenih. *Gigiena i sanitariia* 11: 91-94.
- Jacobson, E. R., 1984. Biology and diseases of reptiles, in Fox, J. G., Cohen, B. J., and Loew, F. M., Eds., *Laboratory Animal Medicine*, Academic Press, New York, 449.
- John, A. et D. V. M. Shaddock. 1980. *Bacillus thuringiensis* serotype H-14 maximum challenge and eye irritation safty tests in mammals. *WHO/VBC* 763:12.
- Jones, T. C. et Hunt, R. D., 1983. Diseases due to simple bacteria, in *Veterinary Pathology*, 5th ed., Lea & Febiger, Philadelphia, 574.
- Jones, T. C. et Hunt, R. D., 1983. Diseases caused by higer bacteria and fungi, in *Veterinary Pathology*, 5th ed., Lea & Febiger, Philadelphia, 638.

- Jourdeuil, P., P. Grison et A. Fraval. 1992. La lutte biologique: un aperçu historique. La lutte biologique. Dossier de la Cellule environnement de l'INRA 5,11-35.
- Jourreau, J. M., C. Kaiser, M. Lahelles et L. Cherzier. 1979. Étude de l'action pathogène éventuelle du Baculovirus oryctes pour le porc. *Entomophaga* 24: 213-219.
- Kandybin, N. V. et O. V. Smirnov. 1990. Registration requirements and safety consideration for microbial pest control agents in the U.S.S.R. and adjacent eastern european countries. In: Safety of microbial insecticides. Laird, M., L. A. Lacey & E. D. Davidson edd. CRC Press Inc., Florida: 20-30.
- Kasimjanova, G. S. et P. M. Mahno. 1976. Nekotorie morfologičeskie ismenenia v tkaniah kur pri obrabotke ih turinginom. *V kn. Problemi veterinarnoi sanitarii. Trudii VNIIVS, Moskva*: 58-64.
- Kaya, H. K. et Tanada, Y., 1971a. Properties of a viral factor toxic to the parasitoid, *Apanteles militaris*. *J. Insect Physiol.*, 17: 2125-2138.
- Kaya, H. K. et Tanada, Y., 1971b. Toxic factor produced by a granulosis-virus infection in armyworm: time of toxin production. In: 4th International colloquium on Insect Pathology. Society of Invertebrate Pathology, M.D, pp. 156-162.
- Kaya, H. K. et Tanada, Y., 1972a. Response of *Apanteles militaris* to a toxin produced in a granulosis-virus infected host. *J. Invertebr. Pathol.*, 19: 1-17.
- Kaya, H. K. et Tanada, Y., 1972b. Pathology caused by a viral toxin in the parasitoid *Apanteles militaris*. *J. Invertebr. Pathol.*, 19: 262-272.
- Kerwin, J. L., Dirtz, D. A. et Washino, R. K., 1988. Non-mammalian safety tests for *Lagenidium giganteum* (Oomycetes: Lagenidiales), *J. Econ. Entomol.*, 81, 158.
- Kevan, D.K.McE. 1992. Les agents de lutte biologique existants et leur potentiel contre les orthopteroïdes nuisibles. In La lutte biologique, sous la direction de C. Vincent et D. Coderre, p107-150. Chicoutimi, Québec, Canada: Gaetan Morin éditeur ltée.
- Khachatourians, G.K. 1986. Production and use of biological pest control agents. *Trends Bio. Tech.* 4: 120 - 124.
- King, E.G. et J.V. Bell. 1978. Interactions between a braconid *Microplitis croceipes* and a fungus, *Nomuraea rileyi*, in laboratory reared bollworm larvae. *J. Invertebr. Pathol.* 31, 337-340.
- Kissane, J. M., 1985. Bacterial diseases, In Anderson's Pathology, 8th ed., Kissane; J. M., Ed., C. V. Mosby, St. Louis, 278.
- Kiselek, E. V., 1975. The effect of biopreparations on insect enemies. *Zashch. Rast.*, 12:23
- Klimpiņa, A. E. et V. A. Kazanskaia. 1980. Proverka virusnogo preparata Viri n-IAM na pchelāh. *Trudi Latv. CHA, Elgava, vip.* 181,43-44.
- Knight, A. L. et G. W. Norton, 1989. Economics of agricultural pesticide resistance in arthropods. *Annu. Rev. Entomol.* 34: 293-313.
- Knox, D. A. 1970. Tests of certain insects viruses on colonies of honey bees. *J. Invertebr. Pathol.* 16: 152-158.
- Korostel, S. I. et Kapustina, O. V., 1975. Effect of the thermostable exotoxin of *Bacillus thuringiensis* on Trichogramma (*Trichogramma* sp.) and *Ageniaspis* (*Ageniaspis fuscicollis* Dalm.). *Tr. Vses. Inst. Zashch.*, 42: 102-109.
- Krieg, A., 1987. Diseases caused by bacteria and other prokaryotes. In: Fuxa, J. R. and Tanada, Y. (eds), *Epizootiology of Insect Diseases*. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 323-55.
- Kucera, M. et A. Samsinakova. 1968. Toxins of the entomophagous fungus *Beauveria bassiana*. *J. Invertebr. Pathol.* 12: 316-320.
- Kushner, D. J. et Heimpel, A. M., 1957. Lecithinase production by strains of *Bacillus cereus* Fr. and Fr. pathogenic for the larch sawfly *Pristiphora erichsonii* (Htg.). *Can. J. Microbial.* 3. 547.
- Lacey, L. A. et Undeen, A. H., 1986. Microbial control of black flies and mosquitoes, *Annu. Rev. Entomol.*, 31, 265.
- Lamanna, C. et L. Jones. 1963. Letality for mice of vegetative and spore forms of *B. cereus* and *B. cereus-like* insect pathogens ingested intraperitoneally and subcutaneously. *J. Bacteriol.* 85: 532-535.
- Lautenschlager R. A. et J. D. Podymait. 1979. Passage of nucleopolyedrosis virus by avian and mammalian predators of gypsy moth *Lymantria dispar*. *Environm. Entomol.* 2: 210-214.
- Lea, A. 1958. Recent outbreaks of the brown locust, *Locustana pardalina* (Walk.) with special reference to the influence to the rainfall. *J. Entomol. Soc. South Afr.* 21: 18-25.
- Leopold, J. et A. Samsinakova. 1970. Quantitative estimation of chitinase and several other enzymes in the fungus *Beauveria bassiana*. *J. Invertebr. Pathol.* 15: 34-42.
- Levin, D. B., Laing, J. E. et Jacques, R. P, 1981. Interactions between *Apanteles glomeratus* (L.) (Hymenoptera: Braconidae) and granulosis virus *Pieris rapae* (L.) (Lepidoptera: Pieridae). *Environ. Entomol.*, 10 : 65-68.
- Lipa, J. J. 1975. White muscardines (*Beauveria* sp.). In: *An Outline Of Insect Pathology*. Foreign Sci. Publ. Dept NCSTEL, Warsaw, Poland, pp. 139-142.
- MacLeod, D. M. 1954. Investigations of the genera *Beauveria* Vuill. and *Tritirachium* Limber. *Can. J. Bot.* 32: 818-890.
- McLaughlin, R. E. et Adams, C. B., 1966. Infection of *Bracon mellitor* (Hymenoptera: Braconidae) by *Mattesia grandis* (Protozoa: neogregarinidae). *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 59: 800-802.
- Maddox, J. V. 1987. Protozoan diseases. In: Fuxa, J. R. and Tanada, Y. (eds), *Epizootiology of Insect Disease*. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 417-52.
- Magalhaes, B. P., J. C. Lord, S. P. Wraight, R. A. Daoust et D. W. Roberts. 1981. Pathogenicity of *Beauveria bassiana* and *Zoophthora radicans* to the coccinellid predators *Coleomegilla maculata* and *Eriopsis connexa*. *J. Invertebr. Pathol.* 52: 471-473.
- Mathavan, S. et Velpandi, A., 1984. Toxicity of *Bacillus sphaericus* strains to selected target and non-target aquatic organisms, *Indian J. Med. Res.*, 80, 653.
- Mazzone, H. M., G. H. Tignor et R. E. Shope. 1976. Serological comparison of the nuclear polyhedrosis viruses of the Gypsy moth and European pine sawfly with arthropod-dorne and other viruses. *Environm. Entomol.* 5: 281-282.
- McKinley, R. G. 1988. Insect pest control on potatoes. *Outlook Agric.* 17: 30-34.
- McLaughlin, R. E. 1971. Use of Protozoa for microbial control of insects, p. 151-172 in H. D. Burges et N. W. Hussey, *Microbial control of insects and mites*. Academic Press. New York, 861p.
- McLaughlin, R. E. 1973. Protozoa as microbial control agents. *Misc. Publ. Entomol. Soc. Amer.* 9: 95-98.
- Mellanby, K. 1967. *Pesticides and Pollution*. London: Collins, pp.367.
- Meretoja, T., G. Calberg et U. Gripenberg. 1977. Mutagenicity of *Bacillus thuringiensis* exotoxin. I. Mammalian tests. *Heredites* 85: 105-112.
- Meynadier, G., Margier, A. A., Girardie, J. et Vago, C. 1992. Une entomopoxvirose chez l'orthoptère *Anacridium aegyptium*. *Entomophag.* 37: 453-464.
- Michelbacher, A. E., C. Swanson et W. W. Middlekauf. 1946. Increase in the population of *Lecanium pruinosum* on english walnuts following application of DDT sprays, *J. Econ. Entomol.* 39: 812-813.
- Miller, L. K., Lingg, A. J., et Bulla, L. A. 1983. Bacterial, viral and fungal insecticides. *Sci.* 219: 715-721.
- Mills, N.J. 1981. The mortality and fat content of *Adalia bipunctata* during hibernation. *Entomol. Exp. Appl.* 30: 265-268.
- Morris, O. N. 1983. Microorganisms isolated from forest insects in British Columbia. *J. Entomol. Sci. BC.* 80: 29-36.
- Muck, O., Hassan, S., Huger, A. M. and krieg, A., 1981. The effect of *Bacillus thuringiensis* Berliner on the parasitic Hymenopterans *Apanteles glomeratus* L. (Braconidae) and *Pimpla thurionella* (L.) (Ichneumonidae). *Z. Angew. Entomol.*, 92: 303-314.
- Mugnai, L., Bridge P. D., and Evans H. C. 1989. A chemotaxonomic evaluation of the genus *Beauveria*. *Myc. Res.* 92: 199-209.
- Muller-Kogler, E., 1965. *Pilzkrankheiten bei Insekten*, Paul Parey, Berlin, 130.
- Mulley, R. C., Egerton, J. R., Sweeney, A. W. et Hartley. W. J., 1981. Further tests in mammals, reptiles, and an amphibian to delineate the host range of the mosquito fungus *Culicinomyces* sp., *Mosq. News*, 41, 528.
- Murza, V. I. 1976. Primenenie bakterialnih inektiqidov trebut ostorojnoiti. *Zachtiia ractenih* 5, 8-13.
- Murza, V. I. 1977. Toksikologo-gigieniticheskaia karakteristika inektiqidnih preparatov na osnove kristallo-sporoobrazuiuchtih basterih vida *Bacillus thuringiensis*. *Avtoref. dina coick. usen. ctep. kand. med. nauk. Kiev*.
- Nordlund, D. A. 1984. Biological control with entomophagous insects. *J.G. Entomol. Soc.* 19:14-27.
- Ohba, M. et Aizawa, K., 1981. Lethal toxicity of arthropod iridoviruses to an amphibian, *Rana limnocharis*, *Arch. Virol.*, 68, 153.
- Paulov, S., 1985. Interactions of *Bacillus thuringiensis* var. *israelensis* with developmental stages of amphibians (*Rana temporaria* L.), *Biologia*, 40, 13.

- Payne, C. C. 1982. Insect viruses as control agents. *Parasitology* 84, 35-77.
- Pedigo, P. L. 1988. *Entomology and Pest Management*. London: Macmillan Press. 646 p.
- Pekrul, S. et E. A. Grula. 1979. Mode of infection of the corn earworm (*Heliothis zea*) by *Beauveria bassiana* as revealed by scanning electron microscopy. *J. Invertebr. Pathol.* 34: 238-247.
- Petch, T. 1926. Studies in entomogenous fungi. VIII. Notes on *Beauveria*. *Trans. British Myc. Soc.* 10: 244-271.
- Petersen, J. J., 1985. Nematodes as biological control agents. 1. Mermithidae, *Adv. Parasitol.*, 24, 307.
- Pimentel, D., D. Andow, R. Dyson-Hudson, D. Gallahan, S. Jacobson, M. Irish, S. Kroop, A. Moss, I. Schreiner, M. Shepard, T. Thompson et B. Vinzant. 1980. Environmental and social costs of pesticides: a preliminary assessment. *Oikos* 34: 125-140.
- Poinar, G. O. et G. M. Thomas. 1985. *Laboratory guide to insect pathogens and parasites*, Plenum Press, New York, P. 329.
- Poirié, M., N. Pasteur, 1991. La résistance des insectes aux insecticides. *La Recherche*. 22: 874-882.
- Prinsloo, H. E. 1960. Parasitische mikro-organismen by die Bruinsprinkaan *Locustana pardalina* (Walk.). *Suid-Afr. Tydskr. Landbouwetensk.* 3: 551-560.
- Prinsloo, H. E. 1961a. Die invloed van 'n amebiese parasit van die Bruinsprinkaan op die voorkoms van diapause in die eirs. *Suid-Agr. Tydskr. Landbouwetensk.* 4: 225-230.
- Prokopenko, V. A., N. P. Sokolovskaia et L. M. Malovizkaia. 1976. Vliianie dendrobacillina na gidrobionti. V kn.: Ispolzovanie himiseckikh i biologiseckikh sredstv v borbe s vrediteliami lesa. Moskva, 112-113.
- Purrini, K., Kohring, G. W., et Seguíni, Z. 1988. Studies on a new disease in a natural population of Migratory Locust, *Locusta migratoria* sp. Caused by an entomopox virus. *J. Invert. Pathol.* 51: 281-283.
- Quinlan, R. J. 1990. Registration requirements and safety consideration for microbial pest control agents in the European Economic Community. In: *Safety of microbial insecticides*. Laird, M., L. A. Lacey & E. D. Davidson edd. CRC Press Inc., Florida: 12-18.
- Ramoska, W. A. 1984. The influence of relative humidity on *Beauveria bassiana* infectivity and replication in the ching bug, *Blissus leucopterus*. *J. Invertebr. Pathol.* 43: 389-394.
- Riba, G. and S. Marcandier. 1984. Influence de l'humidité relative sur l'agressivité et la variabilité des souches de *Beauveria bassiana* (Bals.) Vuillemin et de *Metarhizium anisopliae* (Metsch.) Sorokin, Hyphomycètes pathogènes de la pyrale du maïs *Ostrinia nubilalis* Hübn. *Agronomie* 4:189-194.
- Riba, G. et C. Silvy. 1993. Perspectives de la lutte microbiologique contre les ravageurs des cultures. *La lutte biologique. Dossier de la Cellule environnement de l'INRA*, 5, 41-47.
- Rishikesh, N., Burges, H. D. et Vandekar, M., 1983. Operational use of *Bacillus thuringiensis* serotype H-14 and environmental safety, mimeographed document WHO/VBC/83.371, World Health Organization.
- Roberts, T. 1989. Pesticides in drinking water. *Shell Agriculture* 3, 18-20.
- Robert, J. J., Foster, J. E. 1983. Effect of a leaf pubescence in wheat on the Bird Cherry Oat Aphid (Homoptera; Aphididae). *J. Econ. Entomol.* 72: 211-214.
- Roberts, D. W. et A. S. Campbell. 1977. Stability of entomopathogenic fungi. *Misc Publ. Entomol. Soc. Am.* 10: 19-76.
- Roberts, D. W. 1981. Toxins of entomopathogenic fungi. In: *Microbial Control of Pest and Plant Diseases 1970-1980*. H. D. Burges (ed.). Academic Press, NY, pp. 441-465.
- Roush, R. T. et J. A. McKenzie 1987. Ecological genetics of insecticide and acaricide resistance. *Annu. Rev. Entomol.* 32: 361-380.
- Rudd, R.A. 1974. *Pesticides and the Living Landscape*. Madison, USA: University of Wisconsin Press.
- Saccardo, P. A. 1886. *Sylloge Fungorum omnium hucusque coynitorum*. *Pavia* 4.
- Saik, J. E., L. A. Lacey et C. M. Lacey. 1990. Safety of microbial insecticides to vertebrates - domestic animals and wildlife. In: *Safety of microbial insecticides*. Laird, M., L. A. Lacey & E. D. Davidson edd. CRC Press Inc., Florida: 116-130.
- Samples, J. R. et Buettner, H., 1983. Corneal ulcer caused by a biologic insecticide (*Bacillus thuringiensis*). *Am. J. Ophthalmol.*, 95, 258.
- Samples, J. R. et Buettner, H., 1983. Ocular infection caused by a biological insecticide, *J. Infect. Dis.* 148, 614.
- Sebesta, K., Horska, K. et Ankova, J., 1969. Inhibition of the novo RNA synthesis by the insecticidal exotoxin of *Bacillus thuringiensis* var. *gelechiae*, *Collect. Czech. Chem. Commun.*, 34, 891.
- Sebesta, K. et K. Horska. 1968. Inhibition of DNA-dependent RNA polymerase by the exotoxin *Bacillus thuringiensis* var. *gelechiae*. *Biochem. Biophys. Acta*: 281-282.
- Shadduck, J. A., 1979. The safety of entomopathogens for mammals: present evaluation methods and approaches and suggestions for the future, mimeographed document, TDR/BCV/SWG.79/WP.04/ Add. 1, World Health Organization.
- Shadduck, J. A., 1983. Some considerations on the safety evaluation of nonviral microbial pesticides, *Bull. W.H.O.*, 61, 117.
- Shadduck, J. A., Singer, S. et Lause, S., 1980. Lack of mammalian pathogenicity of entomocidal isolates of *Bacillus sphaericus*, *Environ. Entomol.*, 9, 403.
- Siegel, J. P. et J. A. Shadduck. 1990. Safety of microbial insecticides to vertebrates-humans. In: *Safety of microbial insecticides*. Laird, M., L. A. Lacey & E. D. Davidson edd. CRC Press Inc., Florida: 101-114.
- Siegel, J. P. et Shadduck, J. A., 1987. Safety of the entomopathogenic fungus *Lagenidium giganteum* (Oomycetes: Lagenidiales) to mammals, *J. Econ. Entomol.*, 80, 994.
- Silvy, C. 1992. Informations pratiques. *La lutte biologique. Dossier de la Cellule environnement de l'INRA* 5, 226-234.
- Simmonds, M.J.S., Evans, H.C., et Blaney, W.M. 1992. Pesticides for the year 2000: mycochemicals and botanicals. In *Pest management and the environment in 2000*, sous la direction de Abdul Aziz S.A. Kadir et Henry S. Barlow, p.127-164. Wellingford: CAB International.
- Singer, S. 1981. Potential of *Bacillus Sphaericus* and related spore-forming bacteria for pest control. In: *Burgess, H. D. (ed.) Microbial Control of Pests and Plant Diseases 1970-1980*. Academic Press, New York, pp. 283-98.
- Smith, H.S. 1919. On some phase of insect control by the biological method. *J. Econ. Ent.* 12: 288-292.
- Smith, M.C. 1989. *Plant resistance to insect*. New York: John Wiley & Sons, 286p.
- Smith, R.J., Pekrul, S. et Grula, E.A., 1981. Requirement for sequential enzymatic activities for penetration of the integument of the corn earworm (*Heliothis zea*). *J. Invertebr. Pathol.* 38: 335-344
- Smith, R. J. et E. A. Grula. 1982. Toxic components on the larval surface of the corn earworm (*Heliothis zea*) and their effects on germination and growth of *Beauveria bassiana*. *J. Invertebr. Pathol.* 39: 15-22.
- St. Leger, R. 1993. Biology and mechanisms of insect-cuticle invasion by Deuteromycete fungal pathogens. In: *Parasites and Pathogens of Insects*. Vol. 2, Pathogens. N. E. Beckage and B. Federici (eds.). Academic Press, New York, pp. 211-230.
- St. Leger, R. J., P. K. Durrands, A. K. Charnley et R. M. Cooper. 1988. Role of extracellular chymoelestatase in the virulence of *Metarhizium anisopliae* for *Manduca sexta*. *J. Invertebr. Pathol.* 52: 285-293.
- St. Leger, R. J., T. M. Butt, R. Staples et D. W. Roberts. 1989. Production of appressoria by the entomopathogenic fungus *Metarhizium anisopliae*. *Exp. Mycol.* 13: 274-288.
- St. Leger, R.J., Butt, T.M., Staples, R. et Roberts, D.W., 1989. Production *in vitro* of a cuticle-degrading protease by the entomopathogenic fungus *Metarhizium anisopliae*. *Exp. Mycol.* 13: 253-262.
- Starnes, R. L., C. L. Liu et P. G. Marone. 1993. History, use and future of microbial insecticides. *Amer. Entomol.* 39:83-91.
- Soderhall, K., 1981. Fungal cell wall beta 1-3 glucans induce clotting and phenoloxylase attachment to foreign surfaces of crayfish hemocyte lysate. *Dev. Comp. Immunol* 5:565.
- Som, N. C., Ghosh, B. B. et Majumdar, M. K., 1986. Effects of *Bacillus thuringiensis* and insect pathogen, *Pseudomonas aeruginosa*, on mammalian gastrointestinal tract, *Indian J. Exp. Biol.*, 24, 102.
- Sorsa, M., Cariberg, G., Gripenberg, U., Linnainmaa, K., Meretoja, T. et Troil, H. V., 1976. Mutagenic activity of *Bacillus thuringiensis* exotoxin, the potential biological insecticide. *Hereditas*. 84. 253.
- Starnes, R. L., C. L. Liu et P. G. Marone. 1993. History, use and future of microbial insecticides. *Amer. Entomol.* 39: 83-91.
- Steinhaus, E. A. 1949. *Principles of insect pathology*. McGraw Hill Book. Co. Inc., Toronto. 757p.
- Steinhaus, E. A., 1963. *Insect pathology advanced treatise*. Academic Press. New York, vol. 1: 661p., vol.2: 689p.

