
Influence de l'utilisation de méthodes alternatives aux pesticides pour lutter contre les ravageurs de la pomme de terre dans la province du Shandong (Chine)

Auteur : Verscheure, Rémy

Promoteur(s) : Francis, Frédéric

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : sciences agronomiques, à finalité spécialisée

Année académique : 2016-2017

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/3078>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

**Influence de l'utilisation de méthodes alternatives aux
pesticides pour lutter contre les ravageurs de la
pomme de terre dans la province du Shandong (Chine)**

Rémy Verscheure

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER
BIOINGENIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES.**

Année académique 2016-2017

PROMOTEUR : Frédéric Francis

CO-PROMOTEUR : Yong Liu

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

**Influence de l'utilisation de méthodes alternatives aux
pesticides pour lutter contre les ravageurs de la
pomme de terre dans la province du Shandong (Chine)**

Rémy Verscheure

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER
BIOINGENIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES.**

Année académique 2016-2017

PROMOTEUR : Frédéric Francis

CO-PROMOTEUR : Yong Liu

Le voyage réalisé dans le cadre du présent travail a été rendu possible grâce à l'intervention financière du Fonds d'aide à la mobilité étudiante de la Fédération Wallonie-Bruxelles (FAME) et du Fonds de Mobilité de l'ULg.

Remerciements

Arrivant à la fin de mes études, je tiens à remercier plusieurs personnes qui m'ont accompagné durant la réalisation de ce travail ainsi que dans ma vie étudiante.

Je tiens tout d'abord à remercier les Professeurs Frédéric Francis et Yong Liu, promoteur et co-promoteur de ce travail de fin d'études, qui m'ont permis de réaliser ce travail en Chine et pour leur suivi apporté à ce travail.

Je tiens également à remercier Emilie Bosquée, doctorante à Gembloux, pour son suivi tout au long de ce travail, pour son accessibilité, ses corrections et sa bonne humeur. Merci aussi à tous les autres doctorants qui m'ont aidé pour la réalisation des expériences.

Je remercie aussi tous les étudiants chinois de la Shandong Agricultural University qui ont égayé mon séjour en Chine et aidé dans la réalisation de ce travail. Thank you to all of you, especially to Xiaochen Liang, for your help. My trip in China was wonderful, it was a great experience. I wish you all the best for the future.

Je souhaite remercier également mes acolytes Nicolas et Anthony qui m'ont accompagné lors de mon voyage en Chine et grâce à qui je garderai des souvenirs inoubliables.

Enfin, mes remerciements vont aussi bien sûr à toute ma famille, en particulier mes parents, qui m'ont supporté durant mes études, à mes amis tournaisiens (les loutes) ainsi qu'à tous mes amis gembloutois (les guinsseux) qui ont égayé mes études et avec qui j'ai passé d'excellents moments.

Résumé

L'utilisation abusive de produits phytosanitaires dans de nombreux pays, et particulièrement en République populaire de Chine, entraîne toute une série de conséquences néfastes pour l'environnement et la santé humaine. Ceci a provoqué un changement dans les mentalités qui pousse le monde agricole à se tourner vers une agriculture plus durable. Dans ce but, il est nécessaire de trouver des alternatives à l'utilisation de produits chimiques de synthèse. Ce travail a pour but d'analyser les effets de deux types de molécules sur les ravageurs de la culture de pomme de terre en Chine. Il s'agit d'une part d'une molécule sémiochimique, la népétalactone et d'autre part de deux éliciteurs, Hrip1 et PeaT1. La népétalactone et Hrip1 ont été testés en laboratoire, où des tests de comportement ont été réalisés à l'aide d'un tube en Y sur des pucerons *Aphis fabae* Scopoli femelles, puis la népétalactone et PeaT1 ont été testés sur un champ de pomme de terre, où des pièges jaunes ont permis de récolter les insectes présents. Lors des tests de comportement, les pucerons *A. fabae* femelles n'ont pas été attirés par la népétalactone ou par l'éliciteur Hrip1, il n'y a eu aucune différence significative entre ces molécules et le contrôle. Lors de l'essai en champ, il n'y a pas eu non plus de différence significative dans les nombres d'insectes récoltés entre les trois modalités, la népétalactone, l'éliciteur PeaT1 et le contrôle. Cependant, malgré l'absence de résultat significatif, des tendances ont pu être observées au cours des tests de comportement et de l'essai en champ. En effet, la népétalactone a exercé un effet répulsif lors des tests de comportement sur les pucerons *A. fabae*, alors que pour l'essai en champ, la substance sémiochimique a exercé un effet attractif sur les pucerons ainsi que sur les mirides récoltés dans les pièges, et elle a été répulsive sur les cicadelles. Les éliciteurs Hrip1 et PeaT1 n'ont montré aucun effet. Les résultats ont finalement été discutés afin d'améliorer les expériences et de continuer les recherches dans ce domaine.

Mots-clés : Chine, pomme de terre, sémiochimique, népétalactone, éliciteur, Hrip1, PeaT1, ravageurs, pucerons.

Abstract

The misuse of phytosanitary products worldwide, and especially in People's Republic of China, causes a range of adverse consequences for the environment and human health. This resulted in a change of attitude that forced farming practitioners to turn to a more sustainable agriculture. For this purpose, it is necessary to find alternatives to the use of synthetic pesticides. The purpose of this study is to analyze the effects of two types of molecules on pests of the potato crop in China. On the one hand, it was a semiochemical molecule called nepetalactone and on the other hand two plant defense elicitors, namely Hrip1 and PeaT1. Nepetalactone and Hrip 1 have been tested in the laboratory where behavioural assays were carried out with a Y-tube on aphids *Aphis fabae* Scopoli females. Then, nepetalactone and PeaT1 have been tested on a potato field where yellow traps were used to collect insects. According to the behavioural tests, females of *A. fabae* have not been attracted by the nepetalactone and Hrip1. There was no significant difference between these two molecules and the control. According to the field trials, there was no significant difference in the number of collected insects in the three modalities, nepetalactone, PeaT1 and control. However, despite the absence of significant results, trends have been observed for behavioural tests and the field trial. Indeed, nepetalactone had a repellent trend effect on *A. fabae* during behavioural tests. This semiochemical molecule also showed an attractive trend effect on aphids and mirids collected in field traps, and repulsive trend effect on leafhoppers. Both elicitors Hrip1 and PeaT1 have not shown any effect. Finally, results were discussed to improve experiments and continue research in this area.

Keywords: China, potato, semiochemical, nepetalactone, elicitor, Hrip1, PeaT1, pests, aphids.

Liste des abréviations

COV : Composés organiques volatils.

DAMP: Damage-Associated Molecular Pattern.

MAMP: Microbes-Associated Molecular Pattern.

PAMP: Pathogen-Associated Molecular Pattern.

PLRV: *Potato Leafroll Virus*.

PVY: *Potato Virus Y*.

RH: Réaction d'hypersensibilité.

SDN: Stimulateurs de defenses naturelles.

Table des matières

I. INTRODUCTION.....	1
II. PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE.....	2
1) L'agriculture chinoise.	2
1.1 Généralités :.....	2
1.2 Focus sur la province de Shandong :.....	2
2) La culture de pomme de terre et ses principaux ravageurs et maladies.	3
2.1 La culture de pomme de terre :.....	3
2.2 Les principales maladies :.....	4
2.2.1 Généralités :.....	4
2.2.2 Le mildiou :.....	5
2.2.3 La pourriture brune :.....	5
2.2.4 Le rhizoctone brun :.....	5
2.2.5 Virus transmis par les pucerons :.....	6
2.3 Les principaux ravageurs :.....	7
2.3.1 Généralités :.....	7
2.3.2 Le doryphore :.....	7
2.3.3 Les pucerons :.....	9
2.3.4 Les coccinelles :.....	13
2.3.5 La teigne de la pomme de terre :.....	14
3) Méthodes alternatives de lutte contre les ravageurs.....	15
3.1 Introduction :.....	15
3.2 Lutte biologique :.....	16
3.3 Substances sémiocchimiques :.....	16
3.3.1 Introduction:.....	16
3.3.2 Les différents types de sémiocchimiques:.....	17
3.3.3 Applications des sémiocchimiques :.....	18
3.3.4 Focus sur la népétalactone :.....	18
3.4 Eliciteurs de défense végétale :.....	22
3.4.1 Généralités :.....	22

3.4.2 Eliciteurs spécifiques :	22
3.4.3 Eliciteurs généraux :	23
3.4.4 Mécanismes de résistance de la plante :	24
3.4.5 Focus sur Hrip1 :	26
3.4.6 Focus sur PeaT1 :	27
3.5 Lutttes physique et culturale :	29
4) Conclusions.	31
III. OBJECTIFS DU TRAVAIL	32
IV. PARTIE EXPERIMENTALE	33
1) Matériel et méthodes.	33
1.1 Analyse des effets des molécules testées sur le comportement du puceron <i>Aphis fabae</i> en laboratoire.	33
1.1.1 Pucerons et plantes.	33
1.1.2 Tests comportementaux.	34
1.2 Analyse des effets des molécules testées sur les ravageurs de la culture de pomme de terre.	37
1.2.1 Préparation de la parcelle.	37
1.2.2 Application du sémiochimique.	38
1.2.3 Application de l'éliciteur.	39
1.2.4 Comptage des insectes sur les plantes.	40
1.2.5 Analyses statistiques.	40
1.3 Diagnostic des principales maladies présentes sur les plantes de pomme de terre.	40
2) Résultats.	41
2.1 Analyse des effets des molécules testées sur le comportement du puceron <i>Aphis fabae</i> en laboratoire.	41
2.1.1 Premier test de comportement avec le sémiochimique.	41
2.1.2 Deuxième test de comportement avec le sémiochimique.	41
2.1.3 Troisième test de comportement avec le sémiochimique.	42
2.1.4 Test de comportement avec l'éliciteur.	42
2.2 Analyse des effets des molécules testées sur les ravageurs de la culture de pomme de terre.	43
2.2.1 Piégeage d'insectes ravageurs de la pomme de terre.	43

2.2.2	Comptage des insectes ravageurs sur les plantes de pomme de terre.	49
2.3	Diagnostic des principales maladies présentes sur les plantes de pomme de terre.	50
3)	Discussions.....	51
3.1	Analyse des effets des molécules testées sur le comportement du puceron <i>Aphis fabae</i> en laboratoire.....	51
3.1.1	Tests de comportement avec la substance sémiochimique.	51
3.1.2	Test de comportement avec l'éliciteur.	54
3.2	Analyse des effets des molécules testées sur les ravageurs de la culture de pomme de terre. 55	
3.2.1	Piégeage des insectes.	55
3.2.2	Comptage d'insectes sur les plantes.....	57
3.2.3	Discussion globale de l'essai en champ.	58
3.3	Diagnostic des principales maladies présentes sur les plantes de pomme de terre.	61
V.	CONCLUSIONS GENERALES.....	62
V.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	63

Table des figures

Figure 1. Doryphore <i>Leptinotarsa decemlineata</i> adulte (INRA, 2017).	8
Figure 2. Représentation des cycles de vie d'un puceron hétéroécique (gauche) et monoécique (droite) (Williams & Dixon, 2007).	10
Figure 3. Pucerons <i>Myzus persicae</i> (INRA, 2017).....	11
Figure 4. Pucerons <i>Macrosiphum euphorbiae</i> (INRA, 2017).....	12
Figure 5. Coccinelle <i>Henosepilachna vigintioctomaculata</i> adulte (Xu et al., 2013).	14
Figure 6. <i>Phthorimaea operculella</i> adulte (UF/IFAS, 2017).	15
Figure 7. Représentation chirale des différents composés de la phéromone sexuelle des pucerons (Boullis & Verheggen, 2016).	19
Figure 8. Les différents types d'éliciteurs généraux et spécifiques (Henry et al., 2012).....	24
Figure 9. Méthodes culturales de gestion de la population de pucerons (Wratten et al., 2007). ...	30
Figure 10. Représentation du dispositif complet du test de comportement.	35
Figure 11. Représentation du tube en Y et de ses différentes zones.	36
Figure 12. Plan du champ de pomme de terre.....	38
Figure 13. Piège jaune avec le diffuseur du sémiachimique.	39
Figure 14. Evolution du nombre moyen de pucerons par parcelle de la modalité correspondante en fonction de la date de collecte.	44
Figure 15. Répartition des espèces de pucerons en fonction de la modalité pour l'ensemble de la période de collecte.....	45
Figure 16. Evolution du nombre moyen de cicadelles par parcelle de la modalité correspondante en fonction de la date de collecte.	47
Figure 17. Evolution du nombre moyen de mirides par parcelle de la modalité correspondante en fonction de la date de collecte.	48
Figure 18. Evolution du nombre moyen de pucerons comptés par plante en fonction des modalités et des dates de collecte.	50
Figure 19. Illustration de l'hétérogénéité du champ de pomme de terre.	59

Table des tableaux

Tableau 1. Principaux ravageurs et maladies présents en Chine (Cock et al., 2016).....	4
Tableau 2. Ratios des composants de la phéromone sexuelle (népétalactone et népétalactol) de plusieurs espèces de pucerons (Boullis & Verheggen, 2016).	20
Tableau 3. Résultats du deuxième test comportemental avec la népétalactone (1%).	42
Tableau 4. Résultats du troisième test comportemental avec la népétalactone (10%).	42
Tableau 5. Résultats du test comportemental avec l'éliciteur Hrip1.	42
Tableau 6. Nombre moyen de pucerons récoltés par parcelle de la modalité correspondante en fonction de la date de collecte.	43
Tableau 7. Nombre moyen de pucerons par parcelle en fonction de l'espèce et de la modalité pour l'ensemble de la période de collecte.	45
Tableau 8. Nombre moyen de cicadelles récoltées par parcelle de la modalité correspondante en fonction de la date de collecte.	46
Tableau 9. Nombre moyen de mirides récoltés par parcelle de la modalité correspondante en fonction de la date de collecte.	48
Tableau 10. Evolution du nombre moyen de pucerons comptés par plante en fonction des modalités et des dates de collecte.	49
Tableau 11. Scores moyens du diagnostic obtenus par modalité pour chaque maladie analysée. .	51

I. Introduction

La Chine vit une période de croissance économique et démographique très importante depuis plusieurs années. Cela s'est traduit par une modernisation de son agriculture. Afin de nourrir sa population et augmenter sa productivité, la Chine utilise encore aujourd'hui des quantités très importantes de pesticides et d'engrais chimiques. Selon une étude réalisée par l'Académie chinoise des sciences sociales (CASS), les agriculteurs chinois utilisent en moyenne 70% de pesticides en plus que la moyenne mondiale, ainsi qu'un tiers du total des engrais chimiques sur leurs cultures. Cependant, le ministère de l'agriculture est actuellement en train de mettre en place un plan d'action en faveur d'une agriculture plus durable en encourageant les agriculteurs à réduire l'utilisation de produits chimiques. De manière plus globale, la réduction de l'emploi de produits phytosanitaires de synthèse est l'enjeu majeur du monde agricole du 21^e siècle (CASS, 2015).

L'utilisation systématique de produits chimiques de synthèse pour lutter contre les ravageurs de nos cultures n'est peut-être pas la bonne solution. Cette méthode a montré ses limites. D'une part, elle provoque le développement de mécanismes de résistances chez les ravageurs. D'autre part, elle est à l'origine de plusieurs autres effets néfastes pour l'homme et l'environnement comme la pollution des sols, la pollution des eaux, la perte de biodiversité, les résidus sur les denrées alimentaires ainsi que des effets nuisibles sur les organismes auxiliaires qui nous aident à lutter contre les ravageurs. Il est temps de changer nos mentalités et de trouver des méthodes alternatives de lutte qui sont plus respectueuses de l'environnement. Dans ce but, la lutte biologique constitue une alternative intéressante.

L'objectif de ce travail est de présenter les effets de deux types de molécules dans la lutte contre les ravageurs de la culture de pomme de terre dans la province du Shandong en Chine. Premièrement, ces molécules seront testées en laboratoire afin d'évaluer leurs effets sur le comportement du puceron *Aphis fabae*. Ensuite, ces mêmes molécules seront également testées en champs afin d'évaluer leur impact sur les ravageurs de la pomme de terre.

II. Partie bibliographique

1) L'agriculture chinoise.

1.1 Généralités :

Avec une population de près d'1,4 milliard d'habitants et une superficie de 9,6 millions de km², la Chine est le pays le plus peuplé et le troisième plus grand pays au monde. Pour nourrir cette population, la Chine a dû passer d'une agriculture paysanne traditionnelle à une agriculture moderne et intensive. Ces changements ont été opérés grâce à des améliorations technologiques ainsi que des réformes politiques depuis les années 1970. Cela a provoqué aujourd'hui un grand changement dans le paysage agricole chinois (Han, 1989 ; Liu et al., 2013 ; Ye et al., 2002).

L'agriculture chinoise est vieille de plus de 7000 ans. Les régions de cultures se situent à l'est, au centre et au sud du pays. L'ouest et le nord sont constitués de déserts et de steppes et sont occupés par des pâturages ou laissés inexploités. En réalité, deux tiers de la Chine sont impropres à l'agriculture ou à la sylviculture et les surfaces effectivement cultivées ne représentent que 10% de la superficie totale. De plus, les terres exploitées sont progressivement absorbées par les zones urbanisées. L'agriculture reste tout de même un secteur d'activités important, avec 33,6% de la population active, derrière les services (36,1%) mais devant l'industrie (30,3%). La Chine est le premier producteur mondial de blé, de riz, de thé, de coton, de porcins, d'ovins ou encore de caprins et est le second producteur mondial de maïs. Le pays consomme 20% de la production alimentaire mondiale mais ne possède que 9% des terres agricoles, d'où la nécessité pour la Chine d'investir à l'étranger en louant des terres agricoles à d'autres pays (comme en Argentine ou en Ukraine) (FAOSTAT, 2014 ; Liu et al., 2013 ; Ye et al., 2002).

1.2 Focus sur la province de Shandong :

Le Shandong est une des 22 provinces chinoises. Elle est située sur la côte Est de la Chine et possède une superficie de 157 000 km² et une population de plus de 96 millions d'habitants.

Le Shandong est considéré comme une des provinces les plus importantes en termes de production agricole, en particulier les céréales (dont le blé), le coton, les fruits, les légumes, les fruits de mer, l'arachide, le tabac, le chanvre ou encore le ver à soie. A titre d'exemple, en 2011, la production totale de céréales a atteint 44,3 millions de tonnes (8,5% du total de la production chinoise). En tant qu'un des plus grands greniers de l'agriculture chinoise, la province de Shandong cherche actuellement à moderniser et à industrialiser encore d'avantage son agriculture (FAOSTAT, 2014 ; NENIC, 2014 ; Wang & Zhang, 2010).

2) La culture de pomme de terre et ses principaux ravageurs et maladies.

2.1 La culture de pomme de terre :

La pomme de terre cultivée, *Solanum tuberosum* (L.), est une des cultures les plus répandues sur la planète. Actuellement, la pomme de terre est la quatrième culture agricole la plus produite dans le monde, après le maïs, le riz et le blé. La Chine est le plus grand producteur de pomme de terre (95 millions de tonnes en 2014). Ce pays produit en effet à lui seul 25% de la production mondiale (FAOSTAT, 2014 ; Oerke, 2006 ; Radcliffe, 1982 ; Vincent et al., 2013).

La pomme de terre appartient à la famille des Solanacées, dans laquelle on retrouve également des cultures comme la tomate, le poivron ou le tabac. C'est une plante vivace à fleurs blanches ou violettes originaire des Andes. Les plants sont obtenus par reproduction végétative à partir des tubercules mères. La partie récoltée de la plante est le tubercule fils, riche en amidon et en protéines. La plante pousse en général sur une butte, ce qui permet de réduire l'humidité du sol (qui peut être nuisible aux tubercules) et de faciliter la récolte. Les rendements en tubercules peuvent varier de manière importante entre les régions, allant de 20 tonnes à l'hectare à plus de cent. Il est recommandé de maintenir une période minimale de 4 ans entre deux cultures de pomme de terre afin de limiter les risques de maladies. La date de plantation étant dépendante de la température du sol (au moins 10 °C), la plantation s'effectue généralement durant le mois d'avril dans les régions tempérées. La récolte dépend quant à elle de la variété.

En effet, des variétés précoces peuvent déjà être récoltées 90 jours après la plantation, soit durant le mois de juillet, alors que des variétés tardives peuvent être récoltées jusqu'en septembre (cours de 2^{ème} Master de productions végétales en régions tempérées donné par Mr. Bodson à Gembloux Agro-Bio Tech en 2016).

De nombreux insectes peuvent causer des dégâts à la culture de pomme de terre, soit directement en se nourrissant des tubercules, en détériorant la récolte, soit indirectement en se nourrissant des feuilles, des tiges ou en transmettant des pathogènes. Ces dégâts peuvent mener à des baisses importantes de rendements et de qualité. Jusqu'à présent, la gestion de ces ravageurs dépend principalement d'insecticides synthétiques, causant des résistances chez les insectes ainsi que de sérieux problèmes à l'environnement et la santé humaine. Il est dès lors temps de trouver des alternatives en utilisant des moyens de lutte plus sains (Oerke, 2006 ; Radcliffe, 1982 ; Vincent et al., 2013).

Les maladies et ravageurs qui affectent la culture de pomme de terre sont très nombreux et varient selon les régions. Pour cette raison, uniquement ceux retrouvés en Chine seront abordés (tableau 1).

Tableau 1. Principaux ravageurs et maladies présents en Chine (Cock et al., 2016).

