

Les biopesticides, compléments et alternatives aux produits phytosanitaires chimiques (synthèse bibliographique)

Jovana Deravel, François Krier, Philippe Jacques

Université Lille 1, Sciences et Technologies (USTL). Polytech'Lille/IUT A. Laboratoire des Procédés Biologiques, Génie Enzymatique et Microbien (ProBioGEM). UPRES-EA 1026. F-59655 Villeneuve d'Ascq Cedex (France).
E-mail : Philippe.Jacques@polytech-lille.fr

Reçu le 13 juillet 2013, accepté le 10 décembre 2013.

Les biopesticides, « organismes vivants ou produits issus de ces organismes ayant la particularité de supprimer ou limiter les ennemis des cultures » sont utilisés depuis des siècles par les fermiers et paysans. De nos jours, ils sont classés en trois grandes catégories selon leur origine (microbienne, végétale ou animale) et présentent de nombreux avantages. Ils peuvent être aussi bien utilisés en agriculture conventionnelle qu'en agriculture biologique, certains permettent aux plantes de résister à des stress abiotiques et d'une manière générale, ils sont moins toxiques que leurs homologues chimiques. Même s'ils ont souvent la réputation d'être moins efficaces que ces derniers, les biopesticides sont l'objet d'un intérêt croissant de la part des exploitants, notamment dans le cadre de stratégies de lutte intégrée. La mise sur le marché des biopesticides est facilitée dans certaines régions comme les USA, alors que dans d'autres comme l'Europe de l'Ouest, les processus d'homologation sont longs et coûteux. Le développement futur des biopesticides est dépendant de nombreux facteurs, comme les politiques gouvernementales tant en matière de soutien à la recherche que de réglementation, les stratégies des grands industriels du secteur phytosanitaire et l'évolution des choix des consommateurs.

Mots-clés. Biopesticides, lutte intégrée, réglementation.

Biopesticides, a complementary and alternative approach to the use of agrochemicals. A review. Biopesticides are living organisms or products derived from them, which have the ability to suppress or to reduce pests. Biopesticides have been used for centuries by farmers and these products offer many advantages. Today, biopesticides are classified into three groups according to their origin (microbial, plant or animal). They can be used both in conventional agriculture and in organic farming. Some biopesticides allow plants to withstand abiotic stress and, in general, they are less toxic than their chemical counterparts. Although they often have the reputation for being less effective than chemical pesticides, biopesticides are the subject of growing interest among farmers, particularly in the context of Integrated Pest Management strategies. The marketing of biopesticides is facilitated in some regions, such as the USA, while in others, such as Western Europe, the approval process is long and expensive. The future development of biopesticides depends on many factors, such as government policies both in terms of research support and in regulating agribusiness strategies, and the evolution of consumer choice.

Keywords. Biopesticides, integrated control, regulations.

1. INTRODUCTION

L'utilisation des produits phytosanitaires chimiques a considérablement diminué la pénibilité du travail au champ tout en permettant une production suffisante et à moindre coût pour satisfaire aussi bien le marché que le consommateur. Dans une publication récente, les pertes de production, avant récolte, des cultures mondiales majeures dues aux ravageurs (insectes, micro-organismes) et aux adventices sont estimées à 35 % (Popp et al., 2013). Sans une protection efficace des cultures, ces pertes seraient de 70 % (Popp et al., 2013). À en croire les tenants de l'industrie,

la diminution de la production mondiale de denrées alimentaires causée par la non-utilisation des produits phytosanitaires pourrait être à l'origine de famines chez les populations déjà fragilisées.

Tous ces arguments pris en compte, il est indéniable que les produits phytosanitaires chimiques présentent de nombreux avantages. Cependant, leur utilisation peut être la cause de problèmes environnementaux et de santé publique, d'autant plus que les risques inhérents à certains d'entre eux sont mal évalués. Consciente de ce problème, l'Union européenne (UE) a pris un certain nombre de mesures. Ainsi, dans un souci d'amélioration, la Directive européenne 91/414/

CEE a été abrogée par le règlement (CE) 1107/2009 (Journal officiel de l'Union européenne, 2009a). Cette directive visait à harmoniser les procédures de mise sur le marché des produits phytosanitaires et établissait la liste des substances autorisées ainsi qu'un programme d'évaluation de celles déjà sur le marché. Dans ce nouveau règlement, les critères d'approbation des substances actives sont plus stricts que précédemment. Les co-formulants entrant dans la composition des produits sont soumis à des procédures d'homologation similaires aux substances actives et les substances présentant un risque élevé sont remplacées par leurs homologues ayant un faible risque. De même, une autre directive, la Directive 128/2009/CE, adoptée le 21 octobre 2009, rend obligatoire la protection intégrée des cultures d'ici 2014 (Journal officiel de l'Union européenne, 2009a). Dans cette directive, chaque pays membre de l'UE doit mettre en place son propre plan d'action avec des objectifs quantitatifs et définis dans le temps pour limiter l'impact des produits phytosanitaires chimiques sur la santé et sur l'environnement.

En France, des mesures sont prises pour encadrer l'utilisation des produits phytosanitaires. Ainsi, le plan « Écophyto 2018 » débattu lors du Grenelle Environnement de 2007, vise à réduire de 50 % la quantité de produits phytosanitaires d'origine chimique d'ici 2018 (<http://agriculture.gouv.fr/ecophyto>).

En Belgique, un Programme de Réduction des Pesticides et Biocides (PRPB) a été établi en 2005. Ce programme couvrait la période allant de 2005 à 2010 et visait à diminuer, pour l'année 2012, de 25 % l'impact des pesticides agricoles sur l'environnement et de 50 % l'impact environnemental des autres pesticides et biocides. Ces objectifs, fixés pour 2012, faisaient intervenir plusieurs acteurs comme les pouvoirs publics, les organisations professionnelles ainsi que les associations de défense des consommateurs et de l'environnement. La Belgique souhaite continuer à se conformer à la législation européenne en mettant notamment en place un plan d'action national (Nationaal Actie Plan d'Action National, NAPAN) afin de poursuivre les actions menées au sein du PRPB (www.health.belgium.be/eportal/Environment/Chemicalsubstances/PRPB/index.htm?fodnlang=fr#.Ul_atlDgSH4).

L'un des outils permettant la réduction des pesticides à usage agricole et promu aussi bien par le plan Écophyto 2018 que par le PRPB est l'utilisation de produits phytosanitaires d'origine biologique.

2. LES DIFFÉRENTES CATÉGORIES DE BIOPESTICIDES

Le concept de « biopesticide » n'est pas nouveau. Dès le 7^e siècle av. J.-C., des fermiers chinois utilisaient

des plantes comme *Illicium lanceolatum* pour protéger leurs cultures contre les insectes (Leng et al., 2011). De même, au Moyen-Âge, des végétaux comme les aconits étaient utilisés contre les rongeurs et des récits indiens datant du 17^e siècle rapportent l'utilisation de racines de *Derris* et de *Lonchocarpus* pour leurs propriétés insecticides. De nos jours, plusieurs biopesticides sont commercialisés. Une définition adéquate regroupant les diverses origines de ces produits et retraçant leur histoire s'impose. Ainsi, même s'il n'existe aucune définition officielle, dans le domaine de l'agriculture, les biopesticides pourraient être définis de la manière suivante : « Organismes vivants ou produits issus de ces organismes ayant la particularité de limiter ou de supprimer les ennemis des cultures. » (Thakore, 2006).

Les produits considérés comme des biopesticides par les agences de réglementation européennes et mondiales sont d'origines diverses. Ils peuvent être classés en trois grandes catégories, selon leur nature : les biopesticides microbiens, les biopesticides végétaux et les biopesticides animaux (Chandler et al., 2011 ; Leng et al., 2011).

