

## Les alternatives aux pesticides néonicotinoïdes pour le contrôle des ravageurs : études de cas en agriculture et foresterie.

(Voir l'article original sur [www.tfsp.info](http://www.tfsp.info) )

**Lorenzo Furlan & David Kreutzweiser**

Received: 14 April 2014 / Accepted: 16 September 2014

© The Author(s) 2014. This article is published with open access at Springerlink.com

Responsible editor: Philippe Garrigues

L. Furlan (\*)Veneto Agricoltura, Legnaro, PD, Italy e-mail: [lorenzo.furlan@venetoagricoltura.org](mailto:lorenzo.furlan@venetoagricoltura.org)

D. KreutzweiserCanadian Forest Service, Natural Resources Canada, 1219 Queen Street East, Sault Ste Marie, ON P6A 2E5, Canada

**Résumé.** Dans le monde, les insecticides néonicotinoïdes sont largement utilisés, pour le contrôle des insectes nuisibles, en particulier à titre préventif dans la gestion des ravageurs agricoles. Un nombre croissant de preuves indique que l'utilisation prophylactique et à grande échelle des néonicotinoïdes engendre de graves risques de dommages pour les organismes bénéfiques et leur fonction écologique. Cela constitue une bonne raison pour explorer des alternatives aux insecticides néonicotinoïdes pour le contrôle des insectes nuisibles. Nous nous appuyons sur des exemples de méthodes alternatives de lutte contre les ravageurs concernant la production de maïs italienne et la sylviculture canadienne pour illustrer les principes de l'application d'alternatives aux néonicotinoïdes en vertu d'une stratégie de gestion intégrée des ravageurs (IPM). Une approche de IPM considère toutes les informations pertinentes et disponibles, pour prendre des décisions de gestion éclairées, offrant des options de lutte contre les ravageurs en fonction des besoins réels. Nous explorons les avantages et les défis de plusieurs options pour la gestion de trois insectes nuisibles dans les cultures de maïs et d'un insecte ravageur invasif dans les forêts, y compris en utilisant les rotations pour diversifier les cultures, la modification du moment de la plantation ou du semis, le travail du sol et l'irrigation, l'utilisation des cultures moins sensibles dans les zones infestées, l'application d'agents de lutte biologique et la recherche d'insecticides à risque réduit. La poursuite de la recherche de solutions alternatives est justifiée, mais tout aussi urgente est la nécessité du transfert de l'information, de la formation des agriculteurs et des gestionnaires de parasites, la nécessité de politiques et de règlements pour encourager l'adoption de stratégies de lutte intégrée, l'existence d'options de lutte antiparasitaire alternatives.

**Mots-clés :** néonicotinoïdes. Gestion intégrée des ravageurs (IPM) . Agriculture. Ravageurs du maïs. Sylviculture.

### Introduction

Les insecticides néonicotinoïdes systémiques sont utilisés pour protéger une grande variété de cultures. Sur la base de leur efficacité à contrôler de nombreux insectes nuisibles et leur activité systémique, ils sont largement utilisés en agriculture de sorte que depuis 2008 les néonicotinoïdes représentent un quart du marché mondial des insecticides (Jeschke et al. 2011), et ce taux est en augmentation (Simon -Delso et al. 2014). L'utilisation intensive des néonicotinoïdes en agriculture a indubitablement atteint des objectifs techniques et commerciaux, à savoir la simplification des systèmes agricoles et les grandes applications de pesticides de lutte préventive antiparasitaire afin de maximiser l'efficacité et les profits. Cependant, des preuves s'accumulent indiquant que de cette utilisation à grande échelle résulte un large spectre d'activités insecticides des néonicotinoïdes, même à des doses très faibles, et que cela conduit à un risque d'impact environnemental grave (Henry et al 2012 ; Goulson 2013 ; van der Sluijs et al. 2013, 2014 ; Whitehorn et al. 2012). L'utilisation à grande échelle, souvent prophylactique (Goulson 2013) des insecticides néonicotinoïdes, contraste avec le principe fondamental d'une approche de gestion intégrée des ravageurs (IPM), laquelle inclut une évaluation des populations de ravageurs d'importance économique afin de déterminer si un traitement insecticide est nécessaire. Les principes de la lutte intégrée, provenant de dizaines d'années d'expériences sur le terrain et de la recherche scientifique (Baur et al. 2011), sont résumés et rendus obligatoires dans l'Union européenne par la directive 2009/128/CE. Pour le milieu agricole, la procédure est la suivante :

1. Avant de prendre toute décision sur la lutte antiparasitaire, les organismes nuisibles doivent être surveillés par des méthodes et des outils adéquats lorsqu'ils sont disponibles ; les outils devraient inclure des observations sur le terrain ainsi que les alertes scientifiquement éprouvées, la prévision et des systèmes de diagnostic précoce ;
2. Les traitements ne peuvent alors être effectués que là et quand l'évaluation a constaté que les niveaux sont au-dessus de seuils économiques prédéterminés pour la protection des cultures ;

3. Si les seuils économiques sont dépassés, des solutions agronomiques, principalement les rotations, devraient être envisagées pour éviter des dommages aux cultures de maïs y compris l'interférence des populations de ravageurs nouvellement établie avec le calendrier de travail du sol et d'autres modifications, le choix et la modification des dates de semis et des modifications dans les séquences de rotations (assolement) ;
4. Si les seuils économiques sont dépassés et qu'aucune solution agronomique n'est disponible, la lutte biologique ou physique, ou toute autre méthode de lutte antiparasitaire non chimique, devrait être considérée à la place d'un traitement chimique ;
5. Si les seuils économiques sont dépassés et qu'aucune solution agronomique n'existe, que le contrôle biologique ou les traitements physiques, ou d'autres méthodes de lutte antiparasitaire non chimiques, ne sont disponibles, les traitements chimiques doivent être choisis parmi ceux qui posent le moins de risques pour l'environnement et la santé humaine, et ils devraient être utilisés d'une manière qui minimise le risque de résistance des ravageurs en limitant leur utilisation dans l'espace et le temps.

Afin de montrer que les alternatives aux néonicotinoïdes pour le contrôle des ravageurs sont disponibles et sont réalisables, deux études de cas seront décrites : (i) le traitement des cultures de maïs, dans lesquelles il a été montré qu'il y avait un lien entre les néonicotinoïdes et les effets négatifs sur les abeilles (Girolami et al 2012.) et, (ii) le traitement des arbres pour lutter contre une espèce d'insecte ravageur invasive. L'étude de cas agricole est importante car elle concerne la culture et les méthodes de contrôle antiparasitaire faites sur de grandes surfaces en Italie (en milliers d'hectares couvrant une période de 25 ans (Furlan 1989 ; Furlan et al. 2002, 2007b, 2009a, 2011 ; Ferro et Furlan 2012) avec un potentiel d'effets secondaires sur l'environnement. L'étude de cas en sylviculture est importante, car elle présente un problème de ravageurs unique au Canada avec des questions et des solutions relevant de son propre environnement.