Preferred Scientific name	Common name	Phylum	Order	Family
<i>Phytophthora infestans</i> (Mont.) de Bary	Phytophthora blight	Oomycota	Peronosporales	Peronosporaceae
Potato virus Y	Potato mottle			Potyviridae
<i>Ralstonia solanacearum</i> (Smith 1896) Yabuuchi et al. and <i>Ralstonia solanacearum</i> race 3	Bacterial wilt of potato	Proteobacteria	Burkholderiales	Ralstoniaceae
<i>Thanatephorus cucumeris</i> (Frank) Donk ¹	Brown rot of potato	Basidiomycota	Ceratobasidiales	Ceratobasidiaceae
<i>Leptinotarsa decemlineata</i> Say ²	Black scurf of potato ¹	Arthropoda	Coleoptera	Chrysomelidae
<i>Helicoverpa armigera</i> (Hübner)	Colorado potato beetle ²	Arthropoda	Lepidoptera	Noctuidae
<i>Myzus persicae</i> Sulzer	Cotton bollworm	Arthropoda	Hemiptera	Aphididae
Cucumber mosaic virus	Green peach aphid	Arthropoda	Nidovirales	Bromoviridae
<i>Sclerotinia sclerotiorum</i> (L. lib.) de Bary	Cucumber mosaic	Ascomycota	Helotiales	Sclerotiniaceae
<i>Meloidogyne incognita</i> (Kofoid & White) Chitwood	Cottony soft rot	Nematoda	Tylenchida	Meloidogynidae
Tobacco mosaic virus	Root-knot nematode			Virgaviridae
<i>Epilachna vigintioctopunctata</i> (Fabricius)	Tobacco mosaic	Arthropoda	Coleoptera	Coccinellidae
<i>Gibberella zeae</i> (Schwein.) Petch	Hadda beetle	Ascomycota	Hypocreales	Nectriaceae
<i>Bemisia tabaci</i> (Gennadius)	Headblight of maize	Arthropoda	Hemiptera	Aleyrodidae
<i>Aphis gossypii</i> Glover	Tobacco whitefly	Arthropoda	Hemiptera	Aphididae
	Cotton aphid	Arthropoda	Hemiptera	Aphididae

¹Black scurf of potato (*Thanatephorus cucumeris*) has many other names, depending on the host.

²Colorado potato beetle (*Leptinotarsa decemlineata*) is still considered a quarantine pest restricted to Xinjiang Province.

2.2 Les principales maladies :

2.2.1 Généralités :

Les maladies les plus dommageables au niveau de la pomme de terre en Chine sont le mildiou (*Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary) et le virus PVY (*Potato Virus Y*).

D'autres maladies sont également importantes, comme la pourriture brune (*Ralstonia solanacearum* (Smith) Yabuuchi et al.) ou le rhizoctone brun (*Thanatephorus cucumeris* (Frank) Donk). Concernant les virus, les plus communs sont ceux transmis par les pucerons (Cock et al., 2016).

2.2.2 Le mildiou :

Le mildiou de la pomme de terre, *Phytophthora infestans*, est un champignon appartenant à la classe des oomycètes. Les symptômes de cette maladie sont représentés par de larges plages brunes nécrosées entourées de marges vert pâle au niveau de la face supérieure des feuilles, et par un duvet blanc au niveau de la face inférieure. Les taches brunes peuvent également se manifester au niveau des pétioles et des tiges. Le mildiou peut mener à la destruction totale de la plante. En ce qui concerne les tubercules, ceux-ci présentent des taches brunes au niveau de l'épiderme alors que la chair présente des zones marbrées donnant un aspect de pourriture. Une succession de périodes fraîches et humides favorisent l'apparition et la propagation de ce pathogène (INRA, 2017 ; Platt, 2008).

2.2.3 La pourriture brune :

La pourriture brune, *Ralstonia solanacearum*, est une protéobactérie qui comprend 3 races différentes. Chaque race regroupe plusieurs hôtes, les races 1 et 2 sont très présentes dans les zones à climat chaud, subtropical ou tropical, alors que la race 3 est mieux adaptée aux climats tempérés. La race 3 s'attaque à plusieurs hôtes, dont la pomme de terre. Les symptômes de la maladie chez la pomme de terre commencent par un faible jaunissement des feuilles, puis se concluent par un flétrissement total de la plante. Les tubercules brunissent et pourrissent (INRA, 2017 ; Poussier, 2000).

2.2.4 Le rhizoctone brun :

Le rhizoctone brun, *Thanatephorus cucumeris*, est un champignon appartenant à la classe des basidiomycètes. Cette maladie affecte le développement de la pomme de terre de l'émergence à la récolte. Les symptômes sont représentés par un enroulement des feuilles et par des lésions nécrotiques au niveau des tiges. La maladie peut également s'exprimer sur toutes les parties souterraines de la plante. Le tubercule présente des amas sombres de forme irrégulière à sa surface, et la taille et le rendement des tubercules sont réduits par la manifestation de cette maladie (INRA, 2017 ; El Bakali & Martin, 2006).

2.2.5 Virus transmis par les pucerons :

Les pucerons sont connus pour être des vecteurs importants de virus. Il existe au moins 37 virus répertoriés pour la culture de pomme de terre, parmi lesquels 13 sont transmis par des pucerons. Les deux plus importants virus de la pomme de terre sont transmis par des pucerons, il s'agit du virus de l'enroulement (*potato leafroll virus*, PLRV) et du virus Y (*potato virus Y*, PVY) (Radcliffe, 1982 ; Saguez et al., 2013).

Les virus peuvent être transmis de différentes manières par les pucerons. En effet, les virus peuvent être non-persistants, semi-persistants ou persistants. Les virus non-persistants sont rapidement acquis par les pucerons, il n'y a pas de période de latence entre l'acquisition du virus et le moment où il peut être transmis à une plante. Dans ce cas, les pucerons restent infectieux pendant une période variant de quelques minutes à une heure. Les virus non-persistants et semi-persistants sont non-circulants, c'est-à-dire qu'ils ne circulent pas dans le corps des pucerons, ils restent au niveau des pièces buccales et des parties antérieures du tube digestif du puceron. A l'inverse des virus non-persistants, les virus persistants nécessitent une période de latence. Les pucerons ayant acquis ce type de virus restent infectieux pour le restant de leur vie et peuvent le transmettre à la plante chaque fois qu'ils se nourrissent. Les virus persistants sont circulants, c'est-à-dire qu'après l'acquisition du virus dans le phloème d'une plante infectée, le virus migre vers l'intestin où il traverse la paroi intestinale pour atteindre l'hémocèle, et ensuite les glandes salivaires. C'est à partir de la salive des pucerons que les virus sont ensuite transmis à d'autres plantes. Le virus PLRV est persistant alors que le virus PVY est non-persistant (Eigenbrode et al., 2002 ; Harrington et al., 1986 ; Radcliffe, 1982 ; Saguez et al., 2013 ; van den Heuvel et al., 1994).

Le virus PVY est transmis par de nombreuses espèces de pucerons, dont *Myzus persicae* Sulzer est le vecteur prédominant. Le virus peut s'exprimer par un brunissement et une décoloration des limbes foliaires, des nécroses au niveau des nervures foliaires, et une sénescence prématurée de la plante (Radcliffe, 1982 ; Harrington et al., 1986).

Le virus PLRV peut également être transmis par de nombreuses espèces de pucerons, mais *M. persicae* est de loin le vecteur le plus important. Le virus se manifeste par un pâlissement et une nanification des plantes infectées, les feuilles deviennent raides et s'enroulent, et les tubercules peuvent présenter des nécroses.

La période de latence varie entre 8 et 24 heures pour que le virus soit suffisamment concentré dans les glandes salivaires et que l'insecte devienne infectieux (Radcliffe, 1982 ; Eigenbrode et al., 2002 ; van den Heuvel et al., 1994).

Les virus PLRV et PVY sont très dommageables car ils peuvent causer des dégâts importants et ainsi réduire de manière conséquente les rendements (Radcliffe, 1982 ; Harrington et al., 1986).

2.3 Les principaux ravageurs :

2.3.1 Généralités :

Les principaux ravageurs de la culture de pomme de terre en Chine sont des insectes. Parmi les insectes ravageurs hors-sol, on retrouve le doryphore (*Leptinotarsa decemlineata* Say), les coccinelles (*Henosepilachna vigintioctomaculata* Motschulsky et *Henosepilachna vigintioctopunctata* Fabricius), les pucerons (principalement *Myzus persicae* Sulzer, *Macrosiphum euphorbiae* Thomas, *Aphis* spp. et *Aulacorthum solani* Kaltenbach), la teigne de la pomme de terre (*Phthorimaea operculella* Zeller), les aleurodes (*Bemisia tabaci* Gennadius et *Trialeurodes vaporariorum* Westwood), les cicadelles (*Empoasca* spp.) et les mirides (*Apolygus lucorum* Meyer-Dur et *Adelphocoris lineolatus* Goeze) (Cock et al., 2016 ; Giordanengo et al., 2013 ; Xu et al., 2013).

Certains ravageurs du sol causent des dégâts au niveau des tubercules. Parmi ceux-ci, on retrouve notamment les hannetons (*Amphimallon solstitialis* Linnaeus et *Holotrichia oblita* Faldermann), les noctuelles (*Agrotis* spp.), les taupins (*Pleonomus canaliculatus* Faldermann et *Agriotes subrittatus* Motschulsky), les grillons-taupes (*Gryllotalpa* spp.) et la fourmi pharaon (*Monomorium pharaonis* Linnaeus). Les principaux insectes ravageurs hors-sol de la culture de pomme de terre en Chine sont décrits ci-dessous (Cock et al., 2016 ; Giordanengo et al., 2013 ; Xu et al., 2013).

2.3.2 Le doryphore :

Le doryphore, *Leptinotarsa decemlineata*, appartenant à l'ordre des Coléoptères, est un des ravageurs les plus connus de la pomme de terre. Ce ravageur présent dans de nombreuses régions du monde est capable de s'adapter selon les conditions et est très difficile à contrôler. Le doryphore est un herbivore oligophage qui se nourrit de plantes appartenant à la famille des Solanacées. Parmi elles, la pomme de terre, la tomate et l'aubergine sont des hôtes importants.

Pour trouver et coloniser de nouveaux plants de pomme de terre ou d'autres plantes hôtes, le doryphore utilise des signaux visuels et olfactifs. Actuellement, le doryphore cause des dégâts aux cultures de pomme de terre dans toute l'Europe, l'Amérique du nord, l'Asie mineure, l'Asie Centrale et l'ouest de la Chine, mais son aire ne cesse de croître et elle pourrait à l'avenir atteindre d'autres régions du monde. En effet, le doryphore est très mobile et est capable de voler sur de longues distances. Les femelles sont très prolifiques et peuvent pondre entre 300 et 800 œufs chacune (Alyokhin et al., 2013 ; Liu et al., 2012 ; Weber, 2003).



Figure 1. Doryphore *Leptinotarsa decemlineata* adulte (INRA, 2017).

Le doryphore est considéré comme étant le plus important insecte défoliateur de la pomme de terre. En effet, 40 cm² de feuillage sont consommés en moyenne par doryphore durant l'ensemble du stade larvaire, et environ 10 cm² sont consommés chaque jour durant le stade adulte. Une fois qu'il n'y a plus de feuillage, les doryphores peuvent également se nourrir des tiges et tubercules, même si moins appréciés que les feuilles (Alyokhin et al., 2013 ; Weber, 2003).

La défoliation causée par les doryphores peut mener à des pertes importantes de rendements, particulièrement si la défoliation a lieu durant la formation des tubercules. Néanmoins, les plants de pomme de terre peuvent résister à une défoliation sans réduction du rendement si les dégâts ont été réalisés en dehors de cette période. Afin d'éviter tout risque de perte, les agriculteurs ont souvent recours aux insecticides.

Cependant, les doryphores ont développé avec le temps des résistances aux pesticides et deviennent de plus en plus difficiles à éliminer. Il est donc nécessaire de trouver d'autres méthodes alternatives de contrôle (Alyokhin et al., 2013 ; Liu et al., 2012 ; Mota-Sanchez et al., 2006 ; Scott et al., 2003 ; Weber, 2003).

2.3.3 Les pucerons :

2.3.3.1 Introduction :

Les pucerons sont des insectes phytophages de type piqueur-suceur. Ils appartiennent à l'ordre des Hémiptères, et à la super-famille des Aphidoidea. Au sein de cette super-famille, il existe 3 familles différentes de pucerons : Aphididae (la famille la plus importante), Adelgidae et Phylloxeridae. Il existe environ 4700 espèces de pucerons appartenant à la famille des Aphididae, mais seulement une centaine d'espèces ont une importance économique au niveau des cultures agricoles. Les espèces connues pour être des ravageurs de cultures appartiennent majoritairement à la sous-famille des Aphidinae (Blackman & Eastop, 2007).

Les pucerons causent de sérieux dégâts aux cultures. D'une part, ils se nourrissent de la sève des plantes, mais d'autre part, ce sont des vecteurs importants de virus. Les principales espèces de pucerons s'attaquant à la pomme de terre ne sont pas spécifiques à cette culture, la plupart d'entre elles sont polyphages (Saguez et al., 2013).

2.3.3.2 Cycle biologique des pucerons :

Les pucerons ont des cycles de vie complexes. Au cours de ceux-ci, différentes formes morphologiques apparaissent, et chacune a une fonction spécifique. Il existe deux principaux types de cycles de vie des pucerons : monoécique et hétéroécique. Ces deux types se différencient par l'interaction avec les plantes hôtes. Les pucerons hétéroéciques changent d'espèces de plantes hôtes : ils vivent sur une première espèce végétale en hiver, appelée l'hôte primaire, migrent ensuite vers une autre espèce végétale en été, appelée l'hôte secondaire, et retournent enfin vers l'hôte primaire en automne. Les pucerons monoéciques, quant à eux, ne changent pas d'espèces de plantes hôtes, ils restent sur la même espèce végétale ou migrent entre des espèces végétales proches durant leur cycle (Saguez et al., 2013 ; Williams & Dixon, 2007).

Chez les pucerons hétéroéciques, l'accouplement a lieu sur l'hôte primaire en automne. Les œufs pondus passent ensuite l'hiver. Au printemps, les œufs éclosent sur l'hôte primaire et donnent des femelles appelées fondatrices. Celles-ci se reproduisent de façon asexuée (parthénogenèse) et produisent des femelles asexuées ailées et aptères. Les femelles ailées migrent afin de trouver des hôtes secondaires. Une fois sur l'hôte secondaire, plusieurs générations de femelles parthénogénétiques (appelées virginipares) ailées et aptères se succèdent, permettant à la population de croître rapidement. Ensuite, au début de l'automne, la seconde phase reproductive commence, menant à la production de mâles et femelles ailés. Les femelles ailées, appelées gynopares, migrent vers l'hôte primaire afin de produire des femelles aptères capables de produire des phéromones sexuelles, appelées ovipares. Ces femelles vont attirer les mâles pour l'accouplement. Chez les pucerons monoéciques, le cycle est très similaire à celui des hétéroéciques (Boullis & Verheggen, 2016 ; Williams & Dixon, 2007). Les cycles de vie des pucerons hétéroéciques et monoéciques sont repris à la figure 2 (Williams & Dixon, 2007).

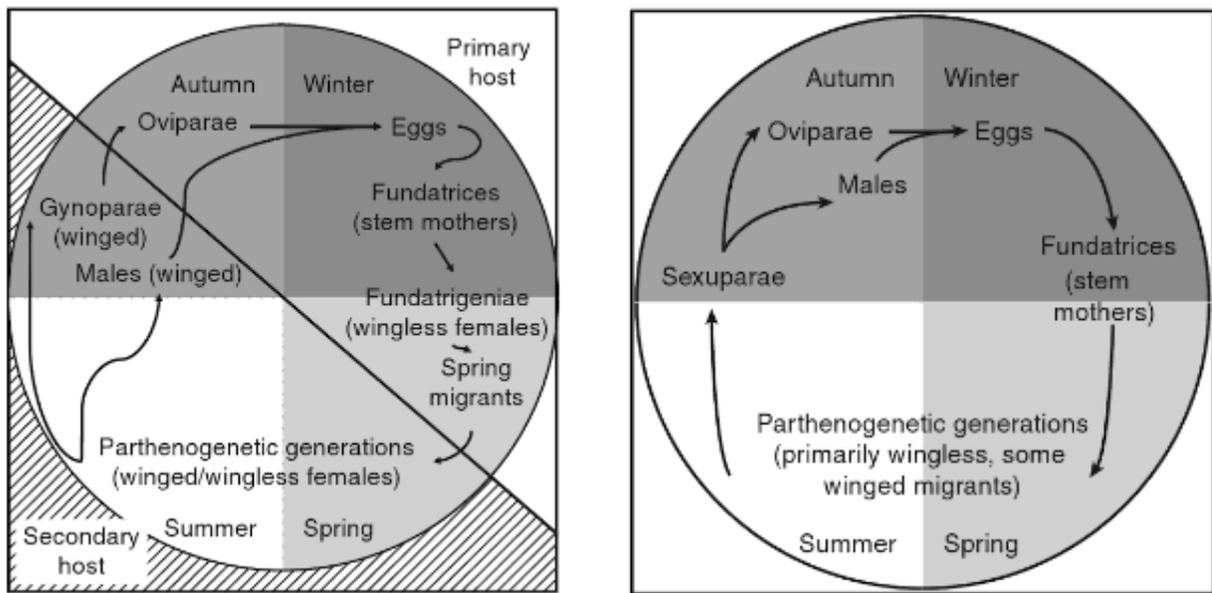


Figure 2. Représentation des cycles de vie d'un puceron hétéroécique (gauche) et monoécique (droite) (Williams & Dixon, 2007).

Les pucerons peuvent être holocycliques ou anholocycliques. Ces termes se réfèrent à la manière de se reproduire. Les pucerons holocycliques alternent la reproduction parthénogénétique et la reproduction sexuée, alors que les pucerons anholocycliques se reproduisent uniquement par parthénogenèse et ne donnent pas de forme sexuée ni d'œuf. Les pucerons qui colonisent la pomme de terre sont principalement hétéroéciques et holocycliques (Saguez et al., 2013).

Les pucerons sont caractérisés par un polymorphisme important. En effet, au sein d'une même espèce, différentes morphologies peuvent être présentes dans la même population. La couleur des individus mais aussi la présence d'ailes (individus ailés ou aptères) peuvent varier au sein d'une même population. La morphologie est influencée par plusieurs facteurs, comme l'environnement, le climat, la qualité de la plante hôte et la densité de population. Par exemple, une population de pucerons dense qui commence à manquer de nourriture produira plus de formes ailées afin de trouver de nouvelles plantes hôtes (Saguez et al., 2013 ; Williams & Dixon, 2007).

2.3.3.3 Pucerons ravageurs de la pomme de terre :

Les pucerons majoritairement présents sur la culture de pomme de terre appartiennent aux genres *Aulacorthum* spp., *Aphis* spp., *Macrosiphum* spp., et *Myzus* spp., et les deux principales espèces sont *Myzus persicae* et de *Macrosiphum euphorbiae* (Radcliffe, 1982 ; Saguez et al., 2013).

Myzus persicae, également appelé puceron vert du pêcher, est le puceron de la pomme de terre le plus important dans le monde. C'est une espèce polyphage qui colonise des centaines d'espèces végétales appartenant à plus de 40 familles botaniques différentes. Cette espèce est généralement hétéroécique et holocyclique (Radcliffe, 1982 ; Saguez et al., 2013).



Figure 3. Pucerons *Myzus persicae* (INRA, 2017).

Macrosiphum euphorbiae, également appelé puceron vert et rose de la pomme de terre, est une espèce polyphage qui se nourrit de plus de 200 espèces végétales appartenant à plus de 20 familles différentes, incluant les plantes du genre *Solanum*. *M. euphorbiae* est une espèce hétéroécique le plus souvent anholocyclique (Radcliffe, 1982 ; Saguez et al., 2013).



Figure 4. Pucerons *Macrosiphum euphorbiae* (INRA, 2017).

2.3.3.4 Dégâts causés par les pucerons :

En plus de la transmission de virus déjà expliquée antérieurement, les pucerons sont également capables de provoquer d'autres dégâts chez les plantes. Tout d'abord, en se nourrissant du phloème à l'aide de leur stylet, les pucerons privent les plantes de nutriments nécessaires à leur croissance et à leur reproduction. Ensuite, en se nourrissant, les pucerons injectent leur salive qui peut être phytotoxique. Enfin, le miellat sécrété par les pucerons constitue un milieu adéquat pour le développement de certains champignons pathogènes (Dedryver et al., 2010 ; Fokkema et al., 1983 ; Goggin, 2007 ; Will & van Bel, 2006).

Les pucerons peuvent également modifier le métabolisme de la plante. Le phloème contient des protéines et métabolites qui permettent à la plante de se défendre face à une attaque de pucerons. Quelques minutes après la pénétration du stylet, la plante accumule de la callose afin de réduire ou de stopper le flux de phloème. En réponse à cela, le puceron injecte de la salive pour contrer les réactions de défense de la plante. En effet, cette salive contient des protéines qui suppriment les défenses de la plante en inhibant la coagulation des protéines du phloème, le dépôt de callose et l'occlusion.

Les pucerons ont aussi la capacité d'améliorer la composition du phloème en augmentant les flux, cela permet ainsi d'amener les nutriments de la plante afin de les détourner à leur avantage. Enfin, les pucerons ont la capacité d'interférer avec le métabolisme de la plante, notamment la formation de parois cellulaires, la photosynthèse, la croissance, et la production de métabolites secondaires (Saguez et al., 2013).

2.3.4 Les coccinelles :

2.3.4.1 *Henosepilachna vigintioctomaculata* :

Egalement appelée coccinelle de la pomme de terre, *Henosepilachna vigintioctomaculata* est un coléoptère appartenant à la famille des Coccinellidae et à la sous-famille des Epilachninae. Au stade adulte, *H. vigintioctomaculata* possède 28 points sur ses élytres. Cette coccinelle est principalement présente dans le nord de la Chine (Xu et al., 2013).

C'est une espèce polyphage qui se nourrit d'au moins une trentaine d'espèces végétales appartenant à 13 familles différentes, dont principalement les Solanacées. En Chine, *H. vigintioctomaculata* est le ravageur le plus important de la culture de pomme de terre. Les adultes et les larves causent des dégâts importants en se nourrissant des feuilles, des tiges et des fleurs. Les parties attaquées peuvent présenter des sécheresses, des nécroses et entraver la photosynthèse pour finalement provoquer la mort de la plante. De plus, les dégâts causés par la coccinelle de la pomme de terre peuvent favoriser les infections de pourriture grise (*Botrytis cinerea*) ainsi que d'autres maladies. Ces dernières années, en cas de forte infestation de *H. vigintioctomaculata*, les pertes de rendements en pommes de terre ont parfois atteint 30% (Hori et al., 2011 ; Xu et al., 2013).



Figure 5. Coccinelle *Henosepilachna vigintioctomaculata* adulte (Xu et al., 2013).