2.1. Biopesticides microbiens

Cette catégorie comprend les bactéries, champignons, oomycètes, virus et protozoaires. L'efficacité d'un nombre important d'entre eux repose sur des substances actives dérivées des micro-organismes. Ce sont, en principe, ces substances actives qui agissent contre le bio-agresseur plutôt que le micro-organisme lui-même.

Les bactéries. Les biopesticides à base de *Bacillus thuringiensis* sont les plus commercialisés. Ils ont une action insecticide. *Bacillus thuringiensis* est une bactérie à Gram⁺ qui produit, durant sa phase stationnaire de croissance, des protéines cristallines appelées delta-endotoxines ou pro-toxines Cry. Ces protéines sont libérées dans l'environnement après la lyse des parois bactériennes lors de la phase de sporulation et sont actives, une fois ingérées par les ravageurs, contre les lépidoptères, les diptères et les larves de coléoptères (Rosas-Garcia, 2009).

Des espèces bactériennes du genre *Bacillus* utilisant des mécanismes d'action autres que celui employé par *B. thuringiensis* peuvent également protéger les plantes. Il y a, parmi ces espèces, des souches de *Bacillus licheniformis*, *Bacillus amyloliquefaciens* ou *Bacillus subtilis*. *Bacillus amyloliquefaciens* et *B. subtilis* sont capables de coloniser les racines des plantes et de produire des molécules de nature lipopeptidique qui sont les surfactines, les iturines et les fengycines. Ces dernières peuvent soit activer les défenses des plantes, soit avoir un effet antibactérien ou antifongique direct (Pérez-Garcia et al., 2011).

Des bactéries appartenant à d'autres genres que le genre *Bacillus* ont également été développées en tant que biopesticides. Ainsi, la souche *Pseudomonas chlororaphis* MA342 est utilisée dans la prévention et le traitement de certains champignons des graines de céréales comme *Drechslera teres*, agent de l'helminthosporiose de l'orge (Tombolini et al., 1999). *Pseudomonas chlororaphis* MA342 protège également le blé et le seigle contre la fusariose et la septoriose. Plusieurs modes d'action sont proposés pour justifier son efficacité. Cette bactérie pourrait agir contre les champignons phytopathogènes par antibiose directe, par concurrence spatiale et nutritive ou en activant les défenses des plantes (Boulon, 2010).

Les virus. Les Baculoviridae sont des virus à double brins d'ADN circulaire, ayant un génome compris entre 100 et 180 kb, protégés par une paroi protéique (Chen et al., 2002). Ils infectent les arthropodes insectes ou larves. Ils représentent un faible risque sanitaire car aucun virus similaire n'a, à l'heure actuelle, été répertorié dans l'infection des vertébrés ou des plantes. Cette propriété les rend particulièrement intéressants pour une utilisation en qualité de bio-insecticide, d'autant plus qu'ils peuvent tuer leur hôte en quelques jours. Ces virus sont classés en fonction de la morphologie particulière de leur corps d'inclusion. Ainsi, on retrouve les *Granulovirus*, comme *Cydia pomonella granulosis*, inclus dans des granules de forme ovale ou ovoïde et les nucleopolyhedrovirus, comme *Helicoverpa zea* (HzSNPV) et *Spodoptera exigua nucleopolyhedrosis* qui sont inclus dans des polyèdres de forme arrondie, cubique ou hexagonale (Chen et al., 2002). Les nucleopolyhedrovirus infectent les larves de lépidoptères selon un mode atypique. En effet, deux formes virales, génétiquement identiques mais structurellement différentes, sont nécessaires pour avoir un cycle complet d'infection. La forme dite « virion inclus » infecte les cellules de l'intestin moyen après ingestion par l'hôte. Une forme dite « virion bourgeonnant » transmet l'infection de cellule en cellule. Les corps d'inclusions sont composés de protéines cristallines qui protègent les virions des dégradations pouvant être causées par l'environnement, mais sont dissoutes par le pH alcalin de l'estomac des larves. Une fois les protéines cristallines dissoutes, les virions sont libérés. L'infection primaire qui débute dans l'intestin moyen produit les formes bourgeonnantes qui progressent de la membrane basale jusqu'aux tissus de l'hôte. Lors de cette progression, des formes virions bourgeonnants et virions inclus sont produites. La propagation dure environ 4 jours. Les tissus meurent et se liquéfient. Cette liquéfaction, caractéristique des maladies provoquées par une infection aux nucleopolyhedrovirus, libère des millions de formes incluses qui infectent les nouveaux hôtes (Washburn et al., 2003).

Les champignons. Outre les bactéries et les virus, certains champignons présentent des activités contre les bio-agresseurs et sont exploités en tant que biopesticides. *Coniothyrium minitans* est connu pour parasiter les champignons du genre *Sclerotinia* spp. Ce genre fongique se retrouve dans le sol et est à l'origine de la maladie appelée pourriture blanche qui peut affecter de nombreuses cultures dont la carotte, le haricot, le colza ou le tournesol. *Coniothyrium minitans* est connu pour pénétrer dans les sclérotés de *Sclerotinia sclerotiorum* soit par des craquelures situées à l'extérieur de cette forme de conservation du champignon, soit en s'introduisant par l'écorce extérieure en suivant une voie intercellulaire. Il poursuit ensuite son chemin en intracellulaire en pénétrant le cortex et la médullaire. Le parcours intracellulaire de *C. minitans* est possible car il produit des enzymes de dégradation des parois telles que les chitinases ou les β -1,3 glucanases. En plus de ces enzymes extracellulaires, diverses molécules pouvant intervenir dans les mécanismes d'action contre *Sclerotinia* spp. ont été identifiées dans des cultures de *C. minitans*. Parmi ces molécules, il y a des 3(2H)-benzofuranones, des chromanes, des métabolites antifongiques ainsi que la macrosphelide A connue pour inhiber l'adhésion des cellules de mammifères et qui, à de faibles concentrations, inhibe la croissance de *Sclerotinia sclerotiorum* et de *Sclerotinia cepivorum* (McQuilken et al., 2003).

Plusieurs souches du champignon filamenteux du genre *Trichoderma* spp. sont utilisées pour la protection biologique des plantes. Elles ont généralement une activité antifongique contre plusieurs pathogènes du sol ou contre des pathogènes foliaires (Dodd et al., 2003). *Trichoderma atroviride* est notamment utilisée pour la protection biologique de la vigne (Longa et al., 2009). L'activité de bio-contrôle de cette souche est attribuée à plusieurs mécanismes d'action qui agissent en synergie. Parmi ces mécanismes d'action, il y a la compétition pour les nutriments, l'antibiose, ou la production d'enzymes spécifiques de dégradation des parois cellulaires comme les chitinases ou protéases (Brunner et al., 2005).

En provoquant des pertes totales de cultures estimées à près de 10 %, les nématodes du genre *Meloidogyne* spp. sont les plus destructeurs au monde (Anastasiadis et al., 2008). Les nématicides chimiques les plus efficaces contre eux ont été progressivement retirés du marché à cause de leur impact sur l'environnement (Anastasiadis et al., 2008). Le champignon *Paecilomyces lilacinus* est l'un des produits alternatifs les plus étudiés dans la lutte biologique contre ces nématodes. Il a la capacité d'infester plusieurs phases de développement du parasite. Il est particulièrement connu pour avoir des propriétés ovicides. *Paecilomyces lilacinus* pénètre

dans les œufs de nématodes en sécrétant des chitinases et protéases (Dong et al., 2007). Il peut également infester les nodules racinaires où se trouvent ces œufs. Les hyphes fongiques déjà formées peuvent s'introduire dans les nématodes adultes *via* leurs orifices naturels. Dans tous les cas d'infestation, *Paecilomyces lilacinus* se nourrit des tissus des nématodes pour pouvoir se développer (www.prophyta.de/fr/protection-des-plantes/anti-nematicide/mode-operatoire/).

