



HAL
open science

Évaluation de la nuisibilité de la mouche du chou *Delia radicum* L. sur Brassicaceae légumières pour mesurer l'impact du contrôle biologique

Marie Vincent

► **To cite this version:**

Marie Vincent. Évaluation de la nuisibilité de la mouche du chou *Delia radicum* L. sur Brassicaceae légumières pour mesurer l'impact du contrôle biologique. Sciences agricoles. 2016. dumas-01417079

HAL Id: dumas-01417079

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01417079>

Submitted on 15 Dec 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Mémoire de stage
Présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur agronome, option Inter-Etablissements
Protection des Plantes et Environnement

Sur le thème :

**Evaluation de la nuisibilité de la mouche du chou *Delia radicum* L.
sur Brassicaceae légumières pour mesurer l'impact du contrôle
biologique.**

Par
Marie VINCENT
Ecole de rattachement : AGROCAMPUS OUEST

Stage réalisé à : INRA
UMR IGEPP
Domaine de la Motte
35650 Le Rheu

Sous la Direction de : Anne LE RALEC
Xavier MESMIN

Soutenu le 28 septembre 2016 à Montpellier, devant le jury composé de :

Président: Serge KREITER
Membres: Marie-Stéphane TIXIER
Jean-Claude STREITO
Anne XUEREB



Résumé

Une alternative possible à l'utilisation des produits phytosanitaires de synthèse est la lutte biologique par conservation, mobilisant les ennemis naturels des ravageurs des cultures. Les ennemis naturels de la mouche du chou (*Delia radicum* L.) réduiraient les populations de ce ravageur, mais sans que l'on puisse démontrer un impact sur le rendement de la culture. Il apparaît nécessaire de préciser la nuisibilité réelle de la mouche du chou afin d'évaluer l'efficacité du contrôle biologique sur les populations de ce ravageur et les dégâts dont il est responsable en culture de brassicacées légumières.

Pour cela, deux expériences ont été mises en place. Une première pour évaluer la nuisibilité de *D. radicum* avec un suivi de brocolis cultivés en conditions contrôlées sous cages insect-proof, l'infestation étant réalisée artificiellement par apport d'œufs à des densités croissantes. Afin d'évaluer l'impact de la régulation naturelle, une deuxième expérience a été mise en place en conditions d'infestation naturelle, en excluant ou non les potentiels prédateurs de ce ravageur.

Les résultats montrent une nuisibilité croissante de la mouche du chou lorsque les populations de ce ravageur augmentent. Les ennemis naturels permettent une réduction des populations de *D. radicum*, mais aussi une diminution des dégâts causés par la mouche du chou, avec un meilleur développement des plants, un système racinaire moins attaqué, une mortalité précoce inférieure et un rendement supérieur. La régulation naturelle permet donc de réduire la nuisibilité de la mouche du chou.

Mots-clés : *Delia radicum*, Brassicaceae légumières, lutte biologique par conservation, ennemis naturels, seuil de nuisibilité.

Abstract

A possible alternative to pesticide use is biological control using natural enemies of pests. Natural enemies of the cabbage root fly (*Delia radicum* L.) are supposed to reduce pest populations, but so far no study has demonstrated an impact of this regulation on the yield losses caused by this pest. To evaluate the efficiency of biological control on the populations of *D. radicum* and the damages caused on Brassica vegetables, it would be necessary to know better the harmfulness of the cabbage root fly.

Two experiments were carried out for this purpose. The first one aimed to evaluate the harmfulness of the cabbage root fly on brocolis. Plants were grown in the field under insect-proof cages and artificially infested by eggs of *D. radicum*, at various densities. To evaluate the impact of the natural control of the pest, we did a second experiment where the brocolis were field scale grown, and naturally infested by the cabbage root fly, excluding or not the potential predators of this pest.

Results show a growing impact of the pest on the culture when populations of *D. radicum* increase. The natural enemies allow a diminution of the cabbage root fly populations. Moreover, these natural enemies permit a reduction of the damages caused by the pest with: a better development of the plants, less attacks on the root system, an inferior premature mortality and a higher yield. We can conclude that the natural regulation of the cabbage root fly allows a reduction of the harmfulness of this pest.

Key-words: *Delia radicum*, Brassica vegetables, biological control by conservation, natural enemies, harmfulness threshold.

AUTORISATION DE DIFFUSION DU MEMOIRE

1. Identification du rapport et de l'auteur

Nom et Prénom de l'auteur : VINCENT Marie

Titre du mémoire : Evaluation de la nuisibilité de la mouche du chou *Delia radicum* L. sur Brassicaceae légumières pour mesurer l'impact du contrôle biologique.

Ecole d'inscription : AGROCAMPUS OUEST Rennes

2. Autorisation de diffusion par l'Auteur

Par la présente, je déclare être titulaire du droit d'auteur pour le mémoire mentionné ci-dessus. J'autorise sans limitation de temps la Bibliothèque à diffuser ce mémoire dans un format électronique adapté et à effectuer toutes éventuelles modifications techniques nécessaires à une amélioration de la diffusion (modification du format) Si ce mémoire est confidentiel, la confidentialité sera respectée dans les mêmes conditions pour les exemplaires électroniques que pour les exemplaires papiers.

Signature de l'Auteur:



Date: le 11/09/2016

3. Autorisation de diffusion par le Maître de stage

J'autorise par la présente l'auteur à diffuser le mémoire mentionné ci-dessus:

Intranet	OUI	NON	Prêt	OUI	NON
Internet	OUI	NON	Prêt entre bibliothèques	OUI	NON
Après une période de confidentialité	OUI	NON	Résumé diffusable	OUI	NON
	Durée:				
Consultation en bibliothèque	OUI	NON	Reproduction	OUI	NON

Signature du Maître de stage:



Date: 19.09.2016

4. Autorisation de diffusion par le Tuteur

J'autorise par la présente l'auteur à diffuser le mémoire mentionné ci-dessus:

Intranet	OUI	NON	Prêt	OUI	NON
Internet	OUI	NON	Prêt entre bibliothèques	OUI	NON
Après une période de confidentialité	OUI	NON	Résumé diffusable	OUI	NON
	Durée:				
Consultation en bibliothèque	OUI	NON	Reproduction	OUI	NON

Signature du tuteur enseignant:



Date: 8.09.2016


Serge KREITER

CONCLUSIONS:

Confidentialité absolue: OUI NON

Durée exigée:

Le Responsable de l'Option PPE



Serge KREITER

Remerciements

Tout d'abord je souhaiterais remercier Anne Le Ralec et Xavier Mesmin pour avoir rendu ce stage possible, j'aurais beaucoup appris au cours de ces 6 mois. Merci pour leur encadrement et leur écoute, ainsi que pour leur patience et leurs encouragements au cours des dernières semaines de rédaction.

La réalisation de ce stage a été possible grâce au financement du GIS PIClég, en association avec l'INRA, la station expérimentale Terre d'essais de Pleumeur-Gautier et la Chambre d'Agriculture du Finistère.

Un grand merci à Loïc pour son aide tout au long des expérimentations, pour son bon sens, pour ses conseils, son optimisme et ses capacités de "bricoleur" qui ont rendu les choses beaucoup plus faciles.

Merci à Vianney Estorgues, toujours disponible pour répondre à mes questions, pour ses conseils quant à la mise en place des expériences et pour son aide pour trouver des informations au moment de la rédaction du mémoire.

Merci aussi à Vincent Faloya pour son aide et ses conseils.

Merci à toute l'équipe de la station expérimentale de Pleumeur-Gautier, pour leur accueil, pour leur aide pour les expériences et pour tous les repas partagés à l'abri du crachin breton devant Météo à la carte !

Je souhaiterais remercier tous les membres de l'équipe EGI de l'IGEPP ainsi que ceux de l'UMR ESP d'AGROCAMPUS OUEST pour leur accueil.

Enfin, un grand merci à tous les stagiaires croisés au cours de ce stage. Un merci particulier à Estelle qui a été de très bonne compagnie, pour ma culture générale avec le Grand Quiz de l'été, parce que j'aurais vu un Praon pondre (pourtant c'est souvent très long !), pour le soutien psychologique lors de la rédaction du mémoire, et surtout pour sa patience pour toutes les fois où j'ai râlé !

Sommaire

Introduction.....	1
Synthèse bibliographique	3
1. Nuisibilité des bioagresseurs et utilisation du seuil de nuisibilité en protection des cultures ...	3
2. La mouche du chou <i>Delia radicum</i> (L.), ravageur des Brassicacées.....	5
2.1. Biologie de l'insecte (<i>Figure 2</i>).....	5
2.2. Dégâts causés et plantes hôtes.....	5
3. Etat des lieux de la lutte contre la mouche du chou.....	6
Matériel et méthodes	8
1. Description des dispositifs expérimentaux	8
1.1. Evaluation de la nuisibilité de la mouche du chou	8
1.2. Evaluation de l'efficacité du contrôle biologique naturel	10
2. Efficacité du dispositif de défaunage et détermination des communautés de carabidés.....	11
3. Evaluation de l'état des plants au cours du développement et estimation du rendement à la récolte	12
4. Evaluation des dégâts racinaires et du nombre de pupes à la récolte	13
5. Analyses statistiques	13
Résultats.....	14
1. Evaluation de la nuisibilité de <i>Delia radicum</i> sur brocoli en condition d'infestation artificielle contrôlée	14
1.1. Impact du ravageur sur la production	14
1.2. Efficacité du dispositif de défaunage.....	15
1.3. Suivi des températures et comparaison du développement entre extérieur et intérieur des cages insect-proof.....	16
2. Evaluation de l'impact du contrôle biologique naturel.....	16
2.1. Impact des ennemis naturels sur les populations de <i>Delia radicum</i>	16
2.2. Impact du contrôle biologique naturel sur le développement des plants et la production	18
2.3. Efficacité du défaunage et suivi des populations d'arthropodes telluriques au cours du temps... ..	19
Discussion	19
1. Méthodologie	20
1.1. Infestation artificielle en conditions contrôlées	20
1.2. Pertinence des variables de croissance et développement mesurées sur les plants de brocoli	21
1.3. Dispositifs de défaunage.....	22
2. Impact de la mouche du chou sur la culture de brocolis	23
3. Impact du contrôle biologique naturel sur la nuisibilité de la mouche du chou	24
3.1. Comparaison des communautés de carabes entre les 2 sites expérimentaux	24
3.2. Impact des ennemis naturels sur les populations de <i>Delia radicum</i> et sur les dégâts causés par ce ravageur sur la culture de brocolis.....	25
Conclusion.....	26
Bibliographie.....	27

Liste des figures

Figure 1 : Définition de la protection intégrée par l'Union Européenne.

Figure 2 : Cycle biologique de la mouche du chou.

Figure 3 : Les différents stades de développement de *Delia radicum*.

Figure 4 : Exemple d'un carabidé : *Metallina properans*.

Figure 5 : *Aleochara bilineata* et *Aleochara bipustula*.

Figure 6 : Cycle biologique des *Aleochara* sp.

Figure 7 : *Trybliographa rapae* adulte.

Figure 8 : Cycle biologique de *Trybliographa rapae*.

Figure 9 : Extérieur et intérieur des cages insect-proof sur la parcelle du Rheu.

Figure 10 : Piège feutrine au pied d'un plant de brocoli.

Figure 11 : Schéma d'un piège de type Barber.

Figure 12 : Schéma du dispositif expérimental – intérieur des cages, au Rheu.

Figure 13 : Apport des œufs au collet des plants de brocoli.