2.3.4.2 *Henosepilachna vigintioctopunctata* :

Egalement appelée coccinelle à 28 points, *Henosepilachna vigintioctopunctata* appartient au même genre que *H. vigintioctomaculata*, dont elle ressemble fortement. Morphologiquement, il est très difficile de différencier ces 2 espèces. En effet, la forme du corps, la couleur du corps et le nombre de points sur les élytres sont similaires pour *H. vigintioctomaculata* et *H. vigintioctopunctata*. Cependant, il est possible de les différencier anatomiquement. *H. vigintioctopunctata* est réparti dans toute la Chine. Cette espèce se nourrit principalement d'espèces végétales appartenant aux familles des Solanacées et des Cucurbitacées. L'aubergine est l'hôte le plus important de la coccinelle à 28 points, mais de sérieux dégâts peuvent aussi être faits au niveau de la pomme de terre. Les larves et les adultes se nourrissent des organes de la plante, pouvant causer sa mort. Les dégâts occasionnés par *H. vigintioctopunctata* peuvent affecter le rendement et la qualité des tubercules (Rajagopal & Trivedi, 1989 ; Xu et al., 2013).

2.3.5 La teigne de la pomme de terre :

La teigne de la pomme de terre, également appelée *Phthorimaea operculella*, est un lépidoptère appartenant à la famille des Gelechiidae. La teigne de la pomme de terre est répartie dans toute la Chine, mais principalement dans les provinces du sud. Le tabac est la plante hôte la plus appréciée par ce lépidoptère, suivent ensuite la pomme de terre, l'aubergine, ainsi que d'autres espèces de la famille des Solanacées.



Figure 6. *Phthorimaea operculella* adulte (UF/IFAS, 2017).

P. operculella est le plus nuisible des ravageurs du stockage des pommes de terre, mais peut également occasionner des dégâts importants au niveau des champs de pomme de terre en se nourrissant des tiges et des feuilles. Les larves se nourrissent des plantes et peuvent provoquer leur mort. Les dégâts sont encore plus graves lors du stockage. En effet, la larve se nourrit des tubercules et peut induire des pertes très importantes, variant entre 50% et 100% dans certaines régions (Das, 1995 ; Trivedi & Rajagopal, 1992 ; Xu et al., 2013).

3) Méthodes alternatives de lutte contre les ravageurs.

3.1 Introduction :

De nos jours, l'agriculture se veut plus durable. Il y a une transition progressive de la lutte chimique vers la lutte intégrée. La lutte intégrée signifie l'association de plusieurs lutttes (chimique, biologique, physique, culturale, etc.) où la lutte chimique n'intervient qu'en dernier recours, ainsi les méthodes de lutte durables sont privilégiées. En effet, la lutte chimique présente de nombreuses limites. Par exemple, le prix élevé des produits phytosanitaires, le développement de résistances, la pollution des sols, les résidus sur les denrées, etc. (cours de 2ème Master de méthodes alternatives donné par Mr.Jijakli à Gembloux Agro-Bio Tech en 2016 ; Dedryver et al., 2010 ; Olivier, 1988). Les principales méthodes alternatives de lutte sont décrites ci-dessous.

3.2 Lutte biologique :

La lutte biologique est le fait d'exploiter un organisme vivant afin de contrôler un autre organisme vivant. Les organismes exploités sont également appelés ennemis naturels ou agents de lutte biologique. La lutte biologique peut être réalisée à l'aide de macro-organismes ou à l'aide de biopesticides. Les macro-organismes, également appelés auxiliaires, sont des organismes prédateurs ou parasitoïdes qui s'attaquent et éliminent les ravageurs d'une culture. Il s'agit par exemple d'insectes aphidiphages se nourrissant de pucerons. Par ailleurs, des micro-organismes peuvent aussi servir d'agent de lutte biologique. Dans ce cas, ils sont formulés en biopesticides. Les biopesticides sont des produits qui contiennent des agents de biocontrôle. Ceux-ci peuvent être des micro-organismes (champignons, bactéries ou virus) ou des substances naturelles issues de micro-organismes, de plantes ou mêmes de minéraux. Bien qu'étant des substances naturelles issues d'organismes vivants, les sémiochimiques et éliciteurs ne font pas partie de la lutte biologique. En effet, ils possèdent leurs propres caractéristiques et seront décrits séparément par la suite (cours de 2^{ème} Master de méthodes alternatives donné par Mr.Verheggen à Gembloux Agro-Bio Tech en 2016 ; Eilenberg et al., 2001 ; Sporleder & Lacey, 2013 ; Weber, 2013).

3.3 Substances sémiochimiques :

3.3.1 Introduction:

Un sémiochimique est une molécule organique, synthétisée par un organisme et porteuse d'une information olfactive destinée à modifier le comportement ou la physiologie d'un autre organisme. Les molécules sémiochimiques permettent aux insectes de communiquer. La communication entre insectes se fait essentiellement par l'émission et la réception de molécules odorantes. Les molécules sémiochimiques peuvent être de 2 types : intra-spécifique ou inter-spécifique. Les sémiochimiques intra-spécifiques sont nommés phéromones, alors que les inter-spécifiques sont appelés allélochimiques (Arnaud et al., 2003 ; cours de 2^{ème} Master de méthodes alternatives donné par Mr.Verheggen à Gembloux Agro-Bio Tech en 2016).

Les molécules sémiochimiques sont perçues par les insectes à l'aide de leurs organes sensoriels, appelés sensilles olfactives, lieu de résidence des neurones olfactifs. Ces centres olfactifs se situent au niveau des antennes. Les sensilles sont différenciées selon leur position sur les antennes, leur rôle physiologique ou leur structure. Plus précisément, les sémiochimiques sont perçus par des structures sensorielles appelées rhinaria.

Anatomiquement, ce sont des ouvertures circulaires au niveau des antennes recouvertes par une membrane et qui contiennent des neurones olfactifs qui permettent aux pucerons de détecter les composés volatiles (Boullis & Verheggen, 2016 ; Dawson et al., 1987 ; Hardie et al., 1990).

3.3.2 Les différents types de sémiochimiques:

Il existe une grande variété de molécules sémiochimiques selon leurs rôles. Les principales catégories sont reprises ci-dessous (Arnaud et al., 2003 ; cours de 2ème Master de méthodes alternatives donné par Mr.Verheggen à Gembloux Agro-Bio Tech en 2016 ; Pickett & Glinwood, 2007).

3.3.2.1 Les phéromones sexuelles :

Les phéromones sexuelles modifient le comportement sexuel des individus et ont pour but plus ou moins direct la reproduction. C'est généralement la femelle qui émet l'attractif sexuel afin d'attirer le mâle, à l'aide d'organes situés à divers endroits selon les espèces.

3.3.2.2 Les phéromones d'agrégation :

Ces phéromones sont émises soit par le mâle, soit par la femelle, afin de regrouper les individus, chez les insectes vivant en colonie. Les colonies peuvent parfois atteindre un nombre très important d'individus. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette habitude de vie en colonie : une meilleure protection face aux ennemis naturels, un regroupement d'individus sur une nouvelle plante hôte (par exemple, les scolytes produisent des phéromones d'agrégation afin d'attaquer un nouvel arbre), etc.

3.3.2.3 Les phéromones d'espacement :

Ces phéromones permettent, à l'inverse des phéromones d'agrégation, de contrôler ou de réduire la population lorsque celle-ci devient trop importante.

3.3.2.4 Les phéromones d'alarme :

Ces phéromones sont émises afin de signaler la présence d'un danger aux autres individus de la population.

3.3.2.5 Les phéromones de reconnaissance :

Ces phéromones agissent au contact des individus, contrairement à celles citées précédemment qui agissent à des distances plus ou moins importantes (parfois plusieurs kilomètres).

Les phéromones de reconnaissance permettent à un groupe d'individus de maintenir sa cohésion. Elles permettent aux individus d'une même colonie de se reconnaître.

3.3.2.6 Les phéromones de piste :

Ces phéromones sont émises par des insectes sociaux afin de tracer des pistes odorantes pour exploiter collectivement une source de nourriture.

3.3.2.7 Les phéromones modificatrices :

Ces phéromones permettent de modifier la physiologie ou le comportement des individus qui les perçoivent.

3.3.2.8 Les allélochimiques :

Les mécanismes d'émission et de perception des allélochimiques sont similaires aux phéromones. Les allélochimiques peuvent être divisés en 3 groupes : les allomones qui sont uniquement bénéfiques pour l'émetteur, les kairomones qui sont uniquement bénéfiques pour le receveur, et les synomones qui sont bénéfiques à la fois pour l'émetteur et pour le receveur.

3.3.3 Applications des sémiachimiques :

Les sémiachimiques peuvent être utilisés dans la lutte intégrée contre les ravageurs des cultures. Dans ce cadre, plusieurs applications existent, comme la surveillance, la perturbation d'accouplement, le piégeage de masse ou encore la stratégie push-pull (cours de 2ème Master de méthodes alternatives donné par Mr.Verheggen à Gembloux Agro-Bio Tech en 2016 ; Heuskin et al., 2011).

3.3.4 Focus sur la népétalactone :

3.3.4.1 Généralités :

La népétalactone est un composé organique de la famille des terpénoïdes. Cette molécule peut être obtenue à partir de la cataire, ou herbe à chats, plante du genre *Nepeta*, et constitue avec le népétalactol les deux composants de la phéromone sexuelle libérée par la plupart des espèces de pucerons. Par conséquent, la népétalactone constitue une voie intéressante pour le développement d'une stratégie de contrôle des pucerons à l'aide de sémiachimiques (Boullis & Verheggen ; 2016 ; Dawson et al., 1987 ; Goldansaz et al., 2004 ; Lösel et al., 1996 ; Park et al., 2000 ; Pickett & Glinwood, 2007).

3.3.4.2 Production et perception de la phéromone sexuelle par les pucerons :

La phéromone sexuelle est produite par des cellules glandulaires situées sous des plaques poreuses localisées au niveau du tibia des pattes arrières de la femelle aptère ovipare. Le rôle de cette phéromone sexuelle est d'attirer les mâles afin d'assurer la reproduction sexuée. La phéromone sexuelle n'est donc émise qu'à un certain stade du développement du puceron, c'est pourquoi le cycle a été détaillé précédemment (Boullis & Verheggen, 2016 ; Campbell et al., 1990 ; Hardie et al., 1990 ; Marsh, 1972 ; Pickett et al., 1992).

Chez la majorité des espèces de pucerons Aphidinae, la phéromone sexuelle est composée de deux principales molécules : la (4aS,7S,7aR)-népétalactone et le (1R,4aS,7S,7aR)-népétalactol (Campbell et al., 1990 ; Dawson et al., 1987 ; Fernandez-Grandon et al., 2013 ; Goldansaz et al., 2004 ; Hardie et al., 1990 ; Park et al., 2000 ; Pickett & Glinwood, 2007). Cependant, d'autres énantiomères de la népétalactone et du népétalactol peuvent aussi constituer la phéromone sexuelle. Les différents énantiomères que l'on peut retrouver sont représentés dans la figure 7 (Boullis & Verheggen, 2016).

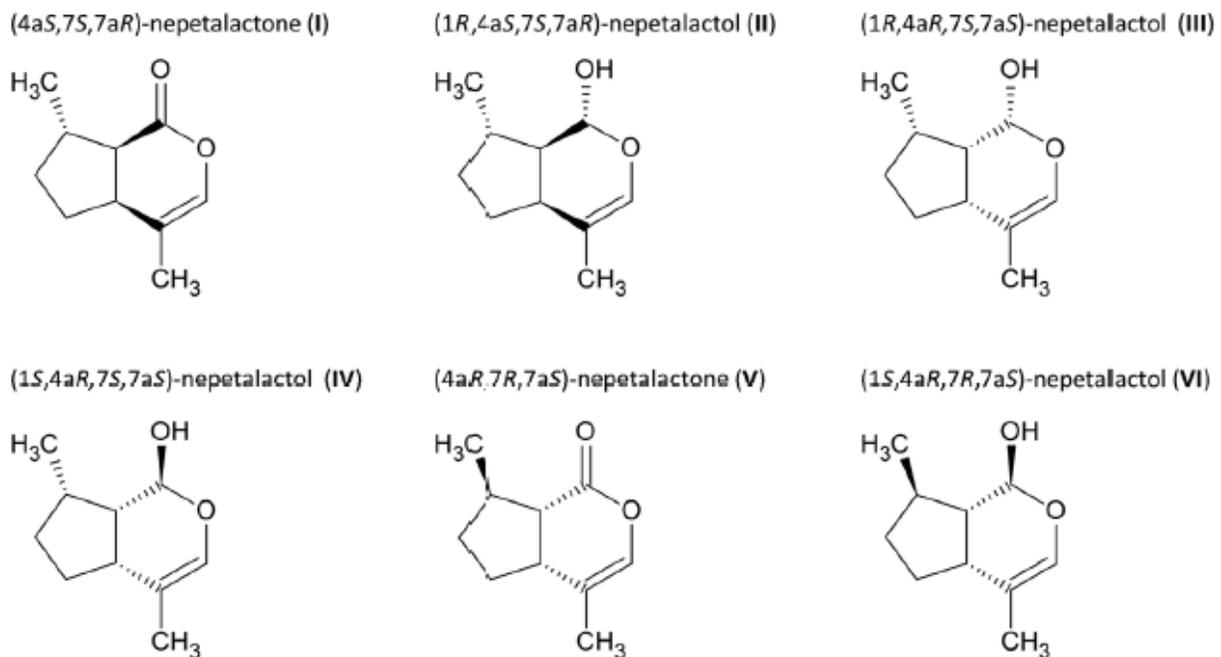


Figure 7. Représentation chirale des différents composés de la phéromone sexuelle des pucerons (Boullis & Verheggen, 2016).

La stéréochimie de la phéromone sexuelle des pucerons est un des éléments majeurs qui expliquent la capacité d'attraction spécifique à l'espèce, mais ce n'est pas le seul. En effet, les ratios entre népétalactone et népétalactol diffèrent et sont spécifiques pour chaque espèce de pucerons. Ces différents ratios sont représentés dans le tableau 2 (Boullis & Verheggen, 2016 ; Hardie et al., 1990 ; Pickett et al., 1992 ; Sun et al., 2012).

Tableau 2. Ratios des composants de la phéromone sexuelle (népétalactone et népétalactol) de plusieurs espèces de pucerons (Boullis & Verheggen, 2016).

Common name	Species name	Ratio lactone : lactol	Reference
Greenbug	<i>Schizaphis graminum</i> Rondani	1 : 8	Dawson et al. 1988
Damson hop aphid	<i>Phorodon humuli</i>	0 : 1 ^w	Campbell et al. 1990
Vetch aphid	<i>Megoura viciae</i>	5 : 1 to 12 : 1 [*]	Hardie et al. 1990
Pea aphid	<i>Acyrtosiphon pisum</i>	1 : 1	Dawson et al. 1990
Black-bean aphid	<i>Aphis fabae</i>	29 : 1	Dawson et al. 1990
Peach-potato aphid	<i>Myzus persicae</i>	1 : 1.5	Dawson et al. 1990
Black-berry cereal aphid	<i>Sitobion fragariae</i> Walker	1 : 0	Hardie et al. 1992
Currant aphid	<i>Cryptomyzus</i> spp.	1 : 30	Guldemon et al. 1993
Bird cherry-oat aphid	<i>Rhopalosiphum padi</i>	0 : 1	Hardie et al. 1994a
Grain aphid	<i>Sitobion avenae</i> F.	1 : 0	Lilley et al. 1994/95
Cabbage aphid	<i>Brevicoryne brassicae</i>	1 : 0	Gabrys et al. 1997
Peach aphid	<i>Tuberocephalus momonis</i> Matsumura	4 : 1	Boo et al. 2000
Spiraea aphid	<i>Aphis spiraeicola</i>	(2 : 1) ^x - (6 : 1 to 8 : 1) ^y *	Jeon et al. 2003
Potato aphid	<i>Macrosiphum euphorbiae</i> Thomas	1 : 2 to 1 : 4 [*]	Goldansaz et al. 2004
Soybean aphid	<i>Aphis glycines</i>	2 : 1	Zhu et al. 2006
Lettuce aphid	<i>Nasonovia ribis-nigri</i> Moseley	1.5 : 1	Dewhurst 2007
Peach aphid	<i>Ovatus insitus</i> Walker	2 : 1	Dewhurst 2007
Apple grass aphid	<i>Rhopalosiphum insertum</i>	1 : 21	Dewhurst 2007
Rosy apple aphid	<i>Dysaphis plantaginea</i>	1 : 3.7	Stewart-Jones et al. 2007
		1 : 4	Dewhurst et al. 2008
Mealy plum aphid	<i>Hyalopterus pruni</i> Geoffrey	(2.5 : 1 - 3.4 : 1) ^z	Symmes et al. 2012
Leaf-curl plum aphid	<i>Brachycaudus helichrysi</i> Kaltentbach	2.6 : 1	Symmes et al. 2012
Tea aphid	<i>Toxoptera aurantii</i> Fonscolombe	4.3 : 1 - 4.9 : 1	Han et al. 2014

^w Diastereoisomers III and IV of nepetalactol, ^x Field-collected oviparae, ^y Lab-reared oviparae,

^z Differences between strains, *Changes linked with aphid age

Bien que ce ratio (népétalactone : népétalactol) soit spécifique pour chaque espèce, il peut aussi varier au sein d'une même espèce, comme on peut le remarquer également dans le tableau 2.

La quantité de phéromone sexuelle produite peut varier selon le stade du puceron. Par exemple, les femelles de l'espèce *Megoura viciae* Buckton libèrent des quantités plus importantes de phéromones au début de leur stade adulte que par la suite. La baisse subséquente de production est peut-être due au vieillissement des tissus produisant la phéromone ou à la photopériode (Goldansaz et al., 2004 ; Hardie et al., 1990).

La reconnaissance spécifique de la phéromone sexuelle est encore bien plus complexe. En effet, il a été démontré dans des tests de comportement que les pucerons mâles appartenant à l'espèce *Cryptomyzus galeopsidis* Kaltentbach sont capables de distinguer les phéromones émises par des femelles de la même espèce parmi un ensemble de phéromones produites par des femelles du genre *Cryptomyzus* appartenant à des espèces différentes mais produisant pourtant le même ratio (1 :30) et les mêmes énantiomères de népétalactone et népétalactol (I et II de la figure 2). De plus, les mâles de *C. galeopsidis* sont aussi capables de faire une différence entre les phéromones produites par les femelles ovipares de la même espèce et les mêmes phéromones reproduites de façon synthétique. Tout ceci indique que d'autres stimuli sont impliqués dans les mécanismes de reconnaissance spécifique (Boullis & Verheggen, 2016 ; Guldmond et al., 1993 ; Lilley & Hardie, 1996).

Bien que les composants de la phéromone sexuelle servent principalement à attirer les mâles, des tests olfactifs et des analyses physiologiques ont également démontré que des femelles gynopares peuvent aussi être attirées par ces composés. Dans ce cas, la phéromone émise par la femelle ovipare sert de stimulus d'agrégation qui va permettre d'améliorer la localisation de la plante hôte pour la femelle gynopare. La népétalactone est donc perçue différemment selon le stade de développement du puceron, c'est pourquoi celui-ci a été détaillé précédemment (Boullis & Verheggen, 2016 ; Campbell et al., 1990 ; Lilley & Hardie, 1996 ; Lösel et al., 1996 ; Park et al., 2000).

Cependant, une étude réalisée sur des pucerons *Myzus persicae* a démontré que la népétalactone peut avoir un effet répulsif sur les femelles virginipares si cette molécule est appliquée à une concentration importante (10 mg/ml). Ceci peut s'expliquer par le fait que la femelle virginipare utilise probablement cette molécule comme indicateur de la présence d'une population importante de pucerons qui signifie une compétition pour les ressources disponibles.

Des concentrations importantes de népétalactone, causant des niveaux différents de ce qui est émis habituellement, peuvent peut-être servir à troubler les détecteurs sensitifs des pucerons, provoquant un effet répulsif. La présence de niveaux élevés de népétalactone peut donc permettre d'entraver la capacité des pucerons à localiser d'autres individus conspécifiques, ce qui peut provoquer une réduction de leur population. Cette méthode peut être très intéressante dans le cadre de la lutte contre les pucerons (Fernandez-Grandon et al., 2013).

3.3.4.3 Perception des ennemis naturels :

Les ennemis naturels des pucerons ont la capacité de détecter des composés volatiles produits par les pucerons. En effet, plusieurs prédateurs et parasitoïdes sont sensibles aux molécules utilisées dans la communication intra-spécifique des pucerons, y compris les composants des phéromones d'alarme et sexuelles. Cette capacité des ennemis naturels est très utile et est exploitée de manière importante dans le cadre de la lutte des pucerons (Boullis & Verheggen, 2016 ; Dawson et al., 1987 ; Pickett & Glinwood, 2007 ; Schillings et al., 2010).

3.4 Eliciteurs de défense végétale :

3.4.1 Généralités :

Egalement appelés stimulateurs de défenses naturelles (SDN), les éliciteurs sont des molécules capables de stimuler des mécanismes de défense chez une plante. Ces mécanismes de défense peuvent mener à un renforcement de la résistance de la plante. De ce fait, tous les signaux qui sont perçus par les cellules végétales et qui induisent une réponse de défense sont considérés comme éliciteurs. Ceux-ci appartiennent à des familles chimiques différentes et comprennent des protéines, des glycoprotéines, des lipides et des oligosaccharides. On peut classer les éliciteurs en deux grandes catégories : les éliciteurs spécifiques (ou effecteurs) et les éliciteurs généraux (Benhamou & Rey, 2012 ; Henry et al., 2012 ; Kulye et al., 2012 ; Mishra et al., 2012).

3.4.2 Eliciteurs spécifiques :

Les éliciteurs spécifiques sont formés par des pathogènes spécialisés et agissent uniquement sur les cultivars portant le gène de résistance correspondant à la maladie (Henry et al., 2012).

En effet, selon la théorie « gène pour gène » de Flor (1971), pour que la plante soit résistante à un organisme pathogène spécifique, la plante et le pathogène doivent avoir des gènes complémentaires : un gène de résistance R (pour la plante) et un gène d'avirulence Avr (pour le pathogène). L'interaction entre les produits de ces deux gènes mène à une résistance spécifique, alors que l'absence d'un de ces gènes mène à l'expression des symptômes de la maladie (Benhamou & Rey, 2012 ; Henry et al., 2012).