### **Des études de cas de lutte antiparasitaire du maïs**

En 2010, les néonicotinoïdes représentaient 27% du total mondial des insecticides utilisés (Casida et Durkin 2013) et leur application à la gestion des ravageurs du maïs est parmi les plus élevées des insecticides utilisés en agriculture. Par exemple, plus de 18 millions d'hectares de maïs ont été traités avec un insecticide néonicotinoïde entre 2009 et 2011 aux Etats-Unis (Brassard 2012). Ceci comprend plus de 810 t de clothianidine et 570 t de thiaméthoxame appliqués en 1 an aux Etats-Unis, la plupart dans les cultures de maïs (Simon-Delso et al. 2014). La production de maïs pour l'alimentation humaine et animale, et pour les agrocarburants, est la principale utilisation des terres arables aux Etats-Unis, et presque toutes les semences de maïs utilisées dans la production sont des semences enrobées de néonicotinoïdes (USDA-NASS 2013). La production de maïs dans l'Union européenne est d'environ 14 millions d'hectares par an, en France, Roumanie, Allemagne, Hongrie, Italie, chaque pays produisant plus de 1 million d'hectares par an (Meissle et al. 2010). Les insecticides néonicotinoïdes sont appliqués à la

culture du maïs principalement en enrobage de semences, conçu pour protéger les semences de maïs, les semis et les jeunes plants en début de croissance au début de la saison. L'utilisation croissante des néonicotinoïdes, y compris leur usage pour le maïs, a été impliquée dans l'exposition et les impacts environnementaux significatifs, y compris dans les troubles chez les abeilles et dans le syndrome d'effondrement des colonies d'abeilles, affectant ainsi la pollinisation et d'autres services écologiques (Goulson 2013 ; van der Sluijs et al. 2013, 2014 ; Bonmatin et al. 2014 ; Chagnon et al 2014 ; Pisa et al. 2014).

Le premier moyen de réduire l'utilisation des insecticides en Europe, en général, et en particulier, des néonicotinoïdes, est la mise en œuvre appropriée des stratégies de lutte intégrée proposées par la directive européenne 128/2009/CE sur l'utilisation durable des pesticides. Cette directive a rendu obligatoire l'application de la IPM à toutes les cultures dans l'Union européenne depuis janvier 2014. Bien que les stratégies de lutte intégrée soient couramment utilisées dans les plantations comme les vergers et les vignobles (Baur et al. 2011), elles n'ont pas été largement introduites pour le maïs et d'autres cultures arables en Europe (Furlan et al. 2013). Comme les grandes cultures ont souvent des ressources limitées en termes de revenu, travail et technologie, un effort particulier est nécessaire pour s'assurer que la directive est appliquée avec succès. Cela signifie que si la IPM doit être introduite pour les cultures arables, il est nécessaire que (a) les stratégies soient à faible coût, (b) les outils soient efficaces en temps, et (c) que l'usage des pesticides, ou d'autres méthodes de lutte antiparasitaire, soit économiquement et écologiquement durable. Une façon d'atteindre ces objectifs est d'initier un système moderne de conseil qui peut fournir des informations en ligne sur les options de traitement des cultures et d'en expliquer les critères techniques. Cela a été démontré en Italie par le nouveau « Bollettino delle Colture Erbacee » (« le Bulletin des cultures herbacées ») (<http://www.Venetoagricoltura.org/subindex.php?IDSX=120>). Ce bulletin conseil, à faible coût, est basé sur un système de surveillance des ravageurs et des maladies à l'échelle régionale qui établit quand et où les populations de ravageurs posent un risque économique pour les terres arables. Lorsque le risque se produit effectivement, il conseille sur la manière dont l'évaluation sur le terrain doit être conduite. Le suivi à l'échelle régionale est d'un faible coût car il est basé sur : (a) des pièges à phéromones qui sont peu coûteux et faciles à utiliser ; (b) des modèles de populations de ravageurs utilisant les renseignements météorologiques (par exemple, le programme de surveillance et de prévision du Ver-gris noir (Furlan et al. 2001c) et le modèle de Davis pour l'éclosion des œufs de *Chrysomèle des racines du maïs*, Davis et al. 1996) ; (c) l'analyse spatiale basée sur la cartographie SIG (par exemple la géostatistique, De Luigi et al. 2011) ; et (d) les informations agronomiques d'un certain nombre de domaines. Afin de s'assurer qu'une IPM fiable et abordable puisse être appliquée aux cultures arables, le suivi et l'évaluation doivent être menés à la fois au niveau régional et local agricole en cas de besoin.

Au niveau local de la ferme, la procédure de suivi nécessite des échantillons à prendre sur le terrain lorsque les zones à risque de dégâts importants aux cultures d'un insecte donné sont identifiées au niveau régional (Furlan et al. 2013). La

surveillance du développement des cultures peut aussi révéler différents niveaux de sensibilité et donc les méthodes d'intervention doivent être ajustées en conséquence.

Les agriculteurs et les autres praticiens sont informés en temps opportun de ces questions et formés sur la façon d'utiliser l'information correctement dans un plan de lutte intégrée réussie où les coûts de production ont des impacts concurrentiels et environnementaux limités. Ce qui suit est une brève description de certaines options de lutte intégrée pour la gestion de certains insectes nuisibles communs sur les cultures de maïs en Italie (et applicable à d'autres parties de l'Europe) sans compter sur l'utilisation prophylactique des néonicotinoïdes.

#### *Contrôle de taupins (Agriotes spp.)*

Les données à long terme suggèrent que la majorité des terres agricoles consacrées au maïs en Italie n'a pas besoin d'être protégée par l'usage de semences enrobées de pesticides (Furlan 1989 ; Furlan et al. 2002, 2007b, 2009a, 2011, 2014 ; Ferro et Furlan 2012). En effet, le pourcentage de terres avec de fortes populations de taupins (un ravageur clé des cultures de maïs) est souvent très faible (moins de 5% dans la région vénétienne (Furlan 1989 ; Furlan et al. 2002, 2007b, 2009a, 2011 ; Ferro et Furlan 2012), une zone de production à grande échelle du maïs). Au niveau européen, des résultats similaires proviennent du projet européen PURE (Cadre VII). Après les 3 premières années de suivi, aucun dégât important du taupin dans les champs expérimentaux de France, de Hongrie, de Slovaquie, d'Allemagne, et d'autres régions italiennes n'a été détecté (Furlan, données non publiées). Des centaines de parcelles ont été examinées dans les études, en Italie, et dans la grande majorité des expériences il n'y avait pas de différences statistiquement significatives, en termes de rendement et de peuplement de la culture, entre des parcelles de maïs traité avec des néonicotinoïdes et des parcelles avec des semences non traitées en raison des faibles dommages du taupin et/ou de la capacité de compensation des cultures (Balconi et al. 2011 ; Boicelli 2007 ; Ferro et Furlan 2012 ; Furlan et al. 2002, 2007b, 2009a, 2011).