2.2. Biopesticides végétaux

Les plantes produisent des substances actives ayant des propriétés insecticides, aseptiques ou encore régulatrices de la croissance des plantes et des insectes. Le plus souvent, ces substances actives sont des métabolites secondaires qui, à l'origine, protègent les végétaux des herbivores. Le biopesticide d'origine végétale le plus utilisé est l'huile de neem, un insecticide extrait des graines d'*Azadirachta indica* (Schmutterer, 1990). Plusieurs molécules dont l'azadirachtine, la nimbidine, la nimbidinine, la solanine, le déacétylazadirachtinol et le méliantriol ont été identifiées comme biologiquement actives dans l'huile extraite des graines de neem. L'azadirachtine, un mélange de sept isomères de tétranortritarpinoïde, est le principal ingrédient actif de cette huile et a la propriété de perturber la morphogénèse et le développement embryonnaire des insectes (Srivastava et al., 2007 ; Correia et al., 2013).

D'autres extraits de plantes ont des activités insecticides ; ainsi, *Tanacetum (Chrysanthemum) cinerariaefolium*, plus communément appelé pyrèthre, est une plante herbacée vivace cultivée pour ses fleurs dont une poudre insecticide est extraite. Ses principes actifs, appelés pyréthrinés, attaquent le système nerveux de tous les insectes. Cependant, ces molécules naturelles sont rapidement dégradées par la lumière. Il y a sur le marché des pyréthrinoïdes de synthèse qui sont beaucoup plus stables que leurs homologues naturels. *Quassia amara* est un arbre d'Amérique dont est extraite la quassine, un insecticide qui a montré une faible toxicité pour l'Homme, les animaux domestiques et les insectes utiles.

Certaines huiles végétales, qui n'ont pas d'activité antiparasitaire intrinsèque, peuvent être retrouvées sur le marché en tant que biopesticide. Dans ce cas, ce sont leurs propriétés physiques qui sont exploitées. Ainsi, l'huile de colza est l'ingrédient principal de quelques produits comme le VegOil® car, aspergée sur les feuilles et les ravageurs, elle forme un film huileux qui asphyxie ces derniers.

Les plantes à pesticides intégrés (*Plant Incorporated-Protectants*, PIPs) sont des organismes modifiés par génie génétique, capables de produire et d'utiliser des substances pesticides afin de se protéger

contre des insectes, des virus ou des champignons. Les PIPs les plus connues sont des plants de pommes de terre, maïs et coton ayant la particularité de produire la protéine Cry de *B. thuringiensis*. Pour l'agence américaine de protection de l'environnement (*United States, Environmental Protection Agency, US.EPA*), les PIPs sont une catégorie de biopesticides. Les premières PIPs ont été cultivées aux États-Unis d'Amérique en 1995/1996. Les surfaces agricoles mondiales cultivées en PIPs sont passées de 11,4 millions d'hectares en 2000 à plus de 80 millions en 2005 (Shelton et al., 2002 ; Bates et al., 2005). Certains pays de l'Union européenne émettent des réticences quant à leur utilisation. En effet, pour des raisons qualifiées d'éthique, morale et des réserves sur leur sûreté biologique, seuls 5 des 27 pays membres de l'Union européenne ont adopté leur utilisation (Kumar et al., 2008). Ainsi, le maïs Bt (*Bacillus thuringiensis*) est couramment cultivé en Espagne, Portugal, Roumanie, Pologne et Slovaquie, alors que la lignée de maïs Bt MON810 est formellement interdite dans certains pays comme la France, l'Autriche, l'Allemagne, la Grèce, le Luxembourg et la Hongrie (Meissle et al., 2011).

2.3. Biopesticides animaux

Ces biopesticides sont des animaux comme les prédateurs ou les parasites, ou des molécules dérivées d'animaux, souvent d'invertébrés comme les venins d'araignées, de scorpions, des hormones d'insectes, des phéromones (Goettel et al., 2001 ; Saidenberg et al., 2009 ; Aquiloni et al., 2010).

La coccinelle est l'insecte auxiliaire le plus connu. La coccinelle *Rodolia cardinalis* prélevée en Australie est couramment utilisée comme prédateur de la cochenille *Icerya purchasi*. Même si elle a été introduite dès le 19^e siècle en Californie pour enrayer la destruction des agrumes, les îles Galápagos n'ont autorisé son introduction qu'en 2002 (Calderón Alvarez et al., 2012). Les effets des biopesticides d'origine animale et plus particulièrement des insectes auxiliaires sur la faune locale sont minutieusement étudiés avant leur utilisation.

Comme les coccinelles, les acariens utilisent la prédation pour se nourrir de certains insectes ravageurs des plantes. C'est l'activité parasitique des nématodes comme *Phasmarhabditis hermaphrodita* qui est utilisée pour la lutte contre les limaces et les gastéropodes en général. Les nématodes juvéniles de troisième stade de *P. hermaphrodita* vont initier l'infection en pénétrant par les cavités des coquilles sous le manteau de leur hôte. Après cette pénétration, les nématodes juvéniles vont transmettre leurs bactéries associées qui vont se multiplier et libérer des endotoxines qui provoqueront la mort des gastéropodes entre 4 et 7 jours. Les nématodes juvéniles vont acquérir leur forme hermaphrodite dans

cette cavité et s'y reproduire. Ils continueront à se développer jusqu'à ce que tout le corps du gastéropode soit consommé et que la prochaine génération de nématodes trouve de nouveaux hôtes à parasiter (Grewal et al., 2003).

Les biopesticides d'origine animale qui sont des signaux chimiques produits par un organisme et qui changent le comportement d'individus de la même espèce ou d'espèces différentes sont également répertoriés sous l'appellation « semio-chimiques ». Les semio-chimiques ne sont pas à proprement parler des « pesticides ». En effet, ils ne vont pas provoquer la mort des bio-agresseurs, mais plutôt créer une confusion chez ces derniers. Cette confusion les empêchera de se propager dans la zone traitée. Les phéromones d'insectes sont de bons exemples de molécules semio-chimiques utilisées comme alternative à l'utilisation des insecticides. Il s'agit de petites molécules naturellement produites par les insectes et qui sont détectées au niveau des antennes de leurs congénères. Ces molécules peuvent être éphémères ou persistantes, mais dans tous les cas véhiculent un message. Elles peuvent marquer un territoire, prévenir de la disponibilité de nourriture ou être un signal pour l'accouplement. Les phéromones d'insectes sont largement utilisées aussi bien pour limiter les insectes ravageurs *via* des techniques de piégeage ou de confusion sexuelle que pour surveiller leur nombre.

Des exemples de biopesticides commercialisés, appartenant aux trois différentes catégories, sont présentés dans le **tableau 1**.

3. LES AVANTAGES DES BIOPESTICIDES

Les biopesticides offrent de nombreux avantages. Leur nature permet leur utilisation aussi bien en agriculture biologique qu'en agriculture conventionnelle. Il est cependant à noter que, dans certains pays, la réglementation en vigueur ne permet pas l'utilisation en agriculture biologique de tous les biopesticides commercialisés sur leur territoire. Si la substance active de ces produits ne pose pas de problème réglementaire, leurs co-formulants peuvent ne pas être compatibles avec ce type d'agriculture. Ainsi, il est recommandé aux agriculteurs biologiques de consulter les listes de produits commerciaux à base de biopesticides autorisés par leur organisme certificateur avant toute utilisation. De même, en tant qu'organismes génétiquement modifiés, les PIPs ne sont pas utilisés en agriculture biologique.