Les possibilités de la lutte microbiologique – M. de Kouassi,

- Street, D.A., et McGuire, M.R., 190. Pathogenic disease of grasshoppers. In Biology of grasshopper, sous la direction de Chapman, R. F. et Joern, p.484-516. A. New York: John Wiley & son.
- Subramanian, C. V. 1983. Hyphomycetes: Taxonomy and Biology. Academic Press. New York, p. 28.
- Taylor, A. B. et R. L. King. 1937. Further studies on parasitic amebae found in grasshoppers. Trans. Am. Microscop. Soc. 56: 172-176.
- Talbot, P. H. B. 1971. Principles of Fungal Taxonomy. Macmillan. Press. London.
- Théodoridès, J., R. Ormières et P. Jolivet 1958. Eugrègarines parasites d'orthoptéroïdes, p. 44 in Explor. Parc Nat. Albert, série 2, vol. 7. Inst. des Parcs nationaux du Congo Belge, Bruxelles.
- Thomas, W. E. et Ellar, D. J., 1983. *Bacillus thuringiensis* var. *israelensis* crystal delta-endotoxin: effects on insect and mammalian cells *in vitro* and *in vivo*, J. Cell., Sci. 60, 181.
- Tingey, W. 1992. 1992 pest management recommendations for commercial vegetable and potato production. Cornell Coop. Ext. Publ. Cornell Univ., Ithaca, NY., pp. 129-137.
- Tinsley, T. W. 1979. The potential of insect pathogens as pesticidal agents. Ann. Rev. Entomol. 24:63-87.
- Todorova, S. I., J.-C. Côté, P. Martel et D. Coderre. 1994. Heterogeneity of two *Beauveria bassiana* strains revealed by biochemical tests, protein profiles and bio-assays on *Leptinotarsa decemlineata* (Col.: Chrysomelidae) and *Coleomegilla maculata lengi* (Col.: Coccinellidae) larvae. Entomophaga 39: 159-169.
- Tonkonojenko, A. P. 1967. Tokicno entomopatogenih bakterih dlia teplokrovnih laboratornih jivotnih, VECTNIK c-h nauki 1, 145-146.
- Tooby, T.E. 1989. Pesticide contamination of water - regulatory consideration. Proceedings of the Brighton Crop Protection Conference on Weeds 3, 1165-1171.
- Tourmanoff. C. 1953. Description de quelques souches entomophytes de *Bacillus cereus* Frank. and Frank. avec remarques sur leur action et celle d'autres bacilles sur le jaune d'oeuf, Ann. Inst. Pasteur, 85, 90.
- Undeen, A. H. et Alger, N. E., 1976. *Nosema algerae*: Infection of the white mouse by a mosquito parasite, Exp. Parasitol., 40, 86.
- Undeen, A. H. et Alger, N. E., 1977. Agglutination and immunofluorescent tests for infection of mammals by *Nosema algerae* (Cnidospora: Microsporodia), Sci. Biol. J., p. 259.
- Vago, C., R. Martoja 1963. Une rickettsiose dans le gryllidae (Orthoptera). C. R. Acad. Sci. Paris. 256: 1045-1047.
- Van Edem, H.F. 1987. Cultural methods: the plant. In Integrated pest management sous la direction de A. J. Burn, T.H. Coacker et P.C. Jepson, p.28-68. London: Academic Press.
- Vanderberg, J. D. 1990. Safety of four entomopathogens for caged adult honey bees (Hymenoptera: Apidae). J. Econ. Entomol. 83: 755-759.
- Vankova, J., 1978. The heat-stable exotoxin of *Bacillus thuringiensis*. Folia Microbiologica 24: 162-174.
- Vereijken et Viaux, 1990. Vers une agriculture intégrée. Supplément de La Recherche 227: 22-25.
- Vey, A.J., Fargues, J. et Robert, P., 1982. Histological and ultrastructural studies of factors determining the specificity of pathotypes of the fungus *Metarhizium anisopliae* for scarabeid larvae. Entomophaga 27: 387-397.
- Vinson, S. B. 1990. Potential impact of microbial insecticides on beneficial arthropods in the terrestrial environment. In: Safety of microbial insecticides. Laird, M., L. A. Lacey & E. D. Davidson edd. CRC Press Inc., Florida: 44-64.
- Von Arx, J. A. 1986. *Tolypocladium*, a synonym of *Beauveria*. Mycotaxon. 25: 153-158.
- Weiser, J. 1972. *Beauveria* Vuill. In: *Nemoci hmyzu*. Naklad. Ceskoslov. Akademie, Praha, pp. 361-377.
- Weiser, J. 1972. Microbiologiseskie metodi borbi s vrednimi nasekomimi. Moskva, *Kolos*, 636.
- Wells, F. E. et Heimpel, A. M., 1970. Replication of insect viruses in insect hosts, J. Invertebr. Pathol., 16, 301.
- Wilson, W. T. 1962. Observation of the effects of feeding large quantities of *Bacillus thuringiensis* Berliner to honey bees. J. Insect. Pathol. 4: 269-276.
- Wraight, R. J. et D. W. Roberts 1987. Insect control effort with fungi. Devel. Industr. Microbiol. 28: 77-87.
- Wratten, S. D. 1987. The effectiveness of natural enemies. In Integrated pest management sous la direction de A. J. Burn, T. H. Coacker et P. C. Jepson, p89-112. London: Academic Press.

LES MÉTHODES DE LUTTE PHYSIQUE COMME ALTERNATIVES AUX PESTICIDES

Par Charles Vincent¹ et Bernard Panneton², Centre de recherche et de développement en horticulture, Agriculture et agro-alimentaire Canada, 430 boul. Gouin, Saint-Jean-sur-Richelieu, QC J3B 3E6, courriels: v Vincentch@em.agr.ca, pannetonb@em.agr.ca.

En matière de protection des végétaux en agriculture, on peut utiliser cinq types d'approches soient la lutte chimique, la lutte biologique, la lutte physique, les biopesticides et les facteurs humains (Fig. 1). Théoriquement, la **lutte intégrée** s'ouvre à toute technique de protection des plantes en fonction de ses mérites dans une situation donnée. En pratique, la **lutte chimique** constitue, et de loin, le type de méthode le plus utilisé en agriculture commerciale. Ceci est dû à des raisons essentiellement économiques et techniques (Tableau 1).

APPROCHES EN PROTECTION DES PLANTES

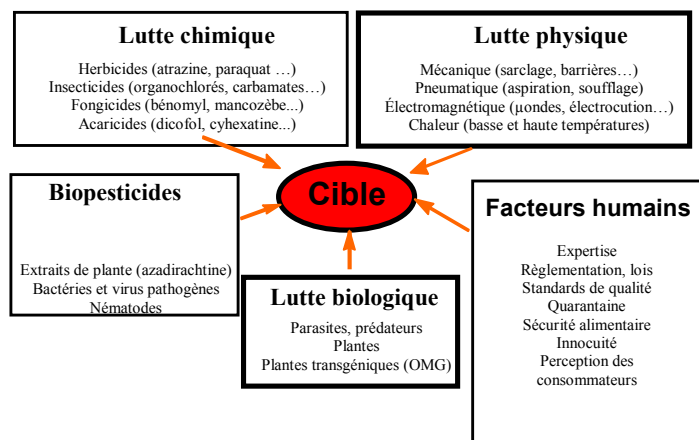


Figure 1. Les cinq types d'approches en protection des végétaux (D'après Panneton et al. 2000a).

L'évolution vers la lutte intégrée s'est amorcée avec la **lutte biologique** classique. Dans un contexte d'agriculture durable, la lutte biologique (prise dans son sens large) peut offrir de nombreuses méthodes de lutte alternatives aux insecticides de synthèse (Vincent et Coderre 1992). En pratique, l'application de la lutte biologique repose souvent sur une multitude d'actions et d'informations complexes et fines.

Parmi les méthodes de lutte biologique, les **biopesticides** occupent une place de choix car ils se prêtent souvent à la production de masse requise pour l'industrie et ils s'appliquent avec un pulvérisateur conventionnel, ce qui en facilite l'adoption par les producteurs agricoles. Les biopesticides peuvent être à

base de bactéries, champignons, virus, nématodes et d'extraits de plantes (Vincent 1998). Ils sont généralement compatibles avec des méthodes de lutte biologique classiques (ex. lâchers de prédateurs ou de parasites), quoiqu'ils peuvent avoir des effets néfastes sur les organismes utiles (Giroux *et al.* 1994, Roger *et al.* 1995).

La **lutte physique en protection** (voir le livre de Vincent, Panneton et Fleurat-Lessard 2000) des plantes regroupe toutes les techniques de lutte dont le mode d'action primaire ne fait intervenir aucun processus biologique, biochimique ou toxicologique. Par opposition, les autres techniques ne sont efficaces que si une interaction est établie entre un processus issu du vivant chez l'ennemi visé (physiologie, comportement, écologie) et l'agent de lutte. Parfois, l'action primaire a une action répressive directe comme dans le cas où des insectes sont tués sur le coup par des chocs mécaniques. D'autres fois, les réactions au stress induit par la méthode physique apportent l'effet désiré. Plusieurs techniques de lutte physique ont suffisamment de qualités ou d'avantages pour enrichir l'arsenal de lutte intégrée.

L'utilisation de méthodes de lutte physique doit s'inscrire dans une démarche de **lutte intégrée**. En effet, comme toute méthode de lutte, les méthodes physiques ont leurs forces et leurs faiblesses (Tableau 1) et certaines sont susceptibles d'avoir des effets secondaires sur la faune et la flore. Dans un contexte de lutte intégrée, la décision d'avoir recours à une méthode de lutte physique doit donc se faire au mérite en fonction des mêmes critères que ceux utilisés pour décider de la pertinence d'une pulvérisation d'un pesticide: efficacité, rentabilité, impacts non-désirés. De plus, il n'existe pas de technique de lutte physique ayant le potentiel de devenir la seule technique nécessaire (ou suffisante) pour tous les traitements phytosanitaires sur une culture donnée. Ce potentiel est la force principale du système de protection des plantes reposant sur la pulvérisation de pesticides, mais c'est probablement aussi sa faiblesse puisque cela tend à amplifier le taux de développement des résistances et à occulter les techniques alternatives. Seule l'application du concept de lutte intégrée permet de sortir du piège de la solution unique et ouvre la porte à l'implantation en conditions commerciales de techniques de lutte physique

CARACTÉRISTIQUE	MÉTHODES		
	CHIMIQUE	BIOLOGIQUE	PHYSIQUE
Apparition	20ième siècle	20ième siècle	Avec l'agriculture
Homologation	Requise	Quelques cas	Jamais
Sciences en support	Chimie analytique et de synthèse, biologie	Biologie, biotechnologie, écologie	Ingénierie (mécanique, électrique, électronique), biologie
Références scientifiques	Très abondantes	Abondantes	Peu
Action résiduelle (résidus et rémanence)	Oui (variable)	Oui (si reproduction)	Négligeable
Possibilités d'utilisation avec une autre méthode	Oui (parfois difficile avec méthodes biologiques)	Oui	Oui
Méthode active ou passive	Active	Active	Active et passive
Application en grandes cultures	Elevée	Faible	Faible à modérée
Application pour des cultures à forte marge à l'hectare	Elevée	Modérée à élevée	Modérée à élevée
Sécurité pour la culture	Moyenne à élevée (phytotoxicité)	Élevée	Élevée (passives) Faible (actives)
Main-d'œuvre requise	Faible	Elevée	Moyenne à élevée
Rendement de chantier (hectares par heure)	Elevé	Variable	Faible (actives) Elevé (passives)
Site d'action	Appareil photosynthétique, système nerveux (quelques gènes seulement)	Systèmes d'adaptation aux stress biotiques	Systèmes d'adaptation aux stress abiotiques
Exigences environnementales ou toxicologiques, sécurité	Elevées et coûteuses	Moyennes (ex. virus)	Faibles (exception: rayonnement électromagnétique)
Impact géographique	Dérive, ruissellement, évaporation, chaîne alimentaire	Colonisation par des parasites ou prédateurs d'habitats non visés	Restreint à la zone traitée (exception: rayonnement électromagnétique)
Quantité d'énergie requise	Élevée pour la production	Faible	Faible (passives) Elevée (actives)
Machinerie requise	Pulvérisateur terrestre ou aérien	Peu ou pas	Machines nombreuses et variées, peu d'utilisations multiples de la même machine
Marché actuel	32 milliards \$US (192 milliards FF)	Environ 1.5% du marché des pesticides chimiques	Négligeable

 Tableau 1. Comparaison entre les méthodes de lutte en protection des plantes (D'après Panneton *et al.* 2000b).

Il convient de distinguer deux types fondamentaux de méthodes de lutte physique: les méthodes actives et les méthodes passives. Les méthodes actives utilisent de l'énergie au moment de l'application pour détruire, blesser ou stresser les ennemis des cultures, ou pour les enlever du milieu. Ces méthodes n'agissent qu'au moment de l'application et ne présentent pratiquement pas de rémanence. Les méthodes passives procèdent par une modification du milieu et ont un caractère plus durable. On peut aussi classer les méthodes physiques selon le mode d'utilisation de l'énergie, soit la lutte mécanique, lutte thermique, lutte électromagnétique et lutte pneumatique. Dans ce contexte, on imagine facilement que d'autres classes peuvent s'ajouter au besoin: lutte acoustique, lutte thermodynamique...

Il n'y a pas de relation stricte entre les classes de méthodes de lutte physique et les grands groupes d'ennemis des cultures: mauvaises herbes, insectes et acariens, pathogènes microscopiques. Bien sûr, quelques associations telle que la lutte mécanique contre les mauvaises herbes (sarclage) sont naturelles, mais on retrouve pratiquement une méthode dans chacune des classes qui s'applique à un groupe d'ennemis particulier. Ici, la lutte pneumatique fait exception puisqu'elle n'est appliquée que pour le contrôle des insectes.

Dans la lutte contre les insectes, la lutte physique peut avoir recours à plusieurs technologies dont certaines mettent en oeuvre des méthodes actives: les chocs thermiques (chaleur), les

radiations électromagnétiques (micro-ondes, radio-fréquences, infrarouge), les chocs mécaniques et la lutte pneumatique (soufflage/aspiration). Au champ, l'utilisation de barrières physiques représente la seule méthode passive disponible.

Des applications faisant appel aux chocs thermiques pour la protection des cultures au champ se développent. L'utilisation de chocs thermiques suppose que la denrée ou la culture à protéger est moins sensible que la cible à une variation soudaine et forte de température. L'étude des seuils de thermosensibilité et des réactions physiologiques aux stress thermiques de courte durée est donc au coeur du développement des techniques de lutte par choc thermique.

Plusieurs pistes d'application des radiations électromagnétiques comme outil de lutte contre les insectes ont été explorées. Les radiations électromagnétiques non-ionisantes tuent les insectes par réchauffement interne des individus. L'utilisation des radio-fréquences, des micro-ondes (ex. Biron *et al.* 1996) ou de l'infrarouge s'apparente donc aux méthodes par choc thermique à la différence qu'avec les radiations électromagnétiques, le transfert d'énergie s'effectue sans l'intermédiaire d'un fluide caloporteur. Au champ, les technologies basées sur les radiations électromagnétiques sont souvent trop dispendieuses. De plus, des règlements viennent limiter les bandes de fréquence disponibles soit pour des raisons de sécurité pour les utilisateurs et l'environnement, soit pour réserver des plages de fréquence à des applications spécifiques ne tolérant pas d'interférences (e.g. systèmes d'aide à l'atterrissage d'avions par micro-ondes).