Ces données démontrent que les insecticides sont souvent sans nécessité et peuvent ne pas toujours contribuer efficacement à produire un gain de rendement (Goulson 2013). Dans ces situations, les populations faibles en ravageurs, déterminées par les évaluations et le suivi sur le terrain, peuvent fournir des informations pour la mise en œuvre réussie de la IPM. En raison de ce faible niveau général de risque, un programme d'assurance-récolte, où les producteurs peuvent contracter une assurance, au lieu d'utiliser les insecticides dans le sol, assurance permettant d'offrir une compensation financière lorsque les pertes de rendement peuvent être attribuées aux ravageurs, serait plus réaliste que la protection prophylactique. Le coût total des dommages au maïs (besoin de réensemencer et perte de rendement due au retard des semis ou à une résistance réduite) est souvent inférieur au coût total de la protection prophylactique de tous les champs semés (Furlan et al. 2014), et cela ne comprend pas toutes les considérations d'effets collatéraux sur l'environnement de l'usage des néonicotinoïdes (van der Sluijs et al. 2014).

#### *La surveillance précise de la population de larves de taupin et la prévision des dommages*

Une stratégie efficace et durable de la production de maïs est de semer des cultures sensibles dans les zones libres de populations nocives de taupin. Actuellement, certains niveaux de populations de taupin peuvent être prédits de façon fiable et rentable au moyen de pièges à phéromone (Furlan et al. 2001a ; Gomboc et al. 2001 ; Karabatsas et al. 2001 ; Tóth et al. 2001, 2003), lesquels sont adaptés au contrôle de toutes les principales espèces d'*Agriotes* d'Europe (*Agriotes sordidus* Illiger, *Agriotes brevis* Candèze, *Agriotes lineatus* L., *Agriotes sputator* L., *Agriotes obscurus* L., *Agriotes rufipalpis* Brulle, *Agriotes proximus* Schwarz, *Agriotes litiginosus* Rossi et *Agriotes ustulatus* Schaller). Au cours des dernières années, la recherche a fourni des informations utiles sur la signification biologique des captures dans les pièges à phéromone et a démontré leur éventail d'attraction (Sufyan et al. 2011). Les adultes capturés (taupins) dans les pièges à phéromones peuvent être corrélés à la présence de larves de la même espèce dans les sols, au moins pour les trois espèces principales de l'Europe du Sud, à savoir *A. sordidus* Illiger, *A. brevis* Candèze, et *A. ustulatus* Schaller (Burgio et al. 2005, 2012 ; Furlan et al. 2001b, 2007a ; Pozzati et al. 2006). Cependant, cette relation est moins certaine pour d'autres espèces européennes importantes, comme *A. obscurus* L., *A. lineatus* L. et *A. sputator* L. (Benefer et al. 2012 ; Blackshaw et Hicks 2013). Les modèles spatiaux (par exemple les analyses géostatistiques) sont disponibles en Italie où ils fournissent des prévisions des dynamiques des populations d'*Agriotes* à différentes échelles spatiales (grandes fermes, provinces), lesquelles sont ensuite interfacées avec des variables agronomiques et géographiques, conduisant à une meilleure analyse des risques et l'optimisation des coûts de surveillance (Burgio et al. 2005).

Les informations obtenues par la surveillance, au moyen de pièges à phéromone, peuvent améliorer la prédiction des niveaux de population et le risque réel de dommages aux cultures sur la base de l'évaluation des caractéristiques agronomiques et climatiques d'un champ avec les informations biologiques et écologiques de chaque espèce (Furlan 1996, 1998, 2004 ; Masler 1982 ; Rusek 1972 ; Kosmacevskij 1955). Les deux principaux facteurs de risque sont (i) plus de 5% de matière organique dans le sol en (Furlan 1989, 2005, données non publiées ; Furlan et al. 2011) et (ii) la couverture végétale permanente du sol avec prairie ou cultures doubles (comme orge et soja, ray-grass et maïs, etc.) au cours des deux années précédentes (Furlan 1989, 2005, données non publiées ; Furlan et Talon 1997 ; Furlan et al. 2011). Si aucun facteur de risque agronomique n'est présent, aucun traitement n'est nécessaire. Lorsque des pièges à phéromone ont détecté de hautes densités de populations de coléoptères et/ou si des facteurs de risques agronomiques sont présents, des pièges à appâts pour les larves (Chabert et Blot 1992 ; Parker 1994, 1996 ; Parker et al. 1994) peuvent ensuite être utilisés pour identifier les zones où les populations de larves de taupin dépassent le seuil économique. Cependant, chaque espèce d'*Agriotes* réagit différemment aux appâts des pièges, et par conséquent, les seuils pour chaque espèce doivent être évalués séparément (Furlan 2011). Par conséquent, l'identification des espèces est importante, et bien que la réaction en chaîne par polymérase

(PCR) et le séquençage de l'ADN soient actuellement disponibles pour identifier les espèces (Staudacher et al. 2010), d'autres méthodes d'identification plus pratiques et réalisables doivent être élaborées pour chaque région. Les données provenant des cultures de maïs en Italie des 20 dernières années ont permis aux chercheurs d'établir qu'il y a une étroite corrélation entre le nombre de larves par mètre carré, ou entre le nombre moyen de larves par piège à appât, et le nombre de plants de maïs endommagé par *A. brevis*, *A. sordidus*, et *A. ustulatus* (Furlan 2014). Lorsque les populations de taupins sont au-dessus des valeurs des seuils, les options de traitements agronomique et biologique devraient être envisagées avant de recourir aux traitements chimiques.

#### *Stratégies agronomiques pour le contrôle des populations de taupins*

La rotation des cultures, les ressources alimentaires, les conditions climatique et agronomique (teneur en matière organique principalement), ainsi que d'autres caractéristiques du sol sont les principaux facteurs qui influent sur les densités des populations larvaires (Furlan 2005). En règle générale, la grande majorité des plantes cultivées, non sensibles ou à faible sensibilité (par exemple le soja), peut être semée dans les champs infestés identifiés, tandis que les sols cultivés restants peuvent être ensemencés d'une culture sensible, y compris le maïs (Furlan et Toffanin 1996). La rotation et une allocation correcte des cultures peut suffire pour éviter des dommages économiques sans l'utilisation d'un quelconque outil de contrôle spécifique (Furlan et al. 2011).

Les données des études en Italie indiquent que le facteur le plus important influençant les niveaux de population de larves de taupin est la rotation des cultures (Furlan et Talon 1997 ; Furlan et al. 2000), et cela semble être la situation dans d'autres régions (Europe de l'Est, Hongrie) aussi bien que (par exemple Szarukán 1977). Ceci parce que les prairies et l'utilisation de la double culture dans le cycle de rotation peut entraîner des augmentations de population d'une espèce qui a la capacité de passer l'hiver à l'état adulte (Furlan 2005). Par conséquent, toute modification de ces facteurs peut perturber la dynamique de population des taupins. La modification des rotations, c'est à dire le retrait temporaire des cultures les plus adéquates pour le développement des larves de taupin, est une stratégie agronomique clé pour le contrôle de la population.