Figure 14 : Schéma du dispositif expérimental – à gauche un bloc défauné, à droite un bloc non défauné, parcelle expérimentale de Pleumeur-Gautier.

Figure 15 : Parcelle expérimentale à Pleumeur-Gautier (22).

Figure 16 : Pesée des pommes de brocoli à la récolte à l'aide d'un peson.

Figure 17 : Différenciation des pupes de *Delia radicum* des autres *Delia*.

Figure 18 : Pupes de *Delia radicum* contenant : **a)** une mouche du chou en face ventrale, **b)** une mouche du chou en face dorsale, **c)** un *Trybliographa rapae* et **d)** un *Aleochara* sp.

Figure 19 : Histogramme du poids des pommes de brocoli à la récolte sur la parcelle du Rheu.

Figure 20 : Représentation du poids des pommes de brocoli à la récolte en fonction du nombre d'œufs apportés artificiellement sur les plants.

Figure 21 : Développement de 2 plants ayant reçu un nombre différent d'œufs dans une cage insect-proof.

Figure 22 : Hauteur des plants de brocoli en fonction du nombre d'œufs reçus initialement, exemple des mesures du 8 juin 2016.

Figure 23 : Dynamique temporelle des différents ordres d'arthropodes capturés dans les pièges Barber au cours du temps sur la parcelle de l'INRA du Rheu.

Figure 24 : Dynamique temporelle des différentes espèces de carabidés capturées dans les pièges Barber au cours du temps sur la parcelle de l'INRA du Rheu.

Figure 25 : Suivi des températures à l'intérieur et à l'extérieur des cages insect-proof.

Figure 26 : Biomasse totale moyenne des plants en fonction du nombre d'œufs reçus.

Figure 27 : Dynamique temporelle de ponte de *Delia radicum* sur la parcelle de la station expérimentale de Pleumeur-Gautier.

Figure 28 : Nombre de pupes de *Delia radicum* relevées dans les prélèvements de sol autour de chaque plant.

Figure 29 : Evolution du nombre de feuilles des plants dans les blocs défaunés et non défaunés au cours du temps.

Figure 30 : Pourcentage de plants morts dans chaque modalité (défauné ou non).

Figure 31 : Poids des pommes de brocolis à la récolte.

Figure 32 : Pourcentage moyen de surface du système racinaire attaquée pour les plants des blocs non défaunés et ceux des blocs défaunés.

Figure 33 : Etat du système racinaire des plants en fonction du nombre de pupes de *Delia radicum* retrouvées à leur pied.

Figure 34 : Poids des pommes de brocolis à la récolte en fonction de la note d'attaque attribuée au système racinaire.

Figure 35 : Dynamique temporelle des différents ordres d'arthropodes capturés dans les pièges Barber au cours du temps, à Pleumeur-Gautier.

Figure 36 : Dynamique temporelle des différentes espèces de carabidés capturés dans les pièges Barber au cours du temps avec abondance de chaque espèce, à Pleumeur-Gautier.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Correspondance du stade de sensibilité des brocolis (jeunes plants) et des vols principaux de mouche du chou dans le temps.

Tableau 2 : Détail des densités choisies et du nombre d'œufs de *Delia radicum* apportés lors des 3 semaines d'infestation artificielle.

Tableau 3 : Taille moyenne des principaux carabes capturés dans les Côtes d'Armor à la station expérimentale de Pleumeur-Gautier et nombre moyen d'œufs consommés par jour pour ces espèces.

Introduction

Les ravageurs phytophages peuvent être naturellement régulés par deux voies différentes : par les ressources qu'ils consomment (régulation "bottom-up") et par les organismes antagonistes (régulation "top-down"). Par cette définition, les réseaux trophiques sont alors partagés en trois niveaux : les végétaux, les phytophages et les prédateurs (au sens large) comme décrits par Hariston et al. (1960), on parle de modèle HSS. Ce modèle s'est depuis complexifié avec la découverte d'organismes prédateurs, parasitoïdes ou pathogènes des prédateurs eux-mêmes (Cappuccino, 1995 ; Rosenheim, 1998). Cette notion de double régulation des phytophages est très intéressante en agronomie pour réfléchir aux différents moyens de contrôler les ravageurs des cultures. Ces ravageurs pourraient donc être régulés soit par leurs ressources, soit par leurs ennemis naturels (prédateurs, parasitoïdes, pathogènes).

Il apparaît assez difficile d'utiliser la stratégie bottom-up contre les ravageurs des cultures. En effet, la ressource est constituée par la culture et souvent la décision de ne plus cultiver une plante n'est pas un choix possible pour les agriculteurs. Cependant, quelques leviers sont mobilisables, il est possible de décaler l'implantation de la culture dans le temps pour la rendre moins sensible aux ravageurs, d'utiliser des variétés résistantes, ou encore de pratiquer des rotations culturales longues afin de diminuer la fréquence d'apparition d'une culture à un endroit donné (LaMondia *et al.*, 2002).

Le contrôle de la régulation par la stratégie top-down constitue le principe de la lutte biologique. La lutte biologique correspond en effet à l'utilisation d'organismes vivants afin de réduire l'abondance ou l'impact d'une population de ravageur (Eilenberg *et al.*, 2001). La lutte biologique peut se faire par trois voies différentes : par acclimatation (introduction d'un organisme exotique), par inondation (lâcher intentionnel massif d'un organisme indigène) ou par conservation (modification des pratiques et/ou de l'environnement afin de protéger voire de favoriser les ennemis naturellement présents), cette dernière étant la plus couramment étudiée et développée aujourd'hui. Dans le cas de la lutte biologique par conservation, on cherche alors à optimiser le service écosystémique, bénéfique que tirent les hommes des écosystèmes (Millenium Ecosystem Assesment, 2005), de régulation rendu par les ennemis naturels des ravageurs.

Diverses études ont démontré que les ennemis naturels, en fonction de leur abondance et de leur diversité, permettent de réduire les niveaux de population des ravageurs (Duan *et al.*, 2014 ; Aviron *et al.*, 2016). Mais pour le moment, peu d'entre elles arrivent à faire le lien entre abondance des ennemis naturels et réduction des pertes de récolte engendrées par la présence de ravageurs, constituant ainsi un verrou au développement de solutions alternatives aux produits phytosanitaires de synthèse pour protéger les cultures des ravageurs. Cette difficulté peut en partie s'expliquer par le manque de connaissances sur la nuisibilité réelle de nombreux ravageurs. La relation entre densité de ravageur et dégâts générés sur la culture est en effet souvent difficile à établir. Sans cette information, il est très difficile de mesurer l'impact des ennemis naturels sur les dégâts causés par un ravageur.

La détermination de la relation densité de ravageurs – dégâts permet de mettre en place des seuils de nuisibilité. Le seuil de nuisibilité biologique correspond au nombre d'individus développés par plant à partir duquel on observe une perte de rendement (Caussanel, 1989). Le seuil de nuisibilité économique désigne le niveau de population d'un bioagresseur à partir

duquel la mise en place d'une méthode de lutte devient rentable, c'est-à-dire lorsque les pertes de récolte sont supérieures au coût de la méthode de lutte choisie (Riba & Silvy, 1989).

Au cours de ce stage, nous nous sommes intéressés plus particulièrement au système mouche du chou – Brassicaceae légumières. Ce système présente un intérêt par rapport à ces questions de nuisibilité. En effet, il existe une méthode fiable de suivi des populations de ce ravageur, telle que en connaissant le rendement à la récolte on peut relier de façon directe le niveau de population du ravageur aux dégâts/pertes causés sur la récolte. Ceci n'est pas le cas pour tous les systèmes ravageur – plante hôte. Par exemple, dans le cas du puceron sur céréales, il est très difficile d'associer le niveau de population à un instant t sur la culture au niveau de rendement observé à la récolte. Cette problématique a conduit à l'élaboration d'un modèle mathématique prédisant la nuisibilité du puceron en s'appuyant sur des observations faites entre 1976 et 1986 (Plantegenest *et al.*, 2001).

Jusqu'à aujourd'hui, la nuisibilité de la mouche du chou, pourtant étudiée depuis de nombreuses années, est assez mal connue. En effet, les différentes études réalisées sur cet insecte révèlent des dégâts très aléatoires, constatés pour une même densité de ravageurs selon la période d'attaque et le type de culture (BSV Bretagne – Légumes frais, 2015 ; Maret *et al.*, 2014 ; Cortesero & Le Ralec, 2014). Pourtant, la connaissance de la nuisibilité de ce ravageur est indispensable pour développer des méthodes de lutte biologique par conservation acceptables par les producteurs. En effet, il faut pouvoir déterminer le niveau de population du phytophage tolérable pour les cultures, afin d'évaluer l'impact attendu de l'action de ses différents ennemis naturels, qui sont aujourd'hui bien connus (Finch, 1993), et quantifier l'efficacité du service qu'ils procurent. L'évaluation de l'efficacité du contrôle biologique apparaît comme un préalable indispensable à l'adoption par les agriculteurs de mesures visant à le renforcer. Sujet préoccupant pour la filière, ce stage s'inscrit directement dans les thématiques prioritaires de recherche du GIS PICLég (Groupement d'Intérêt Scientifique Protection Intégrée en Cultures Légumières), priorité de "maîtrise des bioagresseurs aériens", qui finance ce stage.

L'objectif fixé étant de renforcer la régulation de la mouche du chou par ses ennemis naturels afin de limiter sa nuisibilité, nous cherchons donc à savoir : quelle est la nuisibilité réelle de la mouche du chou *Delia radicum* L. ? La régulation naturelle permet-elle de diminuer les populations de *D. radicum* en dessous de leur seuil de nuisibilité ?

Nous proposons d'évaluer la nuisibilité de ce ravageur en déterminant les niveaux de populations responsables de dégâts et de pertes de récolte sur brocoli de printemps, grâce à une expérimentation d'infestation artificielle contrôlée. L'impact du contrôle biologique naturel sera aussi évalué en condition de forte pression du ravageur dans une zone de production légumière majeure, avec exclusion ou non des ennemis naturels de la mouche du chou. Cette évaluation permettra de déterminer si les ennemis naturels, selon les communautés présentes, leur diversité et leur abondance, peuvent significativement conduire à une réduction des pertes de récolte.

« “Lutte intégrée contre les ennemis des cultures” : la prise en considération attentive de toutes les méthodes de protection des plantes disponibles et, par conséquent, l’intégration des mesures appropriées qui découragent le développement des populations d’organismes nuisibles et maintiennent le recours aux produits phytopharmaceutiques et à d’autres types d’interventions à des niveaux justifiés des points de vue économique et environnemental, et réduisent ou limitent au maximum les risques pour la santé humaine et l’environnement. La lutte intégrée contre les ennemis des cultures privilégie la croissance de cultures saines en veillant à perturber le moins possible les agro-écosystèmes et encourage les mécanismes naturels de lutte contre les ennemis des cultures. »

Figure 1 : Définition de la protection intégrée par l’Union Européenne (Directive 2009/128/EC).

Synthèse bibliographique

1. Nuisibilité des bioagresseurs et utilisation du seuil de nuisibilité en protection des cultures

La nuisibilité d'un bioagresseur comprend les dégâts (les symptômes traduisant les effets du bioagresseur sur la physiologie de l'hôte) et les dommages (pertes mesurables de rendement – quantité ou qualité) que celui-ci peut infliger à une culture (Pedigo *et al.*, 1986 ; Zadocks, 1985).