Certains biopesticides microbiens présentent des bénéfices supplémentaires à leur rôle de protection. Les champignons du genre *Trichoderma* ont la particularité de faciliter l'absorption d'éléments

nutritifs du sol par les plantes (Harman, 2011). De même, il a été récemment mis en évidence que certains micro-organismes endophytes et/ou certaines rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (*Plant Growth Promoting Rhizobacteria* ou PGPR) peuvent conférer à certaines cultures une tolérance aux stress abiotiques comme la sécheresse (Compant et al., 2010 ; Wang et al., 2012). La plupart des bactéries commercialisées en tant que biopesticides font partie du groupe des PGPR, comme *Bacillus subtilis* et sont connues pour leur capacité à favoriser la croissance des plantes. Dans certains produits commercialisés, les molécules bioactives emploient plusieurs modes d'action, ce qui les rend particulièrement intéressantes pour limiter l'apparition de bio-agresseurs résistants. Ainsi, les lipopeptides cycliques produits par les bactéries du genre *Bacillus* peuvent, à la fois, faciliter la colonisation de l'environnement par le micro-organisme producteur (surfactines et iturines), avoir une activité antifongique directe (iturines et fengycines) et induire les mécanismes de défense des plantes (surfactines, fengycines) (Ongena et al., 2008).

Dans la quête de nouveaux bio-insecticides, une attention particulière est portée aux venins d'araignées depuis ces 10 dernières années. En effet, ceux-ci sont composés de centaines de toxines et substances actives qui vont affecter le système nerveux des insectes afin de les paralyser pour ensuite provoquer leur mort. Ils ne sont pas seulement actifs après une morsure, mais le sont également après ingestion, ce qui les rend particulièrement intéressants. Les différentes substances de ces venins ont plusieurs cibles. Ils peuvent aussi bien modifier la conductance de plusieurs canaux ioniques (calcique, potassique, sodium), perturber la disposition des doubles couches lipidiques, agir au niveau de la terminaison des nerfs pré-synaptiques que des récepteurs N-méthyl-D-aspartate. Les multiples cibles des venins vont limiter l'apparition d'insectes résistants. À l'opposé, on retrouve les insecticides conventionnels qui sont formulés pour agir avec l'une de leur cinq cibles principales qui sont les canaux sodium voltage dépendant, les récepteurs acides gamma aminobutyrique (GABA), glutamate, nicotinique acétylcholine et récepteurs acétylcholinestérase. L'utilisation d'une seule cible par les insecticides conventionnels va engendrer des résistances chez les insectes qui pourront soit augmenter leurs métabolites de détoxification, diminuer la sensibilité des cibles et/ou augmenter la séquestration et la biodisponibilité des cibles (Windley et al., 2012).

Des biopesticides, comme les pyrèthres, insecticides extraits de la plante *Tanacetum (Chrysanthemum cinerariaefolium)* ont une action rapide, une faible toxicité contre les mammifères ainsi qu'une faible persistance après leur application (Silverio et al., 2009).

Tableau 1. Quelques biopesticides commercialisés — *Examples of marketed biopesticides.*

Catégorie	Type	Organisme	Produit commercial	Cible	Culture
microbiens	Fongicide	<i>Bacillus subtilis</i> QST713	Serenade®	<i>Botrytis</i> spp.	Légumes, fruits
	Fongicide	<i>Bacillus subtilis</i>	HiStick®	<i>Fusarium, Rhizoctonia, Aspergillus</i>	Soja, arachide
	Fongicide	<i>Bacillus licheniformis</i> SB 3086	EcoGuard®	<i>Sclerotinia</i> spp., anthracnose	Gazon
	Fongicide	<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	Taegro®	<i>Rhizoctonia, Fusarium</i>	Arbustes, plantes ornementales
	Fongicide	<i>Pseudomonas chlororaphis</i> MA342	Cerall®	<i>Tilletia caries, Fusarium nivale, Septoria nodorum</i>	Blé
	Insecticide	<i>Bacillus thuringiensis</i>	Rona Eco®	Chenille, larves de lépidoptères	Pelouse et jardin
	Insecticide	<i>Bacillus thuringiensis</i>	Biobit®DF	Lépidoptères	Vignes, arbres fruitiers, maraichage
	Insecticide	<i>Cydia pomonella granulosus</i> virus	Carpovirusine®	Carpocapse (<i>Cydia pomonella</i>)	Pommiers, poiriers
	Larvicide	<i>Helicoverpa zea</i> HzSNPV	Gemstar®	<i>Heliothis</i> et <i>Helicoverpa larva</i>	Maïs, cultures maraichères, coton, blé,...
	Larvicide	<i>Spodoptera exigua nucleopolyhedrosis</i> virus	SpodX®	Larves de <i>Spodoptera exigua</i>	Cultures maraichères, pomme de terre, tabac, tournesol, etc.
Champignon	Fongicide	<i>Coniothyrium constans</i>	Constans® WG	<i>Sclerotinia</i> spp.	Endives
	Fongicide	<i>Trichoderma atroviride</i>	Esquive® WG	<i>Eutipa lata</i>	Vignes
	Nématicide	<i>Paecilomyces lilacinus</i>	BioAct® WG	<i>Meloidgyne</i> spp., <i>Rodopholus similis</i> , <i>Heterodera</i> spp., <i>Globodera</i> spp., <i>Protylechus</i> spp.	Cultures maraichères, bananiers
	Insecticide	<i>Chrysanthemum cinerariaefolium</i>	Trounce®	Pucerons, cochenilles, aleurodes	Arbustes, plantation en serre, pépinières
	Insecticide	<i>Quassia amara</i>	Quassam®	<i>Hoplocampa testudinea</i>	Pommiers
végétaux	Insecticide	<i>Azadirachta indica</i>	TotalCare®	± 400 espèces d'insectes ravageurs	Toutes cultures
	Insecticide	<i>Brassica napus</i>	VegOil®	Pucerons et acariens	Maraichage, arbres fruitiers, plantes ornementales
	Insecticide	Acariens	Biolime®	Insectes, ravageurs	Cultures sous abris
Insectes	Insecticide	Coccinelle	Adaline b®	Pucerons	Cultures sous abris
	Lutte par confusion sexuelle	Phéromones naturelles de <i>Cydia pomonella</i>	Ginko®	<i>Cydia pomonella</i>	Vergers de pommiers, poiriers, noyers
Biopesticides animaux	Anti limace	Nématodes entomopathogènes	Bioslug®	<i>Deroceca reticulatum, Arion distinctus</i>	Légumes, fraises, plantes ornementales

En comparant les données de la base du Système d'Intégration des Risques par Intégration des Scores pour les Pesticides (SIRIS) de l'INERIS (www.ineris.fr/siris-pesticides/bdd_siris_pesticides), il apparaît que le temps de dégradation moyen dans le sol (DT50) des 126 insecticides chimiques disposant de données répertoriées est de 39,38 jours pour des valeurs variant de 4,8 h pour le vamidothion (un organophosphoré), à 1001 jours pour la chlothianidine (un nicotinoïde). Le temps de dégradation moyen dans le sol des huit insecticides d'origine biologique contenus dans cette base de données est de 6,49 jours avec des valeurs variant de 2 jours pour la nicotine à 14 jours pour le spinosad. Dans le domaine phytosanitaire, les molécules issues des organismes vivants sont donc en général moins rémanentes dans le sol que leurs homologues chimiques.

4. LES INCONVÉNIENTS DES BIOPESTICIDES

Certains des avantages écologiques des biopesticides, comme leur faible rémanence ou le fait qu'un produit soit actif contre un faible spectre de nuisibles, peuvent être considérés comme des inconvénients. En effet, ces deux avantages écologiques combinés à leur activité souvent dépendante des conditions climatiques et environnementales rendent les biopesticides moins efficaces que leurs homologues chimiques. Certains professionnels de l'agriculture estiment que les biopesticides ne leur conviennent pas car ils ne sont pas assez efficaces. Ces derniers évaluent les résultats du biopesticide à court terme, comme s'il s'agissait d'un substitut aux produits phytosanitaires chimiques. Cependant, la mise en place et l'efficacité d'un contrôle biologique doivent être évaluées sur la durée (Popp et al., 2013).