3.4.3 Eliciteurs généraux :

Les éliciteurs généraux n'agissent pas de manière significativement différente sur les cultivars d'une même espèce végétale. Même si la plante ne possède pas de gène de résistance R, elle conserve toujours la capacité de se défendre face à un organisme. Dans tous les cas, la résistance d'une plante ne se manifeste que si il y a eu infection préalable par un pathogène. On parle alors dans ce cas-ci de résistance généralisée (non spécifique) car les stratégies de résistance de la plante sont ciblées contre tous types d'agresseurs, et non pas à celui qui a provoqué le mécanisme de résistance (Benhamou & Rey, 2012). Il existe 4 types d'éliciteurs généraux : les produits chimiques, les MAMPs (Microbes-Associated Molecular Patterns), les DAMPs (Damage-Associated Molecular Patterns), et les PAMPs (Pathogen-Associated Molecular Patterns) (Henry et al., 2012).

Les produits chimiques, contrairement aux autres types d'éliciteurs, sont abiotiques. Les MAMPs, DAMPs et PAMPs sont des éliciteurs biotiques. Les produits chimiques sont de natures très diverses, il s'agit par exemple de métaux lourds, détergents, antibiotiques, UV, ozone, etc. (Benhamou & Rey, 2012).

Les MAMPs sont des profils moléculaires associés aux microbes. Ce sont des éliciteurs biotiques exogènes issus de micro-organismes non pathogènes, comme des rhizobactéries, des champignons ou des levures (Henry et al., 2012).

Les DAMPs sont des profils moléculaires associés aux dommages. Ce sont des éliciteurs biotiques endogènes issus de la plante suite à la présence d'un envahisseur. La plante peut détecter la présence d'un pathogène suite à la perception de composés endogènes libérés par les barrières structurales de la plante ou suite à la présence de macromolécules libérées par des envahisseurs, comme des enzymes par exemple (Henry et al., 2012).

Les PAMPs sont des profils moléculaires associés aux pathogènes. Ce sont des éliciteurs biotiques exogènes issus d'organismes pathogènes (Henry et al., 2012).

Bien que les éliciteurs biotiques exogènes soient pour la plupart d'origine fongique ou bactérienne, quelques molécules élicitrices proviennent également de virus ou d'insectes phytophages (Benhamou & Rey, 2012 ; Henry et al., 2012).

Les principaux types d'éliciteurs généraux et spécifiques sont repris dans la figure 8 (Henry et al., 2012).

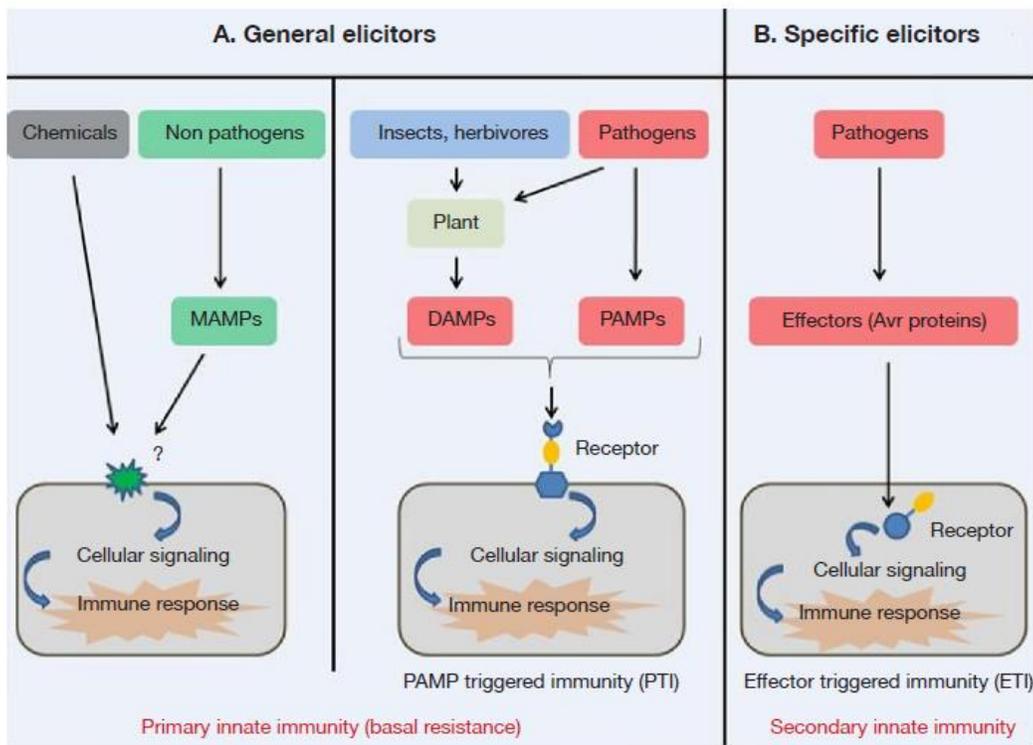


Figure 8. Les différents types d'éliciteurs généraux et spécifiques (Henry et al., 2012).

3.4.4 Mécanismes de résistance de la plante :

Dans le cas où des agents pathogènes ont réussi à pénétrer dans la plante, les éliciteurs vont permettre de déclencher toute une série de réponses de défense caractérisées sous le terme de réaction d'hypersensibilité (RH) à la reconnaissance du pathogène.

Parmi les réactions de défense de la plante, il y a par exemple l'augmentation du pH extracellulaire, production de dérivés réactifs de l'oxygène, production d'oxyde nitrique, synthèse de métabolites antimicrobiens, renforcement de la paroi cellulaire, expression de protéines de résistance PR, etc. (Kulye et al., 2012 ; Benhamou & Rey, 2012 ; Mishra et al., 2012).

Ces réactions de défense s'expriment d'abord au niveau des cellules situées dans le site d'infection, mais s'étendent ensuite aux cellules non infectées, créant ainsi une résistance systémique, efficace contre un large spectre de pathogènes. Grâce à cette résistance, la plante sera mieux préparée et pourra réagir plus rapidement dans le cas d'une attaque ultérieure d'un pathogène (Kulye et al., 2012 ; Mishra et al., 2012).

La production de dérivés réactifs de l'oxygène (ou formes réactives de l'oxygène) joue un rôle primordial dans l'établissement de la résistance. Les principaux radicaux oxydants produits sont l'anion superoxyde O_2^- et le peroxyde d'hydrogène H_2O_2 . Ceux-ci sont générés très rapidement suite à la perception de l'éliciteur et sont à l'origine d'une cascade de réactions qui débouchent finalement sur l'induction de la résistance de la plante. Le peroxyde d'hydrogène a un rôle antimicrobien, il est capable d'inhiber le développement de plusieurs champignons pathogènes. De plus, les radicaux oxydants renforcent la paroi de la cellule végétale en polymérisant des protéines de cette paroi, provoquent la mort des cellules végétales en peroxydant les lipides contenus dans leur membrane, activent des gènes de défense et induisent la production de métabolites de défense (Benhamou & Picard, 1999 ; Blanchard & Limache, 2005 ; Chivasa et al., 2006 ; Mishra et al., 2012 ; Tenhaken et al., 1995).

Les mécanismes de signalisation de défense au sein de la plante sont contrôlés par un réseau de signalisation et de communication dans lequel les phytohormones (acide salicylique, acide jasmonique et éthylène) jouent un rôle majeur. Globalement, la réaction d'hypersensibilité a pour but de limiter l'invasion de pathogènes en libérant des molécules toxiques et en privant les pathogènes de ressources de nutriments grâce à un programme suicide appelé la mort cellulaire programmée. Celle-ci cause l'induction des signaux de défense décrits précédemment, l'activation de gènes de défense et en conséquence, conduit à la résistance de la plante face au pathogène (Benhamou & Rey, 2012 ; Blanchard & Limache, 2005 ; Henry et al., 2012 ; Jourdan et al., 2008 ; Kulye et al., 2012).

3.4.5 Focus sur Hrip1 :

Hrip1, initiales de hypersensitive response inducing protein 1 (réaction d'hypersensibilité induit par une protéine), est un éliciteur protéique produit par le champignon nécrotrophe *Alternaria tenuissima* (Nees) Wiltshire. Cette protéine provoque la formation de lésions nécrotiques qui imitent une réaction d'hypersensibilité typique et permet ainsi à la plante de se défendre face à un organisme pathogène (Kulye et al., 2012 ; Liu et al., 2016 ; Peng et al., 2015).

L'efficacité de la défense de la plante face à des champignons nécrotrophes est basée sur la neutralisation des effets toxiques des dérivés réactifs de l'oxygène, la production de métabolites antimicrobiens comme les phytoalexines, l'induction de voies de signalisation régulées de phytohormones (principalement l'acide jasmonique) et le contrôle de la mort cellulaire. La production rapide d'oxyde nitrique et de dérivés réactifs de l'oxygène est la preuve de la reconnaissance du pathogène et l'induction de mécanismes de défense. La mort des cellules végétales permet aux pathogènes biotrophes de ne plus pouvoir s'alimenter. Cette mort cellulaire requiert des niveaux coordonnés d'oxyde nitrique et de dérivés réactifs de l'oxygène (Jourdan et al., 2008 ; Kulye et al., 2012 ; Mehdy, 1994).

Hrip1 induit des mécanismes de défense similaires à une réaction d'hypersensibilité : induction rapide de la mort cellulaire, induction de réactions de défense, induction de signaux endogènes qui participent au déclenchement des mécanismes de défense, expression de plusieurs gènes de défense et finalement développement d'une résistance systémique acquise (Kulye et al., 2012 ; Peng et al., 2015).

Une étude a été réalisée sur le tabac par Kulye et al. (2012) afin d'étudier les effets de Hrip1 sur le virus de la mosaïque du tabac. Au cours de cette étude, il a été démontré que la protéine Hrip1 était très active : quelques nanogrammes suffisaient pour engendrer des nécroses sur les feuilles de tabac. De plus, les nécroses ne s'étendaient pas au-delà des zones traitées. Les chercheurs ont également découvert que Hrip1 induit l'expression du gène de défense HSR203, considéré comme étant un gène spécifique de la réaction d'hypersensibilité. Cet éliciteur protéique déclenche également une production temporaire d'oxyde nitrique et de H₂O₂ qui provoquent la mort des cellules du site d'infection ainsi que des réactions de défense au niveau de la plante.

Les résultats de l'étude ont démontré que les feuilles de tabac traitées avec Hrip1 manifestent une meilleure résistance contre le virus de la mosaïque du tabac, en comparaison des feuilles non traitées. En effet, le nombre et la taille des lésions du virus sont moins importants dans le cas des feuilles traitées (Kulye et al., 2012 ; Peng et al., 2015).

Néanmoins, le mécanisme d'induction de la réaction d'hypersensibilité et de la résistance systémique acquise par Hrip1 doit encore être étudié plus en profondeur au niveau moléculaire. En effet, certains doutes persistent concernant les mécanismes. Cependant, l'éliciteur protéique Hrip1 représente un outil moléculaire très intéressant afin de comprendre le rôle de la mort cellulaire dans la limitation de la progression d'un organisme pathogène et dans la transmission de signaux induisant les mécanismes de défense de la plante (Kulye et al., 2012 ; Peng et al., 2015).

3.4.6 Focus sur PeaT1 :

PeaT1 est également un éliciteur protéique produit par le champignon nécrotrophe *Alternaria tenuissima*. PeaT1 est une protéine acide et thermostable capable d'améliorer la croissance de la plante et d'induire une meilleure résistance de la plante face à des maladies (Li et al., 2010 ; Liu et al., 2009 ; Mao et al., 2010 ; Wang et al., 2011 ; Xing et al., 2012 ; Zhang et al., 2011).

D'après une étude réalisée sur des plantes de tabac par Mao et al. (2010), PeaT1 était capable de déclencher une résistance systémique acquise face au virus de la mosaïque du tabac, mais n'a pas provoqué de réaction d'hypersensibilité au niveau des plantes. La résistance au virus a pu être démontrée par la mesure du nombre et de la taille des lésions sur les feuilles. Ceux-ci étaient significativement plus faibles pour les feuilles traitées avec l'éliciteur PeaT1 que pour les feuilles non traitées. Ces résultats confortent l'idée que PeaT1 joue un rôle dans l'amélioration de la résistance aux maladies des plantes (Mao et al., 2010).

Des résultats similaires ont été obtenus lors d'une étude menée par Zhang et al. (2011). De plus, au cours de cette étude, les chercheurs ont également découvert que le traitement des plantes de tabac avec PeaT1 induisait l'activation de gènes de défense ainsi que l'accumulation d'acide salicylique. Ceci démontre l'induction d'une résistance systémique acquise par la voie de signalisation de l'acide salicylique suite au traitement de PeaT1. Enfin, cette étude a également démontré que les plantes traitées avec PeaT1 ont une activité de la peroxydase et une quantité de lignine plus importantes que les plantes non traitées.

Etant donné que la lignine est un constituant important de la paroi des cellules végétales et que la lignification est un mécanisme de résistance des plantes, ceci prouve une nouvelle fois l'implication de PeaT1 dans le processus de résistance des plantes (Zhang et al., 2011).

Comme la réaction d'hypersensibilité ne se manifeste pas dans le cas du traitement de PeaT1, cela indique que cet éliciteur protéique utilise d'autres moyens pour s'attaquer au virus : stimulation de la production de composés antiviraux, constitution de barrières physiques, induction de dérivés réactifs de l'oxygène ou inhibition de la réplication ou de la transmission du virus (Li et al., 2010 ; Zhang et al., 2011).

Des chercheurs ont quantifié l'abondance relative des protéines exprimées suite à l'induction par PeaT1 sur des plants d'*Arabidopsis* grâce à la spectrométrie de masse. Des différences ont été observées entre certaines catégories de protéines (Li et al., 2010).

- Les protéines liées à la défense et au stress sont majoritairement produites de manière plus importante suite au traitement de PeaT1. Sous des conditions normales de croissance, ces protéines sont surproduites en réponse à un stress abiotique (stress thermique par exemple), ce qui signifie que PeaT1 participe à la réponse des plantes face à ce type de stress (Li et al., 2010).
- Les protéines mitochondriales sont majoritairement produites de manière moins importante suite au traitement de PeaT1. En effet, les éliciteurs affectent les fonctions de la mitochondrie suite à la production de formes réactives de l'oxygène et à l'induction de la mort cellulaire programmée dont cet organite est en partie responsable. Cette sous-production de protéines mitochondriales pourrait induire la mort cellulaire afin d'éviter l'infection de pathogènes (Krause & Durner, 2004 ; Li et al., 2010 ; Xie & Chen, 2000).
- Parmi les protéines métaboliques, les protéines du chloroplaste sont produites de manière plus importante suite au traitement de PeaT1. C'est dans les chloroplastes que la photosynthèse a lieu. L'augmentation de la production des protéines du chloroplaste révèle que les effets du traitement de PeaT1 améliorent la photosynthèse et peuvent par conséquent permettre d'augmenter le développement végétatif de la plante (Li et al., 2010).

- Les protéines antioxydantes sont produites de manière plus importante suite au traitement de PeaT1. Ces protéines font partie des composés qui protègent les cellules de l'oxydation et des effets toxiques des formes réactives de l'oxygène, nécessaires à l'activation des réactions de défense. La plante doit stopper la propagation de ces dérivés réactifs afin de localiser la mort cellulaire. PeaT1 provoque ainsi le déploiement de composés antioxydants qui permettent à la plante de se protéger des effets toxiques des formes réactives de l'oxygène (Li et al., 2010).

3.5 Lutttes physique et culturale :

Ces méthodes de lutte permettent de contrôler ou de réduire une population de ravageurs en gérant différemment la culture dès le semis ou durant sa croissance. Les méthodes de lutttes physiques et culturales sont diverses et variées et il serait très long de toutes les citer ici. Cependant, la figure 9 ci-dessous reprend les principales méthodes de lutte culturale contre les pucerons. Ces techniques sont générales et peuvent s'étendre également à d'autres types de ravageurs (Wratten et al., 2007).

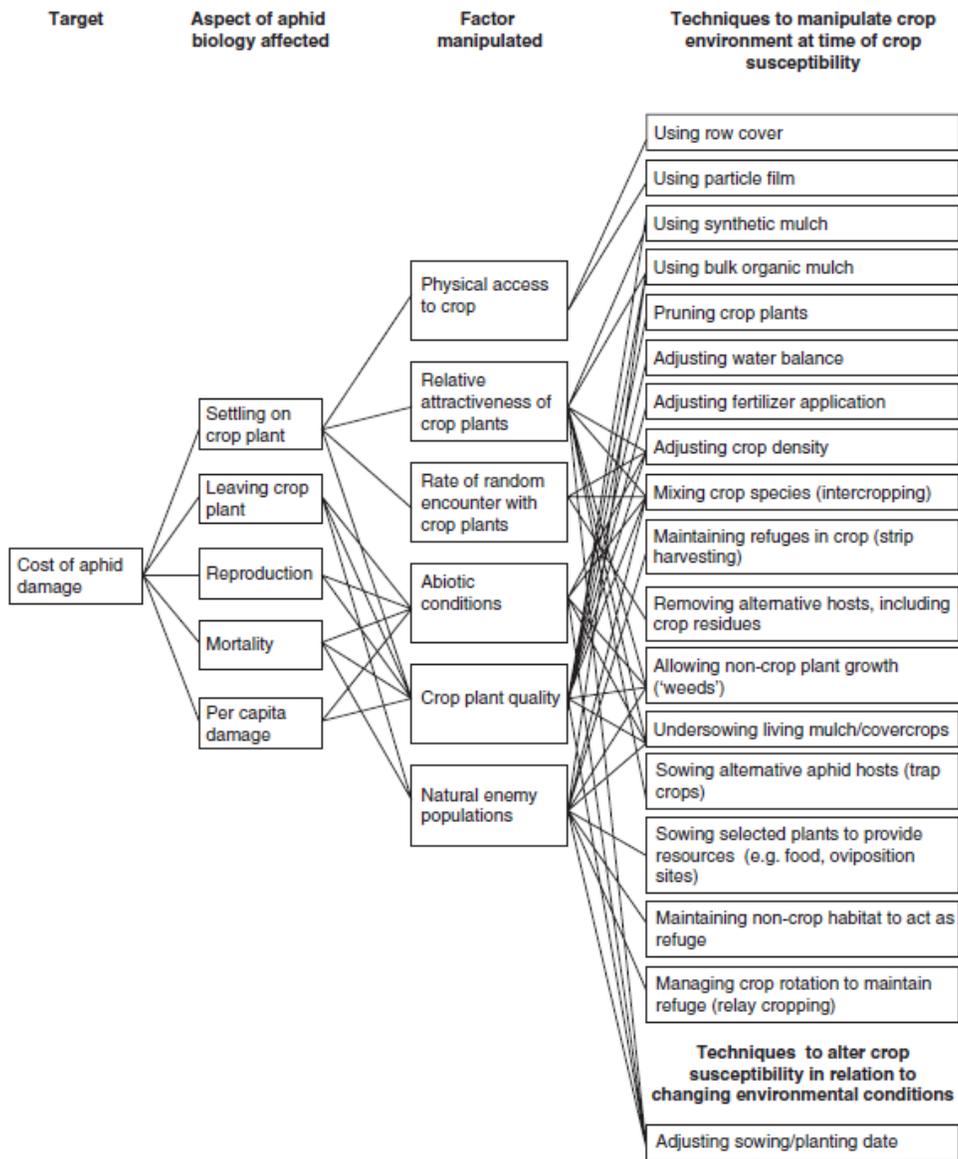


Figure 9. Méthodes culturales de gestion de la population de pucerons (Wratten et al., 2007).

4) Conclusions.

La culture de pomme de terre possède de nombreux ravageurs et maladies qui ont été détaillés ci-dessus. Pour lutter contre ceux-ci, les pesticides représentent actuellement la solution la plus utilisée. Cependant, la lutte chimique ne constitue pas une lutte durable. Le monde en a pris conscience et il y a actuellement une volonté commune de développer des méthodes alternatives aux pesticides. Les principales méthodes alternatives de lutte contre les ravageurs et maladies ont été décrites précédemment. Au cours de ce présent travail, certaines seront testées afin d'analyser leurs effets sur les ravageurs et maladies de la culture de pomme de terre. Deux types de molécules seront testés : une molécule sémiochimique, la népétalactone, ainsi que deux éliciteurs, Hrip1 et PeaT1. Les effets de ces produits sur les bioagresseurs sont encore assez méconnus et ce travail permettra de contribuer à une meilleure connaissance de ceux-ci.

III. Objectifs du travail

L'objectif principal de ce travail est d'analyser les effets de deux types de molécules sur les ravageurs de la culture de pomme de terre. Il s'agit d'une part d'une molécule sémiochimique, la népétalactone et d'autre part de deux éliciteurs de défense végétale, Hrip1 et PeaT1. Ces molécules constituent des méthodes alternatives intéressantes de lutte contre les ravageurs des cultures dans le but de réduire l'utilisation de produits chimiques toxiques en les remplaçant par des produits plus respectueux de l'environnement et de la santé humaine.

Afin de répondre à cet objectif, ces molécules ont d'abord été testées en laboratoire, puis en champ. En laboratoire, la népétalactone et l'éliciteur Hrip1 ont été testés afin d'évaluer leurs effets sur le puceron *Aphis fabae*. Des tests de comportement à l'aide d'un tube en Y ont ainsi été réalisés, dont le but est de déterminer s'il y a un effet, attractif ou répulsif, des molécules testées sur ce puceron.

Ensuite, en champ, deux molécules ont été testées en conditions réelles de culture afin d'évaluer leur impact sur les ravageurs de la pomme de terre. Il s'agit de la népétalactone, testée lors des tests comportementaux en laboratoire, ainsi que l'éliciteur PeaT1. Les molécules testées ont été disposées au niveau d'un champ de pomme de terre, ainsi que des pièges jaunes collecteurs d'insectes. Des insectes ont ainsi progressivement été récoltés et identifiés afin de déterminer et de comparer les effets des molécules testées sur les populations d'insectes ravageurs. En plus des prélèvements réalisés en champ sur la culture de pomme de terre, un comptage des insectes présents sur les plantes a également été effectué.

Enfin, un diagnostic des principales maladies présentes sur pomme de terre a également été effectué en fin de culture afin de déterminer les effets des molécules utilisées sur les maladies. En effet, en plus de leurs effets sur les ravageurs, les molécules testées peuvent également avoir un rôle important à jouer sur le développement des maladies. Le diagnostic a été réalisé visuellement sur les plantes de pomme de terre sur base d'une échelle de développement de trois maladies.

IV. Partie expérimentale

1) Matériel et méthodes.