Plusieurs composantes entrent dans la définition de la nuisibilité associée à un système bioagresseur/hôte : les organes de l'hôte attaqués, la phénologie de la plante (stades où elle sera plus sensible), la quantité de bioagresseurs présents et le stade nuisible de ce bioagresseur.

Selon le type d'organe attaqué, la nuisibilité peut être de deux types. On parle de nuisibilité directe lorsque le bioagresseur attaque directement les organes de production et de nuisibilité indirecte lorsque d'autres organes de l'hôte sont attaqués (Pedigo *et al.*, 1986).

Les plantes elles-mêmes peuvent être plus ou moins sensibles aux attaques des bioagresseurs. A l'échelle d'un peuplement végétal, certains individus peuvent être plus résistants que d'autres. Ceci a en grande partie déterminé la sélection variétale depuis de nombreuses années. Mais une plante peut aussi présenter des différences de sensibilité à l'échelle d'un cycle cultural. En effet, la sensibilité dépend directement du stade phénologique de la plante (Pedigo *et al.*, 1986). Pour la sensibilité aux ravageurs, ceci est en partie lié aux composés émis par la plante qui peuvent être plus ou moins attractifs au cours de son développement (Ellis *et al.*, 1979).

Enfin, la nuisibilité est directement liée à la biologie du bioagresseur. En effet, les bioagresseurs ne sont, pour la plupart, pas nuisibles au cours de la totalité de leur cycle biologique. C'est le cas de nombreux ravageurs, nuisibles uniquement au stade larvaire, comme par exemple une grande partie des diptères ravageurs des cultures (Ephytia).

C'est ensuite la densité de bioagresseurs au stade nuisible qui détermine la nuisibilité de celui-ci sur la culture.

La nuisibilité des bioagresseurs dépend donc directement des interactions entre ces quatre composantes. Par exemple, pour le système méligèthes/colza la nuisibilité ne s'exprime que si les méligèthes adultes sont présents sur la culture de colza lors de l'apparition des premiers boutons floraux, la nuisibilité devient ensuite négligeable dès que les fleurs s'ouvrent (Terresinovia).

La nuisibilité réelle de nombreux ravageurs est encore mal connue, pourtant elle présente un grand intérêt puisqu'elle permet de définir des seuils de nuisibilité. Ce manque de connaissances s'explique en partie par la complexité de la mise en place de tels seuils : ils varient en effet selon les contextes agronomiques et sont en général très dépendants du stade de développement de la plante au moment où le ravageur arrive.

L'utilisation des seuils de nuisibilité s'est généralisée dans les années 80 afin de raisonner l'utilisation des produits phytosanitaires de synthèse (Marra & Carlson, 1983 ; Du Toit & Walters, 1983 ; Bueno *et al.*, 2013). Le but était alors de raisonner et d'optimiser l'utilisation des traitements chimiques. Le seuil de nuisibilité répondait à une question principale : est-il nécessaire de traiter ? Les seuils de nuisibilité permettent la mise en place d'une protection intégrée des cultures, comme définie par l'Union Européenne (Figure 1) : "En s'appuyant sur

les résultats de la surveillance, l'utilisateur professionnel doit décider s'il doit ou non et quand appliquer des mesures phytopharmaceutiques. Des seuils scientifiquement solides et robustes sont des éléments essentiels à la prise de décision. Pour ce qui est des organismes nuisibles, les seuils d'intervention définis pour la région, pour des zones spécifiques, pour des cultures et pour des conditions climatiques particulières doivent, si possible, être pris en compte avant les traitements." (Directive 2009/128/EC – Annexe III, 2009 ; Barzman *et al.*, 2015).

Associé à un suivi des bioagresseurs dans le temps (utilisation de pièges, comptages sur la culture,...), le seuil de nuisibilité est donc une aide à la décision d'utiliser ou non une méthode de lutte. Ainsi des systèmes d'avertissement pour les agriculteurs se sont développés, comme par exemple le Bulletin de Santé du Végétal (Alim'agri, 2016). Les avertissements fournis étaient auparavant accompagnés de préconisations de traitement. Cette dernière fonction a disparu avec l'évolution de l'utilisation des seuils de nuisibilité et le développement de méthodes de lutte alternatives à la lutte chimique contre les bioagresseurs.

Aujourd'hui, les objectifs de réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires conduisent en effet à développer de nouvelles méthodes de lutte, comme la lutte biologique par conservation, ce qui modifie la réflexion et l'utilisation des seuils de nuisibilité. En effet, il ne s'agit plus ici de décider d'une réaction à court terme, comme dans le cas d'un traitement chimique, mais plutôt d'évaluer sur un temps plus long l'efficacité d'une méthode de lutte, au regard d'une exigence économique. La question devient donc : la méthode de lutte est-elle suffisante pour réduire les populations de bioagresseurs en dessous de leur seuil de nuisibilité ?

Plusieurs méthodes existent pour déterminer un seuil de nuisibilité : en infestation naturelle ou artificielle, au laboratoire ou en plein champ, avec ou sans utilisation d'une méthode de lutte,...La méthode la plus souvent utilisée est celle de l'infestation artificielle, permettant ainsi de mieux contrôler les niveaux de population testés (Savary *et al.*, 2000 ; Park *et al.*, 2007 ; Maleki, 2015 ; Mosweu *et al.*, 2015). Plusieurs niveaux de population du bioagresseur sont testés sur une même culture avec suivi des dégâts et/ou de l'incidence et de la sévérité de la maladie ainsi que du rendement permettant ainsi de tracer une courbe du type : pertes de récolte = f(nombre de bioagresseurs) avec un seuil de nuisibilité fixé selon des critères variables : les attentes du producteur, le risque toléré, le contexte économique, les besoins de qualité et de quantité,...

Mais cette méthode est souvent difficile à mettre en place. Il peut être difficile voire impossible d'élever le ravageur pour l'utiliser lors de l'infestation artificielle, de mener l'expérience en conditions contrôlées (sans la présence d'autres bioagresseurs notamment),...

Dans le système mouche du chou-plante hôte, il existe un seuil de nuisibilité "usuel" de **7 œufs/plant/semaine** concernant tous les choux excepté les légumes racine (Freuler & Fisher, 1983). Cependant l'origine de ce seuil est inconnue et sa fiabilité remise en question. Un autre seuil de nuisibilité a été déterminé par Titi (1979) de 21 œufs/plant au cours des 2 semaines après la plantation. Dans les deux cas, il s'agit de seuils qu'on peut qualifier de seuils d'intervention pour l'utilisation de la lutte chimique qui ne sont plus d'actualité aujourd'hui puisque la méthode de lutte actuelle protège les plants avant la plantation et que les autres méthodes de lutte développées ont un fonctionnement différent.

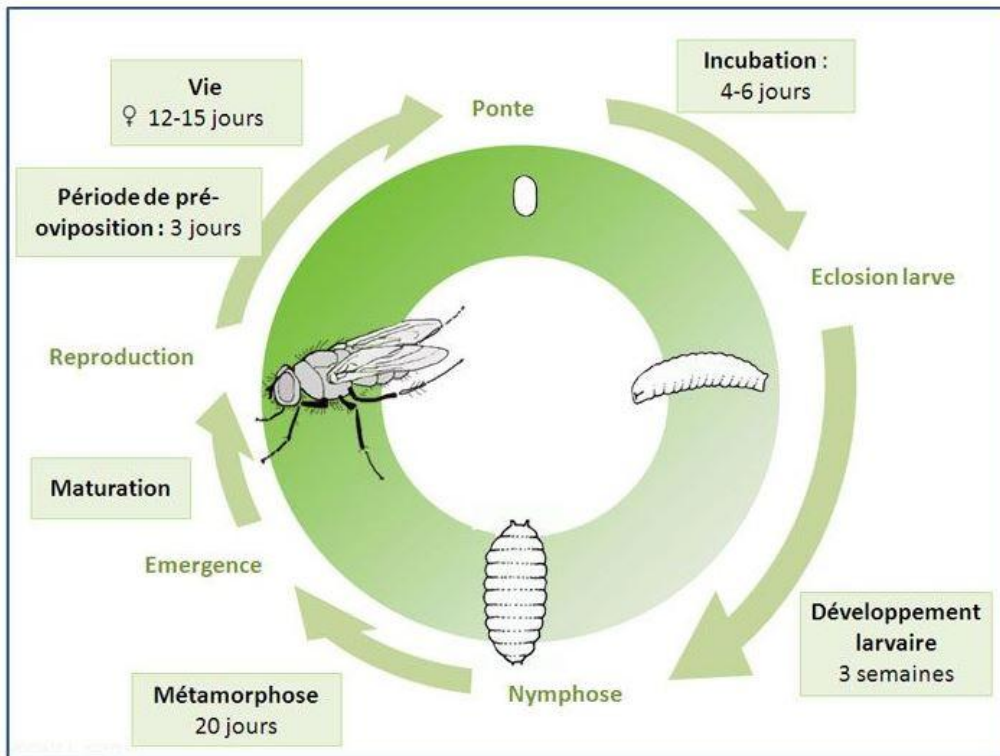


Figure 2 : Cycle biologique de la mouche du chou (ephytia.inra.fr).



Figure 3 : Les différents stades de développement de *Delia radicum* : œufs(a), larves et pupes(b), adulte(c). (Kergunteuil, 2013 ; https://commons.wikimedia.org/wiki/Delia_radicum ; <http://www.radleyvillage.org.uk/nature-post/cabbage-root-fly/>)

2. La mouche du chou *Delia radicum* (L.), ravageur des Brassicacées.

La mouche du chou *Delia radicum* (L.) (Diptère, Muscidae, Anthomyiidae) est un insecte ravageur au stade larvaire, inféodé aux brassicacées (espèces cultivées et sauvages). *D. radicum* est présente dans toute la zone tempérée du globe, en Amérique du Nord, en Europe, en Asie et en Afrique du Nord (Jones, 1986).

2.1. Biologie de l'insecte (Figure 2)

La mouche du chou se développe en 6 à 8 semaines. Les œufs (Figure 3, a), de forme ovoïde et de couleur blanche de 1 à 2 mm, sont déposés près du collet de la plante à moins de 2,5 cm du pied. L'éclosion des œufs a lieu 4 à 6 jours après la ponte (Finch *et al.*, 1975).

Les larves (Figure 3, b), de 1 à 7 mm selon le stade, sont différenciables des autres espèces grâce à une couronne de dix pointes noires membraneuses à leur extrémité postérieure dont deux sont bifides (stigmates). Le développement larvaire dure environ 3 semaines et se fait en 3 stades différents. Les larves entrent dans les racines au premier stade, s'y nourrissent et en ressortent au troisième pour se nymphoser dans le sol (Schoene, 1916 ; HYPPZ ; Lepage, 2011).

La métamorphose dans la puppe (Figure 3, b), petit tonnelet brun clair à brun foncé de 7 à 8 mm, est réalisée dans le sol, le stade nymphal durant 20 jours. A ce stade, deux arrêts de développement peuvent être observés dans l'année : un en été lorsque la température dépasse 22°C (arrêt de développement des pupes jusqu'à ce que la température redeviennent inférieure à 20°C) et un en hiver (diapause jusqu'à ce que la température du sol augmente autour de 6-7°C après une période de froid) (Collier & Finch, 1983).

Les adultes (Figure 3, c), de 6 à 8 mm, ont une vie après émergence d'environ 15 jours. Une femelle peut pondre plus de 200 œufs durant sa vie adulte, ce nombre dépendant principalement de la ressource alimentaire disponible, essentiellement du nectar et du pollen de fleurs, et de la présence de plantes hôte dans le paysage (Finch & Coaker, 1969).