5. STIMULATEURS DES DÉFENSES NATURELLES DES PLANTES (SDN) ET BIOPESTICIDES

Les Stimulateurs des Défenses Naturelles des plantes (SDN) sont des substances qui, une fois appliquées sur la plante, vont déclencher les défenses de cette dernière. Cela va permettre à la plante d'être dans un état de résistance contre un pathogène auquel elle serait normalement sensible. Cette définition rappelle celle des éliciteurs, cependant les SDN ne peuvent pas être limités qu'aux éliciteurs. Le concept d'utilisation des SDN dans la protection des plantes a été introduit en 1975 par Anderson-Prouty et Alberstein. Ces deux collaborateurs ont découvert qu'un polysaccharide issu du champignon pathogène *Colletotrichum lindemuthianum* appliqué sur l'hypocotyle et le

cotylédon du pois (*Phaseolus vulgaris*) est capable d'induire la production chez la plante de molécules de défense comme les phytoalexines (Anderson-Prouty et al., 1975).

Les SDN peuvent être de plusieurs origines. On trouve les synthétiques comme l'acide β -amino butyrique (BABA) ou comme l'analogue fonctionnel de l'acide salicylique (acibenzolar-S-méthyl, ASM). Il y a les substances naturelles minérales comme les poudres de roche, les substances naturelles végétales comme la laminarine, les substances microbiennes comme l'harpine et animales comme le chitosan.

Dans ces trois derniers cas, les SDN correspondent à la définition donnée des biopesticides. Le sigle SDN peut prêter à confusion puisqu'il pourrait faire croire que ces substances sont toutes d'origine naturelle. C'est pour cela que le sigle SDP pour l'appellation Stimulateur de Défense des Plantes est souvent utilisé. Les SDN ont des modes d'action variés qui dépendent de la dose appliquée, de la plante traitée et de l'agresseur visé.

Il y a un paradoxe sur le marché des SDN. Alors que peu de formulations ont une autorisation de mise sur le marché pour la fonction de stimulateurs de défenses des plantes, beaucoup de formulations commercialisées comme fertilisants ont des activités SDN supposées ou suggérées. Ainsi, sur les fiches de produits, les termes phytostimulants, stimulateurs de résistance, fortifiants des plantes, biostimulants, bioactivateurs, activateurs de défense, phytoactivateurs, nutrition santé des plantes ou encore renforts de résistance laissent penser à une activité SDN.

6. LES BIOPESTICIDES ET LA STRATÉGIE DE LUTTE INTÉGRÉE

La lutte intégrée est une stratégie de gestion à long terme des bio-agresseurs qui minimise les risques pour les populations, l'écosystème et l'environnement. Dans ce concept, des actions sont menées pour empêcher les bio-agresseurs de devenir un problème. Pour cela, les champs sont minutieusement observés afin d'identifier les maladies et leur cause, dénombrer les bio-agresseurs et établir leur cycle de vie. Les facteurs environnementaux qui leur sont défavorables sont également étudiés. En fonction du seuil de rentabilité fixé par les agriculteurs, les bio-agresseurs répertoriés peuvent être soit tolérés, soit traités. Dans le cas où le contrôle est nécessaire, les données recueillies lors de la surveillance des champs sont exploitées pour l'application des traitements.

La lutte intégrée combine plusieurs pratiques comme l'utilisation de variétés de plantes résistantes aux maladies et aux ravageurs identifiés, une irrigation des cultures appropriée, la rotation ou l'inter-culture, le

désherbage manuel ou encore l'utilisation de barrières physiques de prévention contre les ravageurs. Les pesticides chimiques ne sont employés que lorsqu'ils sont nécessaires. Ils sont choisis dans le but de limiter au maximum leur impact sur l'environnement. La lutte intégrée privilégie l'application de biopesticides.

En effet, les nombreux avantages des biopesticides, comme leur toxicité réduite vis-à-vis des pollinisateurs, ne peuvent pas être ignorés dans un contexte socio-politique de plus en plus soucieux de l'écologie. C'est ainsi que l'agri-industrie s'intéresse d'une part aux stratégies de lutte intégrée en proposant par exemple des articles pour la surveillance des bio-agresseurs et, d'autre part, aux biopesticides en rachetant des petites et moyennes entreprises les développant, comme la firme Bayer Crop Science SA qui a récemment acquis la société Agraquest SA (www.agraquest.com). À titre d'exemple, cette même firme préconise le traitement des graines de soja et de maïs avec la combinaison de produits Poncho® et VOTiVO® pour lutter contre les nématodes. Dans ce couple, le produit phytosanitaire chimique Poncho® permet une protection immédiate des graines au moment où elles sont plantées, alors que le biopesticide VOTiVO® à base de *Bacillus firmus* agit plus tardivement en créant une barrière de protection vivante autour des racines (www.bayercropscience.us/products/seed-treatments/poncho-votivo/).

L'emploi de certains biopesticides en rotation ou en combinaison avec d'autres biopesticides ou avec des produits chimiques permet de diminuer les quantités d'intrants chimiques, ainsi que l'apparition de nouvelles souches résistantes aux nuisibles (Xu et al., 2011). Les résultats obtenus avec la mise en place des stratégies de lutte intégrée dans les cultures de poires en Californie (USA) montrent l'efficacité d'une telle approche. Dans les années 1960, plus de 14 produits phytosanitaires chimiques étaient appliqués à chaque saison pour traiter les poiriers contre les acariens et les insectes. Pour diminuer cette dépendance croissante aux pesticides chimiques, des agriculteurs, des chercheurs, des agences gouvernementales et des consultants privés ont travaillé de concert. En 2008, la plupart des producteurs de poires de cette région n'appliquent plus que 3 à 5 substances actives par saison. Ces substances sont, pour la majeure partie, des biopesticides utilisables en agriculture biologique (Weddle et al., 2009).

7. LA RÈGLEMENTATION DES BIOPESTICIDES

En Europe et dans la majorité des pays, les produits phytosanitaires doivent être homologués avant leur mise sur le marché et leur utilisation. Les critères

d'approbation d'un produit peuvent varier d'un pays à l'autre en fonction de la législation, de l'époque, des avancées scientifiques et des effets du retrait de la vente de certains d'entre eux.

7.1. L'Union européenne et la réglementation sur les pesticides

La réglementation européenne sur les pesticides comprend quatre textes de lois qui légifèrent les produits phytosanitaires dans l'UE. Ces textes sont les règlements (CE) 1107/2009 relatif à la mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques (Journal officiel de l'Union européenne, 2009a), et (CE) 1185/2009 pour les statistiques pesticides (Journal officiel de l'Union européenne, 2009b), les directives 2009/128 (CE) concernant le développement durable et l'utilisation des pesticides (Journal officiel de l'Union européenne, 2009a) et 2009/127 (CE) relative aux machines pour l'application des pesticides (Journal officiel de l'Union européenne, 2009c).

Le règlement (CE) 1107/2009 ne fait pas état des biopesticides en tant que groupe ou famille de substances. Cependant, il s'applique aux micro-organismes, aux produits biologiques d'origine végétale tels que les huiles ainsi qu'aux produits d'origine animale comme les extraits ou les phéromones. Il fait également allusion aux organismes génétiquement modifiés. Dans ce règlement, les micro-organismes et produits d'origine biologique sont soumis à la même procédure d'homologation que les substances composant les produits phytosanitaires conventionnels. La procédure d'octroi d'une autorisation de mise sur le marché d'un produit phytosanitaire par un pétitionnaire se fait à deux niveaux.

L'évaluation et l'approbation des substances actives se fait au niveau européen. Le pétitionnaire dépose une demande d'évaluation à l'Agence Européenne de Sécurité des Aliments (*European and Food Safety Authority*, EFSA). Cette dernière mandate un état membre pour effectuer l'évaluation. L'état mandaté transmet son rapport à l'EFSA qui, après analyse, donne son avis à la Commission européenne. Cette dernière est chargée de la gestion des risques liés aux substances actives. La Commission européenne informe le pétitionnaire de sa décision et, parallèlement à cela, inscrit la substance évaluée sur la liste des substances actives approuvées ou sur celle des substances non approuvées.