Modifier le calendrier du travail du sol, c'est à dire le choix d'une rotation de cultures (assolement) qui permet le travail du sol dans la phase la plus critique du cycle de vie du taupin (par exemple, lorsque la plupart des œufs sont pondus et les larves au premier stade sont dans le sol), peut également réduire les populations de larves de taupin (Furlan 1998, 2004). Le calendrier de travail du sol devrait être modulé en fonction des différences de cycle de vie parmi les principales espèces d'*Agriotes*. Modifier le calendrier d'irrigation pour assurer le séchage de la couche supérieure du sol juste après la ponte des œufs peut être également un moyen efficace de contrôler les populations d'*Agriotes* (Furlan 1998, 2004). Modifier le calendrier des semis peut également être efficace, tout en reconnaissant que la capacité d'une population à endommager les plantes sensibles varie selon la saison. Par exemple, les populations, même très élevées d'*A. ustulatus*, n'endommagent pas le maïs parce que la plupart des larves

sont dans une phase de non-alimentation à la fin du printemps (Furlan 1998). Par conséquent, le réglage du moment des semis, lorsque cela est possible, afin de coïncider avec les basses populations de ravageurs ou avec des étapes non néfastes de leur vie, peut être efficace. Un autre outil agronomique pour le contrôle de la population est la culture intercalaire dans laquelle les semis de blé d'hiver, ou d'une autre culture-piège, sont inclus dans les champs comme stratégie de contrôle pour attirer les ravageurs loin de la culture économique principale (Furlan et Toffanin 1994 ; Vernon et al. 2000).

#### *L'application des outils biologiques pour contrôler les populations de taupin*

Une série d'autres options possibles est disponible pour les champs infestés de populations de larves de taupin nocives lorsque le semis d'une culture sensible dans des champs non infestés est exclu (Furlan 2007). Les mécanismes et l'efficacité de certaines de ces différentes méthodes de contrôle ont été évalués avec précision dans des conditions contrôlées (Furlan et Toffanin 1998 ; Furlan et Campagna 2002), elles montrent actuellement que les plantes biocides et les farines de graines sont les seules options pratiques (Furlan et al. 2009b, 2010). Leur potentiel peut être considéré comme comparable à celui des néonicotinoïdes et d'autres insecticides chimiques qui peuvent remplacer les néonicotinoïdes (Ferro et Furlan 2012), surtout quand ils sont utilisés pour interférer avec le développement de la population et non pas simplement pour réduire les populations de larves de taupin juste avant ou pendant le semis (Furlan et al. 2009b, 2010).

#### *Appliquer des insecticides chimiques pour contrôler les populations de larves de taupin*

Dans les champs où les populations de larves de taupin dépassent les seuils économiques et que les alternatives agronomique et biologique ne sont pas réalisables, les insecticides de remplacement des néonicotinoïdes, tels que les pyréthrianoïdes et les organophosphates, sont disponibles (Wilde et al 2004 ; Ferro et Furlan 2012). Ils doivent être utilisés avec parcimonie, en conformité avec les meilleures pratiques pour les applications de pesticides. L'efficacité des insecticides du sol peut être influencée par le sol et les conditions météorologiques (par exemple la pluie lessivant la matière active de l'insecticide) laquelle peut entraîner une défaillance de protection des néonicotinoïdes et de leurs insecticides alternatifs (Ferro et Furlan 2012 ; Furlan et al. 2011, 2014). Aucune différence significative dans la lutte contre la larve de taupin entre les néonicotinoïdes et plusieurs autres insecticides n'a été reportée par Wilde et al. (2004) ; les essais en Italie menés sur une période de 10 ans suggèrent que la probabilité de défaillance est plus élevée pour certains insecticides de remplacement (Ferro et Furlan 2012 ; Furlan et al. 2011, 2014).

#### *Le contrôle de la Chrysomèle des racines du maïs (*Diabrotica virgifera virgifera*)*

Les dommages de la Chrysomèle des racines du maïs (WCR) occidentale au maïs en Europe est un risque seulement là où la

monoculture du maïs est adoptée, en particulier lorsque la culture est prolongée durant plusieurs années (Furlan et al. 2014 ; Baiser et al. 2005 ; Sivčev et al. 2009). Toutefois, les dommages économiques se produisent uniquement dans les zones où les populations de la WCR sont élevées. Là où le maïs est inclus dans une rotation, les populations de la WCR se maintiennent généralement en dessous d'un seuil économiquement important, et il y a peu de risques de dégâts importants aux cultures (Kiss et al. 2005 ; Meinke et al. 2009 ; Sivčev et al. 2009). Par conséquent, la IPM pour la WCR devrait être fondée sur une rotation systématique des cultures et soutenue par des informations sur le développement des ravageurs et les niveaux de population comme indiqué par la directive 2009/128/CE et confirmé par la recommandation 2014/63/UE de la Commission (sur les mesures pour contrôler *D. virgifera virgifera* Le Conte dans l'Union où sa présence est confirmée).

*Le suivi précis de la population de la WCR et la prévision des dommages.*

Des pièges appâtés et sans appât sont disponibles pour surveiller les niveaux de population de la WCR (Schaub et al. 2011). Les pièges les plus largement utilisés sans appât comprennent des pièges collants jaunes, ils sont facilement disponibles auprès de divers fabricants. Le piège collant le plus couramment utilisé pour l'évaluation du seuil est Pherocon AM® (PHAM). Les auteurs des États-Unis et de l'Europe ont prouvé qu'il y a une corrélation entre le nombre d'adultes capturés par les pièges collants jaunes (c.-à-d. Pham) et les dommages aux plantes de l'année suivante (Blandino et al. 2014 ; Boriani 2006 ; Hein et Tollefson 1985 ; Kos et al. 2014). Les auteurs américains ont déclaré que les seuils économiques seraient dépassés lorsque plus de 40 coléoptères/piège Pham/ semaine (6 coléoptères/piège Pham/ jour) sont capturés l'année précédente sur une période (environ sept jours) au cours des 3 dernières semaines d'août (Hein et Tollefson 1985). En Italie, le seuil était de 42 coléoptères/piège Pham/jour en moyenne sur une période de 6 semaines après le début du vol des adultes (Boriani 2006 ; Blandino et al. 2014). En Croatie, le seuil a été estimé à 41 adultes/piège Pham dans la semaine 31 (Kos et al. 2014). Les seuils économiques peuvent grandement varier selon les conditions climatique/agronomique et les prix du maïs et des insecticides (Oleson et al. 2005). Sous peu de stress (sol approprié avec suffisamment d'eau et d'approvisionnement en éléments nutritifs), le rendement du maïs n'est pas susceptible d'être considérablement réduit même avec une pression de population de la WCR entraînant un score de dommages aux racines de 1 sur l'échelle 0-3 (Oleson et al. 2005). En revanche, les taux faibles de blessures peuvent causer une baisse de rendement si les niveaux de stress élevés pour la culture du maïs se produisent (Oleson et al. 2005). Dans tous les cas, la probabilité qu'une réduction de rendement se produise est négligeable lorsque la pression de la population de la WCR est très faible (<0,3 score de lésion de la racine sur l'échelle 0-3, Furlan et al. 2014). Selon les données du réseau de surveillance par piège, des outils statistiques innovants (De Luigi et al. 2011) peuvent identifier avec certitude ou prédire les zones où les populations sont suffisamment élevées pour qu'elles réduisent le rendement.