Les conditions océaniques favorables en Bretagne permettent 3 générations par an, la première génération provenant de pupes diapausantes dans le sol pendant l'hiver. Le premier vol d'adultes a lieu fin avril début mai, le deuxième vol entre fin juillet et mi-août et le dernier vol en septembre (BSV Bretagne – Légumes frais, 2015 ; Finch *et al.*, 1975).

2.2. Dégâts causés et plantes hôtes

La larve de mouche du chou s'attaque au système racinaire des plants en y creusant des galeries pour se nourrir.

Les symptômes observés sont un flétrissement des plants, un aspect fané, en particulier lors des journées où la température est élevée. Les feuilles deviennent violettes, jaunissent et finissent par se dessécher. Cela peut conduire à la mortalité des jeunes plants ou à des ralentissements de la végétation (Ephytia, 2014 ; Estorgues *et al.*, 2004).

De plus, la présence de larves peut entraîner la formation de pourritures, attirant ainsi d'autres insectes saprophages.

Avec une production très importante de légumes frais et transformés, en particulier des brassicacées, chou-fleur, chou, brocoli, navet, la Bretagne est une zone très sensible à ce ravageur, présent dans 100% des parcelles tous les ans. La mouche du chou est considérée

	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre
Plantation brocoli									
Vol de mouche du chou									

Tableau 1 : Correspondance du stade de sensibilité des brocolis (jeunes plants) et des vols principaux de mouche du chou dans le temps (inspiré de Estorgues, 2005).

comme un problème majeur en Bretagne puisqu'il s'agit du principal ravageur sur chou (Estorgues, 2005). Les pertes de récolte peuvent être très importantes avec un impact variable selon la plante-hôte, le niveau de population du ravageur et les organes attaqués. Les dégâts sont souvent plus préjudiciables sur légumes racine que sur légumes fleur. Sur légumes racine comme les navets, les attaques produisent des galeries qui peuvent entraîner le pourrissement de la racine et donc une non-commercialisation. Sur les légumes feuilles ou fleur, les attaques peuvent entraîner une mortalité des plants avant production, ou une production moindre ou de mauvaise qualité. Enfin, une ponte tardive peut avoir lieu sur des légumes pommés, problématique car conduisant à des pommes véreuses, non commercialisables (BSV Bretagne – Légumes frais, 2015 ; Chambre d'agriculture du Finistère, 2006).

Parmi les brassicacées hôtes de la mouche du chou se trouve le brocoli, *Brassica oleracea* var. *italica* (L.), utilisé pour les expériences que nous avons mené.

Le brocoli est une culture d'importance en France (2200 hectares, env. 20 000t en 2015), en particulier en Bretagne où sont cultivés plus de 80% de la production nationale (Agreste, 2016 ; Interfel – Les fruits et légumes frais). Ce légume est principalement consommé en frais ou surgelé.

De plus, le cycle de la culture étant assez court (autour de 3 mois selon la précocité de la variété), le brocoli est intéressant pour réaliser des expérimentations.

Sur ce légume fleur, la nuisibilité de la mouche du chou est supposée de 2 types : une mortalité précoce des jeunes plants lorsque les racines sont très attaquées, ou une production moins importante ou de moins bonne qualité lorsque les attaques sont moins importantes. Les brocolis de printemps, cultivés entre avril et juillet (sur la période du stage) sont très exposés au premier vol de mouche du chou, qui survient peu de temps après la plantation, la ponte ayant lieu sur les jeunes plants qui sont plus sensibles (*Tableau 1*). Les dégâts peuvent aller jusqu'à plus de 50% de mortalité des plants sur une parcelle non traitée (Estorgues *et al.*, 2004).

3. Etat des lieux de la lutte contre la mouche du chou

Actuellement deux méthodes de lutte principales sont utilisées sur les brassicacées légumières afin de les protéger de la mouche du chou : la lutte chimique et la lutte physique. Sur choux à inflorescence dont le brocoli et sur choux pommés, la première solution consiste à protéger tous les plants en pépinière avant la plantation avec un produit phytosanitaire dont la matière active est le Spinosad (neurotoxique, action par contact et ingestion - Success4®), autorisé en agriculture conventionnelle et en agriculture biologique. Sur choux, un traitement du sol est autorisé dont la matière active est la téfluthrine (Force 1,5G®). D'autres traitements sont possibles au cours du développement au champ mais consistent plutôt en des traitements de rattrapage, autorisés sur choux pommés et choux à inflorescence avec de la lambda cyhalothrine (Karaté Xpress®, Karaté Zéon®) (E-phy).

La lutte physique, elle, s'observe aujourd'hui principalement avec la pose de filets insect-proof sur l'ensemble des cultures sensibles et concerne les légumes racines, essentiellement le navet, et les autres choux au stade jeune plant (BSV Bretagne – Légumes frais, 2015). Cette solution est particulièrement contraignante car chronophage et assez chère, mais il



Figure 4 : Exemple d'un carabidé : *Metallina properans* (<http://carabidae.org/taxa/trechinae?country=55&mode=imago>).



Figure 5 : *Aleochara bilineata* (Bernard Chaubet) et *Aleochara bipustulata* (Klaus Bek Nielsen).



Figure 7 : *Trybliographa rapae* adulte (<http://www.parasitoides.univ-rennes1.fr/>).

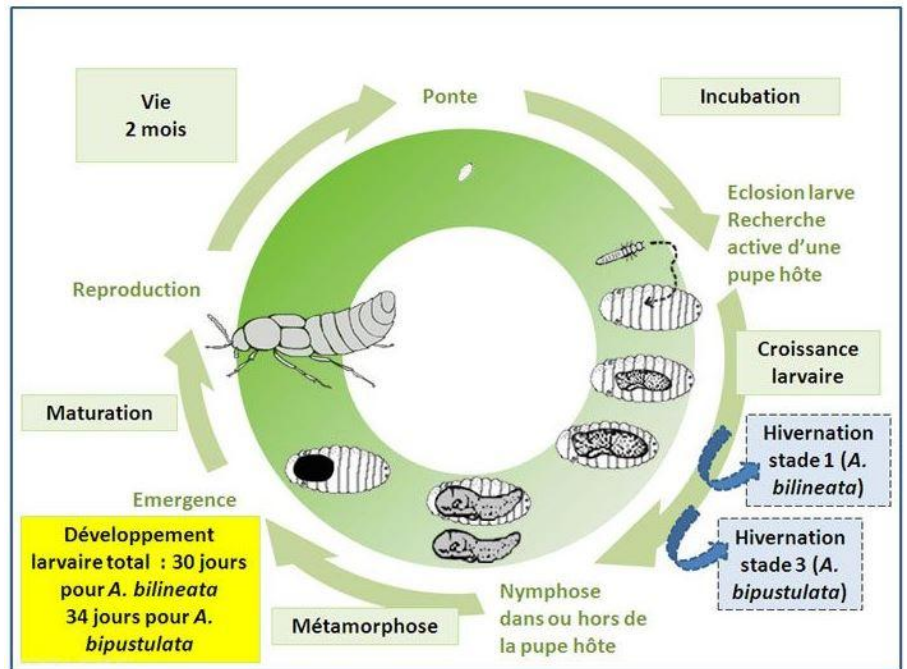


Figure 6 : Cycle biologique des *Aleochara* sp. (ephytia.inra.fr).

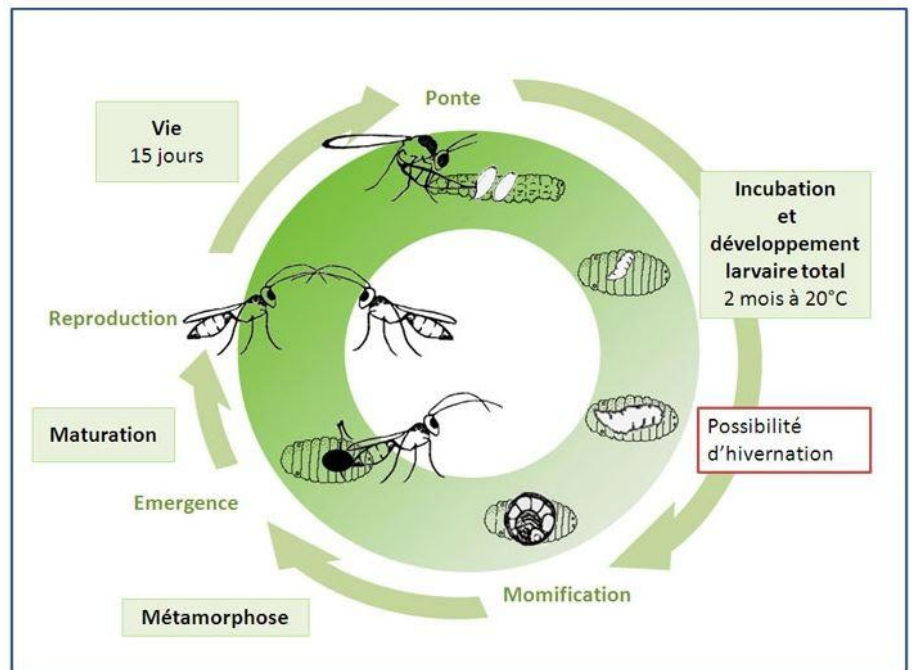


Figure 8 : Cycle biologique de *Trybliographa rapae* (ephytia.inra.fr).

s'agit par exemple de la seule solution de lutte contre la mouche du chou sur navet (ACTA, 2016 ; APREL).

Malgré de nombreuses connaissances sur le système mouche du chou – plante hôte, peu de solutions de biocontrôle sont encore développées, leur efficacité n'étant que peu satisfaisante. Parmi les solutions les plus explorées, on trouve la lutte par utilisation de répulsifs/attractifs et le contrôle biologique naturel par des prédateurs ou parasitoïdes.

Les associations de cultures plus ou moins attractives pour la mouche du chou sont étudiées, avec notamment l'utilisation de plantes à odeur forte afin de masquer les odeurs de chou attractives pour la mouche, les isothiocyanates principalement (Finch & Skinner, 1982). Des essais ont été menés sur les différentes espèces de brassicacées, il semblerait notamment que les navets ou encore les choux chinois soient plus attractifs que les autres choux ce qui permettrait d'envisager des modes de protection en associant ces cultures, par exemple dans les allées de la culture principale (Fournet, 2002 ; Kergunteuil, 2013). Cependant, ces méthodes ne présentent pas encore une efficacité suffisante pour se substituer à l'utilisation d'autres méthodes de lutte.

D'autres voies ont été explorées, avec l'utilisation de champignons entomopathogènes (Bruck *et al.*, 2005) ou de nématodes (Bracken, 1990), mais il s'agit de techniques très difficiles à mettre en place au champ et souvent avec une efficacité peu concluante.