L'évaluation et l'autorisation de mise sur le marché des produits formulés se fait au niveau zonal. L'Union européenne est divisée en trois zones d'autorisation des produits phytosanitaires. La zone A « Nord » comprend le Danemark, l'Estonie, la Lettonie, la Lituanie, la Finlande et la Suède, la zone B « Centre »

est composée de la Belgique, la République tchèque, l'Allemagne, l'Irlande, le Luxembourg, la Hongrie, les Pays-Bas, l'Autriche, la Pologne, la Roumanie, la Slovaquie et le Royaume-Uni et enfin la zone C « Sud » comprenant la Bulgarie, la Grèce, l'Espagne, la France, l'Italie, Chypre, Malte et le Portugal. Lorsqu'un pétitionnaire souhaite une autorisation de mise sur le marché de son produit dans une de ces trois zones, il dépose une demande à l'agence d'évaluation d'un des États de la zone. Le pays choisi fait son évaluation en concertation avec les autres instances de décisions de la zone. Une fois l'autorisation de mise sur le marché délivrée sur le territoire du pays de dépôt, elle peut être approuvée par les autres pays de la zone par reconnaissance mutuelle ou alors refusée par un pays. Dans ce dernier cas, c'est la souveraineté nationale qui prime.

Quel que soit le niveau de demande d'autorisation de la substance ou du produit formulé, les dossiers présentés par le pétitionnaire doivent démontrer leur efficacité, fournir une évaluation complète de ces derniers sur la santé humaine, sur la santé animale et sur l'environnement. Ils doivent également démontrer une absence de contamination de la chaîne alimentaire. Sauf cas contraires solidement argumentés, toutes les expérimentations nécessaires à ces évaluations suivent les lignes directrices officielles en termes de bonnes pratiques de laboratoires (BPL) et de bonnes pratiques expérimentales (BPE).

L'origine biologique des substances et produits proposés à l'homologation ne garantit pas leur approbation. Ainsi, des biopesticides d'origines microbienne, animale et végétale se retrouvent dans la liste mise à jour au 21 octobre 2013 des 783 substances phytosanitaires non approuvées par l'Union européenne et d'autres parmi les 440 substances approuvées. Le **tableau 2** présente un aperçu du panel de substances biologiques en fonction de leur statut d'autorisation dans l'UE.

Les stimulateurs de défenses naturelles des plantes sont soumis à la même réglementation que les autres produits phytosanitaires. Les macro-organismes, tels que les insectes auxiliaires, ne sont pas mentionnés dans le règlement (CE) 1107/2009. En France, l'utilisation de macro-organismes non indigènes utiles aux végétaux dépend du décret n° 2012-140 (Journal officiel de la République Française, 2012).

7.2. Les pays membres de l'OCDE

L'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE) s'est investie dans le domaine des pesticides agricoles et biocides en publiant notamment des lignes directrices des bonnes pratiques de laboratoires et d'expérimentations afin de tester les risques toxicologiques et écotoxicologiques

inhérents à ces produits. L'OCDE invite fortement ces 34 pays membres à suivre ses lignes directrices de manière à harmoniser les évaluations afin d'aider les gouvernements à travailler de concert pour la connaissance des risques liés à ces produits (www.oecd.org/env/ehs/pesticides-biocides/). L'OCDE reconnaît officiellement le terme de biopesticide et inclut dans ce groupe les micro-organismes (bactéries, algues, protozoaires, virus, champignons), les phéromones et semio-chimiques, les macro-organismes (insectes et nématodes) et les extraits de plantes (www.oecd.org/env/ehs/pesticides-biocides/biologicalpesticideregistration.htm). Le travail sur les propositions de lignes directrices relatives à l'homologation des biopesticides a commencé en 1999 dans cette organisation.

Il est toutefois à noter que même si plusieurs pays de l'Union européenne font partie de l'OCDE, l'UE ne reconnaît pas officiellement le terme de biopesticide. À l'opposé, les USA et le Canada, deux autres pays membres de l'OCDE reconnaissent le statut des biopesticides. Aux USA, l'homologation des produits phytosanitaires dépend de l'agence de protection de l'environnement (US.EPA). Des documents servant d'outils à l'enregistrement spécifique des biopesticides sont disponibles sur le site Internet de cette agence (www.epa.gov/opppbpd1/biopesticides/). Au Canada, c'est l'Agence de Réglementation de Lutte Antiparasitaire (ARLA) qui gère la réglementation des produits phytosanitaires. Sans réduire ses exigences habituelles quant à l'homologation, l'ARLA reconnaît, au même titre que l'US.EPA et dans le cadre de l'Accord de Libre-Échange Nord-Américain (ALENA) la désignation de biopesticides comme produits à risque réduit et s'engage à accélérer les délais de procédure de leur examen (ARLA, 2002).

7.3. Les zones Sud-Asie et Afrique

La FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*) propose, aux pays qui ont une réglementation floue en matière de produits phytosanitaires, des lignes directrices pour l'harmonisation de leur réglementation et pour leur homologation. Dans ces lignes directrices, les biopesticides sont clairement désignés. Il est également fait état des données à fournir pour leur enregistrement. Certains pays d'Afrique comme le Ghana ou le Kenya pensent à la FAO pour une réglementation sur les biopesticides. Cette organisation a édité un manuel de 480 pages suggérant, sans faire preuve d'ingérence dans ces pays, des lignes directrices à suivre pour l'harmonisation de la réglementation des produits phytosanitaires dans la zone sud asiatique (FAO, 2012).

Tableau 2. Exemples de substances actives d'origine biologique approuvées et non approuvées par la Commission européenne au 21 octobre 2013. Les substances sont annotées comme non approuvées soit parce que leur utilisation en Europe a été rejetée par la Commission européenne, soit parce qu'aucune demande de leur utilisation n'a été reçue — *Examples of active substances from biological origins approved and non-approved by the European Commission, updated by October 21, 2013. The non-approved substances can be substances whose the use has been forbidden by the European Commission or substances whose the use has never been proposed to the EC* (http://ec.europa.eu/sanco_pesticides/public/?event=activesubstance.selection).

	Substances actives approuvées	Substances actives non approuvées
Biopesticides d'origine microbienne		
Champignon	<i>Trichoderma asperellum</i> (formellement <i>T. harzianum</i>) souches ICC012, T25 and TV1 <i>Trichoderma asperellum</i> (souche T34) <i>Trichoderma atroviride</i> souche I-1237 <i>Paecilomyces fumosoroseus</i> souche Fe9901	<i>Aschersonia aleyrodes</i> <i>Beauveria brongniartii</i>
Bactérie	<i>Pseudomonas chlororaphis</i> souche MA342 <i>Pseudomonas</i> sp. Souche DSMZ 13134 <i>Bacillus firmus</i> I-1582 <i>Bacillus subtilis</i> souche. QST 713 <i>Bacillus thuringiensis</i> subsp. Kurstaki strains ABTS 351, PB 54, SA 11, SA12 and EG 2348	<i>Bacillus subtilis</i> souche IBE 711 <i>Bacillus sphaericus</i> <i>Agrobacterium radiobacter</i> K84
Virus	Zucchini Yellow Mosaic Virus, weak strain <i>Spodoptera littoralis</i> nucleopolyhedrovirus	Zucchini yellow mosaic virus (ZYMV mild strain) <i>Neodiprion sertifer</i> nuclear polyhedrosis virus
Biopesticides d'origine végétale		
Huiles	Huile de girofle Huile de menthe verte Huile de colza	Citronellol Huile de coco Huile de daphné Huile d'eucalyptus Huile de bois de Gaïac Huile d'ail Huile de maïs
Extraits	Azadirachtin Extrait d'ail Géraniol	Répugnant : huiles essentielles Gluten de bé Chlorophylline
Biopesticides d'origine animale		
Extraits	Huile de poissons à propriétés odorantes répugnant	Chitosan Gélatine Lanoline
Semio-chimiques	Chaîne carbonée droite de phéromones de lépidoptère	—

8. LE MARCHÉ DES BIOPESTICIDES

L'utilisation des biopesticides a longtemps été cantonnée à l'agriculture biologique. Ces produits ont été progressivement employés en agriculture conventionnelle car les agriculteurs sont de plus en plus soucieux de leur impact écologique (Frost et al., 2009). Le marché des biopesticides est très en dessous de celui des produits phytosanitaires chimiques. Cependant, il est en constante croissance. En 2008, aux USA et en Europe de l'Ouest, il a été estimé à 594,8 millions de dollars (Frost et al., 2009). Avec un taux de progression annuel de 8 %, il est prévu que ce marché atteindra 1082,0 millions de dollars d'ici 2015 (Frost et al.,

2009). La majorité des biopesticides commercialisés est d'origine microbienne. Il s'agit principalement d'insecticides à base de *B. thuringiensis* (Rosas-Garcia, 2009).