### *Stratégies agronomiques pour contrôler les populations de la WCR*

Bien que la WCR soit arrivée il y a plus de 6 ans dans le sud de la Vénétie (De Luigi et al. 2011), où la rotation est dominante, les niveaux de population sont demeurés faibles et les dommages économiques n'ont pas été relevés, même dans les champs à proximité d'une monoculture de maïs (Furlan et al. 2014). Dans les régions de la Vénétie, où la rotation des cultures n'est pas courante, les niveaux moyens de la population de la WCR sont élevés et le risque de dommages aux racines est considérable. Le maïs en monoculture peut être mis en rotation avec n'importe quel autre type de culture différente du maïs. Même les espèces de graminées qui sont étroitement liées au maïs peuvent être utilisées comme une première ou une deuxième culture après une récolte d'hiver (blé d'hiver + de sorgho ou de ray-grass + sorgho). Le maïs lui-même peut être utilisé comme une deuxième récolte (par exemple le blé d'hiver + maïs) pour interrompre un cycle de la WCR, à condition qu'il soit semé après que les œufs de la WCR soient éclos (Davis et al. 1996).

Les résultats ci-dessus mentionnés suggèrent qu'une approche appropriée de la IPM serait de surveiller en continu les champs de maïs chaque année et quand les seuils de population de la WCR sont dépassés, de mettre en place une rotation du maïs avec une autre culture pour seulement 1 an suivie d'une surveillance ultérieure des cultures de maïs. La rotation périodique des cultures perturbe le cycle de vie de la WCR, maintient ses populations sous les seuils économiques, et typiquement exclut le besoin d'insecticides. Dans la pratique, le maïs peut être mis en rotation à différentes fréquences, même après plusieurs années de monoculture, et seulement lorsque la surveillance révèle que les niveaux de population de la WCR sont en augmentation. La rotation des cultures offre d'autres avantages agronomiques en plus de la gestion des populations d'insectes (Furlan et al. 2014 ; Saladini et al. 2009), augmentant ainsi l'incitation à mettre en œuvre cette pratique.

Le succès d'une rotation souple comme stratégie de lutte intégrée a également été confirmé par des simulations d'ensemble de vastes zones (métamodèles). Ces modèles ont montré que 100% de maïs en rotation n'est pas nécessaire pour maintenir les populations régionales de la WCR sous les seuils économiques, par exemple, l'interruption de la monoculture du maïs après 3 ans réduit la nécessité d'une rotation pour gérer avec succès la WCR à moins de 60% des champs de maïs (Szalai et al. 2014). L'utilisation de fréquences variables et de cultures variables en rotation peut aussi être importante lorsque, comme cela a été démontré aux États-Unis, une « variante de la WCR » s'est adaptée à la rotation des cultures et est en mesure, à des niveaux économiquement significatifs, de pondre ses œufs en dehors de la culture du maïs provoquant ainsi des dommages au maïs dans une simple rotation maïs-soja (Levine et al. 2002).

Dans les pays où elle est permise, une autre alternative agronomique importante est le maïs transgénique qui protège contre les dommages causés par la WCR parce que la protéine du *Bacillus thuringiensis* exprimée dans le maïs est toxique pour les larves de la WCR (Meissle et al. 2011 ; Vaughn et al. 2005). Son efficacité a été établie comme supérieure aux

insecticides néonicotinoïdes (Oleson et Tollefson 2005, 2006). Ce maïs transgénique doit être utilisé dans les stratégies de gestion de la résistance des insectes (Onstad et al. 2001) et être intégré à d'autres tactiques agronomiques pour maintenir les populations sous les seuils économiques pour le maïs « non transgénique ».

#### *L'application des outils biologiques pour contrôler les populations de la WCR*

Bien que la rotation semble être la mesure la plus appropriée pour maintenir les populations de la WCR en dessous des seuils économiques, des options efficaces de contrôle biologique sont également disponibles comme alternatives aux insecticides chimiques avec des nématodes entomopathogènes lesquels s'avèrent être un moyen très efficace pour supprimer les populations de la WCR dans les conditions de terrain (Kurtz et al. 2007 ; Toepfer et al. 2010, 2013). Inversement, le parasitoïde *Celatoria compressa* (diptères : Tachinidae) ne semble pas être adapté pour une application pratique à l'heure actuelle (Toepfer et Kuhlmann 2004 ; Kuhlmann et al. 2005 ; Zhang et al. 2003).

#### *Application d'insecticides chimiques pour contrôler les populations de la WCR*

Des études montrent que les traitements de semences néonicotinoïdes et les applications de sol utilisées comme traitement dans le sillon lors du semis n'interfèrent pas de façon significative avec les populations de la WCR (Furlan et al. 2006). Dans les situations où un processus de la IPM est encore insuffisant pour contrôler les dégâts aux cultures et où quelques champs de maïs nécessitent une protection insecticide, des insecticides de remplacement des néonicotinoïdes sont disponibles. Par exemple, les pyréthrianoïdes et les organophosphates peuvent être aussi efficaces que les néonicotinoïdes contre la WCR (Agosti et al. 2011 ; AA.VV. 2012 ; Blandino et al. 2013 ; Furlan et al. 2006 ; Waldron et al. 2002 ; Whitworth et Davis 2008) ou même plus efficaces (Oleson 2003 ; Oleson et Tollefson 2005). La protection contre la WCR par les insecticides est moins efficace que la protection par la rotation des cultures, et l'efficacité de l'insecticide peut être influencée par le sol et les conditions météorologiques et par la pression démographique de la WCR qui peut entraîner une défaillance de protection (Borioni 2008, données non publiées Furlan).

Les traitements du feuillage par des insecticides (par exemple avec des pyréthrianoïdes et les organophosphates) contre les coléoptères WCR peuvent parfois (i) protéger les soies de maïs d'un coléoptère s'ils sont appliqués avant la floraison, mais cela n'est nécessaire que si les populations de la WCR sont très élevées (Furlan, données non publiées) ce qui ne devrait pas être le cas lorsque les stratégies de lutte intégrée sont mises en œuvre ; et en fait (ii), réduire les niveaux de population et de pontes subséquentes des femelles. L'utilisation d'un modèle de développement (Nowatzki et al. 2002) peut aider à identifier la période où les traitements insecticides des feuillages peuvent réduire de manière significative la ponte des femelles. En outre, ce modèle de développement indique si le traitement pour contenir la pyrale du maïs (par exemple *Ostrinia nubilalis*) permet également de

réduire les effectifs d'adultes de la WCR qui conduiraient à des niveaux de population économiquement non supportables l'année suivante. Cependant, les traitements de feuillage doivent être utilisés avec prudence et seulement lorsque d'autres options dans le cadre d'une approche de lutte intégrée n'ont pas réussi ou ne sont pas réalisables car une utilisation d'insecticides à grande échelle peut conduire à (i) la résistance, comme cela a déjà été démontré avec les larves de la WCR (Ball et Weekman 1962) et les coléoptères adultes (Meinke et al. 1998), (ii) des infestations de ravageurs secondaires tels que les acariens rouges, et (iii) d'autres impacts environnementaux possibles.