Les barrières physiques constituent une famille étendue de techniques de lutte physique. Les technologies de barrières physiques sont applicables en champ ou en cultures abritées. Au champ, les barrières peuvent prendre plusieurs formes, par exemple les tranchées, les fibres cellulosiques (contre la mouche du chou: Fig. 2: Lavoie 1999), les filets contre les oiseaux frugivores en bleuetières (ex. Vincent et Lareau 1993). Elles sont déployées à différentes échelles pour protéger soit un champ complet, un rang de culture ou des plants.

Dans la lutte pneumatique (Fig. 3) (ex. Vincent et Lachance 1993, Chagnon et Vincent 1996, Chiasson et al. 1997), on crée des courants d'air qui délogent les insectes, lesquels meurent dans le transit des tuyaux ou lors du passage à travers la turbine (chocs mécaniques). Lorsque délogés par soufflage, les individus de certaines espèces d'insectes, diminués physiquement, meurent simplement parce qu'ils sont incapables de remonter sur la plante hôte. D'autres machines recueillent les insectes délogés à l'aide d'un système de captage pour les éliminer dans un deuxième temps. Une bonne connaissance du comportement de l'animal est nécessaire pour améliorer l'efficacité de cette méthode (Vincent et Chagnon 2000).



Figure 2. A) Larve de la mouche du chou, *Delia radicum* L. (Anthomyiidae), B) A gauche : plantule saine de chou. A droite : plantule flétrie suite à une attaque de la mouche du chou. C) essai de fibres de cellulose (produites par Cascades Multi-Pro, Drummondville, Qc) comme écran physique pour empêcher la ponte des femelles de mouches du chou. (Photos de Lavoie 1999).

En phytopathologie, on retrouve moins de travaux scientifiques concernant la lutte physique. On peut utiliser des films de polyéthylène ayant des propriétés filtrantes à l'égard de parties spécifiques du spectre de lumière solaire pour lutter contre le *Botrytis* en serre. C'est donc une technique passive faisant appel à une barrière physique. Le traitement des semences de blé à l'aide de micro-ondes pour le contrôle de *Fusarium graminearum* a été évalué. Des essais similaires ont été réalisés pour inactiver *Ustilago nuda* sur des graines d'orge. Dans la culture de la pomme de terre, on utilise souvent un fongicide en complément d'un défoliant chimique comme mesure sanitaire prévenant la transmission de l'infection par *Phytophthora infestans* à la prochaine production. Le défanage thermique, qui remplace la défoliation chimique, réduit significativement la viabilité de *P. infestans* présent dans les feuilles au moment du défanage.

Au cours de la conservation prolongée des produits agricoles non périssables (grains et graines, fruits secs, produits dérivés, plantes séchées et déshydratées, épices, plantes aromatiques et condimentaires, café, cacao, etc.), les pertes les plus importantes sont infligées par des insectes ou des acariens, ou sont la conséquence de la prolifération de certains micro-organismes, les autres agents de détérioration ayant une influence négligeable. La méthode la plus répandue actuellement pour prévenir les attaques des ravageurs des grains et graines est la lutte chimique avec des insecticides à longue persistance d'action. Les avantages de cette pratique sont liés à son faible

coût, à sa facilité de mise en œuvre et à la durée de la protection qui se prolonge plusieurs mois, jusqu'à ce que le niveau de résidus encore actifs ne devienne inférieur au seuil légal pour les espèces cibles. Cependant, l'usage régulier des insecticides comporte de sérieux inconvénients, comme la possibilité de créer des races résistantes et des risques de dépassement des limites de tolérance pour les résidus d'insecticides (LMR) à cause d'applications multiples par différents opérateurs de la chaîne commerciale du grain. Cette situation est difficilement acceptée car les résidus de pesticides issus d'usages mal maîtrisés ont une très mauvaise image dans l'opinion du consommateur. Il en résulte, tant de la part de l'industrie de transformation utilisatrice les grains traités, que des consommateurs avertis, une pression pour que le recours à ce type de moyens de protection soit limité à l'indispensable et pour une absence de résidus dans les produits finis. Les stratégies d'utilisation de tels insecticides à action rémanente, seulement autorisés sur les céréales brutes, privilégient un diagnostic préalable du risque avant chaque utilisation ainsi qu'une évaluation du résultat en termes de coût économique et de fermeture possible des marchés.

l'énergie électromagnétique rayonnante est limitée par des règlements sur les télécommunications dont plusieurs sont le résultat d'ententes internationales. Signalons par exemple le cas des micro-ondes, où peu de fréquences sont réservées pour des applications industrielles, scientifiques et médicales. Ce qui caractérise le cadre réglementaire pour les technologies de lutte physique, c'est qu'il est complètement défini *a priori*. Il s'agit simplement que l'équipement utilisé soit conforme aux normes appropriées (touchant la sécurité de l'utilisateur pour l'essentiel).

Conclusion

Il est clair que la lutte physique n'a pas bénéficié des mêmes efforts de recherche et développement que la lutte chimique ou la lutte biologique. Il a fallu attendre le début des années '90 pour que la lutte physique émerge réellement comme une alternative aux pesticides conventionnels, quand elle a été abordée avec les mêmes moyens que la lutte biologique : des modèles sur l'impact des stress physiques sur les ravageurs ou sur les mauvaises herbes, liés à des effets physiologiques précis permettant de comprendre le processus léthal au point de vue de la modélisation mécanistique. La lutte physique comporte de nombreux défis scientifiques et techniques que plusieurs équipes de recherche s'appliquent à relever. A mesure que les pressions favorisant l'essor de l'agriculture durable s'accroîtront, de nouvelles équipes verront le jour et de nouvelles compagnies se formeront pour développer et mettre en marché ces technologies. Comme la lutte physique offre des opportunités intéressantes de réduction des pesticides de synthèse, leur développement peut contribuer grandement à l'atteinte des objectifs de réduction des pesticides que se sont fixés plusieurs pays et organismes et dans ce contexte, les organisations responsables devraient supporter activement le développement et l'implantation des méthodes de lutte physique à l'intérieur de programmes de lutte intégrée en phytoprotection.

Dans l'état actuel de gestion de la protection des cultures et des denrées post-récolte, la contribution de la lutte physique à la protection intégrée est jugée insuffisante. Pourtant, on dispose de techniques performantes et compatibles avec les stratégies de lutte intégrée ou raisonnée et qui, dans certaines situations particulières, peuvent constituer l'élément majeur d'une telle stratégie. Il faut garder présent à l'esprit que le système de production intensif pour toutes les productions végétales est condamné à régresser progressivement pour pouvoir s'adapter aux politiques de réduction des prix à la production, aux exigences de qualité sanitaire et de sécurité défendues par les consommateurs et à la rareté croissante de nouveaux pesticides dans de nombreux secteurs de la production végétale, différents des grandes cultures. Les recherches associées à l'extension des usages de la lutte physique et au génie des procédés sont de nature à favoriser cette évolution qui paraît inéluctable.

ooo

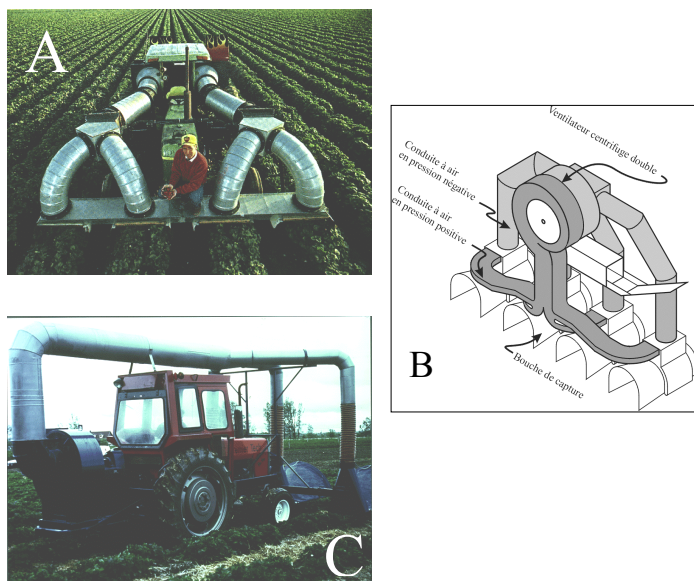


Figure 3. A) Ed Show devant son aspirateur à insectes en Californie (photo reproduite du National Geographic). B) Ventilateur centrifuge double (adapté de Boiteau 1992), C) Biovac, prototype de Premier Tech (Rivière-du-Loup, Qc) ; utilisé en fraisières dans Vincent et Lachance (1993).

Parmi les facteurs humains (Fig. 1), le **cadre réglementaire** de la lutte physique est très différent de celui des produits agro-chimiques. D'abord, plusieurs technologies sont soumises à des règles d'utilisation qui visent la protection de l'utilisateur et des personnes. Parfois, comme dans le cas de l'utilisation du gaz propane, une formation spécifique est exigée. L'utilisation de

Bibliographie

- Biron, D., C. Vincent, M. Giroux et A. Maire 1996. Lethal effects of microwave exposures on eggs and pupae of the cabbage maggot and cabbage plants. *J. Microwave Power & Electromagnetic Energy* 31:228-237.
- Chagnon, R. et C. Vincent 1996. A test bench for vacuuming insects from plants. *Canadian Agricultural Engineering* 38:167-172.
- Chiasson, H., C. Vincent et D. de Oliveira 1997. Effect of an insect vacuum device on strawberry pollinators. *Acta Horticulturae* 437:373-377
- Giroux, S., J.-C. Côté, C. Vincent, P. Martel et D. Coderre 1994. Bacteriological insecticide M-One effects on the mortality and the predation efficiency of adult spotted lady beetle *Coleomegilla maculata* (Coleoptera: Coccinellidae). *J. Econ. Entomol.* 87:39-43.
- Lavoie, A. 1999. Utilisation de fibres de cellulose et de neem (*Azadirachta indica* Juss. Méliacées) et de nématodes entomopathogènes dans la lutte contre la mouche du chou, *Delia radicum* (L.) (Diptera: Anthomyiidae). Mémoire de M.Sc. en biologie, Université du Québec à Montréal, 95p.
- Panneton, B., C. Vincent et F. Fleurat-Lessard 2000a. Place de la lutte physique en phytoprotection, pp. 1-24 in C. Vincent, B. Panneton et F. Fleurat-Lessard (Eds.) La lutte physique en phytoprotection, INRA Editions, Paris, 347 p.
- Panneton, B., C. Vincent et F. Fleurat-Lessard 2000b. Bilan et perspectives pour la lutte physique en phytoprotection, pp. 333-339 in C. Vincent, B. Panneton et F. Fleurat-Lessard (Eds.) La lutte physique en phytoprotection, INRA Editions, Paris, 347 p.
- Roger, C., C. Vincent et D. Coderre 1995. Mortality and predation efficiency of *Coleomegilla maculata lengi* Timberlake (Coccinellidae) following application of Neem extracts (*Azadirachta indica* A. Juss., Meliaceae). *J. Appl. Entomol.* 119:439-443.
- Vincent, C. et M. J. Lareau 1993. Effectiveness of methiocarb and netting for bird control in a highbush blueberry plantation in Quebec, Canada. *Crop Protection* 12:397-399.
- Vincent, C. et P. Lachance 1993. Evaluation of a tractor-propelled vacuum device for the management of tarnished plant bug populations in strawberry plantations. *Environ. Entomol.* 22:1103-1107.
- Vincent, C. et R. Chagnon 2000. Vacuuming tarnished plant bug on strawberry: a bench study of operational parameters versus insect behavior. *Entomol. Exp. Applic.* 97: 347-354.
- Vincent, C. (Ed.) 1998. Les biopesticides. *Antennae* 5(1): 7-29.
- Vincent, C. et D. Coderre (Eds.) 1992. La lutte biologique. Gaëtan Morin Editeur (Montréal) et Lavoisier Tech Doc (Paris), 671 p.

Pour des informations complémentaires concernant la protection des végétaux avec emphase sur la lutte physique, vous pouvez télécharger **gratuitement** (en format PDF: 342 Ko) le chapitre 1 (Panneton et al. 2000a) de l'ouvrage de C. Vincent, B. Panneton et F. Fleurat-Lessard 2000 (eds.). La lutte physique en phytoprotection. (Editions INRA, Paris, 347 p.) en visitant le: http://res2.agr.ca/stjean/person/vincen_f.htm

PARASITOÏDES ET LUTTE BIOLOGIQUE: PARADIGME OU PANACÉE?

Par Guy Boivin,

Centre de Recherche et de développement en Horticulture, Agriculture et Agroalimentaire Canada, 430
Boul. Gouin, Saint-Jean-sur-Richelieu, PQ Canada J3B 3E6, Tel: (450) 346-4494, Fax (450) 346-7740, E-
mail: BoivinG@em.agr.ca

Résumé

La lutte biologique utilise des organismes vivants pour diminuer les niveaux de population d'autres organismes, généralement nuisibles. Les ennemis naturels les plus souvent utilisés en lutte biologique comprennent les microorganismes, les nématodes, les prédateurs et les parasitoïdes. Ces derniers sont responsables de nombreux succès en lutte biologique et ils occupent dans les écosystèmes naturels une place importante. On considère que la mortalité causée par les parasitoïdes est plus importante en nature que celle attribuée aux prédateurs et aux microorganismes combinés. On retrouve des parasitoïdes dans six ordres d'insectes mais ce sont surtout les parasitoïdes hyménoptères, diptères et coléoptères qui ont été étudiés en lutte biologique. Malgré des qualités indéniables en lutte biologique (grande spécificité, innocuité pour l'homme, possibilités d'élevage de masse), l'utilisation de parasitoïdes en lutte biologique n'est pas sans problème. Les risques associés à la pollution génétique des populations naturelles et aux conditions d'élevages de masse doivent être pris en ligne de compte dans l'évaluation des coûts et bénéfices de la lutte biologique.

La lutte biologique

Le milieu agricole et le milieu forestier sont l'objet depuis plusieurs années de critiques concernant leur impact environnemental. Les citoyens s'inquiètent de la dégradation des milieux naturels ainsi que de l'innocuité des aliments qu'ils consomment. Cette perception négative a été exacerbée en Europe suite aux crises successives qui ont frappé le milieu agricole (contamination de poulets à la dioxine, crise de la vache folle, épidémie de fièvre aphteuse...). Face à ces critiques et afin de rendre moins polluante et moins risquée l'agriculture moderne, un certain nombre de solutions, dont la lutte biologique, sont proposées.

Il n'est pas inutile de définir brièvement ce que nous entendons ici par lutte biologique. Il existe de nombreuses définitions de la lutte biologique mais nous nous en tiendrons à une définition générale telle que celle proposée par Van Drische et Bellows (1996): «Biological control is a population-level process in which one species' population lowers the numbers of another species by mechanisms such as predation, parasitism, pathogenicity, or competition» (La lutte biologique est un processus agissant au niveau des populations et par lequel la densité de population d'une espèce est abaissée par l'effet d'une autre espèce qui agit par prédation, parasitisme, pathogénéicité ou compétition). La lutte biologique est donc l'utilisation d'organismes vivants dans le but de diminuer la densité de population d'un autre organisme vivant, généralement un ravageur. Ce ne sont donc pas toutes les méthodes de lutte non-chimiques qui peuvent être considérées

comme de la lutte biologique. Ainsi l'utilisation de produits chimiques extraits de plantes (tels des insecticides d'origine végétale) ou de microorganismes (tels les formulations de Bt ne contenant que l'exotoxine du Bt et non plus de bactéries vivantes) n'est pas de la lutte biologique. La sélection, traditionnelle ou par introduction de gènes, de plantes résistantes aux insectes ou aux maladies, la lutte culturale ou l'utilisation de produits sémi-chimiques, tels les phéromones, ne sont également pas des méthodes de lutte biologique. Par contre l'utilisation de produits chimiques qui attirent ou retiennent des ennemis naturels ou la sélection de plantes qui favorisent l'efficacité des ennemis naturels contribuent à la lutte biologique.

Pourquoi s'intéresser de près à ce qui peut et ce qui ne doit pas être considéré comme de la lutte biologique? En fait, surtout pour une question de crédibilité. La montée de l'intérêt du public pour des aliments produits dans un contexte agricole sain et non-polluant pousse l'industrie agro-alimentaire à satisfaire ce besoin. Cette réponse est tout à fait souhaitable en autant que la réponse de l'industrie corresponde bien aux attentes du public. Or la lutte biologique telle que définie plus haut n'est pas simple à mettre en place et demande un effort de recherche et de vulgarisation important. La tentation peut être forte de qualifier de lutte biologique des méthodes plus faciles à mettre en place, comme par exemple le passage vers des insecticides chimiques d'origine végétale, mais qui n'apportent pas de garanties quand à leur innocuité pour l'environnement ou le public.

L'objectif de la lutte biologique est donc à terme de remplacer, en totalité ou en partie, les pesticides chimiques utilisés en

agriculture et en foresterie. La lutte biologique n'est donc pas l'agriculture biologique ou organique qui demande une production complètement exempte d'intrants chimiques (engrais, pesticides, antibiotiques ...). Cependant la lutte biologique peut devenir une composante importante de systèmes de production intégrée ou biologique.

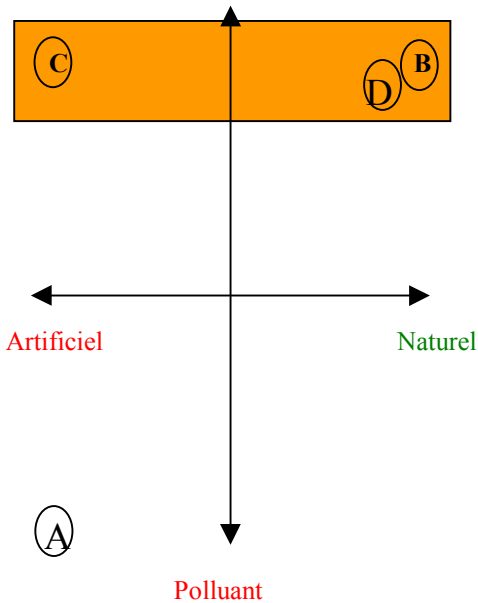


Figure 1- Diagramme illustrant les gradients existants en production agricole et forestière. Selon qu'une production est plus ou moins naturelle et polluante, on peut la situer sur ce plan. A- production à la fois artificielle et polluante, B et D- productions naturelles et non-polluantes, C- production non-polluante mais artificielle

L'utilisation de méthodes de lutte biologique n'est donc pas une assurance de production agricole naturelle mais plutôt d'une production moins polluante. En effet on peut placer les divers types de production agricole et forestière sur un plan séparant la notion de production polluante de celle de production naturelle (Figure 1). Sur ce graphique, la production intensive de porc en porcherie sur clayage peut être placée au point A puisqu'elle est à la fois polluante et artificielle. A l'opposé, la production de bleuets en bleuétière sauvage sans intrants est naturelle et non-polluante (point B, Figure 1). Une production utilisant la lutte biologique progressera vers la zone ombrée au sommet du graphique. La mise en place d'un programme de lutte biologique dans une production de laitue en hydroponique ne rendra pas cette culture moins artificielle mais elle sera moins polluante (point C, Figure 1). Dans le cas d'une repousse naturelle de forêt protégée contre les insectes ravageurs par des bactéries ou des parasitoïdes, on obtiendra une culture à la fois non-polluante et naturelle (point D, Figure 1). Notons au passage qu'une ferme en agriculture

organique se trouvera au sommet du graphique mais pas nécessairement vers la droite. En effet la production de la plupart des fruits et légumes ainsi que la production animale peut être non-polluante mais n'est certainement pas une situation naturelle!