Enfin, une des voies les plus explorées est le contrôle biologique naturel. En effet, *D. radicum* possède de nombreux ennemis naturellement présents dans son environnement. Les plus connus sont des coléoptères prédateurs Carabidae et Staphylinidae, ces derniers étant également parasitoïdes à l'état larvaire, et des hyménoptères parasitoïdes Figitidae :

- Les carabidés (*Figure 4*) sont connus pour leur capacité de prédation des œufs et/ou des larves de la mouche du chou (Hughes & Salter, 1959 ; Finch, 1996). Cette capacité dépend de l'espèce, en particulier de sa taille (directement liée à sa capacité de consommation d'œufs et larves) et de sa période de présence par rapport aux vols de mouche du chou (Finch, 1996).
- Deux espèces de Staphylinidae du genre *Aleochara* présentent un intérêt particulier dans la lutte contre la mouche du chou : *Aleochara bilineata* (Gyllenhaal) et *Aleochara bipustulata* L. (*Figure 5*). En effet, ces deux espèces de staphylin sont des prédateurs d'œufs et/ou de larves à l'âge adulte mais sont aussi des parasitoïdes de la mouche du chou au stade larvaire : la larve de staphylin de premier stade après éclosion perce la puppe de la mouche, y pénètre, se nourrit de la nymphe et se métamorphose dans la puppe avant d'émerger sous forme adulte (*Figure 6*) (Fournet *et al.*, 2000).
- Le dernier ennemi naturel important de la mouche du chou est un hyménoptère parasitoïde, *Trybliographa rapae* Westwood 1835 (*Figure 7*). Cet insecte, spécialiste du genre *Delia*, pond ses œufs dans les larves de mouche du chou, la larve se développe ensuite dans la puppe se nourrissant de la nymphe de mouche et l'adulte de *T. rapae* émerge de la puppe (*Figure 8*) (Université de Rennes 1).

Les études actuellement développées cherchent à comprendre comment favoriser et optimiser l'action de ces ennemis naturels (Meyling *et al.*, 2013 ; Josso *et al.*, 2013).



Figure 9 : Extérieur et intérieur des cages insect-proof sur la parcelle expérimentale du Rheu (photos personnelles).

Pour cela, à partir des connaissances disponibles sur la mouche du chou, ses dégâts sur différentes plantes hôtes et ses ennemis naturels, nous avons cherché à évaluer la nuisibilité réelle de ce ravageur sur une culture légumière, le brocoli, et à déterminer l'impact du contrôle biologique naturel sur les populations du ravageur et les dégâts occasionnés.

Pour cela, nous avons choisi de nous placer en conditions réelles de production, c'est-à-dire en plein champ. Afin de contrôler le système mouche du chou – brocoli et de s'affranchir de l'éventuelle présence d'autres bioagresseurs, une première expérience a été menée sous cages insect-proof. Le dispositif vise à éliminer les ennemis naturels afin de mesurer la nuisibilité maximale de ce ravageur sur brocoli. L'infestation par le ravageur a été réalisée artificiellement afin de contrôler et d'évaluer différents niveaux de populations pour affiner cette quantification de la nuisibilité.

Nous avons choisi de déterminer l'impact du contrôle biologique naturel en conditions réelles de culture de plein champ avec une infestation naturelle afin d'évaluer le potentiel de régulation qui existe effectivement dans des parcelles cultivées concernées par ce ravageur. Les différents dommages et dégâts causés par la mouche du chou supposent un possible suivi de la nuisibilité de ce ravageur au cours du développement des plants (retard de végétation, mortalité précoce, attaques sur système racinaire,...) et à la récolte sur la production (pommes de brocoli). Ces différentes variables ont donc été suivies et évaluées afin de mieux comprendre la nuisibilité de la mouche du chou sur l'ensemble de la durée de la culture.

Matériel et méthodes

1. Description des dispositifs expérimentaux

1.1. Evaluation de la nuisibilité de la mouche du chou

Cette première expérience a été mise en place afin de préciser la nuisibilité réelle de *Delia radicum* en déterminant le niveau d'infestation engendrant des pertes de récolte, sur brocolis non traités en condition d'infestation artificielle contrôlée. L'expérience a été menée sur le site de l'INRA au Rheu (35).

Pour cela, six cages insect-proof (Diatex®, filet à mailles de 500µ), de dimension 6x3 mètres au sol et de 2 mètres de hauteur, ont été installées sur la parcelle (précédemment une prairie semée en août 2015) le 4 avril 2016 (Figure 9). Le sol avait été auparavant travaillé pour la plantation des brocolis. Ce type de dispositif (filets insect-proof) est connu pour ne pas avoir d'impact significatif sur l'intensité lumineuse mais un possible impact sur l'humidité et la température (Park *et al.*, 2007). Afin d'évaluer si les cages mises en place avaient un impact sur la croissance et le développement des brocolis, nous avons mis en place une parcelle de brocolis à l'extérieur des cages. Cette parcelle a été plantée avec les mêmes brocolis et à la même date que les brocolis sous les cages. Un contrôle de la température a aussi été réalisé entre les cages et l'extérieur en mettant en place deux sondes : une à l'intérieur d'une cage et l'autre sur la parcelle extérieure.

Des dispositifs appelés pièges feutrine ont été placés sur 10 des plants de la parcelle extérieure, tirés au hasard. Les mouches du chou pondent dans ces pièges composés de plusieurs bandes de feutrine fermées par un morceau de Velcro®, placés au pied des plants.



Figure 10 : Piège feutrine au pied d'un plant de brocoli (Chambre d'Agriculture du Finistère).

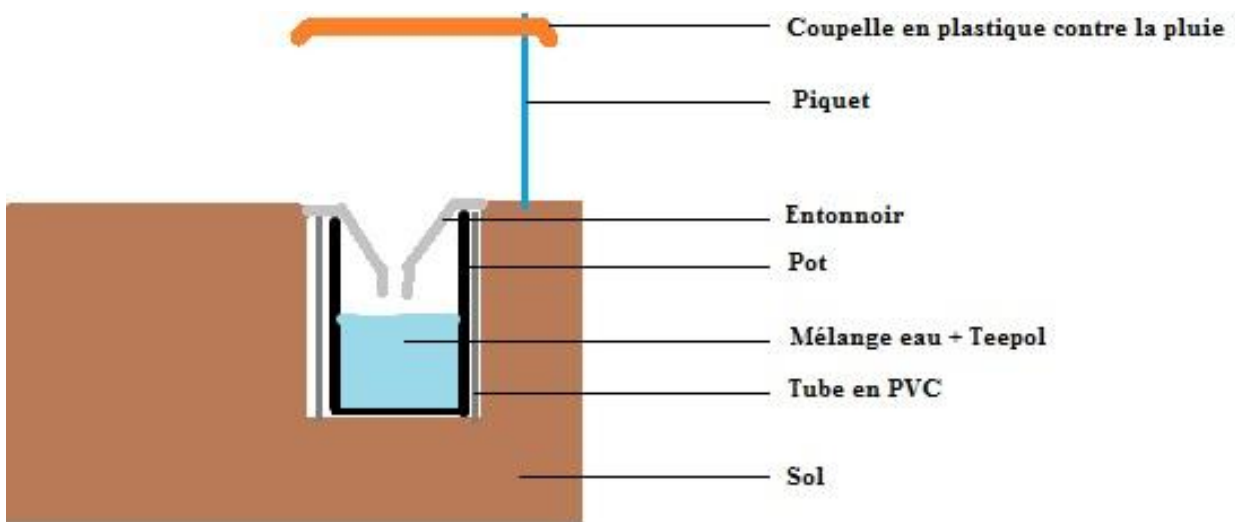


Figure 11 : Schéma d'un piège de type Barber (illustration personnelle).

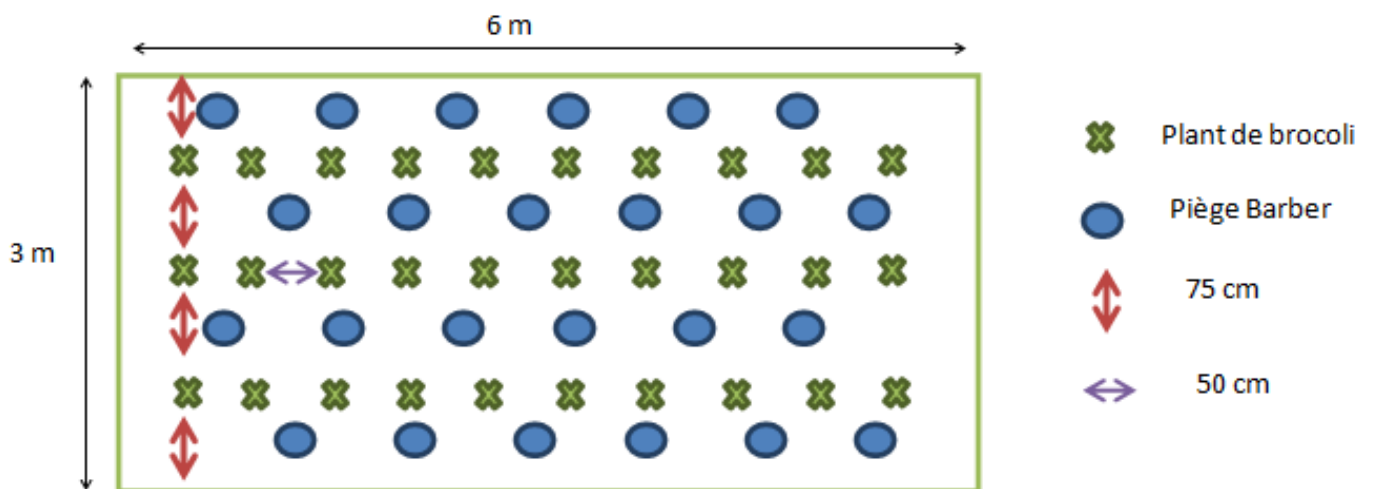


Figure 12 : Schéma du dispositif expérimental – intérieur des cages, parcelle du Rheu (illustration personnelle).

Cela permet d'évaluer les vols et donc la pression de mouche du chou au cours du temps (Freuler *et al.*, 1983 ; Bligaard *et al.*, 1999). Les pièges feutrine ont été relevés toutes les semaines. Les œufs ont été dénombrés puis retirés du piège et le piège est remis en place au pied du plant (*Figure 10*). Ces pièges ont permis de suivre l'infestation naturelle de *D. radicum* pour les brocolis sur la parcelle extérieure.

Vingt-quatre pièges de type Barber (choix de la densité des pièges basé sur des expériences réalisées en 2013 et 2014 – Maret *et al.*, 2014) visant à capturer les insectes se déplaçant au sol et 2 plaques engluées de couleurs jaune et bleue pour piéger les insectes aériens ont été installés dans chaque cage, afin d'éliminer le maximum d'insectes susceptibles de consommer des œufs de mouche du chou. Les pièges Barber sont composés d'un tube en PVC de 15 cm enfoncé dans le sol. Un pot en plastique est posé au fond du tube, il est rempli d'un mélange eau + mouillant (ici du Teepol®) (Greenslade, 1964). Le tout est recouvert d'un entonnoir dont le bord large (10 cm de diamètre) est à la surface du sol. L'ensemble est protégé par une coupelle en plastique fixée sur un piquet planté dans le sol, placée entre 1 et 5 centimètres au dessus du trou (*Figure 11*). Cette coupelle permet d'éviter le remplissage des pots lorsqu'il pleut.

Dans chaque cage, 30 brocolis de la variété Marathon au stade 2-3 vraies feuilles (âgés de 6 semaines), non traités, ont été plantés le 5 avril, avec des intervalles de 75 cm inter-rang et 50 cm sur le rang (~17000 plants/ha) (*Figure 12*). La plantation a été réalisée manuellement.

L'infestation par *Delia radicum* a été réalisée artificiellement par apport de densités croissantes d'œufs sur les brocolis.