Basées sur les principes de la lutte intégrée et les preuves fournies par de nombreux essais de terrain en Italie décrits ci-dessus, il existe des preuves solides que les néonicotinoïdes ne sont pas nécessaires pour une gestion efficace des dommages de la WCR du maïs. Ces principes et ces solutions alternatives ont également été appliqués avec succès aux Etats-Unis en vertu d'un régime de lutte antiparasitaire à l'échelle régionale pour le contrôle de la chrysome des racines dans les champs de maïs (français et al. 2007).

#### *Contrôle du ver-gris noir de la Noctuelle baignée (Agrotis ipsilon)*

La majorité des attaques sur le maïs dans le nord de l'Italie est causée par une espèce invasive, le ver-gris noir (BCW) *A. ipsilon* Hufnagel (Furlan et al. 2001c). Cette espèce ne peut normalement pas hiverner dans les conditions de l'Italie du Nord ni dans les autres régions du Nord de la province (Zangheri et al. 1998), les épidémies sont plutôt dues aux invasions par des vols massifs en provenance des régions méridionales. Les applications d'insecticides au moment du semis ne sont pas recommandées parce le BCW ne peut être détectée au moment des semences et parce que de nombreux insecticides appliqués à la culture deviennent moins efficaces au fil du temps, bien que des flambées se produisent souvent plusieurs jours après le semis (Furlan et al. 2001c ; Zangheri et Ciampolini 1971 ; Zangheri et al. 1984) résultant d'un contrôle insuffisant (Furlan 1989 ; Shaw et al. 1998). Cependant, il a été montré aux Etats-Unis que les traitements de secours (applications post-émergence), à l'aide d'insecticides non néonicotinoïdes, peuvent être très efficaces (près de 100% de contrôle, Shaw et al. 1998).

Une approche de lutte intégrée pour la gestion du BCW est basée sur une combinaison de surveillance à grande échelle par pièges à phéromone pour détecter les niveaux de population, par l'analyse des vents du sud qui peuvent transporter des papillons de nuit, et par un modèle de développement (Programme d'Alerte du Ver-gris noir, Furlan et al. population 2001c; Douches 1997). Une surveillance de forte intensité de la population au niveau local (par exemple le dépistage dans les champs cultivés) n'est effectuée que lorsque la surveillance à l'échelle régionale a établi qu'il existe un risque. Lorsque la surveillance du piégeage et l'analyse du vent ont établi s'il y a et où des papillons sont présents, l'accumulation des degrés-jours est calculée, de préférence avec la température du sol (chaque jour : (température maximale - température minimale) / 2-10,4°C seuil de température développemental, Luckmann et al. 1976). Une fois que la date du risque prévu est atteinte (176° -

accumulation-jour soit la quatrième forme du stade larvaire dans les champs), les larves de la BCW des zones à risque doivent être surveillées et contrôler de sorte que les insecticides appropriés, à risque réduit, puissent être utilisés en post-levée, dans le cas où le montant moyen des cultures touchées dépasse le seuil de 5%. Cela réduit la quantité globale d'insecticide nécessaire, et la validité de cette approche a été testée et démontrée aux Etats-Unis et en Italie depuis plusieurs années (Furlan et al. 2001c ; Douches 1997).

Des preuves existent que certains hybrides de maïs transgéniques peuvent être potentiellement protégés contre la BCW parce que la protéine de *B. thuringiensis* exprimée dans le maïs est toxique pour BCW, mais cela peut ne pas être aussi efficace que les traitements de secours avec des insecticides appropriés (Kullik et al. 2011). En outre, l'utilisation du maïs génétiquement modifié pour le contrôle de la BCW, comme il a été suggéré pour le contrôle de la WCR, doit être décidé quand il n'est pas possible de savoir si le seuil de population à risque économique de la BCW est réellement présent ou en développement. Cette contrainte rend l'option de maïs transgénique d'une utilité limitée dans une approche de lutte intégrée contre les BCW.

Nous suggérons que les stratégies de lutte intégrée pour principaux insectes nuisibles que nous illustrons dans un système de production européen de maïs peuvent aussi bien être applicables à la production de maïs dans d'autres pays avec quelques adaptations où d'autres ravageurs mineurs sont présents. Le processus global pour les trois principaux ravageurs dont nous discutons peut être résumé comme suit : pas de traitements chimiques prophylactiques réalisés sur les semis de maïs, contrôler le ver-gris noir (la BCW) là et si les seuils basés sur le « Programme d'Alerte du Ver-gris noir » complétés par le dépistage quand et où cela est nécessaire sont dépassés, garder la WCR sous contrôle principalement par des stratégies agronomiques et des traitements contre les larves de taupin restreints à la partie mineure des champs où des populations dépassent les seuils détectés de la procédure de surveillance décrite ci-dessus. Le coût et le risque de dommages aux cultures d'une approche de lutte intégrée peut être efficacement réduit par un système de fonds commun de placement (un type spécial d'assurance-récolte directement géré par les associations d'agriculteurs) qui assure à taux garantis un revenu agricole dans tous les cas.

### **Étude de cas de lutte antiparasitaire dans les forêts canadiennes**

L'agrile du frêne, *Agrilus planipennis* (Coleoptera : Buprestidae), est un insecte ravageur foreur exotique invasif qui est de plus en plus une menace pour la santé et la survie du frêne (*Fraxinus* spp.) arbre de la grande région de l'est de l'Amérique du Nord (Poland et McCullough 2006 ; McCullough et Siegert 2007). Toutes les espèces nord-américaines de frênes sont sensibles à l'agrile du frêne, leur mortalité survenant rapidement après l'infestation. Le frêne est une espèce importante des forêts urbaines, mais il peut aussi dominer dans les paysages associés à l'eau, tels que les zones (littoral) tampons riveraines le long des fossés de ruissellement agricoles et des ravins, les mares temporaires et les zones humides, et à l'amont ou dans les zones des source d'eaux. À cet égard, le frêne peut être une espèce forestière clé de voûte

qui influence ou régule la forêt riveraine et la dynamique des écosystèmes aquatiques, le cycle des éléments nutritifs au travers du couvert de la canopée et des apports de feuilles à la litière du sol des forêts et des plans d'eau (Ellison et al. 2005 ; Gandhi et Herms 2010 ; Fleur et al. 2013). Par conséquent, la perte rapide du frêne à partir de ces zones écologiquement sensibles peut poser un risque pour les habitats critiques, la biodiversité et des services écosystémiques importants.