1.1 Analyse des effets des molécules testées sur le comportement du puceron *Aphis fabae* en laboratoire.

1.1.1 Pucerons et plantes.

1.1.1.1 Pucerons *Aphis fabae*.

Le test de comportement a été réalisé avec des pucerons *Aphis fabae* ailés femelles uniquement. En effet, ce sont les femelles ailées qui partent à la recherche de nouvelles plantes hôtes pour développer leur population. Les pucerons *A. fabae* ailés utilisés lors des tests de comportement ont été fournis par un doctorant de l'université de Gembloux Agro-Bio Tech. Ce doctorant possède un élevage de pucerons *A. fabae* sur des plantes de *Vicia faba* en pots, le tout contenu dans une cage en moustiquaire placée dans une chambre d'élevage ($20 \pm 2^\circ\text{C}$; $60 \pm 5\%$ HR ; 16 h de lumière par jour). Les plantes de fèves ont été remplacées régulièrement. La photopériode de la chambre d'élevage assure que la population de pucerons contienne uniquement des femelles. Lors de la réalisation des tests de comportement, uniquement les pucerons *A. fabae* ailés provenant de cet élevage ont été utilisés.

1.1.1.2 Plantes de *Vicia faba*.

La plante utilisée lors des tests de comportement est la fève *Vicia faba* L.'Grosse ordinaire', appartenant à la famille des Fabacées. Les graines de fèves ont été semées individuellement dans des pots de 7 x 8 x 8 cm avec du terreau. Les semis ont ensuite été placés dans une pièce spécifique afin d'optimiser la croissance des fèves ($20 \pm 2^\circ\text{C}$; $60 \pm 5\%$ HR ; 16 h de lumière par jour). Pour les tests de comportement, les plantes ont été sélectionnées deux par deux, les plantes utilisées pour le même test devant avoir approximativement la même taille. Les plantes sélectionnées pour les tests de comportement ont environ 2 semaines à partir du semis.

1.1.2 Tests comportementaux.

1.1.2.1 Dispositif du test de comportement.

Les tests de comportement ont été réalisés au sein du laboratoire de l'unité d'Entomologie de Gembloux Agro-Bio Tech. Les plantes de fèves et les pucerons ont été placés au sein du laboratoire deux heures avant de réaliser les tests afin de s'acclimater aux conditions (23 ± 2 °C ; $50 \pm 5\%$ HR ; lumière uniforme). Chaque test de comportement a été réalisé à l'aide d'un tube en Y. Le puceron *A. fabae* ailé est déposé à la base du tube et a alors le choix entre deux voies possibles : la première contient une plante de fève témoin saine (non traitée) et la seconde contient une autre plante traitée avec la népétalactone ou l'éliciteur Hrip1.

Deux cuves d'un volume de 4 L contenant chacune une plante de fève sont reliées au tube en Y. Chaque cuve est reliée à une des branches supérieures du tube. La première cuve contient une plante de *V. faba* saine en pot, la seconde cuve contient une autre plante de *V. faba* en pot, traitée avec le sémiochimique ou l'éliciteur. Dans le cas où la plante est traitée avec le sémiochimique, celui-ci est contenu dans un diffuseur en caoutchouc placé dans le pot, à côté de la plante.

Dans le cas où la plante est traitée avec l'éliciteur, les graines de fève sont préalablement trempées dans un bain de solution contenant l'éliciteur avant de germer. De plus, une solution contenant l'éliciteur est pulvérisée sur la plante avant que le test de comportement ne soit réalisé.

Pour que les pucerons puissent faire un choix entre les deux voies, l'odeur des fèves et des molécules testées circule dans le dispositif à l'aide d'un flux d'air produit par des pompes. Deux pompes envoient de l'air dans le dispositif. L'air est envoyé dans les cuves contenant les plantes, puis passe dans le tube en Y. Chaque pompe envoie l'air dans une des deux cuves puis dans une des deux voies supérieures du tube. Enfin, l'air ressort par la base du tube en Y. Le flux d'air est contrôlé et maintenu constant à l'aide d'un appareil qui jauge le flux qui est ajouté au dispositif afin de le garder au niveau souhaité. De plus, l'air est filtré par des cartouches de charbon directement à la sortie des pompes. Tous les éléments du dispositif sont reliés entre eux à l'aide de tubes en plastiques afin de permettre la circulation de l'air. Le dispositif complet est représenté à la figure 10.

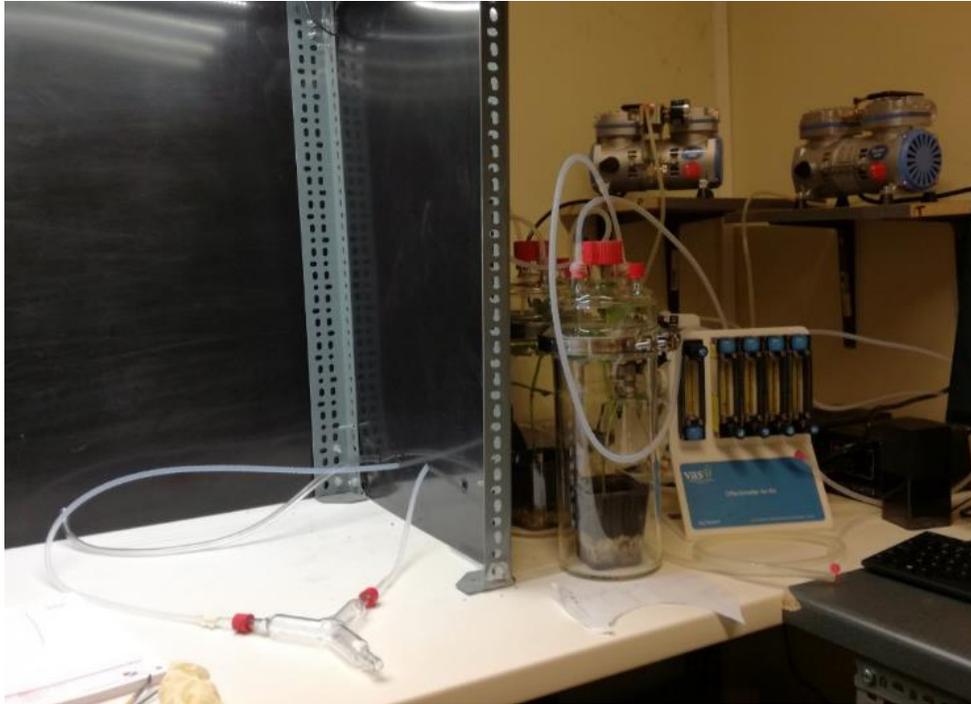


Figure 10. Représentation du dispositif complet du test de comportement.

1.1.2.2 Protocole du test de comportement.

Tout d'abord, le flux d'air circulant dans le dispositif était maintenu entre 100 ml.min^{-1} et 200 ml.min^{-1} . Le test de comportement des pucerons s'est réalisé pour un puceron à la fois. Lorsque le puceron a été déposé à la base du tube en Y, une durée de 5 min lui est laissée afin qu'il puisse progresser dans le tube. Au cours de ces 5 minutes, trois paramètres sont retenus :

- La première zone qui a été choisie par le puceron.
- La dernière zone choisie par le puceron.
- Le temps parcouru dans chaque zone.

Les zones du tube en Y ont été délimitées avant le début du test. Le tube en Y délimité en différentes zones est représenté à la figure 11. La zone A est la zone d'introduction du puceron. Celui-ci va ensuite se diriger vers la zone B, ou zone « Centre ». Le temps a été comptabilisé une fois la limite entre les zones A et B franchie. Dans la zone B, le puceron doit alors réaliser un choix et se diriger soit vers la zone C, soit vers la zone D, ces deux zones menant à la plante saine ou à la plante traitée. Le temps parcouru dans ces deux zones n'est comptabilisé qu'une fois que le puceron a franchi la ligne les séparant de la zone B.

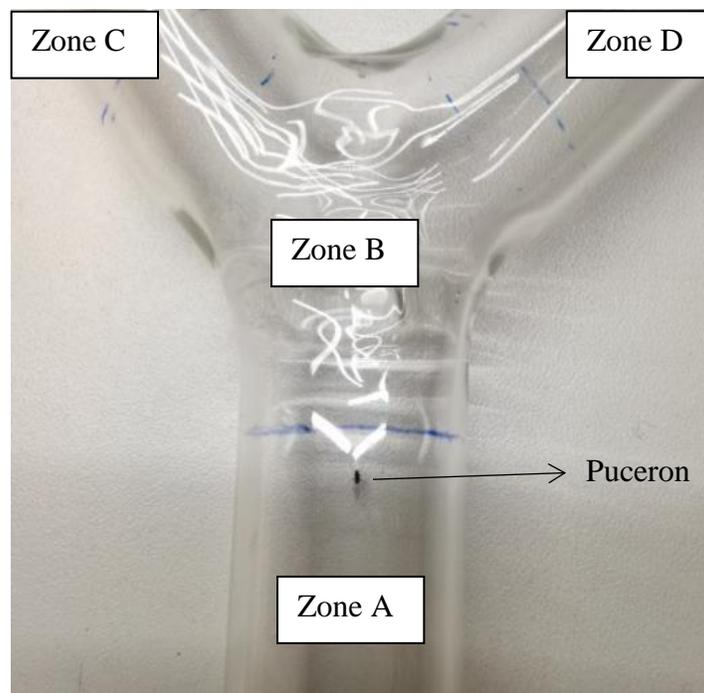


Figure 11. Représentation du tube en Y et de ses différentes zones.

Les cuves ont été inversées et le tube en Y a été nettoyé une fois que 5 pucerons ont réalisé le test comportemental afin d'éviter les biais. Le tube en Y est nettoyé à l'hexane. Enfin, pour que les résultats du test de comportement soient valables, ce test a été réalisé sur un minimum de 30 pucerons. Chaque puceron a été utilisé une seule fois. Les résultats du test n'ont pas été pris en compte dans le cas où le puceron n'a pas fait de choix entre les deux voies durant les 5 min, ou dans le cas où le puceron est revenu vers la zone A.

1.1.2.3 Préparation du sémiochimique.

La népétalactone utilisée lors des tests de comportement est de la (Z, E)-népétalactone et a été synthétisée et fournie par l'unité de Chimie Analytique de l'université de Gembloux Agro-Bio Tech. La pureté de la népétalactone est de 93%. Trois tests de comportement ont été effectués pour le sémiochimique sur les pucerons *A. fabae*, à des concentrations croissantes : 0,1%, 1% et 10%. Les dilutions ont été réalisées dans de l'huile de paraffine. Lors des tests de comportement, des diffuseurs en caoutchouc contenant 100 µl de solutions correspondantes ont été placés dans les pots, à côté des plantes de *V. faba*.

1.1.2.4 Préparation de l'éliciteur.

L'éliciteur Hrip1 utilisé lors des tests de comportement a été fourni par l'Académie Chinoise des Sciences Agricoles (CAAS) de Pékin et préparé au laboratoire EFE de Gembloux Agro-Bio Tech. Avant de réaliser le test comportemental, les graines de *V. faba* utilisées pour le test ont été trempées dans une solution contenant l'éliciteur Hrip1. De plus, une fois que ces graines ont germé et que les plantes ont atteint une taille suffisante (environ 20 cm afin de ne pas dépasser la hauteur de la cuve), une solution contenant l'éliciteur a été pulvérisée sur les plantes.

La concentration de Hrip1 de la solution de trempage des graines était de $60 \mu\text{g}\cdot\text{ml}^{-1}$. La dilution a été réalisée dans de l'eau distillée. Les graines de *V. faba* y ont ensuite été trempées durant 24 heures. La solution de pulvérisation (6% Hrip1 ; 0.5% Tween 20) a été appliquée à l'aide d'un spray sur les plantes de *V. faba* au moins 24 heures avant le test de comportement sur les pucerons.

1.1.2.5 Analyses statistiques.

Les analyses statistiques des différents tests de comportement ont été réalisées à l'aide du logiciel Minitab 17 (State College, Pennsylvania, USA). Lors de ces tests, trois paramètres ont été analysés: la première zone choisie par le puceron, la dernière zone choisie par le puceron, et le temps parcouru dans chaque zone. Un test de conformité d'une proportion a été réalisé pour la première et la dernière zone, et un test d'égalité des moyennes pour le temps parcouru.

1.2 Analyse des effets des molécules testées sur les ravageurs de la culture de pomme de terre.

1.2.1 Préparation de la parcelle.

Les expériences ont été réalisées en Chine, à l'Université agronomique du Shandong (Shandong Agricultural University) située à Tai'an. Les insectes ont été prélevés sur une parcelle de pomme de terre gérée par l'université, à l'aide de pièges jaunes collecteurs d'insectes. Cette parcelle est également située à Tai'an, dans la province du Shandong (Chine), et possède une longueur de 56 m et une largeur de 50m.

Trois modalités sont testées : « Sémiochimique » (la népétalactone), « Eliciteur » (PeaT1) et « Contrôle » (aucun produit). Le champ de pomme de terre a été divisé en 9 parcelles de 15 m de côtés (figure 12), permettant trois répétitions par modalité.

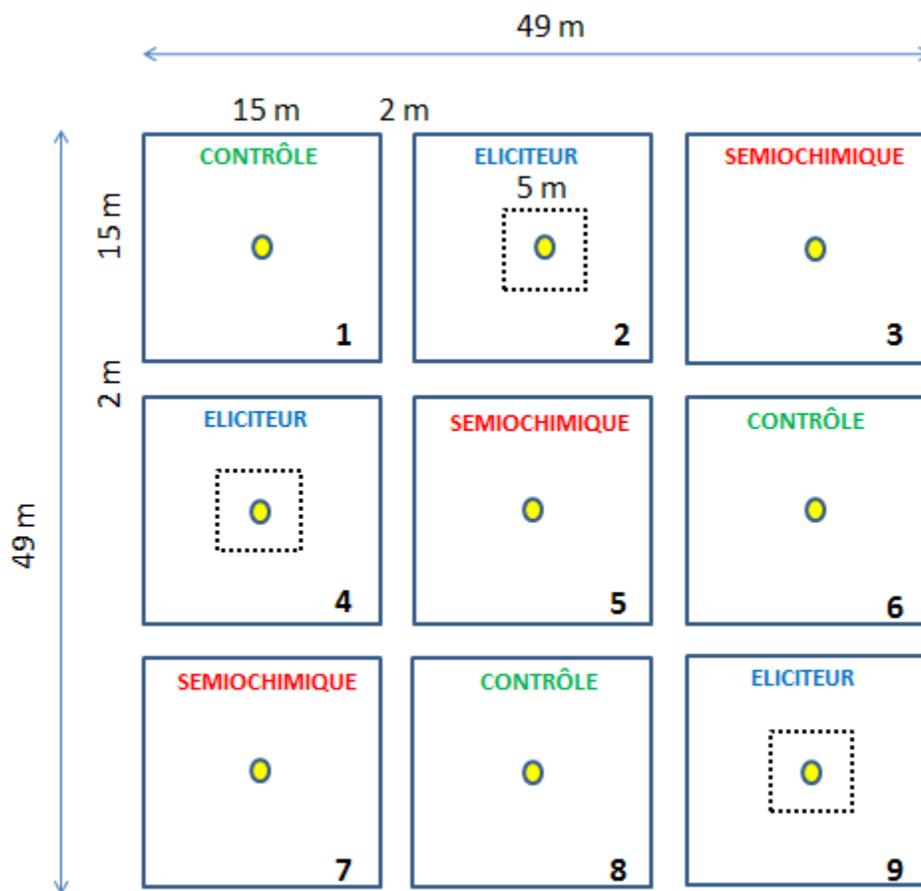


Figure 12. Plan du champ de pomme de terre.

Les parcelles sont séparées entre elles par des bandes laissées libres de 2 m de large. Un piège jaune collecteur est placé au centre de chaque parcelle. Le piège contient de l'eau et du détergent. Ces derniers sont renouvelés chaque semaine de collecte. En cas de fortes températures, de l'eau est ajoutée en cours de semaine. La hauteur des pièges jaunes est modulable et ajustée au niveau de la culture (voir figure 13).

Les pommes de terre cultivées sur la parcelle appartiennent à la variété Holland 15. Le semis a été réalisé le 09/03/2017 et la récolte a été effectuée le 10/06/2017.

1.2.2 Application du sémi chimique.

La népétalactone est appliquée sur le champ de pomme de terre à l'aide d'un diffuseur placé au-dessus du piège jaune (voir figure 13). La népétalactone a été purifiée et fournie par le département de Chimie Analytique de Gembloux Agro-Bio Tech.

Cent microlitres de népétalactone sont placés dans le diffuseur et renouvelés chaque semaine afin de conserver les effets de la molécule. La népétalactone utilisée en champ a une pureté de 93% et a été diluée dans de l'huile de paraffine afin d'obtenir une concentration de 1%. Des bouteilles en plastique ont été utilisées afin de protéger le sémiochimique des vents et des pluies. Ces bouteilles sont découpées pour laisser circuler l'air et diffuser le produit. Les bouteilles sont fixées au support en métal du piège jaune à l'aide de papier collant, le diffuseur contenant le sémiochimique est fixé à la bouteille en plastique également avec du papier collant (voir figure 13).



Figure 13. Piège jaune avec le diffuseur du sémiochimique.

1.2.3 Application de l'éliciteur.

La formulation utilisée contient l'éliciteur PeaT1 sous forme de poudre. Cette poudre a été mélangée à de l'eau, et le mélange a ensuite été pulvérisé sur le champ. La pulvérisation de l'éliciteur sur la parcelle de pomme de terre a été effectuée toutes les deux semaines. L'éliciteur a été pulvérisé uniquement sur les 3 parcelles de la modalité « Eliciteur », dans un carré de 5 mètres de côtés situé au centre de chaque parcelle concernée.

Le produit contenant l'éliciteur a été formulé et fourni par l'Académie Chinoise des Sciences Agricoles (CAAS) de Pékin. Ce produit formulé en sachets de 15 g contient 3% de PeaT1. Une concentration de 1g.l^{-1} de la formulation a été pulvérisée sur les parcelles dédiées à ce traitement.

1.2.4 Comptage des insectes sur les plantes.

Les parcelles et les pièges jaunes ont été installés le jeudi 20/04/2017. La première pulvérisation de l'éliciteur et la mise en place de la népétalactone dans les diffuseurs ont également été effectuées à cette date. Six collectes d'insectes ont ensuite été effectuées entre le 28/04/2017 et le 07/06/2017, à raison d'une collecte par semaine.

En plus des collectes d'insectes réalisées à l'aide des pièges jaunes, un comptage des insectes ravageurs de la pomme de terre a également été effectué sur les plantes. Ce comptage a été réalisé aux mêmes dates que les collectes des pièges, sur 10 plantes de pomme de terre par parcelle, situées dans un rayon de deux mètres autour du piège jaune.

1.2.5 Analyses statistiques.

Les résultats du piégeage et du comptage des insectes ravageurs ont été analysés statistiquement à l'aide du logiciel Minitab 17 afin de déterminer s'il y a des différences entre les trois modalités. Pour cela, une analyse de la variance (ANOVA) a été réalisée.

1.3 Diagnostic des principales maladies présentes sur les plantes de pomme de terre.

Ce diagnostic a été effectué sur la même parcelle de pomme de terre que celle décrite précédemment. Le diagnostic des maladies a été réalisé le 07/06/2017, en toute fin de culture, quelques jours avant la récolte des pommes de terre. Au cours de ce diagnostic, trois maladies ont été évaluées :

- Le mildiou de la pomme de terre (*Phytophthora infestans*).
- Le virus PVY (*Potato Virus Y*).
- Le virus PLRV (*Potato Leaf Roll Virus*).

Ce sont les trois principales maladies rencontrées en Chine au niveau de la culture de pomme de terre.

Le diagnostic consistait en une évaluation visuelle du développement de ces maladies sur les plantes de pomme de terre, à l'aide d'une échelle de 1 à 5 :

- 1) Absence de symptôme de la maladie.
- 2) Faible développement de la maladie.
- 3) Développement moyen de la maladie.
- 4) Développement important de la maladie.
- 5) Plante détruite par la maladie.

Pour chacune des neuf parcelles du champ, 10 plantes de pomme de terre ont été sélectionnées aléatoirement. Ces 10 plantes ont ensuite été examinées visuellement afin de déterminer le niveau de développement de la maladie présente en fonction de ses symptômes.

Les résultats de ce diagnostic ont également été analysés statistiquement à l'aide du logiciel Minitab 17 afin de déterminer s'il y a des différences entre les trois modalités. Pour cela, une analyse de la variance (ANOVA) a été réalisée.

2) Résultats.

2.1 Analyse des effets des molécules testées sur le comportement du puceron *Aphis fabae* en laboratoire.

2.1.1 Premier test de comportement avec le sémiochimique.

Ce premier test de comportement a été réalisé avec de la népétalactone à une concentration de 0.1%. Trente pucerons *A. fabae* ailés ont réalisé ce test. Cependant, les résultats de ce test n'ont pas été pris en compte car un nombre trop important de pucerons n'ont pas fait de choix entre les deux voies possibles durant les 5 min, ou sont revenus vers la zone A.

2.1.2 Deuxième test de comportement avec le sémiochimique.

Le deuxième test de comportement a été réalisé avec de la népétalactone à une concentration de 1%. Trente pucerons *A. fabae* ailés ont été utilisés pour ce test. Les résultats de ce test sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 3. Résultats du deuxième test comportemental avec la népétalactone (1%).

Paramètres évalués	Sémiochimique	Témoin	P valeur
Première zone choisie (pucerons)	12	18	0.362
Dernière zone choisie (pucerons)	19	11	0.200
Temps parcouru (sec)	2349	2966	0.511

Il n'y a pas de différence significative pour les trois paramètres évalués.

2.1.3 Troisième test de comportement avec le sémiochimique.

Le troisième test de comportement a été réalisé avec de la népétalactone à une concentration de 10%. Trente pucerons *A. fabae* ailés ont été utilisés pour ce test. Les résultats de ce test sont présentés dans le tableau 4. Il n'y a pas de différence significative pour les paramètres évalués.

Tableau 4. Résultats du troisième test comportemental avec la népétalactone (10%).