L'objectif étant d'obtenir une relation entre le nombre d'individus et la nuisibilité associée, nous avons choisi de fixer plusieurs densités d'infestation afin d'optimiser le nombre de données autour du supposé seuil de nuisibilité. Les données des différentes expériences réalisées les années précédentes (Maret *et al.*, 2014 ; Cortesero & Le Ralec, 2014) montrent que :

- Il n'y a pas forcément de dégâts observés à la récolte, même avec des relevés de 15 pupes dans le sol
- La mortalité des plants est très importante pour des relevés d'environ 60 pupes à la récolte
- Le seuil actuel de nuisibilité est fixé à 7 œufs par plant et par semaine (soit si on considère un pic de ponte d'une durée d'environ 3 semaines, autour de 20 œufs par plant)
- Les zones légumières bretonnes rencontrent régulièrement, selon les années, des conditions de très forte pression de mouche, jusqu'à plus de 100 œufs en moyenne sur la durée du pic.
- La mortalité entre les œufs et les pupes peut être très importante (plus de 60%).

Une expérience préliminaire réalisée en chambre climatique a montré le même type de résultats : peu de dégâts pour 15 œufs apportés, à partir de 30 œufs on observe des dégâts sur les racines. De plus, cette expérience a permis de soulever un point important : il existe une très grande variabilité entre les plants avec notamment des dégâts très importants pour un nombre très faible de pupes dans le sol (entre 1 et 4).

L'ensemble de ces résultats nous a permis de définir 4 conditions pour choisir les densités d'infestation : (1) il faut maximiser le nombre de densités entre 15 et 60 œufs car on

Densités fixées (total d'œufs/plant sur 3 semaines)	0	5	10	20	30	40	50	60	80	100
S 17	0	1	3	6	9	12	15	18	24	30
S 18	0	3	4	8	12	16	20	24	32	40
S19	0	1	3	6	9	12	15	18	24	30

Tableau 2 : Détail des densités choisies et du nombre d'œufs de *Delia radicum* apportés lors des 3 semaines d'infestation artificielle.

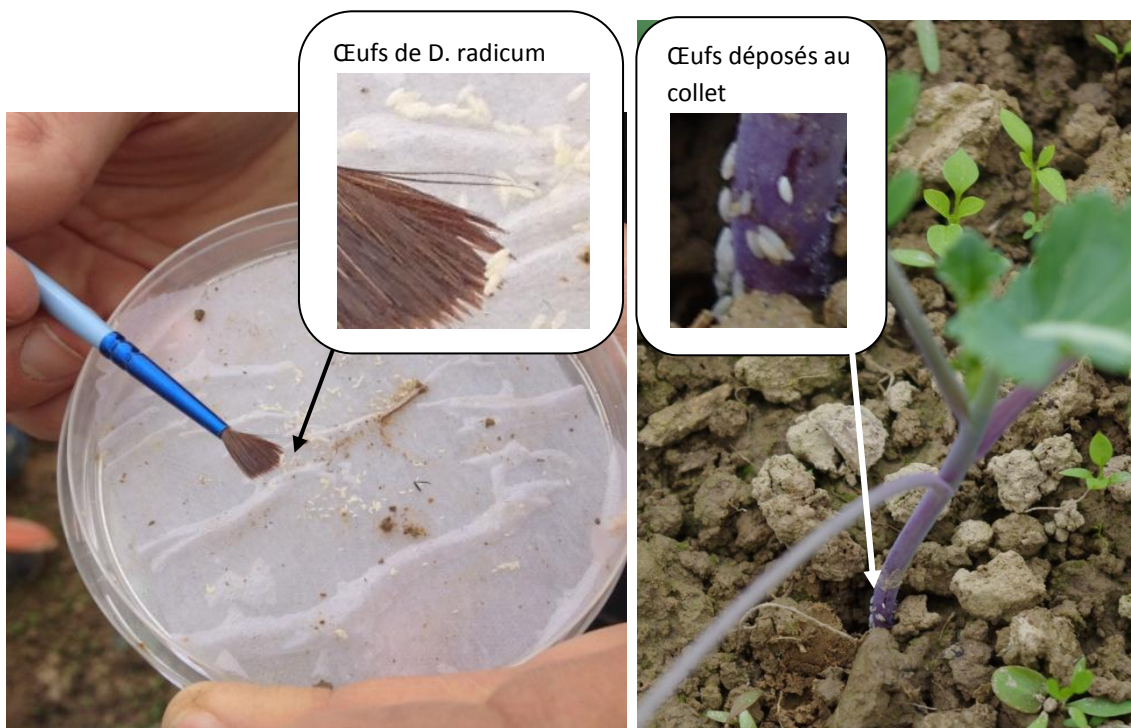


Figure 13 : Apport des œufs au collet des plants de brocoli (photos personnelles).

suppose que la plus grande variabilité de dégâts observés se situe entre ces 2 valeurs, (2) la mortalité naturelle peut être très importante entre les œufs et le dernier stade larvaire (jusqu'à 60%), il faut donc apporter des densités d'œufs élevées afin d'avoir suffisamment d'individus au stade larvaire, nuisible pour la culture, (3) la variabilité des dégâts pouvant être très importante entre les plants, des répétitions sont nécessaires et (4) des dégâts pouvant être observés pour des très faibles densités de mouche, il faut aussi tester ces faibles niveaux d'infestation.

Nous avons donc choisi de tester 10 densités d'œufs différentes, allant de 0 à 100 œufs avec pour valeurs intermédiaires 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 et 80.

Au sein d'une même cage, il y a 30 plants, ce qui permet de réaliser 3 répétitions de chaque densité, soit 18 plants par modalité au total. Les plants ont été tirés au sort afin de répartir aléatoirement les différentes densités au sein de chaque cage.

L'apport des œufs a été étalé sur 3 semaines avec un pic lors de la deuxième semaine pour mimer la dynamique de ponte naturelle de la mouche du chou (BSV Bretagne – Légumes frais, 2016) (Tableau 2).

Les œufs proviennent d'un élevage réalisé à l'université de Rennes 1. Ils ont été apportés à l'aide d'un pinceau au collet des plants en semaines 17 (25 avril), 18 (2 mai) et 19 (9 mai) correspondant aux semaines où sont habituellement observés les vols de *D. radicum* en Bretagne (BSV Bretagne – Légumes frais, 2016) (Figure 13).

Pour chaque lot d'œufs utilisé lors d'une semaine d'infestation artificielle, un test d'éclosion a été réalisé en chambre climatique. Pour cela, environ 300 œufs ont été prélevés. Les œufs pleins (c'est-à-dire ceux qui n'ont pas encore éclos) et les œufs déjà éclos ont été dénombrés. Les œufs pleins ont ensuite été placés sur une feuille de papier filtre humidifiée dans une boîte de Petri et mis en chambre climatique à 20°C pendant une semaine. Le nombre d'œufs éclos a été compté à la fin du test ce qui permet ensuite de calculer un taux d'éclosion :

$$\text{Taux d'éclosion} = \frac{\text{Nombre d'œufs éclos}}{\text{Nombre d'œufs total}}$$

Un entretien régulier a été réalisé sous les cages, un désherbage manuel (binette) a été fait 4 fois entre la plantation et la récolte et un traitement anti-limace biologique à base d'ortho-phosphate de fer (Sluxx®) a été appliqué 2 fois.

La récolte des brocolis a été réalisée le 21 juin 2016. La récolte a été réalisée en une seule fois. Les brocolis ont été récoltés lorsque les premières inflorescences présentaient des signes de desserrement.

1.2. Evaluation de l'efficacité du contrôle biologique naturel

Cette seconde expérience a eu pour objectif de mesurer, dans des conditions naturelles d'infestation, l'impact des ennemis naturels du sol sur les populations de mouche du chou et sur les dégâts causés par ce ravageur, sur brocoli, en absence de traitement insecticide.

Les suivis réalisés tous les ans dans les quatre départements de Bretagne montrent une pression plus importante de *D. radicum* dans les Côtes d'Armor et le Finistère qu'en Ille-et-Vilaine (BSV Bretagne – Légumes frais). Cette deuxième expérience a donc été menée dans la zone de production légumière du Nord de la Bretagne, à la station expérimentale Terre-d'essais de Pleumeur-Gautier dans les Côtes d'Armor.

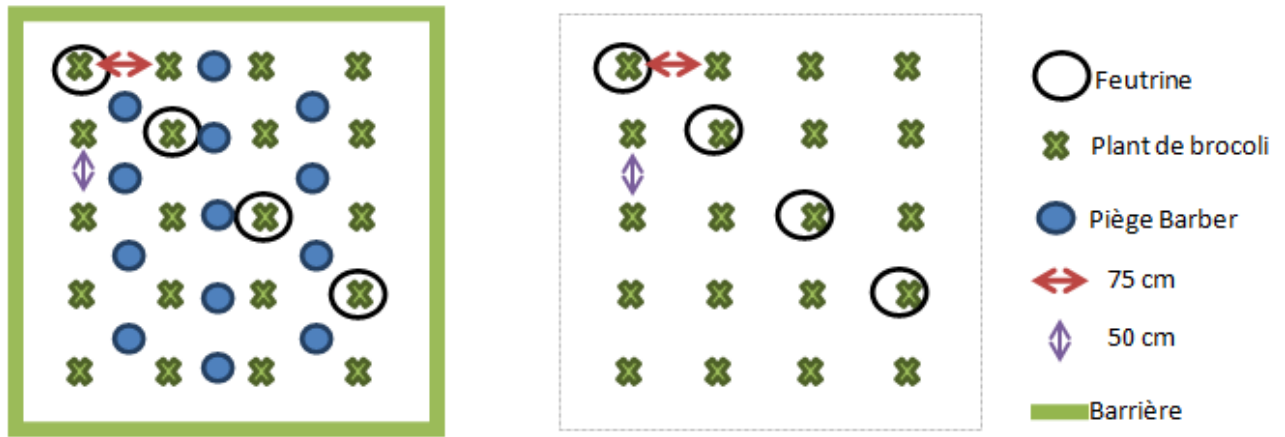


Figure 14 : Schéma du dispositif expérimental – à gauche un bloc défauné, à droite un bloc non défauné, parcelle expérimentale de Pleumeur-Gautier (illustration personnelle).



Figure 15 : Parcelle expérimentale à Pleumeur-Gautier (22) (photo personnelle).

Pour cela, 8 micro-parcelles d'environ 3x3 mètres ont été positionnées sur une parcelle d'environ 200 m² de brocolis non traités, de la variété Marathon, plantés le 7 avril 2016 (inter-rang de 75 cm, inter-plant de 50 cm, utilisation d'une planteuse mécanique). La parcelle était entourée de différentes autres cultures : chou-fleur, échalote, artichaut, mélange féverole- ray gras.

Les micro-parcelles ont été positionnées de manière à laisser au moins 2 rangs à l'extérieur du dispositif et 2 rangs entre chaque micro-parcelle.

Quatre de ces micro-parcelles ont été entourées de barrières en plastique de 30 centimètres de hauteur, semi-enterrées (environ 15 cm) pour empêcher toute entrée ou sortie d'insectes telluriques. Dans ces micro-parcelles, 13 pièges de type Barber (*Figure 11*) ont été installés sur 3 rangées. Ces 4 micro-parcelles sont qualifiées de défaunées (vis-à-vis des insectes telluriques).

Dans les 4 autres micro-parcelles, aucun dispositif n'a été mis en place, il s'agit des parcelles non-défaunées ou témoins.

Les micro-parcelles (ou blocs), qui sont donc de 2 types (défaunées ou non), ont été positionnées sur la parcelle de façon aléatoire.