Comme première étape vers la gestion les dommages causés par l'agrile du frêne, lorsque les populations de ravageurs commencent à augmenter, trois options de gestion ont été proposées pour ralentir la propagation et l'infestation par l'insecte. Ce sont (i) la coupe et l'enlèvement des frênes vivants à l'avant de l'infestation (ii), le maintien d'une ceinture de frênes vivants sur le bord d'attaque d'une infestation, et (iii) l'application d'un insecticide systémique efficace (McCullough et Poland 2010 ; Mercader et al. 2011). Enlever intentionnellement certains des frênes vivants avant ou dans les premiers stades de l'infestation réduit le phloème disponible pour le développement des larves. Cette approche fournit également des opportunités pour le redéveloppement de la canopée forestière pour d'autres espèces d'arbres à travers la régénération naturelle ou une stratégie de sous-plantation pour minimiser les impacts de la perte soudaine des frênes due à l'infestation par l'agrile du frêne (Streit et al. 2012). Une ceinture de frênes vivants sur le bord d'attaque d'une infestation met en évidence l'arbre qui agit alors comme un arbre piège vers lequel les femelles pondueuses sont attirées en grand nombre, probablement en raison de l'augmentation des vols des coléoptères attirés et/ou des indices visuels (McCullough et al. 2009). Ces arbres pièges sont ensuite détruits avant le développement larvaire, après avoir concentré la cohorte à venir de l'agrile du frêne sur une zone spécifique, réduisant ainsi la population locale.

La troisième option de gestion, pour réduire la mortalité des arbres et ralentir la propagation de l'agrile du frêne, est l'application d'un insecticide systémique. Un insecticide systémique est bien adapté pour le contrôle de cet insecte ravageur parce que l'étape de vie dommageable de l'organisme nuisible est celle les larves se nourrissant du phloème. Parmi les insecticides systémiques qui se sont montrés efficaces contre l'agrile du frêne figure l'imidaclopride, un néonicotinoïde (Poland et al. 2006). Les applications aux arbres peuvent être faites par des injections dans le sol autour de la base de chaque arbre ou par des injections directs dans les tiges ou dans le tronc des arbres. Cependant, les études de terrain et de laboratoire au Canada ont montré que les feuilles mortes d'automne des arbres traités à l'imidaclopride pouvaient contenir des résidus qui posent un risque de préjudice pour les organismes décomposeurs aquatiques et terrestres au travers d'effets sublétaux d'inhibition alimentaire (Kreutzweiser et al. 2007, 2008a, 2009). Ils ont en outre montré que les concentrations réalistes d'imidaclopride dans les sols et l'eau posent un risque direct d'effets nocifs sur les vers de terre (Kreutzweiser et al. 2008b) et les invertébrés aquatiques (Kreutzweiser et al. 2008c). Ces résultats, couplés à l'engagement d'adopter une approche de lutte intégrée dans le cas de l'agrile du frêne, ont incité à examiner des alternatives à l'imidaclopride pour le contrôle de la pyrale du frêne.

Dans un contexte d'insectes forestiers ravageurs, une approche de la IPM examine et applique une combinaison des

méthodes de gestion à l'aide de toutes les informations disponibles pour prendre une décision de gestion éclairée. Cette approche actuellement appliquée au contrôle de l'agrile du frêne au Canada comprend des études sur la biologie et le comportement du ravageur pour faciliter la lutte biologique (Lelito et al. 2013), des pièges efficaces et pratiques pour les adultes très mobiles pour suivre les infestations (Grant et al. 2010 ; Ryall et al. 2013), l'amélioration des méthodes de détection pour localiser précocement les infestations et les points chauds potentiels (Ryall et al. 2011), et des stratégies alternatives de lutte antiparasitaire. Ici, nous décrivons brièvement quelques-unes des solutions alternatives à l'imidaclopride qui ont été explorées pour le contrôle de l'agrile du frêne au Canada.

#### *Les insectes parasites exotiques*

Trois espèces d'hyménoptères parasitoïdes (guêpes parasites) des larves ou des œufs de l'agrile du frêne, ont été trouvées en Chine, et celles-ci sont élevées aux États-Unis comme agents de contrôle biologiques potentiels (Lyon 2013). L'accent mis sur la recherche, l'importation et l'élevage de parasitoïdes exotiques, avait pour objectif la sélection d'espèces qui montrent un degré élevé de spécificité de l'hôte. Les trois espèces, Braconidae : *Spathius Agrili*, Eulophidae : *Tetrastichus planipennisi* et Encyrtidae : *Oobius Agrili*, ont été libérées chaque année depuis 2007 dans le nord des États-Unis en vertu des règlements de lutte biologique (Gould et al. 2012) et leurs populations ont été surveillées. Des premières indications, au moins une espèce (*T. planipennisi*) a réussi à établir une population mesurable et a le potentiel pour commencer à contrôler les infestations de l'Agriote du frêne (Duan et al. 2013). *T. planipennisi* a été libéré sur deux sites au Canada en 2012 et le suivi est en cours pour déterminer le succès de l'établissement de la population (B. Lyons, communication personnelle).

#### *Les insectes parasites autochtones*

Des enquêtes ont été conduites dans des zones infestées par l'agrile du frêne au Canada pour déterminer si des parasitoïdes indigènes étaient actifs sur, ou associés à, l'insecte ravageur invasif. Plusieurs espèces de parasitoïdes hyménoptères ont été trouvées dans ces enquêtes et ont été piégées et élevées afin de déterminer un taux de parasitisme pour chaque espèce sur l'agrile du frêne. Parmi ceux-ci, seuls quelques-uns (par exemple Chalcididae : *Phasgonophora sulcata*, Braconidae : *Atanycolus hicoriae*) ont montré des taux relativement élevés de parasitisme sur l'agrile du frêne et tenu certaines promesses comme agent de contrôle biologique indigène (Lyon 2010). Des efforts sont en cours pour déterminer le potentiel des parasitoïdes indigènes pour aider les stratégies de lutte biologique en utilisant les guêpes parasites. Ceci inclut le développement de techniques d'élevage et de libération ou, autrement, d'augmenter les populations naturelles de parasitoïdes indigènes prometteuses. L'utilisation combinée de parasitoïdes exotiques et indigènes, comme agents de lutte biologique, peut éventuellement réussir en aidant à gérer les populations d'insectes du frêne, mais ils sont encore dans les premiers stades de développement.

#### *Les pathogènes fongiques autochtones*

L'utilisation de champignons entomopathogènes indigènes comme agents de lutte biologique contre l'agrile du frêne est à l'étude au Canada. Le dépistage de cadavres pré-nymphales et d'adultes de populations d'agrile du frêne établi indique que le champignon pathogène naturel le plus important de l'agrile du frêne est *Beauveria* spp. (Kyei-Poku et Johny 2013). Il fut ensuite isolé et caractérisé, et il a été déterminé que l'isolat L49-1AA de *Beauveria bassiana* était le plus prometteur en termes de virulence contre l'agrile du frêne (Johny et al. 2012). Un champignon entomopathogène efficace exige un système de diffusion efficace de transmission du champignon chez les hôtes sensibles de la population de ravageurs. Lyons et al. (2012) ont développé un système d'autocontamination par piège pour l'agrile du frêne dans lequel les adultes sont contaminés par *B. bassiana*, et ils ont eu la preuve que ce système a facilité la transmission horizontale chez les adultes.