Terminons cette brève mise au point sur la lutte biologique en soulignant que, selon les modalités d'utilisation, on reconnaît plusieurs types de lutte biologique. On qualifie de lutte biologique classique, ou par introduction, la technique qui consiste à introduire une nouvelle espèce dans un environnement afin de contrôler les populations d'un ravageur (Pedigo 1996). La plupart du temps, cette approche vise à limiter les populations d'un ravageur exotique en introduisant un ennemi naturel provenant de la zone de distribution originale de ce ravageur mais on peut aussi tenter de transférer un ennemi naturel exotique sur un ravageur indigène. La lutte biologique inondative est une technique augmentative c'est-à-dire qu'on augmente les populations d'ennemis naturels. Dans ce cas, les quantités relâchées dans le milieu sont importantes et l'objectif est de détruire immédiatement un ravageur sans que l'établissement et la reproduction de l'ennemi naturel soient visés. L'utilisation du Bt (bactérie pathogène aux insectes) et des trichogrammes (guêpes parasitoïdes) entrent dans cette approche. Dans une autre approche augmentative, appelée lutte biologique inoculative, l'ennemi naturel est relâché en petite quantité et doit s'établir, se multiplier et coloniser une zone donnée. Cependant cet établissement n'est généralement pas permanent et des introductions doivent être faites une ou plusieurs fois par saison. La manipulation environnementale permet quant à elle de maximiser les effets bénéfiques des espèces indigènes d'ennemis naturels. L'utilisation de couverts végétaux modifiés ou de plantes nectarifères sont des exemples de cette approche.

Les organismes utilisés en lutte biologique

Pratiquement tous les organismes vivants peuvent être considérés comme des ennemis naturels selon l'angle avec lequel on examine leur écologie. Cependant dans un contexte de lutte biologique en agriculture et en foresterie, et surtout en ce qui concerne la lutte biologique contre les insectes ravageurs, quatre groupes d'organismes sont surtout utilisés. Ce sont les microorganismes, les nématodes, les prédateurs et les parasitoïdes. Nous examinerons brièvement les trois premiers groupes pour ensuite nous concentrer sur les parasitoïdes.

Les microorganismes regroupent les bactéries, virus, champignons et protozoaires pathogènes aux insectes. Les bactéries entomopathogènes se retrouvent chez les bactéries asporogènes telles les Pseudomonadaceae (*Pseudomonas*) et les Enterobacteriaceae (*Aerobacter*, *Cloaca*, *Serratia*) et les bactéries sporogènes tels les Bacillaceae (*Bacillus*, *Clostridium*). Environ une centaine d'espèces sont spécifiquement entomopathogènes (Cloutier & Cloutier 1992). Le premier groupe, les bactéries asporogènes, est présent dans le sol et souvent dans le système digestif des insectes (Van Driesche & Bellows 1996). Ce sont souvent des opportunistes qui envahissent un insecte suite à une

blesse, un stress ou en conjonction avec un autre pathogène. Leur manque de spécificité et surtout leur relative pathogénicité envers les mammifères les ont évidemment tenu à l'écart des programmes de lutte biologique. Les bactéries sporogènes s'attaquant aux insectes sont plus spécifiques et spécialisées. Ce sont surtout des espèces de *Bacillus* telles *B. thuringiensis*, *B. popilliae* et *B. sphaericus* qui ont été étudiées. La plupart des souches de *B. thuringiensis* sont virulentes contre les Lépidoptères mais quelques souches toxiques aux Diptères (*B. t. israelensis*) et aux Coléoptères (*B. t. tenebrionis*) existent. *B. popilliae* est une bactérie pathogène aux larves de Scarabidae alors que *B. sphaericus* n'est pathogène que pour quelques genres de Culicidae (Van Driesche & Bellows 1996).

Le nombre d'espèces de virus pathogènes aux insectes varie selon les auteurs de 650 (Cloutier & Cloutier 1992) à 1200 (Martignoni & Iwai 1981), la plupart (70%) ayant été décrits chez les Lépidoptères. On divise les virus entomopathogènes en 16 familles de virus à ADN ou ARN, à brins doubles ou simples. Deux familles seulement, les Baculoviridae et les Tetraviridae, n'infectent que des arthropodes, les autres familles ayant des représentants associés aux mammifères ou à d'autres groupes non-arthropodes, ce qui limite évidemment leur intérêt en lutte biologique.

Les 700 espèces de champignons entomopathogènes se regroupent dans cinq sous-divisions: les Mastigomycotina, Zygomycotina, Ascomycotina, Basidiomycotina et Deuteromycotina. Seulement environ une vingtaine d'espèces ont cependant été étudiées dans un contexte de lutte biologique.

Finalement les protozoaires infectant les insectes se retrouvent dans six phyla: les Zoomastigina (Flagellés), Rhizopoda (Amibes), Apicomplexa (Grégarines, Eugrégarines, Néogrégarines, Coccidies), Microspora (Microsporidies), Haplosporidia et Ciliophora (Ciliés). Pratiquement tous les travaux en lutte biologique ont porté sur les microsporidies.

Les nématodes entomophages exploitent les insectes comme ressource pour se développer et se reproduire. On retrouve des nématodes entomophages dans 30 familles différentes ce qui représente environ 4,000 espèces (Van Driesche & Bellows 1996). La relation avec leur hôte va du simple commensalisme, sans aucun effet néfaste, jusqu'au parasitisme obligatoire, causant la mort de l'insecte. Dans cette dernière éventualité, les nématodes peuvent avoir un impact sur les populations de l'insecte hôte et ont suscité un intérêt en lutte biologique.

Parmi les principales familles où se retrouvent ces espèces, les Steinernematidae, Heterorhabditidae et Mermithidae sont celles offrant le meilleur potentiel en lutte biologique. Les genres ayant fait l'objet de plus d'études, les *Steinernema* et *Heterorhabditis*, ne contiennent d'ailleurs que peu d'espèces, 10 et 3 respectivement (Doucet & Doucet 1990; Poinar 1990). Les nématodes entomophages s'attaquent à pratiquement tous les ordres d'insectes mais ce sont chez les Coléoptères, Diptères,

Hyménoptères et Lépidoptères que le plus de cas ont été rapportés. Cependant cette prédominance pourrait bien ne refléter que la concentration des études dans ces groupes.

Les prédateurs, qui tuent et consomment leurs proies (Price 1984) aux stades adulte ou larvaire, constituent un groupe beaucoup plus diversifié que les parasitoïdes. On retrouve des espèces prédatrices de façon importante chez neuf ordres d'insectes (Van Driesche & Bellows 1996) bien que ce soit chez les Hémiptères, Coléoptères, Diptères et Hyménoptères que la majorité de ces espèces se retrouvent.

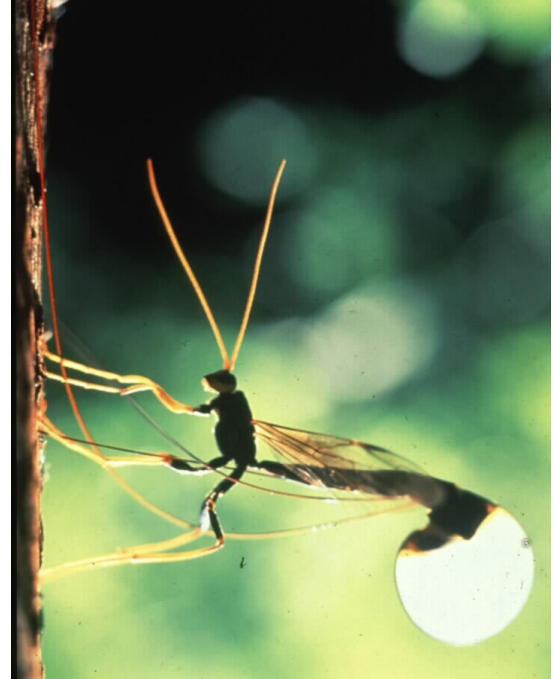


Figure 2- Femelle de *Megarhyssa atrata* (Hymenoptera: Ichneumonidae). Ces femelles percent le bois des arbres pour aller parasiter des larves de mouche à scie jusqu'à 15 cm à l'intérieur de l'arbre.

Chez les Hémiptères, plusieurs familles aquatiques sont prédatrices (Notonectidae, Pleidae, Naucoridae, Belostomatidae etc.). En plus de ces familles, les Anthocoridae, Nabidae, Reduviidae, Pentatomidae, Miridae, Phymatidae et Lygaeidae sont des prédateurs terrestres. Certaines de ces familles, dont les Miridae, contiennent aussi plusieurs espèces phytophages. Les Coléoptères contiennent probablement la majorité des espèces d'insectes prédateurs (Clausen 1940). Les familles de Coléoptères prédateurs les plus connues sont les Coccinellidae, Carabidae, Staphylinidae, Cicindelidae, Dytiscidae et Gyrinidae. Chez les Diptères, on retrouve des familles où seules quelques espèces sont prédatrices, tels les Tipulidae, Culicidae, Chironomidae, Rhagionidae, Asilidae, Empidae, Dolichopodidae, Drosophilidae et d'autres où la majorité des espèces ont un mode de vie de prédateur: Cecidomyiidae, Syrphidae et Chamaemyiidae.

Les parasitoïdes sont des organismes qui se développent sur ou dans un autre organisme, leur hôte, en tirent leur subsistance et le tuent comme résultat direct ou indirect de leur développement (Eggleton & Gaston 1990). Ces organismes ont une importance considérable autant d'un point de vue écologique que de lutte biologique. L'origine, la diversité et l'utilisation en lutte biologique de ces parasitoïdes feront l'objet des sections suivantes.

Les parasitoïdes

La première image qui nous vient à l'esprit lorsque l'on mentionne le mot "parasitoïde" est celle d'une guêpe parasitoïde (probablement d'ailleurs un Ichneumonidae ou un Braconidae) (Figure 2). Le monde des parasitoïdes est cependant beaucoup plus vaste et diversifié que ceux des guêpes de ces groupes. Les parasitoïdes appartenant aux Coleoptères (Figure 3) et Diptères sont aussi relativement bien connus, surtout par les spécialistes travaillant en lutte biologique, mais bien peu connaissent les parasitoïdes appartenant à des groupes comme les Lépidoptères et les Trichoptères. Le mode de vie parasitoïde, tel que défini plus haut, représente entre 5 et 20% des espèces d'insectes (Askew 1971, Eggleton & Belshaw 1992, Godfray 1994). Bien qu'il n'y ait approximativement que 800,000 espèces d'insectes décrites (Gaston 1991), l'évaluation du nombre total d'espèces d'insectes varie entre 2,5 et 30 millions d'espèces (Erwin 1983, Wilson 1988). Il pourrait donc y avoir de 125,000 à 6 millions d'espèces d'insectes ayant un mode de vie parasitoïde. On compte actuellement environ 87,000 espèces de parasitoïdes décrites dans le monde (Eggleton & Belshaw 1992) soit un peu plus de 10 % des espèces décrites. L'imprécision des évaluations tient beaucoup au fait que l'on ne connaît pas de façon précise la richesse de la faune entomologique de la plupart des milieux tropicaux. Par exemple on considère qu'au moins 75% des espèces d'Hyménoptères sont encore non-décrites et qu'une proportion importante des espèces décrites ne peuvent être identifiées (LaSalle 1993).

On retrouve des espèces ayant un mode de vie parasitoïde dans 6 ordres: Hyménoptère, Coléoptère, Diptère, Neuroptère, Lépidoptère et Trichoptère. Evidemment l'importance relative du mode de vie parasitoïde varie beaucoup d'un ordre à l'autre. Ainsi, les 67,000 espèces d'Hyménoptères parasitoïdes représentent environ 67% des espèces de cet ordre. C'est dans cet ordre que se retrouvent la plus grande diversité de modes de vie et d'adaptations à différents hôtes et habitats. L'ordre des Diptères compte un pourcentage important d'espèces parasitoïdes avec 16,000 espèces représentant 18% des espèces. L'importance du mode de vie parasitoïde est minime chez les autres ordres avec environ 1% des espèces parasitoïdes. Ainsi les Coléoptères ont 4,000 espèces de parasitoïdes sur 300,000 espèces, les Neuroptères 50 espèces sur 4500, les Lépidoptères 11 sur 113,000 et enfin les Trichoptères une espèce sur 4,500.

Le nombre d'espèces de parasitoïdes dépasse donc certainement les 100,000 et ces espèces représentent une grande diversité. D'un point de vue de lutte biologique ce sont bien sûr des organismes d'une grande importance, mais quelle est leur importance dans les systèmes naturels? L'importance relative de chacun des groupes d'entomophages est variable. Lorsque les facteurs de mortalité biotique sont compilés pour 78 espèces d'herbivores ayant fait l'objet de tables de survie, les parasitoïdes ressortent comme le groupe causant la plus forte mortalité (Hawkins et al. 1997) (Figure 4). Il est aussi intéressant de noter que, globalement, le taux de mortalité biotique croît avec le stade de développement des herbivores (Figure 5). Ceci pourrait être dû à la faible rentabilité des oeufs et des jeunes stades larvaires pour les prédateurs. Cependant, une partie de cet effet provient sans doute de la difficulté d'identifier correctement les mortalités causées par des pathogènes ou des parasitoïdes tôt dans le développement d'un herbivore (Hawkins et al. 1997).



Figure 3- Adulte de *Aleochara bilineata* (Coleoptera: Staphylinidae). Ces insectes sont des prédateurs d'oeufs de Diptères au stade adulte mais leur premier stade larvaire est un parasitoïde des pupes de ces mêmes Diptères.

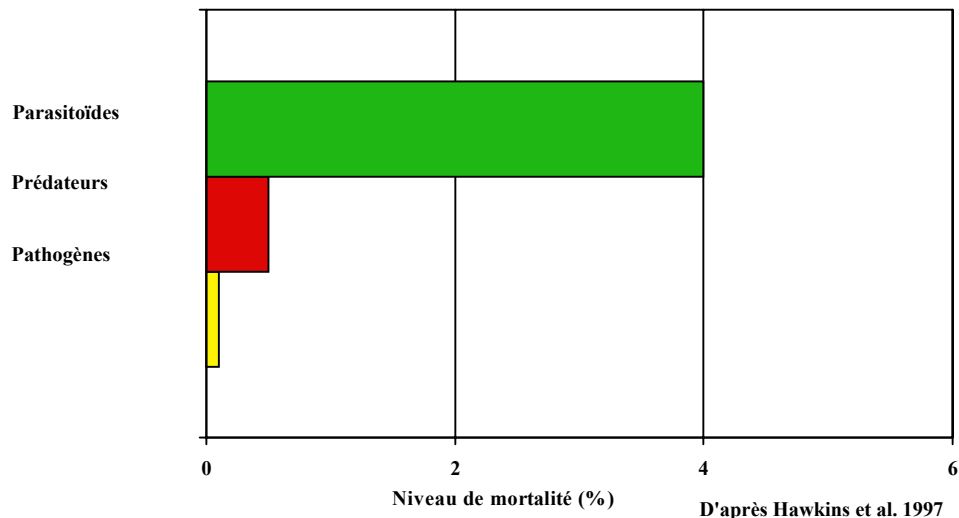


Figure 4- Mortalité naturelle d'insectes phytophages attribuée aux parasitoïdes, prédateurs et pathogènes. Données basées sur des tables de survie de 78 espèces d'herbivore.

Il semble donc que, d'un point de vue écologique, la mortalité causée par les parasitoïdes soit la plus importante. La plus grande spécificité des parasitoïdes et leur capacité à localiser leurs hôtes peuvent expliquer cette plus grande importance. Enfin, les pathogènes, microorganismes et nématodes confondus, sont probablement limités par les conditions du milieu telles l'humidité et la lumière. Les épizooties causées par les pathogènes sont souvent spectaculaires mais peu fréquentes comparées au parasitisme qui est relativement constant d'une génération à l'autre.

Les Hyménoptères parasitoïdes sont nettement le groupe d'organisme le plus important en lutte biologique et il est responsable de la majorité des succès tant du point de vue économique qu'environnemental (LaSalle 1993). Globalement, depuis les 100 dernières années, environ 1200 introductions d'ennemis naturels, tous groupes confondus, ont été faites dans le monde. De ces introductions, 43% ont résulté en l'établissement de l'ennemi naturel et en une réduction au moins partielle des populations du ravageur visé (Van Driesche & Bellows 1996) mais les parasitoïdes se sont établis dans une proportion double de celle des prédateurs et ont été deux fois plus efficaces (Greathead 1986). Cependant, seulement 17% de ces introductions ont permis de contrôler efficacement le ravageur visé. Bien que ce pourcentage de succès apparaisse bas, il reste cependant que l'introduction d'ennemis naturels, lorsqu'elle est bien planifiée, est une approche ayant un rapport coût-bénéfice intéressant.

Les causes d'échecs rapportées par les auteurs varient selon que l'organisme introduit est un parasitoïde ou un prédateur. Alors que la race et l'absence d'hôtes alternatifs sont considérés comme des éléments importants dans le cas des parasitoïdes, ce sont plutôt la présence de refuges pour les proies et la compétition avec la faune indigène qui sont les plus souvent mentionnés pour

les prédateurs (Figure 6) (Stiling 1993). La contrainte la plus importante demeure cependant le climat qui est considéré comme la cause d'échec dans le tiers des cas et ce autant pour les parasitoïdes que pour les prédateurs. Bien que possiblement biaisées parce que rapportées par les équipes ayant elles-même organisé les relâchers, ces explications permettent quand même d'espérer une amélioration dans le pourcentage de succès des introductions d'ennemis naturels exotiques. En effet, des programmes de sélection de parasitoïdes et de prédateurs permettraient de relâcher des souches mieux adaptées aux contraintes du climat et à la race du ravageur visé. Souvent, les raisons expliquant le choix d'une souche ont peu à voir avec la réalité du terrain. Ainsi, dans le cas du parasitoïde *Trichogramma*, une sélection rationnelle préalable n'est faite que dans 8.6% des cas où le choix de la souche est donné (Pak 1992). La souche utilisée a été choisie parce que facilement accessible ou abondante localement dans plus de la moitié des cas! La mise en place de protocoles standards permettant d'évaluer les caractéristiques biologiques des souches puis de choisir la souche la mieux adaptée au ravageur visé dans un environnement donné est certainement une des priorités en lutte biologique.