Chaque micro-parcelle comprenait 20 brocolis, dont 4 sur lesquels ont été placés des pièges feutrine. (*Figure 14*)

L'ensemble de la parcelle a été protégé par un filet contre les lapins entourant la parcelle et 2 mâts effraie contre les oiseaux (*Figure 15*).

De même, un entretien régulier de la parcelle a été réalisé avec un désherbage manuel (binette) réalisé 5 fois le temps de la culture des brocolis.

La récolte a été réalisée le 4 juillet 2016. La récolte a été réalisée en un seul passage lorsque les premières inflorescences se desserraient.

2. Efficacité du dispositif de défaunage et détermination des communautés de carabidés.

Afin d'évaluer l'efficacité du dispositif de défaunage mis en place sur les deux sites expérimentaux, les pièges Barber ont été relevés toutes les semaines. En effet, on suppose que si l'on ne piège plus d'insectes (en particulier les carabes, principaux prédateurs de la mouche du chou) au bout d'un certain temps, c'est que le défaunage a été efficace. L'ensemble a été filtré et stocké dans de l'alcool à 70° et le piège a été rempli avec le mélange eau + Teepol®. Les pièges qui se sont remplis d'eau (souvent à cause de la pluie) durant la semaine ont été jetés.

Pour les cages, les 24 pièges de chaque cage ont été prélevés et stockés dans un même pot chaque semaine. Pour les blocs défaunés sur le site de la station expérimentale de Pleumeur-Gautier, les 13 pièges d'un même bloc ont été stockés dans un même pot chaque semaine.

Les individus piégés ont ensuite été dénombrés au laboratoire. Ce comptage a été réalisé toutes les semaines pour les pièges de Pleumeur-Gautier pour les 4 blocs défaunés. Pour les pièges sous les cages, les individus récoltés dans les pièges Barber ont été comptés



Figure 16 : Pesée des pommes de brocoli à la récolte à l'aide d'un peson (photo personnelle).

pour 5 semaines choisies parmi toutes les semaines de suivi pour des contraintes de temps, et sur deux cages tirées au sort (1 et 4) : la semaine 14 (plantation), les semaines 17, 18 et 19 (infestation artificielle), et la semaine 22 (3 semaines après la dernière infestation, soit à peu près à la fin du développement larvaire des derniers œufs apportés).

Ces piégeages ont aussi permis de mieux connaître les communautés d'arthropodes présents sur les 2 parcelles expérimentales. Une première identification à l'ordre a été réalisée (choix de ne relever que les principaux ordres retrouvés habituellement) : coléoptères, diptères, hyménoptères, araignées et autres.

Enfin, on s'est intéressés plus particulièrement aux prédateurs potentiels de mouche du chou. Il aurait été intéressant de dénombrer les *Aleochara* sp. mais l'identification au genre étant très complexe, cela n'a pas pu être réalisé au cours du stage. Les Staphylinidae ont donc été comptés, ainsi que les Carabidés qui ont de plus été identifiés à l'espèce grâce à la *Clé de Détermination des Carabidés – Paysages agricoles du Nord Ouest de la France* (Roger et al., 2013).

Ces différentes mesures nous ont permis d'évaluer, pour les deux sites, l'abondance et la diversité des principaux arthropodes, en particulier les potentiels prédateurs de la mouche du chou.

3. Evaluation de l'état des plants au cours du développement et estimation du rendement à la récolte

Un suivi hebdomadaire a été réalisé sur les plants de la plantation à la récolte et différentes mesures ont été réalisées à la récolte.

Pendant le développement, le nombre de vraies feuilles (feuilles étalées) et de pousses latérales a été compté. De plus, la date de l'apparition de l'inflorescence a été notée. Ces mesures ont permis de suivre le stade de développement de la plante.

Enfin, la hauteur des plants (du sol jusqu'au méristème apical) et la longueur et largeur du limbe de la plus grande feuille ont été mesurées à l'aide d'une règle de 40 centimètres graduée en millimètres permettant de suivre la croissance des plants.

La mortalité des plants a aussi été relevée.

A la récolte, les pommes ont été récoltées toutes à la même date et pesées à l'aide d'un peson (1kg précision 5g, et lorsque le poids dépasse 1kg peson de 2kg précision de 10g) (*Figure 16*). Cette mesure a permis d'évaluer le rendement.

Sur la parcelle de l'INRA au Rheu, les brocolis cultivés à l'extérieur n'avaient pas encore d'inflorescence au moment de la récolte. La biomasse totale (racines + parties aériennes) a donc été mesurée à l'aide d'un peson. Cette mesure a aussi été réalisée pour 5 brocolis dans chaque cage correspondants à 5 densités d'infestation différentes (0, 10, 30, 60 et 100 œufs apportés), tirés au sort afin de pouvoir comparer le développement à l'intérieur et à l'extérieur des cages.

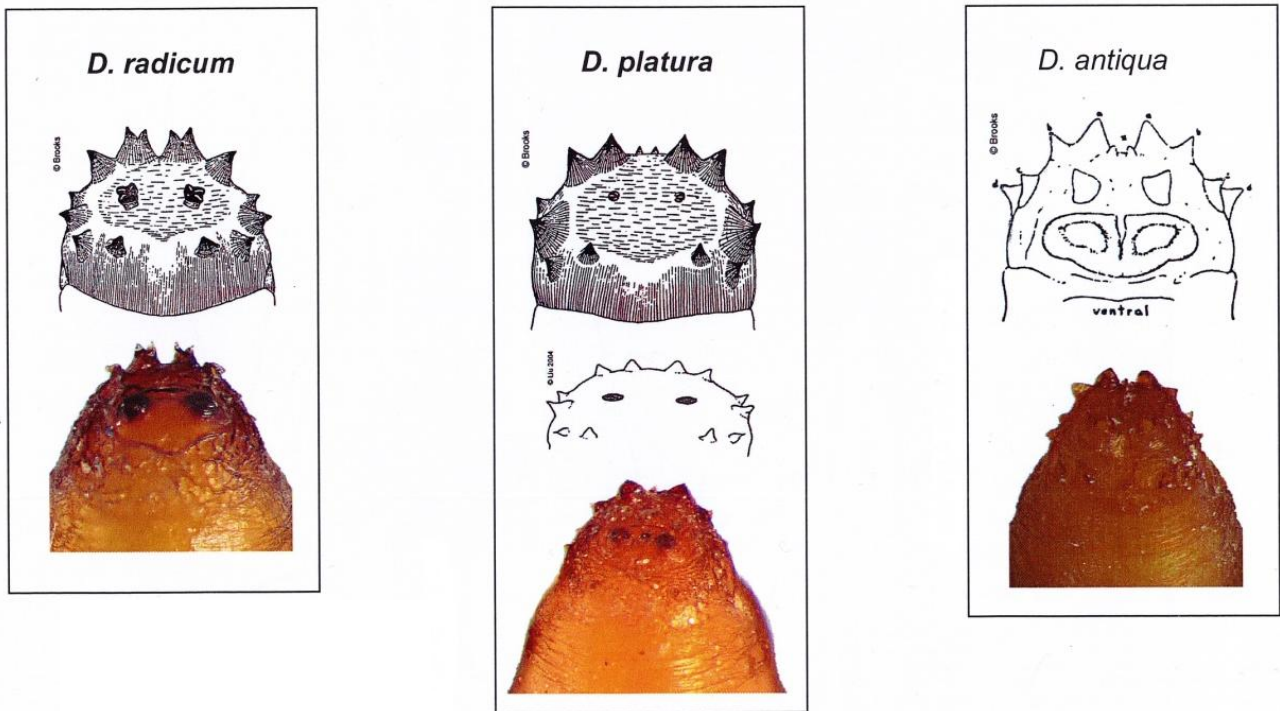


Figure 17 : Différenciation des pupes de *Delia radicum* des autres *Delia* (exemple extrait d'*Ecobiologie des Insectes Parasitoïdes* par S. Dourlot)

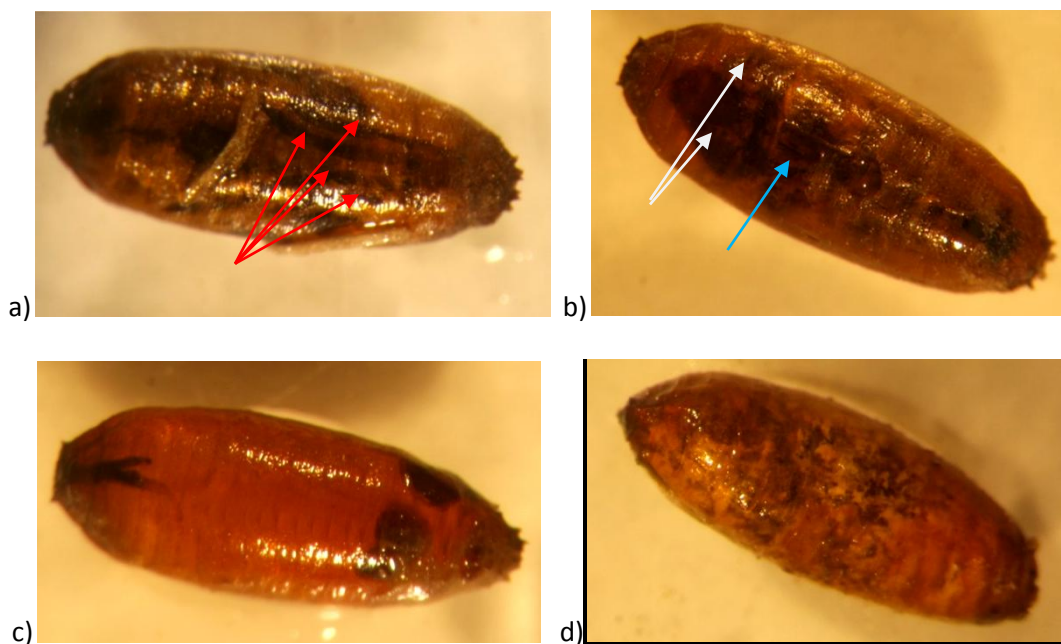


Figure 18 : Pupes de *Delia radicum* contenant : **a**) une mouche du chou en face ventrale (pattes visibles, indiquées par les flèches rouges), **b**) une mouche du chou en face dorsale (yeux – flèches blanches et pilosité – flèche bleue), **c**) un *Trybliographa rapae* (tâches noires = méconium) et **d**) un *Aleochara* sp. (pupe tachetée de blanc) (photos personnelles).

4. Evaluation des dégâts racinaires et du nombre de pupes à la récolte

Après la récolte des brocolis, les plants ont été sectionnés au collet et un prélèvement de sol a été réalisé autour de chaque pied. Pour cela, une tarière à moteur thermique a été utilisée, permettant de faire des trous de 12 centimètres de diamètre (autour du pied de brocoli) et d'environ 13,5 centimètres de profondeur ($\pm 0,4$ cm). Le sol ainsi prélevé a ensuite été tamisé sous un jet d'eau.

La racine récoltée avec le prélèvement de sol a été lavée et les dégâts ont été évalués grâce à l'échelle de notation décrite dans Soroka *et al.*, (2004) : **0** = pas de dégât, **1** = dégâts < 10% de la surface racinaire, **2** = dégâts recouvrant entre 10 et 25% de la surface racinaire, **3** = entre 25 et 50% de la surface racinaire, **4** = entre 50 et 75% et **5** = dégâts > 75%. Pour l'analyse statistique, la notation a été convertie en variable continue en associant à chaque note la médiane de l'intervalle auquel elle renvoie.