Les fournisseurs de biopesticides sont principalement des petites et moyennes entreprises qui ont des difficultés compréhensibles à développer de nouveaux produits et à commercialiser pleinement ceux déjà existants (Farm Chemical International, 2010). Deux cent soixante-deux biopesticides microbiens sont commercialisés dans les 34 pays de l'OCDE (Kabaluk et al., 2011). Il y a beaucoup plus de biopesticides disponibles sur le continent américain qu'en Europe. Des études suggèrent que cet écart serait dû au prix

élevé et au délai souvent long du système européen d'autorisation des principes actifs et de la complexité des procédures d'homologation (Kiewnick, 2007). Les processus d'homologation des biopesticides sont facilités aux USA et les autorisations sont en moyenne délivrées au bout d'un an de procédure (Frost et al., 2009). Les processus d'homologation dans certains pays européens sont beaucoup plus longs car ils suivent les modèles règlementaires des pesticides chimiques. Dans cette vision de l'homologation, un produit d'origine biologique n'est pas nécessairement sans risque. Une démarche est actuellement en cours pour homologuer, en tant que « Préparations Naturelles Peu Préoccupantes (PNPP) » (article 23 du règlement [CE] 1107/2009), un certain nombre de produits susceptibles de protéger les plantes contre les prédateurs (prêle, saule blanc, tanaisie, armoise, rhubarbe officinale, absinthe, vinaigre, sucre, talc) (INRA et al., 2013). Si elle aboutit, cette démarche pourrait constituer une nouvelle piste d'homologation nettement moins onéreuse de certains biopesticides.

En Europe de l'Ouest, le prix des biopesticides est en général 25 fois plus important que celui des produits phytosanitaires chimiques. Selon les économistes, cette différence devrait s'accroître car une baisse des prix des produits conventionnels est prévue, alors que les prix de vente des biopesticides microbiens stagneraient (Frost et al., 2009). Toutefois, l'Europe de l'Ouest est considérée comme la région où la part de marché des biopesticides pourrait le plus augmenter. En effet, la législation de plus en plus stricte sur les produits phytosanitaires a conduit au retrait de plusieurs substances chimiques, ce qui devrait encourager le secteur des biopesticides (Frost et al., 2009).

Il est à noter qu'il y a des disparités dans l'utilisation des biopesticides au sein des pays de l'Union européenne. Ces inégalités dépendent de plusieurs facteurs tels les politiques gouvernementales, l'opinion publique et les programmes de recherche industriels (Bailey et al., 2010).

9. CONCLUSION

L'utilisation généralisée et la dépendance aux produits phytosanitaires chimiques a conduit à l'apparition de bio-agresseurs résistants. La mauvaise réponse pour lutter contre ceux-ci est d'augmenter la quantité et la fréquence d'application du produit phytosanitaire le moins efficace. Cette réponse est généralement contraire à la législation qui encadre l'emploi des produits phytosanitaires et aux « Bonnes Pratiques Agricoles » définies par la réglementation, imposant un nombre maximal d'applications et une dose maximale à ne pas dépasser. L'alternative est de développer de nouvelles molécules chimiques. Ce système à double réponse,

identifié dans les années 1970 et nommé « *pesticide treadmill* » par les entomologistes, est toujours d'actualité (Weddle et al., 2009 ; Popp et al., 2013). Malgré tous les effets indésirables sur l'environnement et la santé, il est prévu que ce cycle ne prendra fin que lorsqu'il ne sera plus possible de développer de nouveaux pesticides chimiques. Les biopesticides représentent une des alternatives à cette dépendance. Même si, employés seuls, ils sont généralement moins efficaces à court terme que leurs homologues chimiques, ils présentent de nombreux avantages écologiques qui ne peuvent pas être ignorés. Utilisés dans une stratégie de lutte intégrée en combinaison avec les pesticides chimiques, ils permettent de limiter la quantité d'intrants ainsi que l'apparition de nuisibles résistants.

Le développement de l'utilisation des biopesticides est variable d'une région du monde à l'autre. Ils dépendent fortement de plusieurs facteurs dont :

- les agriculteurs : leur méfiance vis-à-vis de l'efficacité de ce type de produits, leur niveau de formation ainsi que les moyens dont ils disposent en main-d'œuvre et appareillage ;
- l'environnement : l'efficacité des biopesticides est souvent conditionnée par les contraintes climatiques ;
- la recherche et le développement de nouveaux biopesticides plus efficaces que ceux déjà disponibles ;
- la mise en place d'un processus d'homologation et d'une législation dédiés à ce type de produit ;
- la logistique pour le stockage et la distribution des organismes vivants qui les composent ;
- les préférences des consommateurs (agriculteurs, distributeurs et consommateurs finaux) ;
- les politiques nationales comme la ratification de projets de lois sur la diminution des quantités de pesticides chimiques utilisées, la promotion des stratégies de lutte intégrée par des actions comme l'octroi de crédits d'impôts en faveur de l'agriculture biologique.

Remerciements

Cette revue a été réalisée grâce au soutien de l'Union européenne dans le cadre du projet INTERREG IV PHYTOBIO.

Bibliographie

- Anastasiadis I., Giannakou I., Prophetou-Athanasiadou D. & Gowen S., 2008. The combined effect of the application of a biocontrol agent *Paecilomyces lilacinus*, with various practices for the control of root knot nematodes. *Crop Prot.*, **27**, 352-361.
- Anderson-Prouty A.J. & Albersheim P., 1975. Host-pathogen interactions: VII. Isolation of a pathogen-