L'utilisation des parasitoïdes en lutte biologique offre plusieurs avantages. Ainsi on considère que les parasitoïdes ont une bonne capacité de dispersion et de découverte de l'hôte, ont une bonne capacité à s'établir dans un habitat donné, sont très sécuritaires pour la santé humaine et ont une grande spécificité d'hôte, donc posent peu de risques aux organismes non-visés (Cloutier & Cloutier 1992). Par contre, les parasitoïdes sont coûteux à élever en masse, sont fragiles, ce qui complique leur transport des sites de production vers les zones de relâcher, et les techniques de relâcher de parasitoïdes sont souvent compliquées et laborieuses. Il y a également un délai d'action entre le lâcher de parasitoïdes et

l'effet recherché sur les hôtes. Leur grande spécificité, qui est un avantage lorsque ce sont les espèces non-visées qui sont considérées, devient un inconvénient économique puisque le développement d'une méthode de lutte biologique basée sur un parasitoïde doit se rentabiliser sur seulement un ou quelques hôtes (Cloutier & Cloutier 1992).

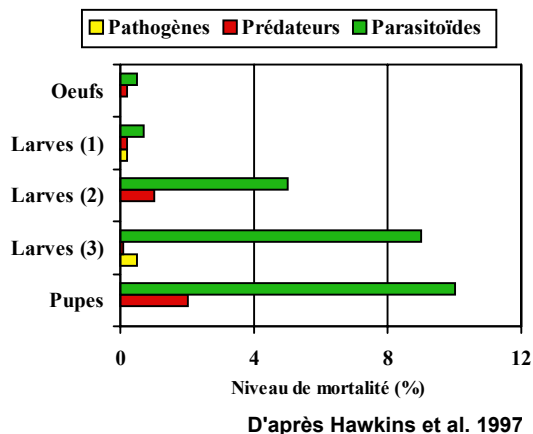


Figure 5- Mortalité naturelle d'insectes phytophages attribuée aux parasitoïdes, prédateurs et pathogènes selon le stade de développement de l'herbivore. Données basées sur des tables de survie de 78 espèces d'herbivore.

Avantages et risques associés aux parasitoïdes

Ces quelques avantages et inconvénients liés à l'utilisation des parasitoïdes en lutte biologique mettent en lumière le fait que la lutte biologique n'est pas une panacée universelle en agriculture et en foresterie. Les risques inhérents à la lutte biologique, que ce soit par parasitoïdes, prédateurs, microorganismes ou nématodes, sont de plus en plus reconnus et quantifiés (Simberloff & Stiling 1996a, b).

Comme toute intervention dans des milieux naturels ou semi-naturels, la lutte biologique utilisant les parasitoïdes comporte des risques. Le risque le plus souvent mentionné est celui de l'introduction d'ennemis naturels exotiques qui pourraient devenir nuisibles à leur tour. Il suffit en effet qu'un prédateur ou un parasitoïde élargisse son spectre de proie ou d'hôte pour qu'il s'attaque à des espèces non-visées et potentiellement à risque. Au Canada, depuis quelques années, les introductions d'ennemis naturels sont réglementées et un permis d'introduction est exigé. Toute demande de permis d'introduction doit faire la preuve de la pertinence de cette introduction ainsi que des risques potentiels. Comme les prédateurs ont généralement un spectre d'hôte plus large que les parasitoïdes, les introductions de nouveaux prédateurs au pays sont particulièrement surveillées.

D'autres risques existent toutefois. La production de parasitoïdes tels les trichogrammes est basée sur une production de papillons hôtes en très grande quantité. Or les papillons ont les ailes couvertes de petites écailles et ces écailles se détachent tout au long de la vie d'un papillon. Les élevages de papillons entraînent donc de grandes concentrations d'écailles qui flottent dans l'air. Ces écailles peuvent causer des troubles respiratoires allant de la simple allergie à l'asthme et nécessitent de la part du personnel travaillant dans ces élevages le port de matériel respiratoire filtrant l'air (Brenner et al. 1991). Il s'agit donc dans ce cas d'une pollution liée à la production des parasitoïdes mais qui est limitée aux locaux où se fait l'élevage.

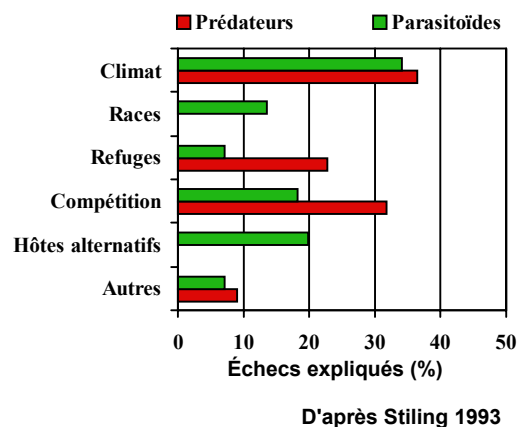


Figure 6- Causes d'échec dans des programmes de lutte biologique impliquant des parasitoïdes ou des prédateurs. Basé sur 126 cas (parasitoïdes) et 22 cas (prédateurs).

D'autres types de pollution sont plus insidieux. Ainsi la multiplication et le relâcher de grandes quantités d'un ennemi naturel indigène peuvent aussi causer une pollution dite génétique. Lorsqu'on débute un élevage de masse, on utilise un nombre réduit d'individus (de quelques dizaines à quelques milliers) mais cet échantillon ne représente nécessairement qu'une fraction de la diversité génétique d'une espèce. De plus, au cours d'un élevage de masse, la diversité génétique de l'élevage tendra à baisser, la sélection favorisant les individus pré-adaptés aux conditions de l'élevage. Il en résulte que, lors d'un relâcher, ce sont des individus génétiquement plus homogènes que les populations sauvages qui sont introduits en grand nombre dans l'environnement. Ces individus domineront l'habitat pendant une période de temps variable et durant cette période pourront s'accoupler avec les individus sauvages. Il y a alors un risque que des gènes maladaptés au milieu naturel soient introduits dans les populations sauvages. Par exemple, si les individus de l'élevage résistent mal aux basses températures, cette caractéristique ne sera jamais éliminée dans un élevage à température fixe. Cependant, si cette caractéristique est transmise à un grand nombre d'individus métissés (parents sauvage et d'élevage), ces

individus et leurs descendants pourraient mal survivre à l'hiver. Les relâchers d'un programme de lutte biologique auraient alors comme résultat à moyen terme d'abaisser les populations sauvages du parasitoïde! L'importance de ce risque variera selon le niveau de variabilité génétique présent dans une espèce, caractéristique pour laquelle nous ne possédons à peu près pas d'information pour la grande majorité des ennemis naturels. Il serait important de mener des recherches dans ce domaine si on veut bien évaluer les bénéfices et les risques de la lutte biologique.

Il ressort donc que les parasitoïdes, et plus particulièrement les Hyménoptères, sont d'une grande importance autant dans les systèmes naturels qu'en lutte biologique. Malgré cette importance, les Hyménoptères parasitoïdes sont souvent présents en faible densité de population dans l'environnement. On pense que ces bas niveaux de population sont dus d'une part au fait que la plupart des Hyménoptères parasitoïdes sont relativement spécialisés et qu'ils agissent sur les populations de leurs hôtes d'une manière dépendante de la densité. En écologie, on qualifie de dépendant de la densité un facteur de mortalité qui augmente avec les populations de proies ou d'hôtes et qui inversement diminue lorsque ces populations diminuent. En conséquence, les niveaux d'équilibre des hôtes et des parasitoïdes sont relativement bas. Le fait que beaucoup d'espèces d'Hyménoptères parasitoïdes soient présentes en basse densité les rends susceptibles aux perturbations environnementales (LaSalle 1993). Or, parmi ces perturbations, plusieurs sont directement reliées aux activités humaines. L'utilisation des pesticides est évidemment mise en cause mais la présence accrue de poussières dans les zones agricoles ou forestières peut diminuer le niveau de parasitisme (Rose & DeBach 1990). La fragmentation des milieux naturels, un problème important en milieu agricole, peut aussi contribuer à perturber l'équilibre fragile entre hôtes et parasitoïdes.

Malgré leur potentiel certain en lutte biologique, l'utilisation des parasitoïdes est freinée surtout par le manque d'information sur leur comportement et leur écologie. La production en masse de ces organismes et les relâchers efficaces dépendent largement de la qualité de notre compréhension du fonctionnement de ces organismes. Les recherches récentes dans ce domaine indiquent que dans un élevage de masse le nombre et la qualité des individus produits peut facilement varier du simple au double selon les conditions d'élevages. Or on ne connaît les conditions optimales d'élevage que pour quelques espèces de parasitoïdes. Des progrès considérables sont à prévoir dès que ces phénomènes seront mieux compris.

Remerciements

Je remercie Dominique Pelletier et Mathieu St-Louis pour leurs commentaires sur une version précédente de ce texte.

Bibliographie

- Askew RR (1971) Parasitic insects. Heinemann Inc., London.
- Brenner RJ, Barnes KC, Helm RM, Williams LW (1991) Modernized society and allergies to arthropods. *Am. Entomol.* 37: 143-155.
- Clausen CP (1940) Entomophagous insects. McGraw-Hill, New York.
- Cloutier C, Cloutier C (1992) Les solutions biologiques de lutte pour la répression des insectes et acariens ravageurs des cultures. In: Vincent C & Coderre D (éd) La lutte biologique. p. 19-88. Gaëtan Morin Ed., Boucherville.
- Doucet MMA, Doucet ME (1990) *Steinernema ritteri* (Nematoda: Steinernematidae) with a key to the species of the genus. *Nematologia*, 36: 257-265.
- Eggleton P, Belshaw R, (1992) Insect parasitoids: an evolutionary overview. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 337: 1-20.
- Eggleton P, Gaston KJ (1990) "Parasitoid" species and assemblages: convenient definitions or misleading compromises? *Oikos* 59: 417-421.
- Erwin TL (1983) Tropical forest canopies: the last biotic frontier. *Bull. Entomol. Soc. Am.* 29(1): 14-19.
- Gaston KJ (1991) The magnitude of global insect species richness. *Conserv. Biol.* 5: 283-296.
- Godfray HCJ (1994) Parasitoids, behavioral and evolutionary ecology. Princeton University Press, Princeton.
- Greathead DJ (1986) Parasitoids in classical biological control In Waage J and Greathead DJ (éd) *Insects parasitoids*. p. 289-318. Academic Press, London.
- Hawkins BA, Cornell HV, Hochberg ME (1997) Predators, parasitoids, and pathogens as mortality agents in phytophagous insect populations. *Ecology* 78: 2145-2152.
- LaSalle J (1993) Hymenoptera and biodiversity In LaSalle J and Gauld ID (éd) *Hymenoptera and biodiversity*. p. 197-215, CAB International, Wallingford.
- Martignoni ME, Iwai PJ (1981) A catalogue of viral diseases of insects, mites and ticks. In Burges HD (éd) *Microbial control of pests and plant diseases, 1970-1980*. p. 897-911. Academic Press, London.
- Pak GA (1992) Inundative release of *Trichogramma* for the control of cruciferous Lepidoptera: preintroductory selection of an effective parasitoid. In Talekar NS (éd) *Diamondback moth and other crucifer pests*. pp. 297-308. Tainan, Taiwan : Asian Vegetable Research and Development Center, AVRDC Publication, No. 92-368.
- Pedigo LP (1996) *Entomology and pest management*. 2nd ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Poinar GO (1990) Taxonomy and biology of Steinernematidae and Heterorhabditidae. In Gaugler R & Kaya HK (éd) *Entomopathogenic nematodes in biological control*. p. 23-61. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Price PW (1984) *Insect ecology*. 2ième Edition, John Wiley & Sons, New York.
- Rose M, DeBach P (1990) Foreign exploration and importation of natural enemies. In Rosen D (éd) *Armored scale insects: their biology, natural enemies and control*. p. 417-431. Elsevier, Amsterdam.
- Simberloff D, Stiling P (1996a) How risky is biological control? *Ecology* 77: 1965-1974.
- Simberloff D, Stiling P (1996b) Risks of species introduced for biological control. *Biol. Conserv.* 78: 185-192.
- Stiling P (1993) Why do natural enemies fail in classical biological control programs? *Am. Entomol.* 39: 31-37.
- Van Driesche RG, Bellows TS (1996) *Biological control*. Chapman & Hall, New York
- Wilson EO (1988) The current state of biological diversity, pp 3-18 in Wilson EO (Ed), *Biodiversity*, National Academy Press, Washington, D. C.

LA LUTTE INTÉGRÉE POUR LA PUNAISE TRANSLUCIDE : Un auxiliaire prometteur pour la pomiculture au Québec

Annabelle Firlej¹ et Franz Vanoosthuyse², Département des Sciences Biologiques
Université du Québec à Montréal, C.P. 8888, Succ. Centre-ville, Montréal, Québec,, Canada, H3B 3H5,
courriels: ¹ afirlej@hotmail.com, ² franzv@hotmail.com

Résumé

La protection intégrée des cultures est un terme de plus en plus à la mode en agriculture résultant des préoccupations des consommateurs et écologistes face aux problèmes engendrés par l'application répétitives de pesticides. Quels sont les objectifs de cette méthode de gestion, quels en sont les principes fondamentaux? Le but principal est de réduire l'utilisation des pesticides par l'emploi de méthodes de luttes alternatives. Parmi les composantes de la lutte intégrée, il y a la lutte biologique, une méthode utilisant des ennemis naturels afin de contrôler les populations de ravageurs. Cependant, le potentiel de ces ennemis présents dans l'écosystème est souvent sous-exploité. Plus particulièrement dans le cadre de la pomiculture au Québec, l'exemple d'une punaise prédatrice d'acariens phytophages démontre le chemin encore à parcourir pour maîtriser les ressources à notre portée de mains afin de les mettre à profit.

Quel que soit le type de cultures, plusieurs organismes ravageurs y sont associés, ce qualificatif ici de ravageur se définit par la relation de l'organisme en question avec les hommes. En effet, un organisme est qualifié de ravageur car son action provoque des dommages aux plantes cultivées par l'homme et par conséquent lui impose une perte économique. Il n'y a pas de solutions miracles en réponse aux problèmes engendrés par ces ravageurs des cultures et seul l'étude de méthodes de gestion plus écologiques de ces ennemis et de leurs combinaisons peut permettre une gestion durable de ces ennemis du point de vue économique, de la santé et de l'environnement. Nous traiterons donc ici de la lutte intégrée et mettront en relief plus particulièrement l'importance de certains insectes en vergers de pommiers : les punaises prédatrices.

La lutte intégrée: Principe fondamental

La lutte intégrée est une stratégie élaborée pour contrôler des organismes ravageurs en utilisant tous les moyens possibles et compatibles entre eux afin de maintenir ces ravageurs sous un seuil économique acceptable (Dent, 1995). Les ravageurs ici considérés peuvent être des oiseaux, rongeurs, acariens, insectes, nématodes, champignons, bactéries ou virus, cependant nos exemples traiteront plus particulièrement des insectes et acariens. Les moyens mis en oeuvre pour réduire l'activité des ravageurs ciblés font appel à des méthodes pluridisciplinaires pour développer une véritable stratégie de lutte viable du point de vue socioéconomique. Cette méthode est un mélange de réflexion associée aux connaissances des différentes disciplines suivantes : l'entomologie, la nématologie, la phytopathologie et la malherbologie (Figure 1).

Introduction

L'utilisation des pesticides en agriculture représente un danger non négligeable pour la santé humaine par la présence de résidus sur la nourriture et le risque d'intoxication des agriculteurs et autres personnes en contact avec ces pesticides. Les dangers sont également de taille pour l'environnement avec la pollution des cours d'eau et nappes phréatiques et la toxicité envers les animaux et plantes sauvages. Cependant, depuis longtemps, les cultures sont le siège d'attaques féroces par des insectes ou des acariens phytophages provoquant une perte de rendement, des dommages aux fruits et légumes et par conséquent une perte économique pour l'agriculteur. C'est pourquoi, dans la plupart des cas, le moyen de se débarrasser de ces organismes gênants est l'emploi de produits chimiques.

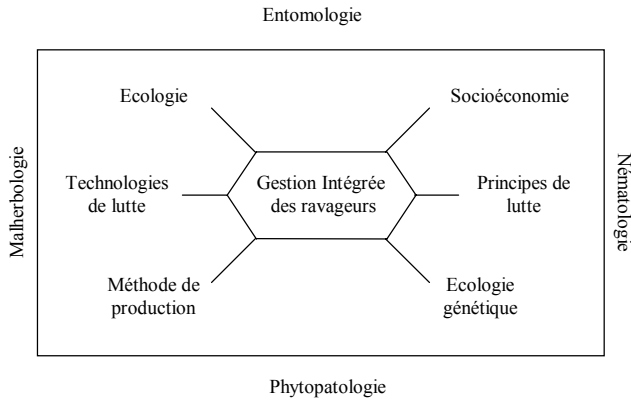


Figure 1 : Représentation schématique des relations entre les disciplines fonctionnelles et fondamentales intervenant dans la gestion intégrée des ravageurs de cultures. Tiré et traduit de Dent (1995).

Le développement de la lutte intégrée en pomiculture a commencé dans les années 50 et 60 et depuis, les efforts pour réduire l'utilisation des pesticides montrent leurs effets positifs par une réduction significative du nombre d'applications durant la saison de production. Par exemple, une réduction de 3 applications de pesticides a été enregistrée pour des vergers pilotes faisant partis du réseau d'avertissement phytosanitaire (Tableau 1).

Une pratique intégrée d'une production pomicole peut varier d'un verger à l'autre et d'une année à l'autre, c'est pourquoi certains principes de base doivent être respectés pour assurer une meilleure réussite. Les principes généraux de la lutte intégrée en pomiculture sont donc :

- Identifier les organismes ravageurs et les bénéfiques présents
- Dépister et évaluer la situation des organismes ravageurs et bénéfiques régulièrement
- Utiliser les seuils d'intervention
- Combiner les différentes méthodes de lutte disponibles
- Évaluer leurs impacts (Chouinard, 2001)

Les insecticides ou acaricides ne sont donc pas forcément bannis mais plutôt choisis judicieusement en tenant compte de leur action toxique pour la faune d'arthropodes auxiliaires, et l'environnement. La surveillance rigoureuse par des pratiques de dépistage et piégeage et par l'établissement de seuil de prévention évite des applications d'insecticides inutiles, permet également de mieux cibler le ravageur dont on veut contrôler la population et d'éviter de toucher des insectes bénéfiques pouvant jouer un rôle important dans la répression de ces ravageurs (Pasqualini, 2000). De plus, les risques de résistances des ravageurs à ces insecticides et les problèmes de résurgence

(des ravageurs secondaires devenant d'importance économique) sont ainsi réduits. L'apparition de ces problèmes a permis une prise de conscience des limites de l'application chronique d'insecticides ou acaricides pour le contrôle des ravageurs et la nécessité de trouver des méthodes alternatives à la lutte chimique.