Les entomopathogènes semblent prometteurs comme agents biologiques de contrôle et des méthodes pour leur dépistage, leur caractérisation et leur diffusion ont été développées. Cependant, il y a encore quelques limites concernant cette approche pour le contrôle à grande échelle de l'agrile du frêne. Les entomopathogènes en général ne semblent pas être des facteurs importants qui régulent les populations d'agrile du frêne (Liu et al. 2003) et la biologie et le comportement de l'organisme nuisible ne se prêtent pas à une transmission fongique efficace. En outre, de nombreux entomopathogènes, y compris *B. bassiana*, ne sont pas particulièrement spécifiques de l'hôte, et, s'ils sont diffusés comme agents de lutte biologique, ils peuvent présenter des risques pour les insectes non-cibles.

#### *Une alternative, un insecticide systémique non persistant*

Plusieurs insecticides systémiques ont été testés pour leur efficacité contre l'agrile du frêne, l'efficacité de leur translocation dans les frênes et leur innocuité pour l'environnement. Le plus prometteur d'entre eux est l'azadirachtine. L'azadirachtine est un composé naturel extrait des graines de l'arbre neem, *Azadirachta indica*, et il a été montré qu'il a un effet anti-appétent, anti-fertilité, et des propriétés insecticides de régulation de la croissance contre une gamme d'insectes nuisibles (Schmutterer 1990). Des études antérieures dans un contexte forestier canadien ont montré que l'azadirachtine n'était pas persistant dans l'environnement (eau, sols, feuillage) et ne présente pas de risque significatif pour la plupart des invertébrés non-cibles à des concentrations prévues dans l'environnement (Thompson et Kreuzweiser 2007), et donc, il a été considéré comme un bon candidat pour le contrôle de l'agrile du frêne. L'azadirachtine a été injecté dans des troncs de frênes infestés et s'est révélé très efficace pour inhiber le développement des larves et des adultes émergents et, par conséquent, efficace pour protéger les frênes de l'agrile du frêne (McKenzie et al. 2010). Des essais ultérieurs sur le terrain ont confirmé que l'azadirachtine est facilement absorbé après l'injection dans la tige des frênes, rapidement transloqué à travers l'arbre et le feuillage, et se dissipe généralement dans des limites proches de la détection dans les feuilles mortes à l'automne (Grimalt et al. 2011). Nous avons effectué une série de tests sur espèces



non-cibles suivant les protocoles utilisés pour évaluer les effets de l'imidaclopride et avons montré que l'azadirachtine dans les feuilles mortes d'automne ne pose pas de risque mesurable de préjudice pour les invertébrés décomposeurs terrestres ou aquatiques, même en utilisant intentionnellement des taux d'application élevés (Kreutzweiser et al. 2011).

## Conclusions

Ces études de cas dans l'agriculture et la foresterie fournissent des exemples de solutions alternatives raisonnables et viables aux insecticides néonicotinoïdes pour le contrôle des insectes nuisibles. Dans le secteur agricole il est de plus en plus clair que les traitements prophylactiques avec les insecticides néonicotinoïdes ne sont souvent pas nécessaires et entraînent une contamination de l'environnement inutile augmentant ainsi les risques pour les organismes non-cibles (van der Sluijs et al. 2014) et peuvent augmenter la probabilité du développement de résistance chez les insectes ravageurs (Szendrei et al. 2012). Comme alternative, une approche de la IPM devrait envisager toutes les informations pertinentes et disponibles pour prendre des décisions de gestion éclairées, offrant des options de lutte contre les ravageurs en fonction des besoins réels. Quand un besoin est identifié, les options de lutte antiparasitaire qui se passent de l'utilisation des insecticides néonicotinoïdes sont variées et peuvent inclure la diversification et la modification de la rotation des cultures, les dates de semis, le travail du sol et l'irrigation ; l'utilisation des espèces de cultures moins sensibles dans les zones infestées ; l'application des agents de lutte biologique ; l'usage d'autres insecticides à risque réduit. Ces options sont souvent plus efficaces lorsqu'elles sont appliquées en combinaison dans une stratégie globale de lutte intégrée.

L'adoption généralisée d'une approche de lutte intégrée à la gestion des insectes nuisibles, nécessitera une éducation et une acceptation par les régulateurs et les praticiens. A titre d'exemple, une incitation particulièrement prometteuse de mise en œuvre de la IPM en Italie est un régime d'assurance de rendement (fonds commun de placement) pour les agriculteurs, dans laquelle la prime d'assurance requise est généralement inférieure aux coûts de l'insecticide (Furlan et al. 2014). Une contribution publique initiale à ce genre de régime d'assurance-récolte pour compenser les risques de mise en œuvre d'une IPM serait d'encourager l'adoption plus large de stratégies de lutte intégrée.

Nous reconnaissons que l'adoption de solutions alternatives aux néonicotinoïdes et la modification des pratiques agricoles pour une approche de lutte intégrée est particulièrement difficile là où à grande échelle les opérations agricoles rentables sont à l'échelle du paysage. Au cours des deux dernières décennies la tendance vers les grandes exploitations commerciales agricoles a mis l'accent sur les économies d'échelle et des efficacités (CIES Morrison Paul et al. 2004), ce qui a encouragé l'utilisation de la protection des cultures à titre prophylactique par l'usage des néonicotinoïdes pour réduire les risques dus aux ravageurs. Le déplacement de la production agricole d'une dépendance aux insecticides prophylactiques à un modèle de la IPM et l'utilisation des options de lutte antiparasitaire de remplacement prendra un certain temps et nécessitera des investissements dans la recherche et la vulgarisation publique pour la promotion des

systèmes agricoles économiquement compétitifs et durables (Meissle et al. 2010). Cependant, maintenir le cap de l'utilisation répandue et prophylactique des néonicotinoïdes augmente le risque de graves dommages à l'environnement (van der Sluijs et al. 2014) et peut à terme menacer des fonctions et des services écosystémiques importants qui favorisent la sécurité alimentaire (Chagnon et al. 2014). La mise en œuvre de pratiques agricoles durables à l'échelle régionale bénéficierait d'un point de vue du paysage et de l'adoption des principes de l'architecture du paysage basée sur des incitations ou des règlements (Dale et al. 2013).

Bien que certaines des options pour la lutte antiparasitaire alternative que nous illustrons dans ces études de cas ont été démontrées et testées avec succès sur le terrain, d'autres sont en cours de développement. La poursuite de la recherche de solutions alternatives est justifiée, mais tout aussi urgente est la nécessité du transfert des technologies et la formation à la lutte intégrée des agriculteurs, et d'autres praticiens, par des organismes publics et la nécessité de politiques et de règlements pour encourager l'adoption de stratégies de lutte intégrée et les options de lutte antiparasitaire alternatives.

Traduction Christian Pacteau