Paramètres évalués	Sémiochimique	Témoin	P valeur
Première zone choisie (pucerons)	11	19	0.200
Dernière zone choisie (pucerons)	12	18	0.362
Temps parcouru (sec)	1757	2976	0.171

2.1.4 Test de comportement avec l'éliciteur.

Ce test de comportement a été réalisé avec l'éliciteur Hrip1. Trente pucerons *A. fabae* ailés ont été utilisés pour ce test. Les résultats de ce test sont présentés dans le tableau 5.

Tableau 5. Résultats du test comportemental avec l'éliciteur Hrip1.

Paramètres évalués	Eliciteur	Témoin	P valeur
Première zone choisie (pucerons)	15	15	1
Dernière zone choisie (pucerons)	15	15	1
Temps parcouru (sec)	2155	2237	0.916

Il n'y a pas de différence significative pour les trois paramètres évalués.

2.2 Analyse des effets des molécules testées sur les ravageurs de la culture de pomme de terre.

2.2.1 Piégeage d'insectes ravageurs de la pomme de terre.

L'identification des insectes récoltés à l'aide des pièges jaunes dans la parcelle de pomme de terre de Tai'an a permis de dénombrer les différents types d'insectes ravageurs présents. Cependant, parmi l'ensemble des insectes ravageurs de la pomme de terre, seuls trois types ont été principalement retrouvés. Il s'agit en grande majorité des pucerons (Hémiptères), mais aussi de quelques cicadelles (Hémiptères) et mirides (Hémiptères : Miridae). En raison du nombre trop faible des autres types de ravageurs, les résultats de ceux-ci ne seront pas analysés statistiquement. En effet, parmi les autres ravageurs de la pomme de terre retrouvés dans les pièges jaunes, uniquement trois coccinelles *Henosepilachna vigintioctopunctata* Fabricius et 10 fourmis pharaons *Monomorium pharaonis* L. ont été comptabilisés durant l'ensemble de la période de collecte.

2.2.1.1 Piégeage des pucerons.

L'évolution du nombre moyen de pucerons récoltés à l'aide des pièges jaunes en fonction des modalités et des dates de collecte est représentée dans le tableau 6 et la figure 14.

Tableau 6. Nombre moyen de pucerons récoltés par parcelle de la modalité correspondante en fonction de la date de collecte.

Dates de collecte	Contrôle	Eliciteur	Népétalactone	Total
28/04/2017	18,67±10,60	19,00±16,52	15,67±7,57	53,33
05/05/2017	224,00±43,55	254,33±194,24	322,33±132,79	800,67
12/05/2017	228,33±46,07	271,33±111,20	280,67±126,57	780,33
19/05/2017	168,00±35,00	174,00±58,23	162,33±72,04	504,33
30/05/2017	59,00±29,21	42,33±19,04	66,67±37,21	168,00
07/06/2017	10,67±4,04	16,00±8,54	11,67±8,33	38,33
Total	708,67	777,00	859,33	2345,00

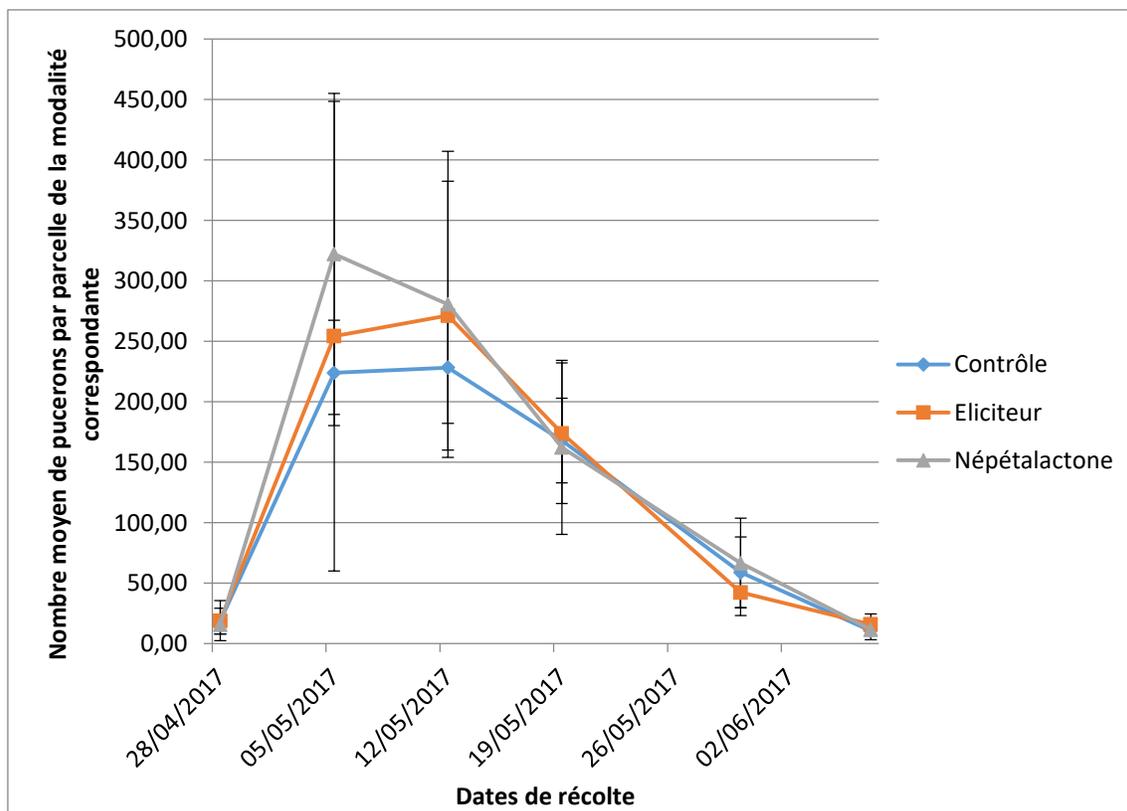


Figure 14. Evolution du nombre moyen de pucerons par parcelle de la modalité correspondante en fonction de la date de collecte.

Il y a une différence très hautement significative pour le facteur « Date » ($P < 0.001$) mais pas de différence significative pour les facteurs « Modalité » ($P = 0.803$) et « Bloc » ($P = 0.356$), ni pour aucune des interactions entre les facteurs.

Un plus grand nombre de pucerons a été retrouvé dans la modalité « Népétalactone », suivent ensuite respectivement les modalités « Eliciteur » et « Contrôle ». La différence entre les modalités se marque surtout lors des pics d'affluence des pucerons, qui ont eu lieu au début du mois de mai (05/05 et 12/05).

Il est également intéressant de connaître la répartition des différentes espèces de pucerons qui ont été retrouvées dans les pièges jaunes. Six espèces ont principalement été identifiées : *Myzus persicae* Sulzer, *Aphis fabae* Scopoli, *Aphis gossypii* Glover, *Aphis nasturtii* Kaltenbach, *Macrosiphum euphorbiae* Thomas et *Aulacorthum solani* Kaltenbach. La répartition des différentes espèces de pucerons retrouvées dans les pièges en fonction de la modalité pour l'ensemble de la période de collecte est représentée dans le tableau 7 et la figure 15.

Tableau 7. Nombre moyen de pucerons par parcelle en fonction de l'espèce et de la modalité pour l'ensemble de la période de collecte.

Espèces de puceron	Contrôle	Eliciteur	Népétalactone	Total
<i>Myzus persicae</i>	353,67±157,99	454,33±232,05	416,33±221,86	1224,33
<i>Aphis fabae</i>	161,00±65,16	162,67±74,75	177,67±88,75	501,33
<i>Aphis gossypii</i>	136,67±68,96	102,00±57,02	143,67±71,84	382,33
<i>Aphis nasturtii</i>	9,67±6,68	6,33±3,66	6,33±4,58	22,33
<i>Macrosiphum euphorbiae</i>	42,67±24,70	50,00±26,89	113,33±49,58	206,00
<i>Aulacorthum solani</i>	5,00±3,99	1,67±1,60	2,00±2,00	8,67
Total	708,67	777,00	859,33	2345,00

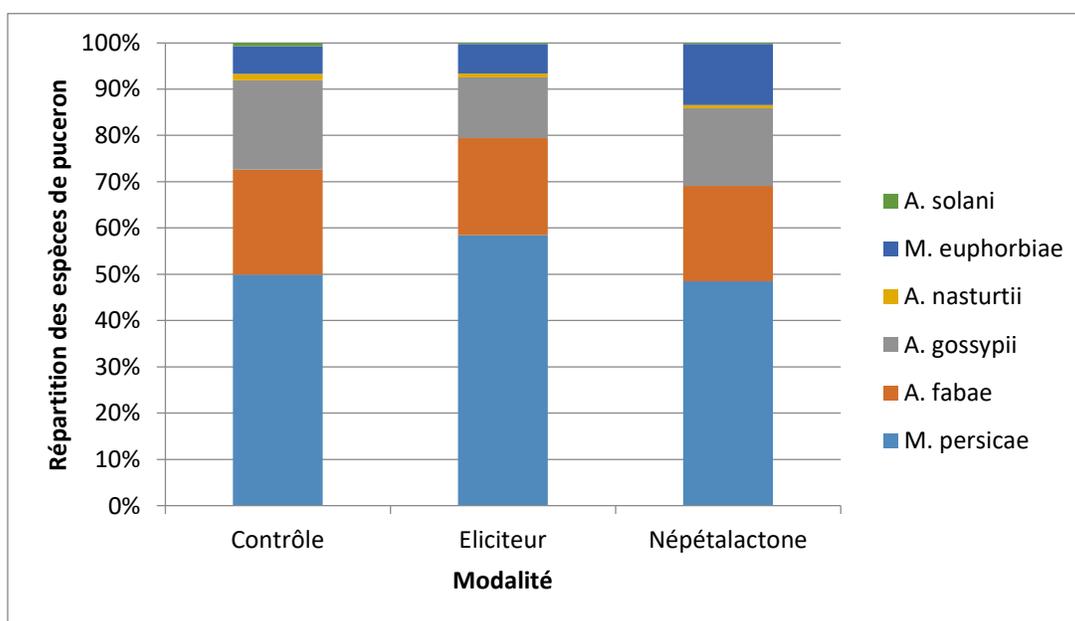


Figure 15. Répartition des espèces de pucerons en fonction de la modalité pour l'ensemble de la période de collecte.

Une différence très hautement significative est observée pour le facteur « Date de collecte » ($P < 0.001$) ainsi que pour le facteur « Espèce de pucerons » ($P < 0.001$), mais pas pour le facteur « Modalité » ($P = 0.096$). Il y a également une différence très hautement significative pour l'interaction entre les facteurs « Date de collecte » et « Espèce de pucerons » ($P < 0.001$), mais pas pour les autres interactions. La décomposition en AV1 des espèces de pucerons en fonction des dates de collecte a montré qu'il y avait des différences significatives entre les nombres des différentes espèces de pucerons récoltés pour l'ensemble des dates de collecte.

L'espèce de pucerons la plus présente est de loin *M. persicae*. Cette espèce est retrouvée majoritairement pour les trois modalités. D'autres espèces sont également bien présentes, comme *A. fabae*, *A. gossypii* ou *M. euphorbiae*. A l'inverse, les espèces *A. nasturtii* et *A. solani* ont été très peu retrouvées dans les pièges.

2.2.1.2 Piégeage des cicadelles.

L'évolution du nombre moyen de cicadelles récoltées à l'aide des pièges jaunes en fonction des modalités et des dates de collecte est représentée dans le tableau 8 et la figure 16.

Tableau 8. Nombre moyen de cicadelles récoltées par parcelle de la modalité correspondante en fonction de la date de collecte.

Dates de collecte	Contrôle	Eliciteur	Népétalactone	Total
28/04/2017	0	0	0	0,00
05/05/2017	1,00±1,00	0,33±0,58	0,67±0,58	2,00
12/05/2017	0	0,33±0,58	0	0,33
19/05/2017	0,33±0,58	1,00±1,00	0,33±0,58	1,67
30/05/2017	13,33±4,73	5,67±3,21	9,67±0,58	28,67
07/06/2017	13,67±4,04	14,33±4,51	9,67±1,53	37,67
Total	28,33	21,66	20,34	70,33

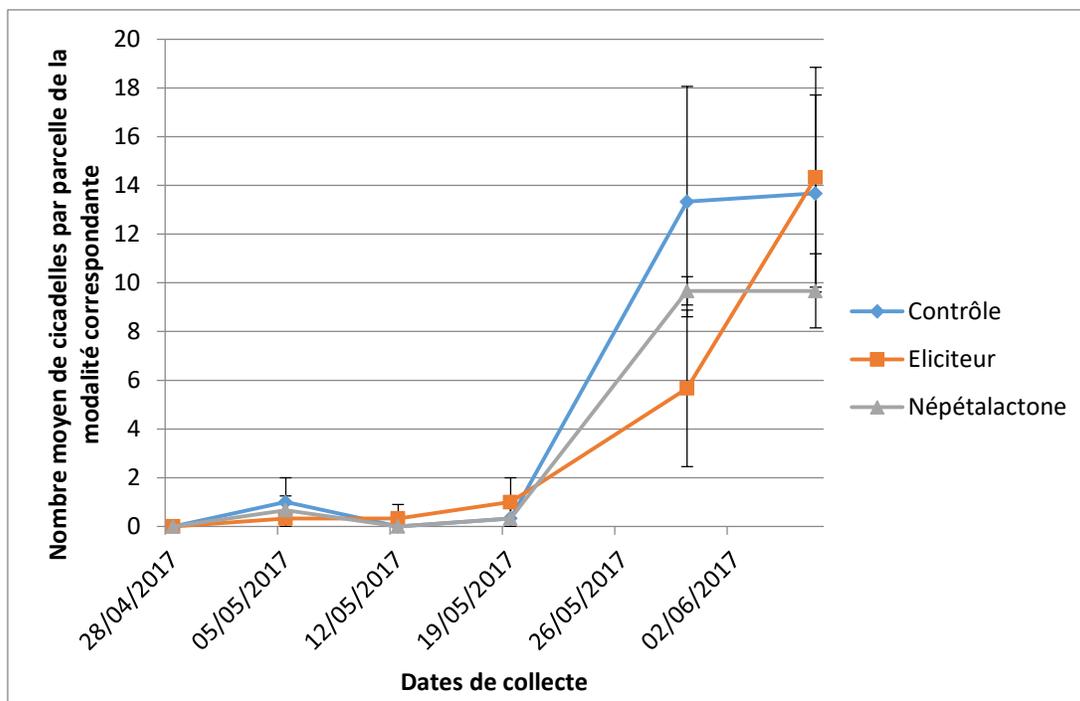


Figure 16. Evolution du nombre moyen de cicadelles par parcelle de la modalité correspondante en fonction de la date de collecte.

Il y a une différence très hautement significative pour le facteur « Date » ($P < 0.001$) mais aucune différence significative pour les facteurs « Modalité » ($P = 0.205$) et « Bloc » ($P = 0.946$), ni pour les interactions entre les facteurs.

La modalité dans laquelle le plus grand nombre de cicadelles a été retrouvé est la modalité « Contrôle », suivent ensuite respectivement les modalités « Eliciteur » et « Népétalactone ». L'écart entre les trois modalités se marque surtout lors des deux dernières collectes, entre la fin du mois de mai et le début du mois de juin. C'est à cette période qu'il y a eu un plus grand nombre de cicadelles récoltées dans les pièges. Avant cela, le nombre de cicadelles est presque négligeable.

2.2.1.3 Piégeage des mirides.

L'évolution du nombre moyen de mirides récoltés à l'aide des pièges jaunes en fonction des modalités et des dates de collecte est représentée dans le tableau 9 et la figure 17.

Tableau 9. Nombre moyen de mirides récoltés par parcelle de la modalité correspondante en fonction de la date de collecte.

Dates de collecte	Contrôle	Eliciteur	Népétalactone	Total
28/04/2017	0	0	0	0,00
05/05/2017	0	0	0	0,00
12/05/2017	0,67±0,58	0,33±0,58	1,67±1,15	2,67
19/05/2017	0	0,67±1,15	1,67±1,53	2,33
30/05/2017	1,00±1,73	1,33±1,53	2,33±1,53	4,67
07/06/2017	1,33±1,53	1,00±1,00	3,00±2,65	5,33
Total	3	3,33	8,67	15

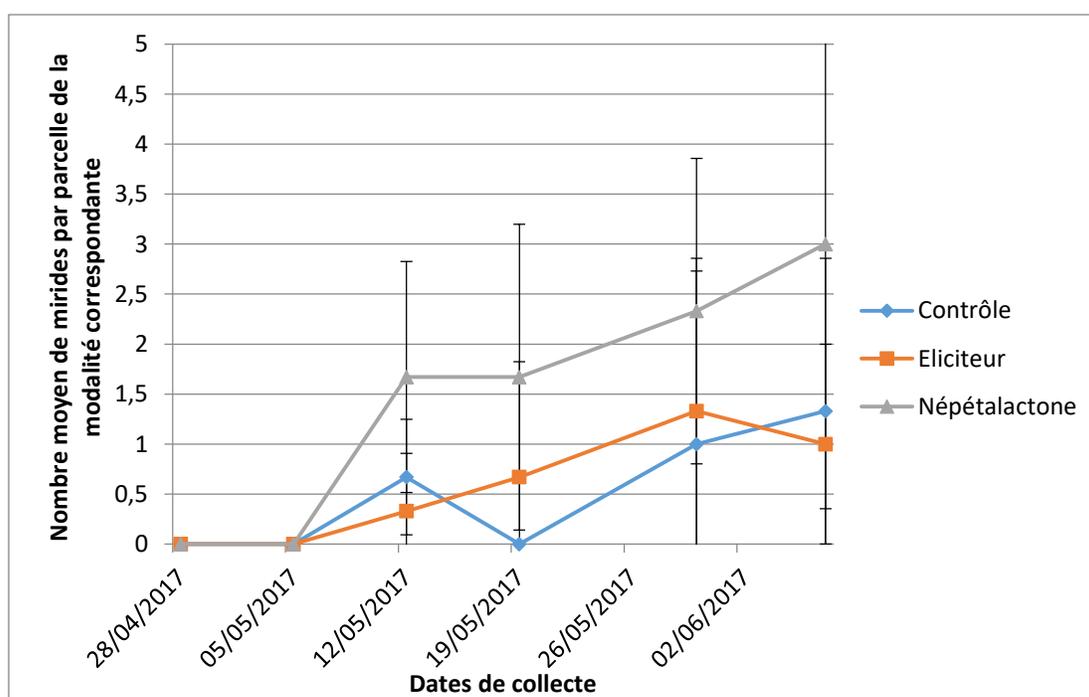


Figure 17. Evolution du nombre moyen de mirides par parcelle de la modalité correspondante en fonction de la date de collecte.

Aucune différence significative n'est observée pour les facteurs « Date » ($P=0.058$), « Modalité » ($P=0.055$) et « Bloc » ($P=0.755$), ni pour les interactions entre ces facteurs. Par contre, lorsque le facteur « Bloc » n'est plus pris en compte, l'analyse de la variance à 2 facteurs (Date et Modalité) conclut qu'il y a une différence hautement significative pour le facteur « Date » ($P= 0.003$) et une différence significative pour le facteur « Modalité » ($P=0.019$).

La modalité pour laquelle le plus grand nombre de mirides a été retrouvé est la modalité « Népétalactone », suivent ensuite respectivement les modalités « Eliciteur » et « Contrôle », tous deux très proches. La différence entre la modalité « Népétalactone » et les deux autres est importante. Cette différence s'est marquée entre les deuxième et sixième récoltes. Avant cela, aucun miride n'a été récolté dans les pièges. Les plus grands nombres de mirides ont été récoltés lors des deux dernières collectes. Cependant, le nombre de mirides récoltés durant l'ensemble de la période de collecte reste assez faible par rapport aux pucerons et aux cicadelles.

2.2.2 Comptage des insectes ravageurs sur les plantes de pomme de terre.

Le comptage des insectes ravageurs a été réalisé sur dix plantes de pomme de terre par parcelle. En raison du très faible nombre de ravageurs autres que les pucerons retrouvés sur les plantes, seuls ces derniers ont été comptabilisés.

L'évolution du nombre de pucerons comptabilisés sur les plantes de pomme de terre en fonction des modalités et des dates de collecte est représentée dans le tableau 10 et la figure 18. Les résultats sont donnés en nombre moyen de pucerons par plante de pomme de terre.

Tableau 10. Evolution du nombre moyen de pucerons comptés par plante en fonction des modalités et des dates de collecte.

Dates de collecte	Contrôle	Eliciteur	Népétalactone	Total
28/04/2017	/	/	/	/
05/05/2017	14,7±2,9	12,9±3,1	10,1±7,3	37,7
12/05/2017	17,1±5,1	22,9±5,5	20,2±3,7	60,2
19/05/2017	6,1±2,2	6,7±1,6	7,6±2,9	20,4
30/05/2017	1,2±0,6	2,2±1,2	2,9±2,2	6,3
07/06/2017	1,5±0,7	1,2±0,4	0,5±0,1	3,2
Total	40,6	45,9	41,3	127,8

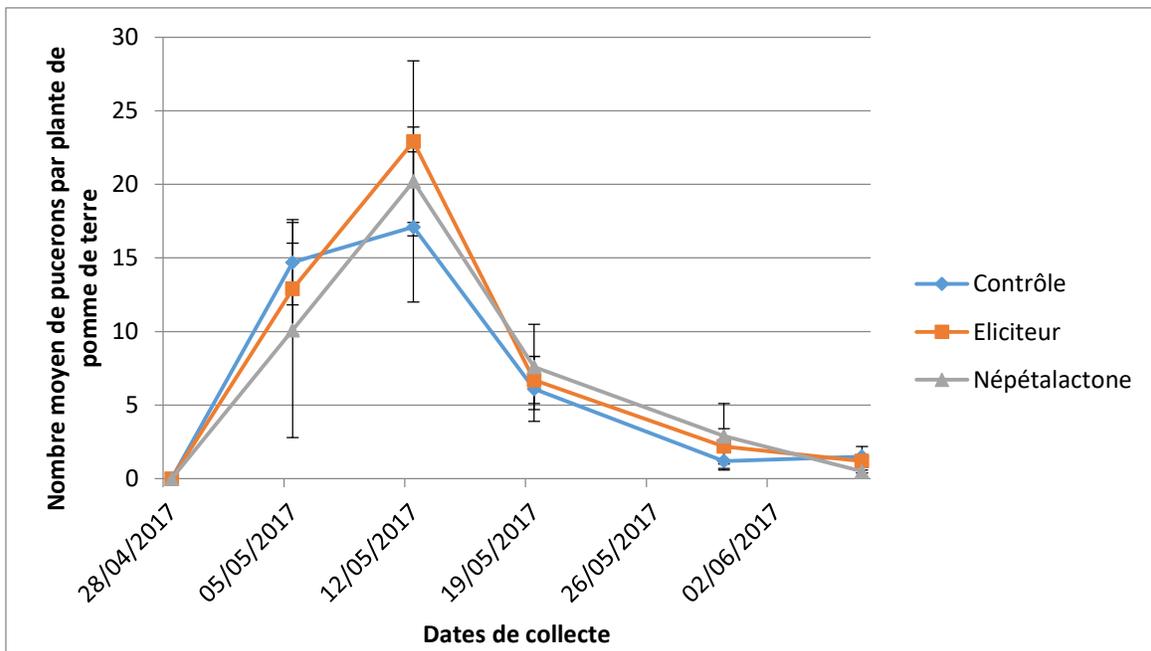


Figure 18. Evolution du nombre moyen de pucerons comptés par plante en fonction des modalités et des dates de collecte.