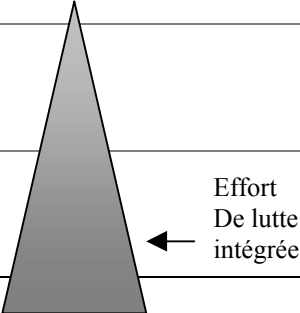
Les méthodes alternatives

Plusieurs méthodes alternatives à l'emploi de produits chimiques sont actuellement disponibles pour lutter contre les différents ravageurs des pommiers (Smeesters *et al.*, 2000), cependant, associer ces méthodes en vue d'un succès à long terme demande beaucoup de doigté écologique. Ces différentes méthodes sont encore difficiles d'utilisation en vergers commerciaux essentiellement à cause des impératifs de fruits parfaits et des coûts quelque fois importants dans leur réalisation. Il y a essentiellement 6 types de méthodes alternatives à la lutte chimique :

- La lutte culturale qui consiste en la manipulation de l'habitat afin de diminuer les populations de ravageurs. L'environnement est rendu hostile et défavorable au développement des phytophages en employant par exemple des cultivars résistants ou en manipulant l'habitat par la plantation de plantes présentant un attrait pour des ennemis naturels.
- La lutte physique qui consiste en l'utilisation de piège afin d'intercepter les ravageurs. Ce type de lutte comprend également l'utilisation de mâles stérilisés en laboratoire relâchés dans l'environnement s'accouplant avec les femelles de même espèce mais ne produisant aucune descendance.
- La lutte grâce à des produits d'origine naturelle tel que les antibiotiques, la terre de diatomée, les décoctions végétales, les huiles de dormance, etc.
- La confusion sexuelle qui utilise des capsules imprégnées de phéromones sexuelles se diffusant dans l'air jusqu'à saturation, si bien que les mâles de l'espèce visée ne réussissent pas à localiser les femelles et meurent sans s'être accouplés.
- Les régulateurs de croissance qui imitent les hormones de croissance de l'insecte et affectent la croissance et la morphogenèse des insectes.
- Et enfin, la lutte biologique connue depuis peu : elle consiste à réguler au moyen de lâchers d'ennemis naturels la densité de population d'insectes ou acariens ravageurs sous un seuil économique (Coderre et Vincent, 1992). Les ennemis naturels peuvent être des insectes prédateurs ou parasitoïdes, acariens prédateurs, bactéries, virus ou nématodes.

Certaines méthodes alternatives énoncés précédemment sont cependant encore au stade expérimental ou ne sont pas forcément réalisables dans un verger de type commercial. De

Type de verger ou d'approche	Nombre de pulvérisations (fongicides, insecticides et acaricides)
Calendrier du CPVQ ¹	23
Vergers pilotes du RAP ² (dépistage et recommandations du RAP)-1990	17,1
Vergers pilotes du RAP (dépistage et recommandations du RAP)-2000	14,5



¹ : Conseil des productions végétales du Québec

² : Réseau d'avertissement phytosanitaire

Tableau 1 : Utilisation des pesticides dans les vergers du sud-ouest du Québec. Tiré de Chouinard (2001).

manière générale, beaucoup d'obstacles se dressent devant la mise en oeuvre de la protection intégrée : la prédiction des évolutions de populations de ravageurs est difficile, les seuils d'intervention sont quelque fois peu représentatifs dans un système de culture aux conditions diversifiées et complexes. C'est pourquoi, la véritable application de la protection intégrée des cultures reste encore illusoire pour certain (Ehler et Bottrell, 2000). Également, il reste beaucoup à accomplir pour enrichir nos connaissances sur les différents ennemis naturels présents dont les capacités sont sous-exploitées. En effet, certains ennemis naturels pourraient assurer un meilleur contrôle biologique des populations de phytophages en association avec d'autres méthodes de lutte, cependant trop peu est encore connue sur les facteurs influençant leur comportement vis à vis des proies ou d'autres prédateurs, leur biologie, leur compatibilité avec certains pesticides ou pratiques culturales.

Également, nos connaissances sur les stratégies d'introduction des agents bénéfiques dans les cultures ciblées sont faibles. Lâcher un entomophage dans une culture consiste d'abord en une multiplication en laboratoire de l'insecte bénéfique puis en une libération dans la population de ravageur à réprimer au moment le plus opportun, soit de façon ponctuelle ou de façon sporadique (Cloutier et Cloutier, 1992). Un des buts des lâchers est d'augmenter l'efficacité prédatrice ou parasite de l'ennemi naturel (Huffaker *et al.*, 1976). De même, la mise au point de méthodes d'élevage efficaces et rentables de ces agents bénéfiques sont quelque fois difficiles à cause des différents paramètres à étudier puis à contrôler. Un élevage est d'autant plus nécessaire afin de faciliter l'établissement d'une espèce introduite ou indigène en l'élevant en grande quantité pour des lâchers dans un milieu de culture visé mais aussi pour fournir régulièrement des insectes pour des lâchers dans le cadre de contrôle biologique d'espèces nuisibles (Simmonds, 1966; Singh, 1982; Waage *et al.*, 1985).

Des acariens et des insectes prédateurs ont été manipulés avec succès au cours des dernières années et plusieurs espèces

polyphages sont actuellement ou potentiellement exploitables surtout certains acariens phytoséiides dont quelques espèces sont élevées en laboratoire et commercialisées, mais aussi parmi les coléoptères (coccinellides), les diptères (cécidomyiides), les hémiptères (anthocorides, mirides et pentatomides) et les neuroptères (Cloutier et Cloutier, 1992).

De même, plusieurs insectes et acariens bénéfiques sont présents naturellement en verger et pourraient assurer un contrôle plus efficace des ravageurs si plus de recherches étaient effectuées dans ce sens. C'est le cas plus particulièrement de certaines punaises prédatrices pouvant jouer un rôle non-négligeable dans le contrôle des insectes et acariens nuisibles.

Les punaises prédatrices

Les prédateurs sont des organismes avec un régime alimentaire souvent généraliste, c'est à dire qu'ils se nourrissent d'une grande diversité d'insectes (Van Den Bosch et Messenger, 1973). Ils sont reconnus ainsi pour avoir un impact important dans l'élimination des ravageurs en agriculture et foresterie. Les arthropodes prédateurs quel que soit le type de culture appartiennent à 32 familles (Van Driesche et Bellows, 1996) et beaucoup d'entre elles sont représentées en verger (Tableau 2). Les insectes prédateurs présents en verger de pommier sont aussi divers que des chrysopes (neuroptères), des syrphes et cécydomyies (diptères), des coccinelles (coléoptères) et des punaises (hémiptères) (Chouinard, 2000).

De manière générale, les hémiptères terrestres sont en majorité des phytophages, cependant quelques milliers d'espèces de diverses familles ont évolué vers un régime alimentaire prédateur. Plusieurs de ces prédateurs sont d'une grande importance pour le contrôle biologique naturel car ils attaquent des ravageurs conséquents dans les cultures. Ces ennemis naturels se retrouvent dans les familles des Anthocoridae,

Acari	Phytoseiidae Stigmaeiidae Hemisarcoptidae	Hemiptera	Anthocoridae Gerridae Miridae Nabidae Pentatomidae Reduviidae Veliidae Phasmatidae
Aranae		Hymenoptera	Formicidae Vespidae Sphecidae
Coleoptera	Carabidae Cicindelidae Dytiscidae Cleridae Coccinellidae Cybophelidae Staphylinidae	Neuroptera	Chrysopidae Hemerobiidae Thysanoptera Aelothripidae Phloeothripidae Thripidae
Diptera	Cecidomyiidae Chamaemyiidae Sciomyzidae Syrphidae		

Tableau 2 : Les familles importantes d'arthropodes prédateurs. Tiré de Van Driesche et Bellows (1996).

Lygaeidae, Miridae, Nabidae, Pentatomidae et Reduviidae (DeBach, 1974; Daane *et al.*, 1998). Depuis le débourrement (éclosion des bourgeons végétatifs) jusqu'à la récolte des pommes, plusieurs punaises prédatrices se côtoient en verger. Il y a par exemple, les punaises réduviides de formes et tailles variables, dont plusieurs espèces présentes en verger ont une abondance variable d'une année à l'autre. Notamment, sont présentes les espèces *Acholla multispinosa* (De Geer) et *Zelus luridus* Stal. (Elmer et Hagler, 1999).

Ces punaises sont prédatrices à tous les stades de leur développement. Elles se nourrissent de pucerons verts, de cicadelles, de tétranyques rouges du pommier, d'hémiptères et diverses autres espèces de diptères et immatures de lépidoptères. Également, les punaises pentatomides présentes en verger sont principalement prédatrices et quelquefois phytophages. Elles s'attaquent à diverses proies ayant un déplacement lent. Ces punaises sont sensibles aux insecticides organophosphorés et carbamates (Chouinard, 2001). Les principales espèces présentes sur les pommiers sont *Cosmopepla bimaculata* (Say) et *Podisus maculiventris* Say (Elmer et Hagler, 1999). Des punaises mirides prédatrices se retrouvent aussi en grande quantité avec pour premier exemple la punaise de la molène (*Campylomma verbasci* Meyer) (Elmer et Hagler, 1999; Chouinard, 2001). Cette punaise est assez particulière par son statut ambigu : en effet elle est un ravageur important en Amérique du Nord des cultures de pommes et poires mais elle se nourrit également d'autres insectes. Certains cultivars (Délicieuse rouge, Spartan, Jaune transparente, Melba) sont plus sensibles que d'autres aux attaques de la punaise et le stade phénologique atteint lors de l'émergence des premières nymphes

détermine souvent le niveau de dommages. Dans les vergers du sud-ouest du Québec, la punaise peut aussi assurer un certain contrôle des acariens (Smeesters *et al.*, 2000). Une association de différentes méthodes de lutte permettrait une gestion efficace des tétranyques que la punaise à elle seule ne sait réguler étant donné son double régime alimentaire ainsi qu'au fait qu'en tant que prédatrice, elle n'est pas parmi les punaises les plus voraces.

La punaise translucide : Un prédateur à ne pas négliger.

Une autre punaise miride prédatrice d'une voracité étonnante est la punaise translucide (*Hyaliodes vitripennis* Say) (Figure 2). Ce prédateur est présente dans les vergers de pommiers du sud-ouest Québécois de juin à août (Chouinard, 2001). Au contraire de sa cousine la punaise de la molène, elle ne provoque aucun dommages aux fruits, cependant il n'est pas rare de voir les nymphes ou adultes percer de leur rostre les nervures des feuilles (Elmer et Hagler, 1999). Ce prédateur se retrouve surtout sur les pommiers mais aussi sur les poiriers, les pruniers, les vignes, les ormes et les chênes. C'est une prédatrice généraliste mais elle s'attaque de préférences aux acariens phytophages des pommiers tels le tétranyque rouge (*Panonychus ulmi* (Koch)) et le tétranyque à deux points (*Tetranychus urticae* Koch) (Horsburgh, 1969). Elle se nourrit également de pucerons, nymphes de cicadelles et larve de lépidoptères (Horsburgh, 1969; Bouchard *et al.*, 1982) d'où son importance comme auxiliaire pour la lutte biologique. Son efficacité en laboratoire a notamment été démontrée par les études d'Arnoldi *et al.* (1992) et en vergers commerciaux par Brodeur *et al.* (1999).



Figure 2 . Adulte de punaise translucide (*Hyaliodes vitripennis* Say). © David Levadoux

La présence de la punaise translucide est actuellement en augmentation dans les vergers commerciaux du sud-ouest du Québec. Elle se retrouve facilement sur des pommiers standards au niveau des pousses végétatives où s'établissent les colonies de pucerons et au niveau des bouquets à fruits où se trouvent préférentiellement les acariens phytophages. Cependant on peut également retrouver ce prédateur sur des pommiers nains et semi-nains, ces types de pommiers étant actuellement les plus couramment plantés au Québec (Chouinard, 2001). La punaise translucide est un acteur de plus en plus important des vergers de pommiers et l'utilisation de son potentiel est encore sous-optimale. Des observations sur pommiers nains engagés ont permis de noter une prédation significative de la part de cette punaise envers des tétranyques rouges. Cette punaise comporte également l'avantage d'être plus tolérante à certains insecticides organophosphorés utilisés lors de sa présence en verger (Bostanian *et al.*, 2000). Ces insecticides étant notamment appliqués pour le contrôle de la mouche de la pomme (*Rhagoletis pomonella* Walsh), un ravageur important présent durant le mois de juillet. Certains insecticides de la famille des organophosphorés sont dangereusement toxiques pour cette punaise (Bostanian *et al.*, 2000). La difficulté réside dans le fait que souvent ces insecticides sont utilisés en même temps pour contrôler la mouche de la pomme mais aussi d'autres types de ravageurs tels que les chenilles de lépidoptères ou pucerons. Les insecticides auxquels cette punaise est plus tolérante sont par exemple la Phosalone ou le Phosmet de la famille des organophosphorés (Bostanian *et al.*, 2000). Cette alternative permettrait donc à un producteur de pommes d'utiliser ces insecticides pour combattre un type de ravageur tout en minimisant l'impact sur la punaise préservant un autre type de ravageur.

Cette prédatrice offre donc des possibilités intéressantes lorsqu'elle est présente dans un verger. Elle est très vorace, elle a une répression significative sur les populations d'acariens phytophages, elle tolère certains insecticides utilisés en sa présence. Cependant, on ne connaît pas encore ses réactions quant à la présence d'autres prédateurs d'acariens phytophages (Acariens Phytoséiides et Stigmaéiides, Coccinelles) : y a-t'il une compétition entre-eux ? Il est maintenant reconnu que des

prédateurs s'attaquant à un même type de proie peuvent se livrer bataille (prédation intragilde) et donc leur pouvoir de répression des populations de ravageurs est diminué (Rosenheim *et al.*, 1995). Également, quels sont les facteurs qui influencent le comportement de cette punaise lors de son introduction et lors de sa présence en verger ? Les conditions météorologiques, la présence de proies alternatives, la compétition intra-spécifique sont autant de sujets à éclaircir. Enfin, cette punaise n'est pas encore élevée en laboratoire, ce qui pourrait faciliter les recherches et l'alimentation des vergers dépourvus de cette punaise dans le cadre de lâchers. Des réponses à ces questions seront bientôt élucidées par des recherches effectuées à l'Université du Québec à Montréal (UQÀM) en collaboration avec l'Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA) de St-Hyacinthe (St-Louis *et al.*, 2001) et permettront certainement d'améliorer nos connaissances sur cet insecte et de fournir ainsi une contribution dans la lutte à la réduction de l'utilisation d'insecticides en pomiculture.

Conclusion

De plus en plus de producteur en pomiculture tiennent compte au fil des années de principes de gestion intégrée. Ce mode de gestion contribue à la réduction de pesticides appliqués dans l'environnement, à l'amélioration de notre sécurité alimentaire et sanitaire. La punaise prédatrice présentée précédemment n'est qu'un exemple du potentiel de notre richesse faunistique. Parmi les acteurs principaux de la lutte intégrée, les organismes bénéfiques ont un potentiel d'action important soulignant la nécessité de poursuivre les recherches afin d'augmenter leur utilisation, favoriser leur présence dans l'environnement, et évaluer leur compatibilité avec d'autres méthodes alternatives à la lutte chimique.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Daniel Coderre pour ses commentaires instructifs sur cet article.

Bibliographie

- Arnoldi, D., R.K. Stewart, et G. Boivin. 1992. Predatory mirids of the green apple aphid *Aphis pomi*, the two-spotted spider mite *Tetranychus urticae* and the european red mite *Panonychus ulmi* in apple orchards in Québec. *Entomophaga* 37: 283-292.
- Bostanian, N. J., N. Larocque, C. Vincent, G. Chouinard, et Y. Morin. 2000. Effects of five insecticides used in apple orchards on *Hyaliodes vitripennis* (Say) (Hemiptera: Miridae). *J. Environ. Sci. Health. B35*: 143-155.
- Bouchard, D., J.-C. Tourneur, et R.O. Paradis. 1982. Le complexe entomophage limitant les populations d'*Aphis pomi* De Geer (Homoptera: Aphididae) dans le sud-ouest du Québec. Données préliminaires. *Ann. Soc. Entomol. Québec* 27: 80-93.
- Brodeur, C., G. Chouinard, G. Laplante, et Y. Morin. 1999. Études préliminaires sur l'activité et l'efficacité du prédateur indigène *Hyaliodes vitripennis* (Heteroptera: Miridae) pour la lutte biologique contre les acariens en vergers de pommiers au Québec. *Ann. Entomol. Soc. Fr.* 35: 458-462.
- Chouinard, G. 2001. Guide de gestion intégrée des ennemis du pommier. CRAAQ. Québec. 226 p.

- Chouinard, G., A. Firlej, F. Vanoosthuysse et C. Vincent. 2000. Guide d'identification des ravageurs du pommier et de leurs ennemis naturels. CPVQ. Québec. 69 p.
- Cloutier, C et C. Cloutier. 1992. Les solutions biologiques de lutte pour la répression des insectes et acariens ravageurs des cultures, pp. 19-105. Dans C. Vincent et D. Coderre (eds.), La lutte biologique. Gaëtan Morin, Boucherville, Québec. 671 p.
- Coderre, D. et C. Vincent. 1992. La lutte biologique: toile de fond de la situation, pp. 3-18. Dans C. Vincent et D. Coderre (eds.). La lutte biologique. Gaëtan Morin éditeur, Boucherville, Québec. 671 p.
- Daane, K. M., K. S. Hagen et N. J. Mills. 1998. Predaceous insects for insects and mite management. pp. 62-115. Dans R. L. Ridgway, M. P. Hoffmann, M. N. Inscoe et C. S. Glonister (eds.). Mass-reared natural enemies: application, regulation and needs. Entomol. Soc. Am. Lanham, Maryland.
- DeBach, P. 1974. Biological control by natural enemies. Cambridge University Press. London. 323 p.
- DeBach, P. et B. R. Bartlett. 1964. Methods of colonization, recovery and evaluation, pp. 402-426. Dans P. DeBach (eds.). Biological control of insect pests and weeds. Halsted press, New York. 844 p.
- Dent, D.R. 1995. Principles of integrated pest management. pp 8-46. Dans D. Dent (ed.). Integrated pest management. Chapman et Hall. London. 356 p.
- Ehler L. E. et D. G. Botrell. 2000. L'illusion de la protection intégrée des cultures. Courrier de l'environnement de l'INRA, n° 40 (Juin)
- Elmer et Hagler. 1999. Insectes prédateurs dans les vergers du sud de l'Ontario. Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales. Toronto. 33 p.
- Horsburgh, R.L. 1969. The predaceous mirid *Hyaliodes vitripennis* (Hemiptera) and its role in the control of *Panonychus ulmi* (Acarina: Tetranychidae). Ph. D. Thesis, Pennsylvania State University, Department of Entomology. 96 p.
- Huffaker, C. B., R. L. Rabb et J. A. Logan. 1976. Some aspects of population dynamics relative to augmentation of natural enemy action, pp 3-38. Dans R. L. Ridgway et S. B. Vinson (eds). Biological control by augmentation of natural enemies (Insect and mite control with parasites and predators). Plenum Press, New York. 480 p.
- Pasqualini, E. 2000. IPM : Theory and practice in the pest control of pome fruit trees. Pflanzenschutz-Nachrichten Bayer , 53 : 154-176.
- Rosenheim, J.A., H.K. Kaya, L.E. Ehler, J.J. Marois et B.A. Jaffee. 1995. Intraguild predation among biological control agents: Theory and evidence. Biol. Control 5: 303-335.
- Simmonds, F. J. 1966. Insect parasites and predators, pp. 489-499. Dans C. N. Smith (ed.), Insect colonization and mass production. Academic Press, New York. 618 p.
- Singh, P. 1982. The rearing of beneficial insects. N. Z. Entomol. 7: 304-310.
- Smeesters, E., G. Chouinard et S. Gagnon. 2001. Les méthodes alternatives à la lutte chimique en pomiculture: principales techniques applicables au Québec. Ministère de l'agriculture, des Pêcheries et de l'alimentation du Québec. Québec. 40 p.
- Stehr, F. W. 1982. Parasitoids and predators in pest management. 2nd édition, pp: 135-173. Dans R. L. Metcalf et W. H. Luckmann (eds). Introduction to insect pest management. J. Wiley and sons, New York. 577 p.
- St-Louis, M., Firlej, A., Gagné, I., Gorjeltchan, M., Kouassi, M., Pelletier, F., Provost, C., Vanoosthuysse, F. 2001. Éléments de recherches pour une meilleure utilisation des prédateurs et des champignons entomopathogènes en lutte biologique. Antennae, 8 :5-9
- Van Den Bosch, R. et P. S. Messenger. 1973. Entomophagous Insects, pp 35-47. Dans R. Van Den Bosch, P. S. Messenger (eds.). Biological control. Intext Press, Inc., New York. 180 p.
- Van Driesche, R.G., et T.S. Bellows, Jr. 1996. Biological control: Parasitoids and predators of arthropods and molluscs. Chapman et Hall, New York. 539 p.
- Waage, J.K., et N.J. Mills. 1992. Biological control, pp. 412-430. Dans M.J. Crawley (eds.), Natural enemies: The population biology of predators, parasites and diseases. Blackwell Scientific Publications, Oxford. 576 p.
- Waage, J.K., K.P. Carl, N.J. Mills, et D.J. Greathead. 1985. Rearing entomophagous insects, pp. 45-66. Dans P. Singh, et R. Moore (eds.), Handbook of insect rearing, vol 1. Elsevier, Amsterdam. 1016 p.