- synthesized fraction rich in glucan that elicits a defense response in the pathogen's host. *Plant Physiol.*, **56**(2), 286-291.
- Aquiloni L. & Gherardi F., 2010. The use of sex pheromones for the control of invasive populations of the crayfish *Procambarus clarkia*: a field study. *Hydrobiologia*, **649**, 249-254.
- ARLA (Agence de Règlementation de la Lutte Antiparasitaire), 2002. *Directive d'homologation DIR2002-02*. Numéro de catégorie : NH113-3/2002-2F-IN.
- Bailey K., Boyetchko S. & Längle T., 2010. Social and economic drivers shaping the future of biological control: a Canadian perspective on the factors affecting the development and use of microbial biopesticides. *Biol. Control*, **52**, 221-229.
- Bates S., Zhao J.-Z., Roush R. & Shelton A., 2005. Insect resistance management in GM crops: past, present and future. *Nat. Biotechnol.*, **23**, 57-62.
- Boulon J.-P., 2010. Qu'est-ce que ? *Pseudomonas chlororaphis* souche MA342 bio-fongicide en traitement de semences de blé, triticale et seigle. *Phytoma Défense Végétaux*, **632**, 10-12.
- Brunner K. et al., 2005. Improvement of the fungal biocontrol agent *Trichoderma atroviride* to enhance both antagonism and induction of plant systemic disease resistance. *Appl. Environ. Microbiol.*, **71**, 3959-3965.
- Calderón-Alvarez C. et al., 2012. Monitoring the effects of *Rodolia cardinalis* on *Icerya purchasi* on the Galapagos Islands. *BioControl*, **57**, 167-179.
- Chandler D. et al., 2011. The development, regulation and use of biopesticides for integrated pest management. *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. B.*, **366**(1573), 1987-1998.
- Chen X. et al., 2002. Comparative analysis of the complete genome sequences of *Helicoverpa zea* and *Helicoverpa armigera* single-nucleocapsid nucleopolyhedroviruses. *J. Gen. Virol.*, **83**, 673-684.
- Compant S., Clément C. & Sessitsch A., 2010. Plant growth promoting rhizobacteria in the rhizo and endosphere of plants: their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization. *Soil Biol. Biochem.*, **42**, 669-678.
- Correia A. et al., 2013. Microscopic analysis of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) embryonic development before and after treatment with azadirachtin, lufenuron, and deltamethrin. *J. Econ. Entomol.*, **106**(2), 747-755.
- Dodd S., Lieckfeldt E. & Samuels G., 2003. *Hypocrea atroviridis* sp. nov., the teleomorph of *Trichoderma atroviride*. *Mycologia*, **95**(1), 27-40.
- Dong L., Yang J. & Zhang K., 2007. Cloning and phylogenetic analysis of the chitinase gene from the facultative pathogen *Paecilomyces lilacinus*. *J. Appl. Microbiol.*, **103**(6), 2476-2488.
- FAO, 2012. *Guidance for harmonizing pesticide regulatory management in Southeast Asia*. Bangkok: Food and Agriculture Organization of the United Nations, Regional Office for Asia and the Pacific.
- Farm Chemical Internationals, 2010. *Biological pesticide on the rise*, www.farmchemicalsinternational.com/uncategorized/biological-pesticides-on-the-rise/, (03.02.14).
- Frost & Sullivan, 2009. *North American and Western European biopesticides market*. M472-39.
- Goettel M. & Hajek A., 2001. Evaluation of non-target effects of pathogens used for management for arthropods. In: Wajnberg E., Scott J.K. & Qimby P.C., eds. *Evaluating indirect ecological effects of biological control*. Wallingford, UK: CABI Publisher, 81-97.
- Grewal P., Grewal S., Tan L. & Adams B., 2003. Parasitism of molluscs by nematodes: types of associations and evolutionary trends. *J. Nematol.*, **35**(2), 146-156.
- Harman G., 2011. *Trichoderma* not just for biocontrol anymore. *Phytoparasitica*, **39**, 103-108.
- INRA & ITAB, 2013. Homologation des substances naturelles en protections des cultures. In : *Recueil des résumés des présentations du Colloque DinaBio 2013, 13-14.11.13, Tours, France*, 65-66. Paris : INRA, ITAB.
- Journal officiel de la République Française, 2012. **48** :1803. 30.10.2012
- Journal officiel de l'Union européenne, 2009a. **L309**. 24.11.2009, 1.
- Journal officiel de l'Union européenne, 2009b. **L324**. 10.12.2009, 1.
- Journal officiel de l'Union européenne, 2009c. **L310**. 25.11.2009, 29.
- Kabaluk T. & Gazdik K., 2011. *Directory of microbial pesticides for agricultural crops in OEDC countries*. Ottawa, ON, Canada: Agriculture and Agri-Food Canada, <https://www4.agr.gc.ca/MPDD-CPM/search-recherche.do?lang=eng>
- Kiewnick S., 2007. Review: practicalities of developing and registering microbial biological control agents. *CAB Rev. Perspect. Agric. Vet. Sci. Nutr. Nat. Resour.*, **2**(013), <http://www.cabi.org/bni/FullTextPDF/2007/20073085842.pdf>
- Kumar S., Chandra A. & Pandey K.C., 2008. *Bacillus thuringiensis* (Bt) transgenic crop: an environment friendly insect-pest management strategy. *J. Environ. Biol.*, **29**(5), 641-653.
- Leng P., Zhiming Z., Guangtang P. & Maojun Z., 2011. Applications and development trends in biopesticides. *Afr. J. Biotechnol.*, **10**(86), 19864-19873.
- Longa C. et al., 2009. Evaluating the survival and environmental fate of the biocontrol agent *Trichoderma atroviride* SC1 in vineyards in northern Italy. *J. Appl. Microbiol.*, **106**(5), 1549-1557.
- McQuilken M. et al., 2003. Production of macrosphelide A by the mycoparasite *Coniothyrium minitans*. *FEMS Microbiol. Lett.*, **2009**, 27-31.

- Meissle M., Romeis J. & Bigler F., 2011. Bt maize and integrated pest management - a European perspective. *Pest Manage. Sci.*, **67**, 1049-1058.
- Ongena M. & Jacques P., 2008. *Bacillus* lipopeptides: versatile weapons for plant disease biocontrol. *Trends Microbiol.*, **16**(3), 115-125.
- Pérez-García A., Romero D. & de Vicente A., 2011. Plant protection and growth stimulation by microorganisms: biotechnological applications of *Bacilli* in agriculture. *Curr. Opin. Biotechnol.*, **22**(2), 187-193.
- Popp J., Petö K. & Nagy J., 2013. Pesticide productivity and food security. A review. *Agron. Sustainable Dev.*, **33**, 243-255.
- Rosas-Garcia N.M., 2009. Biopesticide production from *Bacillus thuringiensis*: an environmentally friendly alternative. *Recent Pat. Biotechnol.*, **3**(1), 28-36.
- Saidenberg D. et al., 2009. Monoamine oxidase inhibitory activities of indolylalkaloid toxins from the venom of the colonial spider *Parawixia bistriata*: functional characterization of PwTX-I. *Toxicon*, **54**(6), 717-724.
- Schmutterer H., 1990. Properties and potentials of natural pesticides from neem tree. *Annu. Rev. Entomol.*, **35**, 271-298.
- Shelton A.M., Zhao J.-Z. & Roush R.T., 2002. Economic ecological, food safety, and social consequences of the deployment of BT transgenic plants. *Annu. Rev. Entomol.*, **47**, 845-881.
- Silverio F., de Alvarenga E., Moreno S. & Picanco M., 2009. Synthesis and insecticidal activity of new pyrethroids. *Pest Manage. Sci.*, **65**, 900-905.
- Srivastava M. & Raizada R., 2007. Lack of toxic effect of technical azadirachtin during postnatal development of rats. *Food Chem. Toxicol.*, **45**(3), 465-471.
- Thakore Y., 2006. The biopesticide market for global agriculture use. *Ind. Biotechnol.*, **2**, 194-208.
- Tombolini R., Van Der Gaag D., Cerhardson B. & Janssoni J., 1999. Colonization pattern of the biocontrol strain *Pseudomonas chlororaphis* MA 342 on barley seeds visualized by using green fluorescent protein. *Appl. Environ. Microbiol.*, **65**(8), 3674-3680.
- Wang C.J. et al., 2012. Induction of drought tolerance in cucumber plants by a consortium of three plant growth-promoting rhizobacterium strains. *PLoS One*, **7**(12), e52565
- Washburn J., Trudeau D., Wong J. & Volkman L., 2003. Early pathogenesis of *Autographa californica* multiple nucleopolyhedrovirus and *Helicoverpa zea* single nucleopolyhedrovirus in *Heliothis virescens*: a comparison of the 'M' and 'S' strategies for establishing fatal infection. *J. Gen. Virol.*, **84**, 343-351.
- Weddle P., Welter S. & Thomson D., 2009. History of IPM in California pear-50 years of pesticide use and the transition to biologically intensive IPM. *Pest Manage. Sci.*, **65**(12), 1287-1292.
- Windley M. et al., 2012. Spider-venom peptides as bioinsecticides. *Toxins*, **4**, 191-227.
- Xu X., Jeffries P., Pautasso M. & Jeger M., 2011. Combined use of biocontrol agents to manage plant disease in theory and practice. *Phytopathology*, **101**(9), 1024-1031.

(49 réf.)