Il y a une différence très hautement significative pour le facteur « Date » ($P < 0.001$) mais il n'y a pas de différence significative pour le facteur « Modalité » ($P = 0.633$).

La modalité pour laquelle le plus grand nombre de pucerons par plante de pomme de terre a été comptabilisé est la modalité « Eliciteur », suivent ensuite respectivement les modalités « Népétalactone » et « Contrôle ». Cependant, les valeurs des trois modalités sont très proches. Les plus grands nombres de pucerons ont été comptés lors des deuxième et troisième semaines de collecte. C'est lors de ces deux dates que les écarts entre les trois modalités sont les plus importants, ce qui correspond aux résultats du piégeage des pucerons dans les pièges jaunes.

2.3 Diagnostic des principales maladies présentes sur les plantes de pomme de terre.

Les résultats du diagnostic sont présentés dans le tableau 11. Les valeurs du tableau sont les scores moyens des trois parcelles de chaque modalité obtenus pour chacune des maladies présentes. Le total est également donné en moyenne.

Tableau 11. Scores moyens du diagnostic obtenus par modalité pour chaque maladie analysée.

Maladie	Contrôle	Eliciteur	Népétalactone
Mildiou (<i>Phytophthora infestans</i>)	2,00	2,00	2,00
PVY (<i>Potato Virus Y</i>)	3,00±1,00	3,00±1,00	2,67±0,58
PLRV (<i>Potato Leafroll Virus</i>)	3,67±0,58	3,67±0,58	3,33±0,58
Total	2,89	2,89	2,67

Il y a une différence très hautement significative pour le facteur « Maladie » ($P < 0.001$), mais il n'y a pas de différence significative pour les facteurs « Modalité » ($P = 0.849$) et « Bloc » ($P = 0.663$), ni pour aucune des interactions entre les facteurs.

Les modalités « Contrôle » et « Eliciteur » obtiennent le score moyen global le plus élevé, suivi ensuite de près par la modalité « Népétalactone ». La différence se marque pour les deux virus PVY et PLRV car pour le mildiou, les scores moyens des trois modalités sont égaux.

3) Discussions.

3.1 Analyse des effets des molécules testées sur le comportement du puceron *Aphis fabae* en laboratoire.

3.1.1 Tests de comportement avec la substance sémi chimique.

Les résultats du premier test de comportement (népétalactone 0.1%) n'ont pas été pris en compte. En effet, les pucerons semblaient indifférents et n'ont pas fait de choix. La principale raison qui pourrait expliquer cela est que la concentration de népétalactone utilisée était probablement trop faible pour que les pucerons perçoivent cette molécule.

Concernant les tests comportementaux qui ont suivi, les pucerons ont répondu. Cependant, il n'y a pas eu de différence significative pour les trois paramètres évalués.

Le deuxième test n'a pas permis de déceler une tendance dans les résultats. Un nombre plus important de pucerons a choisi le témoin comme première zone, par contre, la dernière zone a été privilégiée pour le sémi chimique. Le temps parcouru dans les deux zones est équilibré.

Le troisième test a par contre permis de déceler une certaine tendance. Malgré le fait qu'il n'y ait pas de différence significative pour les paramètres évalués, les pucerons *A. fabae* semblent préférer se diriger vers la plante de fève témoin plutôt que vers celle contenant la népétalactone. En effet, un nombre plus important de pucerons a choisi le témoin comme première et dernière zone. De plus, le temps parcouru pour le témoin est bien supérieur à celui du sémiochimique.

Une tendance semble donc apparaître : à forte concentration, la népétalactone pourrait avoir un effet répulsif sur les pucerons *A. fabae*. Cette tendance confirme les résultats d'une étude similaire réalisée par Fernandez-Grandon et al. (2013) sur les pucerons *M. persicae*.

Diverses hypothèses peuvent expliquer le fait qu'il n'y ait pas eu de différence significative pour les paramètres évalués lors des tests réalisés avec le sémiochimique. Premièrement, les concentrations de népétalactone utilisées pour réaliser les tests comportementaux ont peut-être été mal choisies. Une concentration de 0.1% est probablement trop faible pour avoir une influence sur le comportement du puceron. De plus, les écarts entre les concentrations utilisées sont importants. Des écarts plus faibles auraient permis de confirmer une éventuelle tendance. Il aurait donc été intéressant d'inclure dans ces tests des concentrations de népétalactone situées entre 1 et 10%.

Une deuxième hypothèse pourrait être que le nombre de pucerons utilisés lors des tests de comportement (n=30) était trop faible. Il serait donc intéressant de refaire ces tests avec un nombre plus important de pucerons afin d'obtenir des résultats sur un nombre plus représentatif.

Une autre hypothèse concerne la forme de népétalactone utilisée. En effet, d'après les travaux de Guldmond et al. (1993), les pucerons *Cryptomyzus galeopsidis* Kaltenbach mâles ont une préférence pour les phéromones naturelles par rapport aux phéromones reproduites de façon synthétique. Cela a peut-être eu un effet similaire sur les pucerons *A. fabae* utilisés lors des tests de comportement réalisés dans le cadre de ce travail, les pucerons étant probablement moins sensibles à la népétalactone synthétique. De plus, il semble que le ratio entre népétalactone et népétalactol ne doit pas être négligé lors d'un test olfactométrique. En effet, une étude réalisée à l'aide d'un olfactomètre par Dawson et al. (1987) a permis de mettre en évidence le fait que des pucerons *Megoura viciae* Buckton mâles (dont le ratio népétalactone :népétalactol varie entre 5 :1 et 12 :1) ont répondu favorablement à un mélange de népétalactone et de népétalactol synthétiques alors qu'ils n'ont pas répondu favorablement à ces deux molécules séparément.

Or, dans la présente étude, le népétalactol n'a pas été ajouté pour reproduire le ratio caractéristique du puceron *A. fabae* (29 :1). Malgré l'importance de la népétalactone par rapport au népétalactol dans ce ratio, ce dernier ne doit pas être négligé. Il aurait donc été intéressant de reproduire le ratio caractéristique du puceron *A. fabae* lors des tests de comportement.

L'espèce de pucerons utilisée lors d'un test comportemental est également très importante. Contrairement à la présente étude utilisant des pucerons *A. fabae*, une étude similaire réalisée par Lilley & Hardie (1996) utilisant des pucerons *Sitobion avenae* Fabricius et *Sitobion fragariae* Walker a obtenu des résultats très différents. En effet, cette étude a démontré que les pucerons *S. avenae* et *S. fragariae* mâles et femelles gynopares et virginopares étaient attirés par la népétalactone à une concentration de 1%. Ceci démontre que les résultats dépendent de l'espèce de pucerons utilisée. De plus, les pucerons *S. avenae* et *S. fragariae* possèdent un ratio népétalactone :népétalactol de 1 :0. Ce qui signifie que la phéromone sexuelle produite par ces pucerons contient uniquement de la népétalactone. Ceci peut expliquer pourquoi les pucerons *S. avenae* et *S. fragariae* sont particulièrement attirés par cette molécule, au contraire des pucerons *A. fabae* qui produisent également du népétalactol.

Enfin, une dernière hypothèse concerne le sexe des pucerons utilisés lors des tests de comportement. En effet, les pucerons mâles sont attirés par la phéromone sexuelle (Pickett & Glinwood, 2007), mais les effets que cette phéromone exerce sur les pucerons femelles ne sont pas encore bien connus. Les études réalisées à ce sujet ne concordent pas toutes sur le fait que les pucerons femelles sont également attirés par la phéromone sexuelle. Par exemple, une étude réalisée par Park et al. (2000) a démontré que la népétalactone n'exerce aucun effet sur les pucerons *Rhopalosiphum padi* L. femelles gynopares et virginopares alors qu'elle exerce un effet attractif sur les mâles. Or, dans le cadre de la présente étude, les pucerons *A. fabae* ailés utilisés sont uniquement des femelles. Cela peut être une raison majeure qui explique l'absence de résultat significatif pour les tests de comportement avec le sémiochimique. Il aurait été intéressant de réaliser ces tests comportementaux avec des pucerons mâles et femelles afin de comparer les deux.

3.1.2 Test de comportement avec l'éliciteur.

Pour ce test, il n'y a pas eu de différence significative pour les paramètres évalués. De plus, il y a une égalité dans les résultats entre le témoin et l'éliciteur, ce qui porte à croire que la plante élicitee avec Hrip1 n'a eu aucun effet (attractif ou répulsif) sur le puceron *A. fabae*.

L'absence d'effet de la plante élicitee sur le puceron *A. fabae* peut s'expliquer par diverses hypothèses. Premièrement, les concentrations de l'éliciteur dans les solutions de trempage et/ou de pulvérisation n'étaient peut-être pas suffisantes. De plus, par définition, les éliciteurs stimulent des réactions de défense naturelle chez la plante. L'éliciteur Hrip1 a donc provoqué des réactions de défense chez *V. faba*, mais ces réactions n'ont peut-être aucun effet sur un puceron quant à son attirance envers la plante. Le rôle de l'éliciteur est d'induire des réactions chez la plante lui permettant de se défendre face à une attaque. Cependant, dans ce cas-ci, le puceron *A. fabae* n'a pas été en contact direct avec *V. faba*. Des études ont déjà démontré les effets bénéfiques de l'éliciteur Hrip1 en phytopathologie, notamment sur le virus de la mosaïque du tabac (Kulye et al., 2012). Cependant, les effets de cet éliciteur sur les insectes sont encore trop peu connus. Le test de comportement réalisé dans le cadre de cette étude fonctionne selon l'attraction des pucerons envers la plante, dépendant de stimuli olfactifs. S'il n'y a pas eu d'attraction pour le puceron, on peut dès lors supposer qu'il n'y a pas eu de molécule volatile émise par la plante suite à l'élicitation par Hrip1, ou alors que ces molécules, mêmes si elles ont été produites, n'ont pas eu d'effet sur les pucerons *A. fabae*.

Les résultats du test de comportement avec Hrip1 n'ont pas pu être confrontés à ceux d'autres études similaires en raison du manque d'études réalisées avec cet éliciteur. Cependant, d'autres études ont été réalisées avec d'autres éliciteurs. Par exemple, une étude très récente réalisée par Sobhy et al. (2017) sur des pommes de terre a démontré que la cis-jasmone, molécule élicitrice, était capable de provoquer chez la plante une augmentation de la production de composés organiques volatils (COV) naturellement libérés par les plantes. En conséquence de cette augmentation de COV produits, les pucerons *Macrosiphum euphorbiae*, ravageurs de la pomme de terre, étaient repoussés de manière significative lors d'un test de comportement. Cette étude démontre donc qu'en plus d'agir au niveau interne des plantes, les éliciteurs peuvent également agir au niveau externe en modifiant la production des COV, repoussant ainsi les insectes ravageurs. Cependant, les mécanismes produisant les COV ne sont pas encore bien connus.

De plus, certains éliciteurs peuvent augmenter la production de COV, alors que d'autres peuvent la diminuer (Sobhy et al., 2017). La présente étude doit servir de précurseur pour des études ultérieures avec Hrip1, et il serait intéressant, dans le cadre de ces études, de déterminer si Hrip1 modifie la production des COV produits naturellement par la plante utilisée, leur identité, les mécanismes de production de ces COV, ainsi que leurs effets sur les insectes ravageurs.

3.2 Analyse des effets des molécules testées sur les ravageurs de la culture de pomme de terre.

3.2.1 Piégeage des insectes.

3.2.1.1 Piégeage des pucerons.

Les résultats du nombre de pucerons retrouvés dans les pièges n'ont pas menés à des différences significatives entre les modalités. Lors des tests de comportement réalisés sur les pucerons *A. fabae* avec une concentration de népétalactone identique à celle appliquée en champ (1%), il n'y a pas eu d'effet de la molécule sur les pucerons.

Cependant, une tendance était apparue : à forte concentration, la népétalactone semble exercer un effet répulsif sur le puceron *A. fabae*. Or, d'après les résultats de l'essai en champ, les conclusions sont bien différentes. Malgré le fait qu'il n'y ait pas de différence significative entre les modalités, comparée au contrôle, la népétalactone semble toutefois exercer un effet attractif sur les pucerons retrouvés dans le champ de pomme de terre. Cette conclusion correspond à celle de l'étude menée par Dong et al. (2009) réalisée en champ en Chine selon laquelle des pucerons *M. persicae* mâles et femelles gynopares ont été récoltés significativement en plus grand nombre dans les parcelles contenant la népétalactone par rapport à la parcelle contrôle.

Dès lors, pourquoi y a-t-il une telle différence entre les résultats de l'essai en champ et ceux des tests de comportement ? Plusieurs raisons peuvent expliquer cela. Premièrement, même si des tendances sont apparues pour les tests de comportement et pour l'essai en champ, il n'y a toutefois pas eu de différence significative dans les résultats. Deuxièmement, les conditions des deux expériences sont très différentes. L'essai en champ a été effectué en milieu naturel, en condition réelle de culture, avec un nombre illimité de pucerons et durant une période relativement longue. A l'inverse, les tests de comportement ont été effectués en laboratoire, avec un nombre limité de pucerons et sur une durée de 5 min.

Troisièmement, les espèces de pucerons utilisées sont différentes. En plus de l'espèce *A. fabae* utilisée lors des tests de comportement, cinq autres espèces ont été retrouvées dans les pièges. Si un effet à tendance répulsive de la népétalactone sur les pucerons *A. fabae* a été décelé lors des tests de comportement, cela ne veut pas dire que ça aurait été le cas pour les autres espèces. Enfin, l'effet à tendance répulsive de la népétalactone lors des tests comportementaux a été perçu pour une concentration de 10%. Or, en champ, la concentration appliquée était de 1%, afin de tester une concentration ni trop faible, ni trop importante.

Les effets de la népétalactone sur les pucerons femelles sont encore peu connus. Or, d'après le cycle des pucerons, ce sont des femelles que l'on retrouve au printemps et en été lors des saisons de culture (Williams & Dixon, 2007). Il est donc primordial, dans le cadre de la lutte contre les pucerons, de connaître les effets de la népétalactone sur les femelles. Même si un effet à tendance attractive est apparu au cours de l'essai en champ, et que ces résultats correspondent à ceux de l'étude similaire réalisée par Dong et al. (2009), d'autres études doivent être réalisées afin de confirmer ces résultats.

Concernant l'éliciteur PeaT1, les résultats correspondent à ceux du test de comportement réalisé sur les pucerons *A. fabae* avec l'éliciteur Hrip1 où aucun effet de cet éliciteur sur les pucerons n'avait été identifié. Pour l'essai en champ, les résultats entre les modalités « Eliciteur » et « Contrôle » sont également assez proches.

Les résultats de la répartition des différentes espèces de pucerons retrouvées dans les pièges jaunes correspondent aux informations tirées des travaux de Radcliffe (1982) et Saguez et al. (2013). En effet, l'espèce présente en majorité dans les pièges est *M. persicae*, qui est également la plus importante espèce de pucerons retrouvée au niveau de la culture de pomme de terre dans le monde entier. D'après ces mêmes travaux, les autres espèces récoltées dans les pièges sont également souvent retrouvées dans la culture de pomme de terre. Il n'y a donc pas eu d'espèce provenant d'autres cultures. Enfin, l'analyse statistique a conclu que les trois modalités n'étaient pas significativement différentes, ce qui signifie qu'il n'y a pas d'effet de la népétalactone ou de l'éliciteur sur la répartition et la diversité des espèces de pucerons présentes.

3.2.1.2 Piégeage des cicadelles.

Un nombre plus important de cicadelles a été retrouvé dans la modalité « Contrôle » que dans les deux autres modalités. Cela signifie que, même s'il n'y a pas eu de différence significative entre les modalités, il semblerait que la népétalactone et l'éliciteur aient un effet répulsif sur les cicadelles récoltées dans le champ de pomme de terre. La différence entre le contrôle et les deux autres modalités s'est marquée lors des deux dernières dates de collecte, soit au moment du pic de présence des cicadelles. Pour les collectes précédentes, le nombre de cicadelles récoltées est négligeable.

3.2.1.3 Piégeage des mirides.

Un nombre plus important de mirides a été retrouvé dans la modalité « Népétalactone » que dans les deux autres modalités. De plus, en supprimant le facteur « Bloc », l'AV2 indique qu'il y a une différence significative entre les modalités. En comparant les différentes modalités, l'AV1 indique qu'il y a une différence significative entre les modalités « Népétalactone » et « Contrôle » ($P=0.048$). Il semble donc que la népétalactone ait un effet attractif sur les mirides récoltés dans le champ de pomme de terre. Il n'y a par contre pas eu d'effet de l'éliciteur.

Les mirides (Hémiptères : Miridae) forment une vaste famille comprenant à la fois des ravageurs de cultures, mais également des prédateurs d'insectes (INRA, 2017). Parmi les espèces de mirides retrouvées dans les pièges jaunes, *Apolygus lucorum* Meyer-Dür est une espèce à la fois phytophage et prédatrice de pucerons, notamment le puceron *A. gossypii* (Yuan et al., 2013). Au cours de cette expérience, la népétalactone semble avoir eu un effet attractif sur les mirides. Cette substance sémiochimique, en plus de son effet sur les pucerons, a également un rôle intéressant à jouer en attirant leurs ennemis naturels.

3.2.2 Comptage d'insectes sur les plantes.

Les résultats du nombre de pucerons comptabilisés par plante sont très proches pour les trois modalités. Ces résultats démontrent une nouvelle fois l'absence de différence significative entre les modalités. L'absence de résultat significatif peut s'expliquer par les difficultés de réaliser un comptage exact du nombre d'insectes sur les plantes. En effet, les insectes comptabilisés étaient en grande partie des pucerons. Lorsque ceux-ci sont ailés, ils s'envolent très souvent quand la plante de pomme de terre est manipulée afin de réaliser le comptage.

Toutefois, le comptage des insectes sur les plantes est utile car il se focalise essentiellement sur les insectes aptères, alors que le piégeage se focalise sur les insectes ailés. Ce sont donc deux approches différentes. Les résultats du comptage permettent ainsi de déterminer d'éventuels effets des molécules testées sur les insectes aptères. Dans le cas présent, il n'y a pas eu d'effet des molécules testées sur les pucerons aptères. Les résultats du piégeage des pucerons n'ont pas démontré d'effet sur les pucerons ailés, ce qui signifie qu'il ne semble pas y avoir de différence entre les pucerons ailés et aptères au niveau des effets de la népétalactone et de PeaT1.

3.2.3 Discussion globale de l'essai en champ.

Globalement, l'essai en champ n'a pas mené à des différences significatives entre les modalités. Ceci peut s'expliquer par diverses hypothèses liées à la parcelle et aux molécules utilisées.

Premièrement, les volumes et la concentration de la népétalactone n'étaient peut-être pas adaptés. Pour rappel, la népétalactone était appliquée à l'aide d'un diffuseur de 100 µl. Ce volume est peut-être insuffisant pour couvrir une parcelle de 225 m². De plus, une concentration de népétalactone de 1% est peut-être trop faible pour pouvoir obtenir des résultats significatifs. Il serait donc intéressant, dans le cadre d'études ultérieures, d'essayer une concentration plus importante de népétalactone.

Une autre hypothèse qui pourrait expliquer l'absence de résultat significatif est l'hétérogénéité du champ de pomme de terre. En effet, le champ sur lequel les collectes ont été effectuées présentait de grandes différences au niveau du développement des plantes de pomme de terre du côté droit du champ (voir figure 19). Il s'agit des parcelles 3, 6 et 9, donc cela a touché les trois modalités (voir figure 12). En analysant la figure 19, il est constatable qu'au-delà de la ligne rouge, le champ est beaucoup plus clairsemé.



Figure 19. Illustration de l'hétérogénéité du champ de pomme de terre.

Cette hétérogénéité au sein du champ est due à une application trop importante de fertilisants au niveau de cette partie du champ de pomme de terre, ce qui a peut-être faussé les résultats. En effet, sans cet excès de fertilisation, le développement des plantes de pomme de terre dans les parcelles 3, 6 et 9 aurait probablement été meilleur et un nombre plus important d'insectes aurait peut-être été récolté dans les pièges, modifiant ainsi les résultats obtenus.

Enfin, une dernière hypothèse concerne l'éliciteur. L'essai en champ n'a pas mené à des différences significatives entre l'éliciteur PeaT1 et le contrôle. Les résultats de la modalité « Eliciteur » sont même souvent très proches de ceux de la modalité « Contrôle », alors que certains écarts ont parfois été constatés entre la modalité « Népétalactone » et la modalité « Contrôle ». L'efficacité de PeaT1 face aux insectes ravageurs n'a pas pu être démontrée. Cela pourrait venir du fait que les dates de pulvérisation de l'éliciteur sur les plantes de pomme de terre aient été mal choisies. En effet, la solution contenant PeaT1 a été pulvérisée une semaine avant le début des collectes, puis a ensuite été pulvérisée toutes les deux semaines durant la période de collecte. Il serait donc intéressant de pulvériser les plantes de pomme de terre plusieurs semaines avant le début des expériences.

Toutefois, comme pour Hrip1, aucune étude n'a encore démontré les effets de PeaT1 sur les insectes. Ce domaine de recherche est très récent, il en résulte que très peu d'études ont été réalisées à ce sujet. Le but de la présente étude était de démontrer des effets causés par les éliciteurs Hrip1 et PeaT1 sur les insectes ravageurs d'une culture. Les effets bénéfiques de ces éliciteurs sur des maladies de plantes ont déjà été démontrés dans plusieurs études. Cependant, leurs effets sur les insectes restent encore trop peu connus. Il est dès lors nécessaire d'étudier précisément les effets des éliciteurs Hrip1 et PeaT1 sur les plantes afin d'identifier les molécules qui serviront dans la lutte des insectes ravageurs.