PRÉDATION INTRAGUILDE ET LUTTE BIOLOGIQUE

Éric Lucas, professionnel de recherche, Département des Sciences Biologiques, Université du Québec à Montréal, C.P 8888, Succursale Centre-Ville, H3C 3P8

Le cas du puceron du coton

En 1993, dans les champs de coton américain, un programme de lutte biologique basé sur des lâchers massifs de la chrysope prédatrice *Chrysoperla carnea* a été mis en place en vue du contrôle du puceron *Aphis gossypii* (Rosenheim et al. 1993, Rosenheim & Wilhoit 1993). Malgré des résultats préliminaires en laboratoire très prometteurs et malgré l'utilisation de doses supérieures aux doses prescrites commercialement (lâchers d'œufs et de larves), l'impact du programme sur les populations de pucerons s'est avéré faible voire nul... Des études ultérieures *in situ* ont permis de constater que très peu de larves de chrysope étaient retrouvées en champs, alors qu'une importante faune de prédateurs généralistes était présente. Elles ont montré également que ces prédateurs indigènes des pucerons (punaises, coccinelles, ...) s'attaquaient massivement aux chrysope relâchées empêchant du même coup un contrôle satisfaisant du ravageur. Ce type de prédation entre ennemis naturels appelée prédation intragilde est responsable de l'échec du programme de lutte.

Qu'est-ce que la prédation intragilde?

Anciennement, les communautés naturelles étaient vues selon le modèle de la pyramide trophique. L'emphase était alors mise sur les liens verticaux entre niveaux trophiques différents (le lion mange la gazelle qui broute les graminées, etc.), et les interactions à l'intérieur d'un même niveau trophique (telles que la prédation intragilde) étaient considérées comme secondaires. Par la suite, la notion de pyramide trophique a été abandonnée au profit du modèle de réseau trophique aux liens très complexes horizontaux aussi bien que verticaux. Cette reconceptualisation des communautés naturelles a permis de reconsidérer des interactions complexes comme la prédation intragilde. Polis et ses collaborateurs (1989) sont les premiers à en avoir clairement énoncé les fondements théoriques, bien que des études précédentes aient déjà abordé le sujet (Fox 1975). Une guilda représente un ensemble d'organismes qui exploitent une même ressource, laquelle peut s'avérer théoriquement limitée (Polis & McCormick 1987). Le terme guilda s'applique ici au sens large utilisé par Polis et al. (1989) et comprend des organismes qui peuvent être taxonomiquement et écologiquement très différents. Le terme prédation est également utilisé au sens large puisqu'il englobe les prédateurs classiques, les parasites, les parasitoïdes, les pathogènes ou tout organisme qui en exploite un autre. La prédation intragilde

représente le cas où un membre de la guilda tue et dévore un autre membre de cette même guilda. La prédation intragilde constitue donc une interaction "hybride" entre la prédation classique (extragilde) et la compétition. Elle se distingue de la compétition par le fait que l'un des deux protagonistes va manger le second, et de la prédation extragilde par le fait que la prédation intragilde réduit aussi la compétition (Polis & Holt 1992). Dans une interaction de type prédation intragilde, on distingue le prédateur intragilde (qui exploite l'autre), la proie intragilde (qui partage la même ressource que le précédent) et finalement la proie extragilde (ressource commune aux deux précédents) (Fig.1). Une interaction de type prédation intragilde est dite asymétrique lorsque invariablement la première espèce est le prédateur intragilde et la seconde espèce la proie intragilde. Dans une relation symétrique, la première et la seconde espèce sont selon les circonstances proie ou prédateur. À titre d'exemple, les veuves noires capturent grâce à une toile de soie plusieurs espèces de scorpions. Ces mêmes espèces de scorpions attaquent les veuves noires au sol (Polis & McCormick 1986).

Depuis le travail de Polis, plusieurs études ont montré l'importance de la prédation intragilde dans de nombreux systèmes. La prédation intragilde peut ainsi constituer pour plusieurs espèces un facteur de mortalité prédominant. Szeinfeld (1991) a montré que chez l'anchois du Cap, *Engraulis capensis*, 56% des œufs étaient dévorés par un prédateur intragilde, la sardine d'Afrique du Sud *Sardinops ocellatus* et 88% des sardines capturées avaient des œufs d'anchois dans l'estomac. Autre exemple, chez le guépard, *Acinonyx jubatus*, la prédation intragilde par le lion *Panthera leo*, représente 72,2% de la mortalité des juvéniles avant qu'ils n'aient quitté leur tanière (Laurenson 1994).

Où observe-t-on de la prédation intragilde?

La prédation intragilde est un phénomène très répandu dans toutes les communautés et au sein d'un vaste éventail de groupes taxonomiques (Polis et al. 1989, Polis & Holt 1992, Rosenheim et al. 1995). La plupart des prédateurs sélectionnent leur proie en fonction de leur taille et non en fonction de leur niveau trophique, ce qui implique qu'ils peuvent s'attaquer aussi bien à une proie extragilde, qu'à un prédateur de cette proie (donc intragilde) de même taille (Polis & Holt 1992). Les espèces possédant des structures d'âge ou des stades de développement définis constituent de bons candidats pour la

prédation intraguilde, particulièrement lorsque la taille des juvéniles est similaire à celle de la proie, ce qui est fréquemment le cas chez les invertébrés. On note ainsi la présence de prédation intraguilde aussi bien chez les mammifères, les reptiles, les amphibiens, les oiseaux, les poissons, que chez les invertébrés (Polis et al. 1989, Polis & Holt 1992, Fincke 1994). La prédation intraguilde se retrouve au sein des communautés naturelles terrestres, d'eau douce, marines, aquatiques de surface, aériennes et des agroécosystèmes (Polis & McCormick 1987, Szeinfeld 1991, Rosenheim & Wilhoit 1993). Si la prédation intraguilde implique le plus souvent des espèces carnivores (prédateurs, parasitoïdes), on la retrouve également chez des espèces omnivores (Coll & Izraylevich 1997), principalement détritivores (Wissinger et al. 1996) ou même principalement phytophages (LeCato 1978, Herrera 1984).

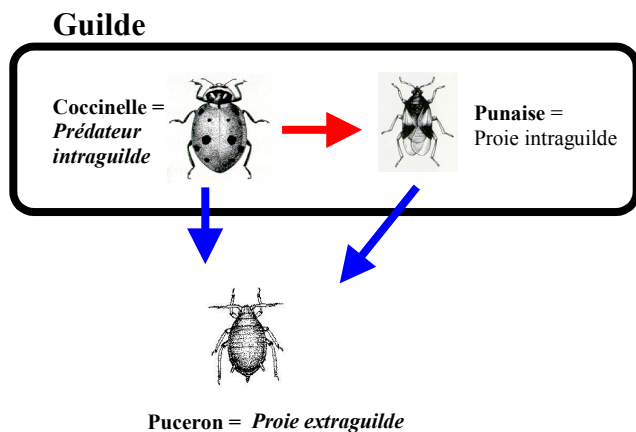


Figure.1- Le puceron est le ravageur visé et donc la proie extraguilde. La coccinelle et la punaise prédatrice sont des ennemis naturels du puceron et appartiennent donc à la guildes exploitant le puceron (cadre noir). Une flèche signifie « dévore ». Les flèches en bleu représentent des cas de prédation classique (extraguilde); la flèche en rouge représente un cas de prédation intraguilde car la coccinelle (prédateur intraguilde) et la punaise (proie intraguilde) appartiennent à la même guildes.

Quelles sont les implications écologiques liées à la prédation intraguilde?

La prédation intraguilde a des implications multiples au sein des communautés. Au niveau individuel, elle procure plusieurs avantages au prédateur intraguilde. Elle élimine un compétiteur, elle élimine un prédateur potentiel du prédateur intraguilde (en période de mue par exemple) ou de sa descendance (dans les cas de prédation intraguilde symétrique) et lui procure un apport protéinique. Les proies intraguildes peuvent ainsi constituer jusqu'à 50% de la diète d'un prédateur (Polis et al. 1989). La prédation intraguilde contribue également à une plus grande dispersion des espèces impliquées (Moran & Hurd 1994). Les proies intraguildes affichent souvent des patrons de distribution spatio-temporel différents de leur prédateur intraguilde. Le

risque encouru par la prédation intraguilde restreint ainsi les proies intraguildes à des milieux moins productifs, mais moins risqués, ou encore à des périodes d'activité moins risquées.

Au niveau populationnel, la prédation intraguilde a des impacts sur les populations du prédateur intraguilde, de la proie intraguilde et de la proie extraguilde. Elle constitue dans de nombreux cas un facteur de mortalité très important maintenant la population de proies intraguildes sous la capacité de soutien de l'environnement et peut dans certains cas provoquer l'extinction de la population (Polis et al. 1989). Plusieurs études montrent que le retrait d'un prédateur intraguilde provoque une augmentation parfois considérable des populations de proies intraguildes, sans que la compétition exploitative soit le facteur déterminant (Polis & McCormick 1987). La prédation intraguilde peut également augmenter l'abondance de la proie intraguilde en provoquant une diminution compensatoire de la compétition intraspécifique, ou au contraire augmenter la compétition intraspécifique en ce qui a trait à la recherche de refuge par les proies intraguildes.

La prédation intraguilde a également une influence significative sur la structure des communautés (Gustafson 1993) mais il est très difficile de connaître son impact réel en raison de la complexité des effets directs et indirects générés (Polis & Holt 1992). Selon les modèles théoriques, la prédation intraguilde peut conduire à trois scénarios principaux: à la coexistence, à l'extinction ou à des états stables alternatifs (Holt & Polis 1997). La prédation intraguilde permet la coexistence des espèces si la proie intraguilde est un meilleur compétiteur par exploitation que le prédateur intraguilde. La prédation intraguilde stabilise la population de la proie extraguilde et empêche son extinction, si le prédateur intraguilde se rabat sur la proie intraguilde lorsque la proie extraguilde se raréfie. L'extinction de la proie intraguilde peut survenir, notamment si la proie extraguilde est plus productive que la proie intraguilde et maintient, par le fait même, la densité du prédateur intraguilde à un niveau très élevé (Polis et al. 1989). La prédation intraguilde peut également conduire à des états stables alternatifs (Polis et Holt 1992) dans les systèmes où la prédation intraguilde mutuelle (symétrique) est très importante et liée à la structure d'âge des populations. Lorsque les adultes de deux espèces de prédateurs intraguildes dévorent les jeunes de l'autre espèce, la première espèce à parvenir au stade adulte va contrôler la population de la seconde espèce en tuant ses juvéniles. Si pour une raison ou une autre (exemple: une perturbation), les adultes de la première espèce disparaissent, la seconde peut alors proliférer ce qui modifie complètement la structure de la communauté.

La prédation intraguilde peut également avoir des répercussions sur les phénomènes de cascades trophiques. La théorie des cascades trophiques prédit que dans une communauté où les liens trophiques verticaux sont suffisamment étroits, une augmentation dans l'abondance du prédateur supérieur (3ème niveau) provoque une diminution du prédateur intermédiaire (2ème niveau), et par un effet de cascade une augmentation du

consommateur (1er niveau) (Hairston et al. 1960). Lorsque la prédation intraguilde est suffisamment forte, on se retrouve avec, non plus une suite de relations linéaires mais plutôt des relations triangulaires, de telles réactions en cascade peuvent être annihilées (Polis & Holt 1992, mais voir Rosenheim et al. 1993).

Tel que mentionné précédemment, la prédation intraguilde est une interaction tenant à la fois de la prédation et de la compétition. La prédation et la compétition constituent deux forces évolutives majeures (Connell 1983). De même, la prédation intraguilde affecte de façon significative l'évolution de nombreuses espèces. Chez les proies intraguildes, outre la mortalité générée, la prédation intraguilde a notamment favorisé le développement d'une panoplie de stratégies défensives (Polis & Holt 1992, Lucas et al. 1998).

Quel est l'impact de la prédation intraguilde dans les programmes de lutte biologique?

Comme dans le cas du puceron du coton, la prédation intraguilde peut avoir de lourdes conséquences sur les programmes de lutte biologique (voir Rosenheim et al. 1995, Ehler 1996). Elle peut survenir lors de lâchers mono ou multispécifiques, lorsque les différents agents lâchés s'attaquent entre eux, ou lorsque l'agent lâché s'attaque aux ennemis naturels indigènes, ou encore lorsque les ennemis naturels indigènes attaquent l'agent lâché (Rosenheim et al. 1993, 1995). Dans les programmes de lutte contre les arthropodes nuisibles, un prédateur peut ainsi s'attaquer à un autre prédateur, à un parasitoïde adulte ou à un ravageur parasité ou infecté par un pathogène; un parasitoïde généraliste peut s'attaquer à un prédateur, à un ravageur infecté, ou à un ravageur déjà parasité par un autre parasitoïde; enfin un pathogène peut infecter un hôte déjà infecté par un autre pathogène, ou encore parasité, ou encore s'attaquer à un parasitoïde adulte ou à un prédateur (Rosenheim 1998). Rosenheim et al. (1995) ont montré que la prédation intraguilde est omniprésente dans les guildes d'agents de lutte biologique contre les arthropodes et les nématodes nuisibles. Au contraire, la prédation intraguilde semble peu fréquente au sein des guildes s'attaquant aux agents phytopathogènes.

La prédation intraguilde est-elle nécessairement néfaste aux programmes de lutte biologique?

La prédation intraguilde est généralement identifiée comme un facteur négatif dans les programmes de lutte biologique. Plusieurs exemples, tel celui du coton présenté précédemment démontrent le risque associé à la prédation intraguilde. Néanmoins, dans certaines circonstances, la prédation intraguilde peut constituer un facteur positif dans les programmes de lutte. En effet, dans les programmes de lutte par introduction d'un ennemi naturel dont l'action doit se maintenir au fil des générations, il est souhaitable qu'un équilibre s'installe entre cet auxiliaire et sa proie, afin que la disparition

du ravageur n'entraîne pas la disparition de l'auxiliaire. Si cet auxiliaire est lui-même victime de prédation intraguilde par un autre prédateur du ravageur, ce prédateur intraguilde peut contribuer à stabiliser les populations du ravageur et de l'auxiliaire et donc contribuer au succès du programme. Au niveau de la modélisation, les modèles analytiques et empiriques concernant l'effet de prédateurs intraguildes (Rosenheim et al. 1995) ou l'effet des ennemis naturels des agents de lutte (Rosenheim 1998) sur le contrôle biologique débouchent le plus souvent sur des réponses multiples ou contradictoires. On constate à nouveau que chaque système culture-ravageur-ennemis naturels constitue un cas particulier et que l'extrapolation des conclusions d'un système à un autre s'avère très délicate.

Conclusion

Traditionnellement, lorsque l'on parle de lutte biologique on pense aux exemples de lutte biologique classique, ou un ravageur exotique est contrôlé par l'introduction d'un ennemi naturel exotique. Les réussites les plus retentissantes appartiennent à ce type de lutte. Néanmoins, dans la majorité des cas, on ne retrouve pas un auxiliaire de lutte suffisamment efficace pour contrôler le ravageur ciblé. C'est pourquoi les programmes actuels de lutte biologique intègrent fréquemment plusieurs espèces d'auxiliaires. En outre on considère de plus en plus l'emploi d'espèces d'ennemis naturels généralistes, donc capables de contrôler plusieurs espèces de ravageurs, et capables de survivre dans le milieu même après la disparition de l'espèce de ravageur ciblée. Ces programmes multispécifiques augmentent les risques de prédation intraguilde entre les agents lâchés. De plus, les auxiliaires généralistes précisement de part leur large spectre alimentaire constituent des candidats idéaux pour les interactions de type prédation intraguilde. Donc dans tous les programmes de lutte biologique, la prédation intraguilde doit donc plus que jamais être un facteur à prendre en ligne de compte; sans nécessairement le considérer a priori comme un facteur négatif. Il importe alors, quel que soit le système dans lequel est appliquée la lutte biologique, de ne pas simplement considérer les interactions entre ravageurs et ennemis naturels mais également les interactions entre les agents de lutte et leurs propres ennemis naturels indigènes ou relâchés.

Bibliographie

- Coll, M. & S. Izraylevich. 1997. When predators also feed on plants: effects of competition and plant quality on omnivore-prey population dynamics. *Ann. Entomol. Soc. Am.* 90: 155-161.
- Connell, J.H. 1983. On the prevalence and relative importance of interspecific competitive competition: Evidence from field experiments. *Am. Nat.* 122: 661-696.
- Ehler, L.E. 1996. Structure and impact of natural enemy guilds in biological control of insect pests. pp. 337-342. In G.A. Polis & K.O. Winemiller (Eds). *Food Webs; Integration of Patterns & Dynamics*. Chapman & Hall. Toronto, Canada.