Pour cela, d'autres études doivent être réalisées. Comme énoncé lors de la discussion des tests de comportement, les composés organiques volatils (COV) peuvent être une voie très intéressante dans la lutte des insectes ravageurs. Cependant, les mécanismes entre les éliciteurs et les plantes ne sont pas encore bien connus. Il est dès lors nécessaire, dans le cadre d'études ultérieures sur les éliciteurs, en particulier Hrip1 et PeaT1 étant donné le manque de connaissance à leur sujet, de déterminer si ces éliciteurs augmentent ou réduisent la production de COV des plantes élicitées ainsi que les mécanismes impliqués. De plus, il est également nécessaire d'identifier les COV libérés afin de déterminer leurs effets sur les insectes ravageurs, mais aussi sur leurs ennemis naturels.

Pour cela, diverses pistes peuvent être envisagées, comme par exemple l'utilisation de l'électroantennographie qui permet de savoir si les COV produits par la plante ont un effet sur les insectes en fonction de la réponse de leurs antennes à l'aide d'un signal électrique. Les antennes sont reliées à des électrodes. L'électroantennographie pourrait permettre de déterminer les effets des COV sur les insectes ravageurs, mais également sur leurs ennemis naturels. L'identification des COV ainsi que la détermination de leurs effets sur les insectes peuvent se réaliser simultanément à l'aide d'une chromatographie en phase gazeuse couplée à une électroantennographie (GC-EAG) (Sobhy et al., 2017).

3.3 Diagnostic des principales maladies présentes sur les plantes de pomme de terre.

Les résultats du diagnostic sont très proches pour les trois modalités. Aucune modalité ne semble se démarquer quant à une meilleure résistance aux trois maladies, du moins visuellement.

La modalité « Népétalactone » a obtenu le plus faible score moyen, alors que c'est pour cette modalité qu'un plus grand nombre de pucerons a été retrouvé. Les virus PVY et PLRV étant uniquement transmis par des pucerons, il aurait été normal que la modalité « Népétalactone » obtienne un score moyen plus élevé que les deux autres modalités. De plus, l'éliciteur, qui a pour but de stimuler des défenses naturelles et de renforcer la résistance des plantes face à des maladies, n'a visiblement pas agi de manière suffisante.

Cependant, le diagnostic réalisé est une évaluation visuelle personnelle des symptômes des maladies présentes et reste donc très subjectif. Il faut donc rester vigilant à la lecture de ces résultats. De plus, les symptômes des maladies ont peut-être été confondus avec des symptômes de carences des plantes de pomme de terre, ou avec des lésions nécrotiques caractéristiques des réactions d'hypersensibilité causées par les éliciteurs.

Afin d'obtenir des résultats plus précis et plus scientifiques, ce diagnostic devrait être accompagné d'un échantillonnage adapté des feuilles de plantes de pomme de terre suivi d'un test ELISA.

V. Conclusions générales

La népétalactone a obtenu des résultats contradictoires entre les tests de comportement et l'essai en champ. Ayant d'abord une tendance à exercer un effet répulsif pour les pucerons *A. fabae* lors des tests de comportement, la népétalactone s'est ensuite révélée plutôt attractive pour les pucerons lors de l'essai en champ. Cependant, plusieurs raisons ont expliqué les différences de résultats entre les deux expériences. Concernant les autres insectes ravageurs, la népétalactone a eu un effet à tendance répulsive pour les cicadelles, et un effet à tendance attractive pour les mirides. Les tests de comportement ont été réalisés afin d'introduire les expériences en champ et d'éventuellement confirmer ou donner une explication à ce qu'il se passe sur le terrain. Les résultats de l'essai en champ correspondent toutefois à ceux d'une étude similaire réalisée en Chine. Il semblerait donc que la népétalactone exerce un effet attractif sur les pucerons. Cette attraction était déjà connue pour les mâles, attirés par la phéromone sexuelle, mais pas encore bien connue pour les femelles. Cependant, afin de confirmer les effets de la népétalactone sur les pucerons mais aussi sur les autres insectes ravageurs des cultures ainsi que leurs ennemis naturels, d'autres études doivent encore être réalisées. La présente étude doit servir d'outil aux études ultérieures qui seront réalisées dans ce domaine.

Les éliciteurs n'ont visiblement pas eu d'effet sur les insectes. Que ce soit lors des tests de comportement ou lors de l'essai en champ, les résultats des éliciteurs ont été très proches du contrôle. Les éliciteurs sont connus pour lutter contre certaines maladies. Cependant, leurs effets sur les insectes sont encore trop peu connus. Des pistes d'amélioration ont été envisagées afin de mieux connaître leurs effets sur les insectes. Ce travail doit donc servir de précurseur pour des études futures sur les éliciteurs.

Pour conclure ce travail, il est difficile de juger le sémiochimique et les éliciteurs utilisés lors de ces expériences. En effet, ce travail consistait à tester de nouvelles molécules dans le cadre de la lutte durable des ravageurs d'une culture. Cependant, ce domaine de recherche est encore très récent et les études réalisées sur ces molécules sont encore trop peu nombreuses.

En conséquence, il est encore trop tôt pour que les études s'accordent sur les effets de ces molécules. Il est dès lors nécessaire de continuer à travailler dans ce domaine afin de trouver des solutions alternatives à l'usage de pesticides sur nos cultures.

VI. Références bibliographiques

- Alyokhin A., Udalov M. & Benkovskaya G., 2013. The Colorado potato beetle. *In: Insect Pests of Potato*. Elsevier Inc., 11–29. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-386895-4.00002>.
- Arnaud L. et al., 2003. Insectes et communication. *Le Journal des Ingénieurs*, (87), 25–28.
- Benhamou N. & Picard K., 1999. La résistance induite : une nouvelle stratégie de défense des plantes contre les agents pathogènes. *Phytoprotection*, **80**(3), 137–168.
- Benhamou N. & Rey P., 2012. Stimulateurs des défenses naturelles des plantes : une nouvelle stratégie phytosanitaire dans un contexte d'écoproduction durable. *Phytoprotection*, **92**(1), 1. Available at: <http://id.erudit.org/iderudit/1012399ar>.
- Blackman R.L. & Eastop V.F., 2007. Taxonomic Issues. *In: H. F. van Emden & R. Harrington, eds. Aphids as Crop Pests*. 1–30.
- Blanchard A. & Limache F., 2005. *Les stimulateurs des défenses naturelles des plantes (SDN) : Rapport bibliographique*.
- Bodson B., 2016. Cours de productions végétales en régions tempérées donné à Gembloux Agro-Bio Tech (Belgique). *In: La culture de la pomme de terre*.
- Boullis A. & Verheggen F.J., 2016. Chemical Ecology of Aphids. *In: Biology and Ecology of aphids*. 171–198.
- Campbell C.A.M. et al., 1990. Sex attractant pheromone of damson-hop aphid *Phorodon humuli* (Homoptera, Aphididae). *Journal of Chemical Ecology*, **16**(12), 3455–3465.
- CASS, 2015. Chinese Academy of Social Sciences. Available at: <http://www.cass.net.cn> [Accessed May 15, 2017].
- Chivasa S. et al., 2006. Proteomic analysis of differentially expressed proteins in fungal elicitor-treated *Arabidopsis* cell cultures. *Journal of Experimental Botany*, **57**(7), 1553–1562.
- Cock M.J.W. et al., 2016. The main agricultural insect and disease pests of China and implications for the use of remote sensing for their management. *CAB Reviews*, **11**(14).
- Das G.P., 1995. Plants used in controlling the potato tuber moth, *Phthorimaea operculella* (Zeller). *Crop Protection*, **14**(8), 631–636.
- Dawson G.W. et al., 1987. Identification of an aphid sex pheromone. *Nature*, **325**, 614–616.

- Dedryver C.A., Le Ralec A. & Fabre F., 2010. The conflicting relationships between aphids and men: A review of aphid damage and control strategies. *Comptes Rendus - Biologies*, **333**(6–7), 539–553.
- Dong, W.-X., Zhang, F., Kan, W., Zhang Z.-N., 2009. Responses of aphid males and gynoparae to sex pheromones and plant volatiles in the field. *Shengtai Xuebao/ Acta Ecologica Sinica*, **29**(1), 178–184.
- Eigenbrode S.D. et al., 2002. Volatiles from potato plants infected with potato leafroll virus attract and arrest the virus vector, *Myzus persicae* (Homoptera: Aphididae). *Proceedings. Biological sciences / The Royal Society*, **269**(1490), 455–460.
- Eilenberg J., Hajek A. & Lomer C., 2001. Suggestions for unifying the terminology in biological control. *BioControl*, **46**, 387–400.
- El Bakali A.M. & Martín M.P., 2006. Black scurf of potato. *Mycologist*, **20**(4), 130–132.
- FAO, 2014. FAOSTAT. Available at: <http://www.fao.org/faostat/en/#home> [Accessed April 10, 2017].
- Fernández-Grandon G.M., Woodcock C.M. & Poppy G.M., 2013. Do asexual morphs of the peach-potato aphid, *Myzus persicae*, utilise the aphid sex pheromone? Behavioural and electrophysiological responses of *M. persicae* virginoparae to (4aS,7S,7aR)-nepetalactone and its effect on aphid performance. *Bulletin of Entomological Research*, **44**(January), 1–7.
- Fokkema N.J. et al., 1983. Aphid honeydew, a potential stimulant of *Cochliobolus sativus* and *Septoria nodorum* and the competitive role of saprophytic mycoflora. *Transactions of the British Mycological Society*, **81**(2), 355–363.
- Giordanengo P., Vincent C. & Alyokhin A. eds., 2013. *Insect Pests of Potato*, Elsevier Inc. Available at: <http://dx.doi.org/10.1201/b17510-1>.
- Goggin F.L., 2007. Plant-aphid interactions: molecular and ecological perspectives. *Current Opinion in Plant Biology*, **10**(4), 399–408.
- Goldansaz S.H. et al., 2004. Identification of two sex pheromone components of the potato aphid, *Macrosiphum euphorbiae* (Thomas). *Journal of Chemical Ecology*, **30**(4), 819–834.
- Guldmond J.A. et al., 1993. Specificity of sex pheromones, the role of host plant odour in the olfactory attraction of males, and mate recognition in the aphid *Cryptomyzus*. *Physiological Entomology*, **18**, 137–143.
- Han C., 1989. Recent changes in the rural environment in China. *Journal of Applied Ecology*, **26**, 803–812.

- Hardie J. et al., 1990. Aphid sex pheromone components : age-dependent release by females and species-specific male response. *Chemoecology*, **1**, 63–68.
- Harrington R., Katis N. & Gibson R.W., 1986. Field assessment of the relative importance of different aphid species in the transmission of potato virus Y. *Potato Research*, **29**(1), 67–76.
- Henry G., Thonart P. & Ongena M., 2012. PAMPs, MAMPs, DAMPs and others: an update on the diversity of plant immunity elicitors. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, **16**(2), 12. Available at: <http://www.doaj.org/doi/func=fulltext&aId=1044522>.
- Heuskin S. et al., 2011. The use of semiochemical slow-release devices in integrated pest management strategies. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, **15**(3), 459–470.
- Hori M. et al., 2011. Chemicals affecting the feeding preference of the Solanaceae -feeding lady beetle *Henosepilachna vigintioctomaculata* (Coleoptera: Coccinellidae). *Journal of Applied Entomology*, **135**(1–2), 121–131.
- INRA, 2017. INRA e-phytia. Available at: <http://ephytia.inra.fr/fr/Home/index> [Accessed April 7, 2017].
- Jijakli H., 2016. Cours de méthodes alternatives donné à Gembloux Agro-Bio Tech (Belgique). *In: Lutte intégrée*.
- Jourdan E., Ongena M. & Thonart P., 2008. Caractéristiques moléculaires de l'immunité des plantes induite par les rhizobactéries non pathogènes. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, **12**(4), 437–449.
- Krause M. & Durner J., 2004. Harpin Inactivates Mitochondria in *Arabidopsis* Suspension Cells. *Molecular plant-microbe interactions*, **17**(2), 131–139.
- Kulye M. et al., 2012. Hrip1 , a novel protein elicitor from necrotrophic fungus , *Alternaria tenuissima* , elicits cell death , expression of defence-related genes and systemic acquired resistance in tobacco. *Plant, Cell and Environment*, **35**, 2104–2120.
- Li G.Y. et al., 2010. Stable isotope labelled mass spectrometry for quantification of the relative abundances for expressed proteins induced by PeaT1. *Science China Life Sciences*, **53**(12), 1410–1417.
- Lilley R. & Hardie J., 1996. Cereal aphid responses to sex pheromones and host-plant odours in the laboratory. *Physiological Entomology*, **21**, 304–308.
- Liu M. et al., 2016. The Protein Elicitor PevD1 Enhances Resistance to Pathogens and Promotes Growth in *Arabidopsis*. *International Journal of Biological Sciences*, **12**(8), 931–943.

- Liu N., Li Y. & Zhang R., 2012. Invasion of Colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata*, in China: Dispersal, occurrence, and economic impact. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, **143**(3), 207–217.
- Liu Y. et al., 2009. Expression of peaT1 gene from *Alternaria tenuissima* in *Pichia pastoris* and its function. *Sheng wu gong cheng xue bao = Chinese journal of biotechnology*, **25**(3), 413–417. Available at: <http://europepmc.org/abstract/MED/19621583>.
- Liu Y., Duan M. & Yu Z., 2013. Agricultural landscapes and biodiversity in China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **166**, 45–54. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2011.05.009>.
- Lösel P.M. et al., 1996. Effect of primary-host kairomones on the attractiveness of the hop-aphid sex pheromone to *Phorodon humuli* males and gynoparae. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, **80**, 79–82.
- Mao J. et al., 2010. Purification and expression of a protein elicitor from *Alternaria tenuissima* and elicitor-mediated defence responses in tobacco. *Annals of Applied Biology*, **156**, 411–420.
- Marsh D., 1972. Sex pheromone in the aphid *Megoura viciae*. *Nature new biology*, **238**(79), 31–32.
- Mehdy M.C., 1994. Active Oxygen Species in Plant Defense against Pathogens. *Plant Physiology*, **105**, 467–472.
- Mishra A.K., Sharma K. & Misra R.S., 2012. Elicitor recognition, signal transduction and induced resistance in plants. *Journal of plant interactions*, **7**(2), 95–120.
- Mota-Sanchez D. et al., 2006. Resistance and cross-resistance to neonicotinoid insecticides and spinosad in the Colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata* (Say) (Coleoptera: Chrysomelidae). *Pest Management Science*, **62**(1), 30–37.
- NENIC, 2014. *Economic overview of shandong province*. Available at: <http://china.nlbassade.org/binaries/content/assets/postenweb/c/china/zaken-doen-in-china/2014/economic-overview-of-shandong-province.pdf>.
- Oerke E.-C., 2006. Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science*, **144**(1), 31–43.
- Olivier A., 1988. La lutte intégrée au coeur des enjeux de l'agriculture moderne. *Insectes*, **69**(2), 15–16. Available at: <http://www7.inra.fr/opie-insectes/pdf/i68olivier.pdf>.
- Park K.C. et al., 2000. Electroantennogram and behavioural responses of different forms of the bird cherry-oat aphid, *Rhopalosiphum padi*, to sex pheromone and a plant volatile. *Journal of Insect Physiology*, **46**, 597–604.

- Peng X.-C. et al., 2015. Inducible and constitutive expression of an elicitor gene Hrip1 from *Alternaria tenuissima* enhances stress tolerance in *Arabidopsis*. *Transgenic Res*, (24), 135–145.
- Pickett J.A. & Glinwood R.T., 2007. Chemical Ecology. In: H. F. van Emden & R. Harrington, eds. *Aphids as crop pests*. CABI, 235–260. Available at: <http://dx.doi.org/10.1002/9780470015902.a0003265.pub2%5Cnfile:///Users/andrefrainer/Documents/André/Biblioteca/Papers2/2001/Drijfhout/Drijfhout 2001 Encyclopedia of Life Sciences.pdf%5Cnpapers2://publication/doi/10.1002/9780470015902.a0003265.pub2>.
- Pickett J.A. et al., 1992. THE CHEMICAL ECOLOGY OF APHIDS. *Annual Review of Entomology*, (37), 67–90.
- Platt R., 2008. Maladies de la pomme de terre causées par des oomycètes. *Cahiers Agricultures*, **17**(4), 361–367.
- Poussier S., 2000. *Exploration de la diversité génétique de Ralstonia solanacearum, agent du fletrissement bactérien. détection et dynamique des populations dans les réservoirs d'inoculum*. Université de Rennes I.
- Radcliffe E.B., 1982. Insect Pests of Potato. *Ann. Rev. Entomol.*, (27), 173–204.
- Rajagopal D. & Trivedi T.P., 1989. Status, bioecology and management of *Epilachna* beetle, *Epilachna vigintioctopunctata* (Fab.) (Coleoptera: Coccinellidae) on potato in India: A review. *Tropical Pest Management*, **35**(4), 410–413.
- Saguez J., Giordanengo P. & Vincent C., 2013. Aphids as major potato pests. In: P. Giordanengo, C. Vincent, & A. Alyokhin, eds. *Insect Pests of Potato*. Elsevier Inc., 31–63. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-386895-4.00003-X>.
- Schillings T. et al., 2010. *Identification de substances informatives actives dans les relations pucerons-prédateurs et utilisation potentielle en lutte biologique*.
- Scott I.M. et al., 2003. Botanical insecticides for controlling agricultural pests: Piperamides and the Colorado potato beetle *Leptinotarsa decemlineata* say (Coleoptera: Chrysomelidae). *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, **54**, 212–225.
- Sobhy I.S. et al., 2017. cis-Jasmone Elicits Aphid-Induced Stress Signalling in Potatoes. *Journal of Chemical Ecology*, **43**(1), 39–52.
- Sporleder M. & Lacey L., 2013. Biopesticides. In: P. Giordanengo, C. Vincent, & A. Alyokhin, eds. *Insect Pests of Potato*. Elsevier Inc., 463–497.
- Sun Y.F. et al., 2012. Two Odorant-Binding Proteins Mediate the Behavioural Response of Aphids to the Alarm Pheromone (E)- β -farnesene and Structural Analogues. , **7**(3), 1–10.

- Tenhaken R. et al., 1995. Function of the oxidative burst in hypersensitive disease resistance. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **92**, 4158–4163. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11607542>.
- Trivedi T.P. & Rajagopal D., 1992. Distribution, biology, ecology and management of potato tuber moth, *Phthorimaea operculella* (Zeller) (Lepidoptera: Gelechiidae): A review. *Tropical Pest Management*, **38**(3), 279–285. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09670879209371709>.
- UF/IFAS, 2017. University of Florida, Institute of Food and Agricultural Sciences. Available at: http://entnemdept.ufl.edu/creatures/VEG/POTATO/potato_tuberworm.htm [Accessed April 18, 2017].
- van den Heuvel J.F.J.M., Verbeek M. & van der Wilk F., 1994. Endosymbiotic bacteria associated with circulative transmission of potato leafroll virus transmission by *Myzus persicae*. *Journal of General Virology*, **75**, 2559–2565.
- Verheggen F., 2016. Cours de méthodes alternatives donné à Gembloux Agro-Bio Tech (Belgique). In: *Lutte sémiochimique*.
- Vincent C., Alyokhin A. & Giordanengo P., 2013. Potatoes and their Pests - Setting the Stage. In: P. Giordanengo, C. Vincent, & A. Alyokhin, eds. *Insect Pests of Potato*. Elsevier Inc., 3–8. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-386895-4.00001-6>.
- Wang L. et al., 2011. Extracellular expression of protein elicitor PeaT1 in *Bacillus subtilis* to enhance drought tolerance and growth in wheat. *Sheng wu gong cheng xue bao = Chinese journal of biotechnology*, **27**(9), 1355—1362. Available at: <http://europepmc.org/abstract/MED/22117519>.
- Wang Y. & Zhang S., 2010. Comparative Analysis of Agriculture Industrialization : Hebei Province and Shandong Province. *International Journal of Business and Management*, **5**(12), 173–176.
- Weber D., 2003. Colorado beetle: pest on the move. *Pesticide Outlook*, (December), 256–259.
- Weber D., 2013. Biological Control of Potato Insect Pests. In: P. Giordanengo, C. Vincent, & A. Alyokhin, eds. *Insect Pests of Potato*. Elsevier Inc., 399–437.
- Will T. & van Bel A.J.E., 2006. Physical and chemical interactions between aphids and plants. *Journal of Experimental Botany*, **57**(4), 729–737.
- Williams L.S. & Dixon A.F.G., 2007. Life Cycles and Polymorphism. In: H. F. van Emden & R. Harrington, eds. *Aphids as crop pests*. 69–85.
- Wratten S.D. et al., 2007. Cultural Control. In: H. F. van Emden & R. Harrington, eds. *Aphids as crop pests*. CABI, 423–445.

- Xie Z. & Chen Z., 2000. Harpin-induced hypersensitive cell death is associated with altered mitochondrial functions in tobacco cells. *Molecular plant-microbe interactions : MPMI*, **13**(2), 183–190.
- Xing X. et al., 2012. Shape evolution with temperature of a thermotolerant protein (PeaT1) in solution detected by small angle X-ray scattering. *Proteins*, 1–10.
- Xu J., Liu N. & Zhang R., 2013. Other Pests - China. In: P. Giordanengo, C. Vincent, & A. Alyokhin, eds. *Insect Pests of Potato*. 193–226.
- Ye X.J., Wang Z.Q. & Li Q.S., 2002. The ecological agriculture movement in modern China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **92**, 261–281.
- Yuan W. et al., 2013. Combination of Plant and Insect Eggs as Food Sources Facilitates Ovarian Development in an Omnivorous Bug *Apolygus lucorum* (Hemiptera: Miridae). *Journal of Economic Entomology*, **106**(3), 1200–1208. Available at:
<http://jee.oxfordjournals.org/content/106/3/1200>
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23865184>.
- Zhang W. et al., 2011. PeaT1-induced systemic acquired resistance in tobacco follows salicylic acid-dependent pathway. *Molecular Biology Reports*, **38**(4), 2549–2556.