- Fincke, O.M. 1994. Population regulation of a tropical damselfly in the larval stage by food limitation, cannibalism, intraguild predation and habitat drying. *Oecologia* 100:118-127.
- Fox, L. 1975. Cannibalism in natural populations. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 6: 293-302.
- Gustafson, M.P. 1993. Intraguild predation among larval plethodontid salamanders: A field experiment in artificial stream pools. *Oecologia* 96: 271-275.
- Hairston, N.G., F.E. Smith & L.B. Slobodkin. 1960. Community structure, population control, and competition. *Am. Nat.* 94: 421-425.
- Holt, R.D. & G.A. Polis. 1997. A theoretical framework for intraguild predation. *Am. Nat.* 149: 745-764.
- Laurenson, M.K. 1994. High juvenile mortality in cheetahs (*Acinonyx jubatus*) and its consequences for mutual care. *J. Zool. (London)* 234: 387-398.
- LeCato, G.L. 1978. Functional response of flour beetles to density of cigarette beetles and the role of predation in population regulation. *Environ. Entomol.* 7: 77-80
- Lucas, E., D. Coderre & J. Brodeur. 1998. Intraguild predation among three aphid predators: Characterization and influence of extra-guild prey density. *Ecology* 79: 1084-1092.
- Moran, M.D. & L.E. Hurd. 1994. Short-term responses to elevated predator densities: noncompetitive intraguild interactions and behavior. *Oecologia* 98: 269-273.
- Polis, G.A. & R.D. Holt. 1992. Intraguild predation: The dynamics of complex trophic interactions. *Trends Ecol. Evol.* 7:151-154
- Polis, G.A. & S.J. McCormick. 1986. Scorpions, spiders and solpugids: Predation and competition among distantly related taxa. *Oecologia* 71: 111-116.
- Polis, G.A. & S.J. McCormick. 1987. Intraguild predation and competition among desert scorpions. *Ecology* 68: 332-343.
- Polis, G.A., C.A. Myers & R.D. Holt. 1989. The ecology and evolution of intraguild predation: Potential competitors that eat each other. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 20: 297-330.
- Rosenheim, J.A. 1998. Higher-order predators and the regulation of insect herbivore populations. *Annu. Rev. Entomol.* 43: 421-447.
- Rosenheim, J.A. & R. Wilhoit. 1993. Why lacewings may fail to suppress aphids? Predators that eat other predators disrupt cotton aphid control. *California Agriculture*, September-October: 7-9.
- Rosenheim, J.A., R. Wilhoit & C.A. Armer. 1993. Influence of intraguild predation among generalist insect predators on the suppression of an herbivore population. *Oecologia* 96: 439-449.
- Rosenheim, J.A., H.K. Kaya, L.E. Ehler, J.J. Marois & B.A. Jaffee. 1995. Intraguild predation among biological control agents: Theory and evidence. *Biol. Control* 5: 303-335.
- Szeinfeld, E.V. 1991. Cannibalism and intraguild predation in clupeoids. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 79: 17-26.
- Wissinger, S.A., G.B. Sparks, G.L. Rouse, W.S. Brown & H. Steltzer. 1996. Intraguild predation and cannibalism among larvae of detritivorous caddisflies in subalpine wetlands. *Ecology* 77: 2421-2430.

J'AI LU

Parer aux risques de demain

D. Bourg – J.-L. Schegel,
Éd. du Seuil, 187 p., 2001

En ouvrant ce livre, on pénètre immédiatement dans le pourquoi du développement d'un principe de précaution dans la conduite des affaires humaines. Que soit évoqué le cas récent de la "vache folle" en Europe, celui de l'accident nucléaire de Tchernobyl, de l'utilisation toujours présent du DDT ou de la crise environnementale actuelle, voilà autant de raisons de parer aux risques de demain. Loin de la technicité que l'on retrouve dans *Le principe de précaution dans la conduite des affaires humaines* (ouvrage sous la direction de O. Godard), D. Bourg et J.L Schegel abordent les sujets de base qui sous-tendent le principe de précaution. "Un principe qui n'a de sens que dans un contexte d'incertitude scientifique et qui préconise l'action à la source du danger avant que cette incertitude puisse être levée".

Parer au risques de demain aborde les notions de risque et de danger, la perception du progrès, la crise environnementale et les responsabilités politique et économique dans la gestion sociale. Chacun des chapitres traitent des différentes facettes du principe avec plus ou moins de succès. Ainsi, bien que l'on soit d'accord avec l'importance du changement dans la perception humaine du progrès technologique dans l'origine du développement du principe de précaution visant son contrôle, le traitement fait à cette problématique s'égare dans des méandres intellectuels difficilement cernables. Ceci est d'autant plus surprenant que d'autres chapitres sont d'une clareté exemplaire. En revanche, ce manque de rigueur passager est compensé par des conclusions pertinentes. Par exemple, afin d'appliquer le principe les auteurs recommandent l'utilisation de procédures diversifiées de participation. Selon eux, c'est dans le "contexte générale des procédures de participation nouvelles que se fait jour et qu'est posée de plus en plus fortement la question du recours au principe de précaution". Cette recommandation est loin de l'éternel appel au développement d'une science plus précise. Le mélange de réalité et de fantasmes représente une difficulté spécifique des questions d'environnement. Il est impossible d'opposer la perception humaine et l'objectivité des risques, au sens où ne seraient objectifs que les risques décrits et analysés. La rigueur analytique et la participation seraient la solution pour l'application du principe.

Il ne faut pas croire que par la définition du principe, perçu par certain comme un moyen de paralyser le développement humain, les auteurs veulent détruire toute forme de progrès. Bien au contraire, ils considèrent que l'accumulation du

savoir scientifique conduira nécessairement, par les avancées technologiques et industrielles qu'elle autorise et promeut, à une amélioration générale de la condition humaine. Cependant la maîtrise des technologies ne permet pas de faire table rase sur les risques car *la maîtrise ne cesse de produire de la non-maîtrise, les avoir ne cesse de produire de l'ignorance, qui elle-même suscitera de nouvelles connaissances, qui elle-même.... – à l'infini.*

Ce livre est une bonne introduction aux ouvrages plus techniques et pratiques sur l'utilisation du principe de précaution. Tout en remettant les concepts à leur place, il permet de départager l'usage abusif et/ou approprié que nous faisons du terme

É. Duchemin



Notre empreinte écologique

M. Wackernagel et W. Rees,
Éditions Écosociété, 207 p., 1999

L'objectif de M. Wackernagel et W. Rees, respectivement directeur du groupe de réflexion *Redefining Progress* et directeur de l'École de planification communautaire et régionale de l'université de Colombie-Britannique, est de fournir un outil de planification pour mesurer le poids réel sur la terre de l'entreprise humaine. Un outil abordable pour tous et chacun. Tel que définit par les auteurs, *l'empreinte écologique est la mesure de la charge qu'impose à la nature*

une population donnée. Elle représente la surface du sol nécessaire pour soutenir les niveaux actuels de consommation des ressources et de production de déchets de cette population. À l'ère de l'urbanisation et de la mondialisation il est primordial d'avoir de tels outils permettant d'imager et de quantifier notre impact sur l'environnement. L'empreinte écologique est l'une d'elle.

Mathis Wackernagel et William Rees

Notre empreinte écologique



Conscients des limites de l'outil développé, dans cet ouvrage, les auteurs livrent l'ensemble des principes du calcul de l'empreinte. Par une écriture limpide ils décrivent les fondements de la méthodologie. Cette description est complétée par des études de cas où les auteurs jouent avec les empreintes. Cette manière de concevoir l'utilisation de l'outil reflète bien l'ouvrage; un support pédagogique non rébarbatif. Les auteurs ont confiance dans leur indicateur. Cette confiance pousse à utiliser *l'empreinte écologique* afin d'évaluer ce que nous pouvons personnellement faire pour réduire notre impact sur l'environnement. Toutes les applications pratiques de l'empreinte écologique, allant de l'initiation des enfants à l'éducation relative à l'environnement jusqu'à l'évaluation de politiques et de projets municipaux, aideront à formuler des enjeux et des solutions de durabilité. *L'empreinte écologique* est un ouvrage pédagogique primordial pour faire connaître les notions d'écologie dans les écoles. Pour que nos enfants ne croient pas que notre mode de vie n'a pas d'effet. Si cet effet n'est pas visible à proximité, il l'est certainement ailleurs. L'ouvrage est parsemé de dessins illustrant de façon juste, et agréable, les propos.

É.D.

Restructured rivers – Hydropower in the Era of Competitive Markets

Philip Raphals, International Rivers Network, 113p., 2001

À l'époque de la restructuration des systèmes énergétiques nationaux et continentaux, la « Planification intégrée des ressources » - approche structurante assurant une solution optimale dans le but de rencontrer, dans une perspective sociétale, les besoins énergétiques futurs - est éliminée. Cet abandon laisse place à la loi du marché. Dans un tel contexte, de nombreuses problématiques, dont celle de l'intégration des externalités environnementales et de la justice environnementale, émergent.

En utilisant les cas précis de la Californie et du Québec, Philip Raphals du Centre Hélios amène les lecteurs à travers les dédales de la restructuration énergétique. Son analyse porte spécialement sur la place de l'hydroélectricité dans une telle restructuration. Pour ce faire, il analyse les restructurations et leurs liens avec l'environnement, les impacts environnementaux de la production hydroélectrique et les différents moyens d'inclure dans le cadre d'un environnement compétitif les impacts environnementaux de ce type de production énergétique.

Ce rapport englobe l'ensemble de la problématique entourant la place de l'hydroélectricité dans les systèmes énergétiques restructurés, tout en offrant des moyens permettant d'intégrer les impacts environnementaux de tels développements.

É.D.

L'électrification rurale décentralisée; une chance pour les hommes, des techniques pour la planète.

Œuvre collective sous la direction de C. De Gouvello et Y. Maigre, Ed. Systèmes Solaires, 363p., 2000

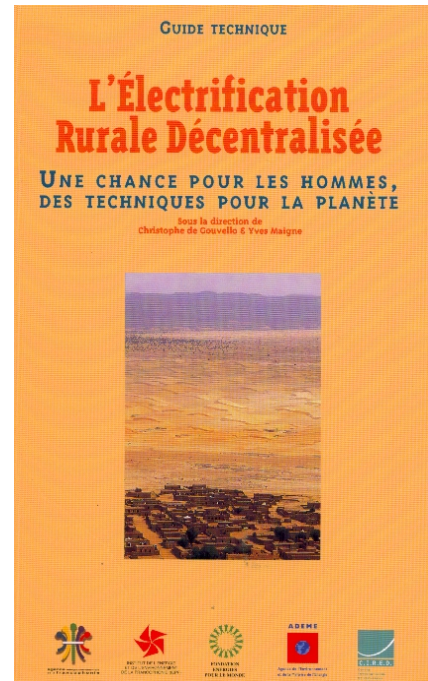
Encore à ce jour on estime que 2,6 milliards d'individus n'ont pas accès à une source d'énergie stable et autonome. Par continent, ce chiffre est de 2 milliards d'individus pour l'Asie, de 430 millions en Afrique, de 120 millions en Amérique du sud et de 80 millions au moyen-orient. Dans un contexte économique néo-libéral, ces individus - principalement situés en zones rurales - ont peu de chance d'être raccordés prochainement au réseau électrique. Un tel raccordement ne serait pas rentable économiquement. Cette absence de raccordement se traduit par l'utilisation d'une énergie de premier recours (lampe à pétrole, batterie). Bien que l'utilisation de ce type d'énergie, ne demandant pas un investissement majeur à l'initial, soit avantageuse à court terme, à long terme elle est coûteuse en argent et en temps.

Une approche pour palier aux besoins énergétiques des régions rurales serait l'électrification rurale décentralisée.

Dans cet ouvrage, les différents auteurs abordent avec l'angle de la pratique les différentes facettes de l'implantation des systèmes énergétiques photovoltaïques dans les milieux ruraux. Chacune des problématiques auxquelles doivent faire face les intervenants lors l'implantation de technologies dans les pays en développement est abordée de manière succincte mais précise. Chaque fois on perçoit que l'expérience de terrain est présente et sous-tend les analyses. Cette impression se confirme par la présentation de six études de cas à la fin de l'ouvrage. Tout en démontrant une cohésion d'ensemble axée sur la rédaction d'un guide technique, les différents chapitres amènent tous à une réflexion dépassant la seule technique. Nous sommes plus près de la définition d'une approche intégrée de gestion environnementale.

Quelle que soit la problématique à analyser, la lecture de ce livre est une mine de renseignements pour toute personne intervenant dans les pays en développement.

É.D.



Découverte: Un site Internet brésilien permettant de naviguer facilement sur les sites portant sur l'environnement et l'écologie (guia da ecologia sobresites). Bien conçu. Pour ceux qui sont lusophones ou lusophiles. www.sobresite.com/ecologia – **Sur ma table de chevet:** *Écologia humana, ética e educação-* a mensagem de Pierre Dansereau (Ed. Pallotti/APED). Un ouvrage sur l'œuvre et les recherches de Pierre Dansereau - professeur émérite de l'UQAM - **Sur mon bureau:** Le programme informatique BASIN développé par US-Environmental Protection Agency. Ce programme SIG regroupe de nombreuses informations sur les bassins versant des États-Unis - Idéal pour ceux ayant des projets de recherche ou d'intervention dans ce pays (pour commander voir le site internet de L'EPA).

L'ACTUALITÉ

Est-ce que le développement hydroélectrique à petite échelle est environnementalement préférable?

Par Éric Duchemin, Ph.D., Consultant en Environnement

Durant les derniers mois le gouvernement québécois s'est prononcé pour la création d'un nouveau programme de développement de petites centrales hydroélectriques. Ce programme prévoit la production de 435 MW, soit près de la moitié du potentiel québécois non-développé en petite hydroélectricité (862 MW). Cette quote-part accordée dépasse largement la limite de 150 MW recommandée par la Régie de l'Énergie dans son Avis de décembre 1999 (A-99-02, www.regie-energie.qc.ca). On peut se questionner sur un tel choix, mais on doit reconnaître que le gouvernement du Québec suit la tendance continentale en ce qui concerne l'augmentation de la production d'énergie électrique. Nos voisins de la Nouvelle-Angleterre ont construit pour 3 500 MW de centrales thermiques durant les deux dernières années, tandis que dans l'ensemble des États-Unis, 67 000 MW de capacité de production ont été rajoutés sur le réseau électrique, et 70 000 MW sont en construction. Cela représente, une augmentation de la capacité de production états-uniennes de 18% depuis 1998.

Bien que les structures socio-économiques québécoises dépendent d'une augmentation de la production d'énergie électrique évaluée à 1,2 % par année², soit des besoins d'environ 500 MW par année, nous devons en tant que société nous donner les moyens de juger au niveau socio-économique et environnemental le bien fondé de tout programme de développement énergétique. Avec les avancées technologiques actuelles de nombreuses autres possibilités énergétiques s'offrent à nous. Que ce soit par la production d'énergie à partir des ressources éoliennes, par la production solaire dans un contexte d'électrification décentralisée ou encore par l'efficacité énergétique, il est possible de générer à partir d'énergie «vertes» des quantités non négligeables d'électricité. Par exemple, à partir de deux projets réalisés dans un quartier de Laval et à Métabetchouan (au Lac St-Jean), Négawatts Production Inc. estime qu'un programme québécois d'économie d'énergie léger³ permettrait d'économiser environ 600 MW à un coût inférieur à celui de l'énergie provenant de centrales de production traditionnelle.

² Estimé de l'Office national de l'énergie : L'énergie au Canada – Offre et demande jusqu'à 2025, 1999, 105p. Cet estimé est corroboré par le dernier plan d'approvisionnement déposé par Hydro-Québec devant la Régie de l'énergie le 25 octobre 2001.

³ sans intervention sur les bâtiments

Le bien fondé relatif d'un programme de petites centrales hydroélectriques sur le développement socio-économique des communautés a été longuement discuté lors des audiences de la Régie de l'énergie. Selon les intervenants, les opportunités de développements socio-économiques étaient soit importantes ou soit négligeables. Cette dichotomie provenait principalement du regard porté sur la problématique. Au niveau régional le programme permettrait aux petites communautés un certain développement, tandis qu'au niveau du Québec d'autres options énergétiques devaient être retenues. Toutefois, de la majorité des mémoires présentés, on peut conclure qu'à court et moyen terme l'énergie produite servira aux exportations mais qu'à long-terme elle satisfera à la demande énergétique québécoise, et ce, avec des impacts environnementaux mineurs. Cependant, il faudrait évaluer ces impacts avant de statuer leur absence. Une telle évaluation n'a pas été retenue dans l'Avis.

Pour permettre une évaluation environnementale du programme, le ministère de l'environnement du Québec a abaissé de 10 MW à 5 MW le seuil d'assujettissement des projets hydroélectriques à des audiences publiques. Ceci pourrait déclencher l'examen public de 31 des 36 projets qui sont sur la table des promoteurs. En revanche pour différentes raisons cela n'est pas suffisant :

1. Contrairement aux grands développements hydro-électriques, les petites centrales ont des impacts difficilement mesurables, ce qui ne veut pas dire inexistant. La littérature scientifique démontre hors de tout doute que le développement hydroélectrique a des impacts sur les écosystèmes en aval et en amont des ouvrages. Les impacts et leur importance varient selon les caractéristiques des ouvrages. Le développement de plusieurs petites centrales hydrauliques risque, au minimum, d'avoir le même effet environnemental que le développement d'un grand barrage produisant 435 MW. Effectuer les évaluations barrage par barrage fera uniquement ressortir les incertitudes des recherches scientifiques environnementales sur de tel aménagement.
2. On aimerait que l'effet environnemental du programme soit dilué spatialement, mais en réalité il touche l'ensemble de l'écosystème du bassin versant

aménagé, le bassin du fleuve St-Laurent dans le cas présent. En aménageant les tributaires de cet écosystème on risque de déstabiliser son équilibre écologique.

3. Chaque rivière, par ses caractéristiques physiques (débits d'eau, apport en éléments nutritifs, etc.) a son importance écologique pour le milieu récepteur. Réaliser des projets sans considérer l'importance de chacune des rivières pour l'ensemble peut conduire à un déséquilibre écologique important.

Pour ces différentes raisons, il est important que le gouvernement recommande d'effectuer une évaluation environnementale de l'ensemble du programme. Une telle audience permettra d'évaluer et d'illustrer les impacts environnementaux que causera un tel programme. En outre, il permettra de faire prendre conscience au citoyen que le développement de petites centrales hydroélectriques n'est pas uniquement du ressort des régions touchées par les développements. Actuellement les différents intervenants économiques impliqués dans le dossier privilégient une approche régionale. Le Saint-Laurent, dont le cours sillonne les basses-terres, risque d'être atteint par leurs actions. Enfin, une évaluation permettra de déterminer le bien fondé de chacun des projets pour l'ensemble de l'écosystème. Devons-nous permettre un développement régional sans considérer les impacts potentiels sur l'ensemble du territoire? Et n'oublions pas que dans ce programme on prévoit aménager des rivières ayant un potentiel hydroélectrique et non uniquement des ruisseaux avec de faibles débits.