Le nombre de pupes dans chaque prélèvement a été compté et les pupes ont été stockées. Différentes analyses ont été réalisées sur les pupes ainsi récupérées. Tout d'abord, l'observation de la morphologie externe des pupes nous a permis de vérifier qu'elles provenaient bien de larves de *D. radicum*. Pour cela, une observation de l'extrémité de la pupe à la loupe binoculaire est nécessaire (Figure 17).

Ensuite, une mesure du taux de parasitisme (par *Trybliographa rapae* ou *Aleochara* sp.) a été réalisée. Pour cela, les pupes ont été observées sous la loupe binoculaire, et éventuellement disséquées lorsque l'observation ne permettait pas de trancher. En effet, le parasitisme entraîne des modifications de la pupe caractéristiques de l'espèce, avec des tâches noires visibles à une extrémité lorsqu'un *T. rapae* a parasité la pupe, et une pupa tachetée de blanc lorsqu'elle est parasitée par un *Aleochara* sp. (Figure 18). Les comptages réalisés permettent de calculer un taux de parasitisme pour chaque échantillon :

$$\text{Taux de parasitisme} = \frac{\text{Nombre de pupes parasitées par } T.\text{rapae} + \text{Nombre de pupes parasitées par } Aleochara \text{ sp.}}{\text{Nombre total de pupes de } Delia \text{ radicum}}$$

5. Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées grâce au logiciel R, avec les packages car, lme4 et MASS ainsi que le package Grapher pour les représentations graphiques.

La méthode générale utilisée a été la suivante :

- Représentation graphique de la variable à étudier par un histogramme
- Ecriture d'un modèle avec choix des effets et du type de modèle selon la distribution de la variable, modèle linéaire général (*lm()*) ou modèle linéaire généralisé (*glm()*).
- Vérification des hypothèses d'homoscédasticité (graphique des résidus `plot(residuals(modèle)~fitted(modèle))`, observation de l'homogénéité du nuage de point) et de normalité des résidus (`hist(residuals)`, distribution normale)
- Comparaison des modèles et sélection du "meilleur" modèle grâce au critère d'information d'Akaike (AIC), le modèle sélectionné est celui avec l'AIC le plus petit

- ANOVA sur le modèle pour observer la significativité des effets testés sur la variable à expliquer, l'effet étant considéré significatif lorsque $p \leq 0,05$.

L'effet principal choisi pour expliquer les variables, à savoir le nombre d'œufs apportés pour l'expérience menée au Rheu et le défaunage pour l'expérience menée à Pleumeur-Gautier, est considéré comme fixe. Cela nous permet de savoir quel est le sens de l'interaction entre l'effet et la variable à expliquer.

Selon les modèles créés et la variable à expliquer, d'autres effets peuvent s'ajouter. Pour les variables analysées au cours du développement, un effet date est ajouté. Les mesures au cours du temps ne sont pas indépendantes puisque ce sont les mêmes mesures répétées sur les mêmes plants à des dates différentes. Pour s'affranchir de cette non indépendance, un effet individu (donc ici brocoli) aléatoire est ajouté dans les modèles permettant d'analyser les variables de croissance et développement (inspiré des exemples de modèles longitudinaux dans *Extending the linear model with R*, Faraway, 2016).

Résultats

1. Evaluation de la nuisibilité de *Delia radicum* sur brocoli en condition d'infestation artificielle contrôlée

Les tests d'éclosion réalisés en laboratoire sur les œufs utilisés pour les infestations présentent les résultats suivants :

- Pour la première semaine d'infestation, le taux d'éclosion est de 68%
- Pour la deuxième semaine, de 56%
- Pour la troisième semaine, de 81%.

Soit un taux d'éclosion moyen de **68,3%** pour l'ensemble des œufs utilisés pour les 3 semaines d'infestations artificielles.

Quant au nombre d'individus retrouvés à la fin de l'expérience, les prélèvements de sol associés à chaque plant sous les cages ne contenaient aucune pupe, quel que soit le nombre d'œufs apportés initialement.

Par comparaison, les pontes de *D. radicum* relevées sur la parcelle extérieure sont en moyenne de 50 œufs/plant sur l'ensemble de la période de culture. A la fin de la récolte, nous avons trouvé moins d'une pupe (0,8) de *D. radicum* par plant.

1.1. Impact du ravageur sur la production

Afin d'observer si le ravageur apporté avait eu un impact sur la production des brocolis, le poids des pommes ainsi que le développement des plants ont été comparés entre les brocolis ayant reçu des quantités différentes d'œufs.

Le poids moyen des pommes de brocoli à la récolte est de 283,3 grammes. Cependant, on peut remarquer une large distribution autour de ce poids moyen (*Figure 19*).

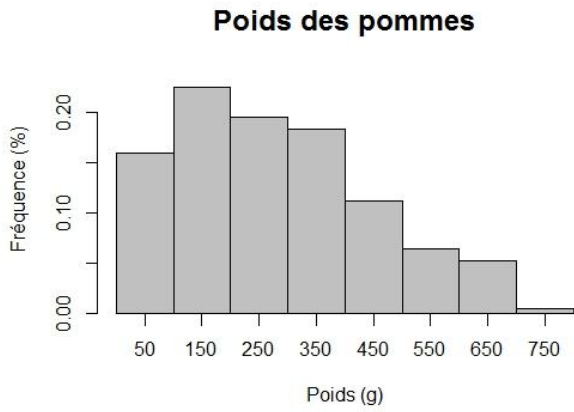


Figure 19 : Histogramme du poids des pommes de brocoli à la récolte dans les cages installées au Rheu.

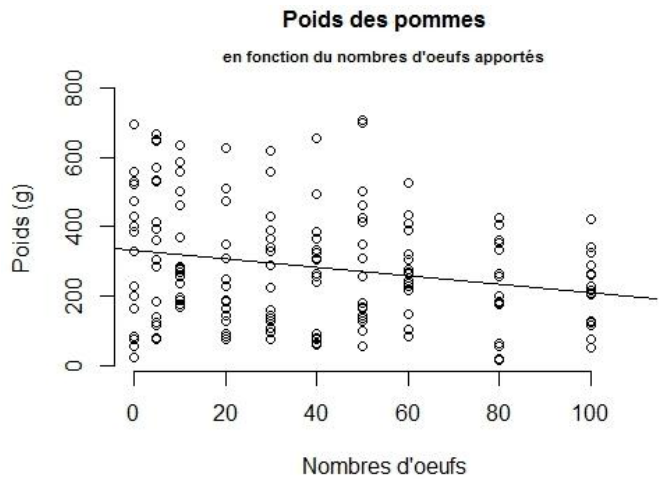


Figure 20 : Représentation du poids des pommes de brocoli à la récolte en fonction du nombre d'œufs apportés artificiellement sur les plants, parcelle expérimentale du Rheu. La droite représente le modèle linéaire calculé : $\text{Poids des pommes} = 328 - 1,18 \text{ œufs}$.



Figure 21 : Développement de 2 plants ayant reçu un nombre différent d'œufs : en bas 100 œufs, en haut 0 (photo personnelle, prise le 01/06/2016).

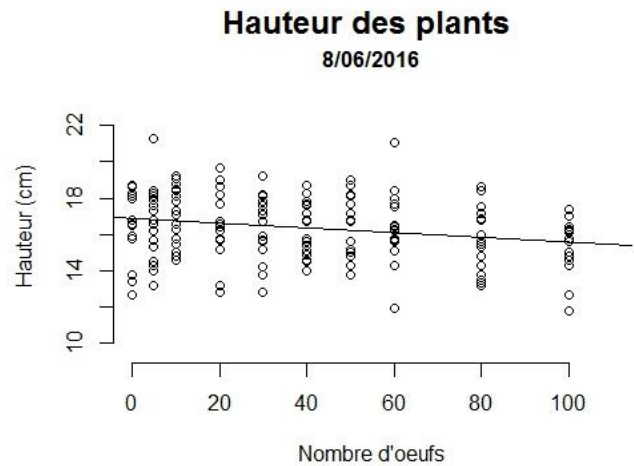


Figure 22 : Hauteur des plants de brocoli en fonction du nombre d'œufs reçus initialement, exemple des mesures du 8 juin 2016 sur la parcelle expérimentale du Rheu. La droite représente le modèle linéaire associé.

Afin de savoir si cette variabilité était due aux densités différentes d'œufs apportés, un modèle linéaire a été construit afin d'expliquer le poids des pommes par le nombre d'œufs apportés. L'ANOVA révèle un effet significatif du nombre d'œufs apportés ($p \leq 0,01^{**}$) tel que, plus le nombre d'œufs apportés est grand, plus le poids des pommes diminue. Le poids moyen d'une pomme de brocoli sans mouche du chou est de 328 g avec une perte de 1,18 g par œuf apporté (*Figure 20*).

Nous pouvons cependant remarquer une très grande variabilité pour le poids des pommes au sein d'un groupe de plants ayant reçu le même nombre d'œufs.

Cette variabilité entre les plants observée à la récolte sur le poids des pommes s'observe aussi au cours du développement des plants (*Figure 21*).

Le développement des plants s'est fait en 11 semaines, de la plantation (stade 2 à 3 vraies feuilles) à la récolte. Les premières pousses latérales sont apparues en semaine 19 soit 5 semaines après plantation, et les premières inflorescences en semaine 22 soit 8 semaines après la plantation.

Pour chaque variable mesurée au cours du développement, un modèle a été écrit afin d'expliquer la variable par le nombre d'œufs apportés sur le plant : modèle linéaire général pour la longueur et la largeur du limbe ainsi que la hauteur et modèle linéaire généralisé (loi de Poisson) pour le nombre de feuilles et de pousses latérales. Excepté pour le nombre de feuilles, le nombre d'œufs apportés a toujours un effet significatif sur la variable étudiée. Si on prend par exemple la hauteur des plants, l'effet du nombre d'œufs apportés est significatif ($p \leq 0,01^{**}$) avec une hauteur des plants qui diminue pour un nombre d'œufs apportés plus grand (-0,0055 cm par œuf apporté, moyenne sur la totalité de la période de culture). L'exemple de cette différence est représenté en *Figure 22*, pour les mesures réalisées le 08/06/2016.

Comme pour le poids des pommes, nous pouvons remarquer une très grande variabilité entre les plants ayant reçu le même nombre d'œufs.

Les résultats sont similaires pour le nombre de pousses latérales, la longueur et la largeur du limbe de la plus grande feuille.

Le nombre d'œufs apportés a donc un effet significatif sur le développement des plants : plus le nombre d'œufs augmente plus les plants sont petits, avec des petites feuilles et moins de pousses latérales. De plus, le nombre d'œufs apportés a un effet significatif sur la récolte puisque le poids des pommes diminue avec le nombre d'œufs apportés.

1.2. Efficacité du dispositif de défaunage

Les individus piégés sont principalement des carabes, des fourmis (hyménoptères sur le graphique), des staphylins et des araignées (*Figure 23*). L'abondance de ces populations ne diminue pas au cours du temps révélant un effet tardif du piégeage. On observe de plus un pic de population pour la semaine 19 qui peut s'expliquer par des températures très élevées la semaine précédente favorisant les émergences.

La composition des communautés de carabes (*Figure 24*) révèle la prédominance de 2 espèces sur les 17 relevées : *Metallina lampros* et *Phyla obtusa*. Ces deux espèces représentent plus des trois quarts des carabes piégés pour chaque semaine de suivi.

Si on regarde plus particulièrement les 3 semaines aux cours desquelles ont été menées les infestations artificielles (semaines 17, 18 et 19), il s'agit des semaines où le plus de carabidés

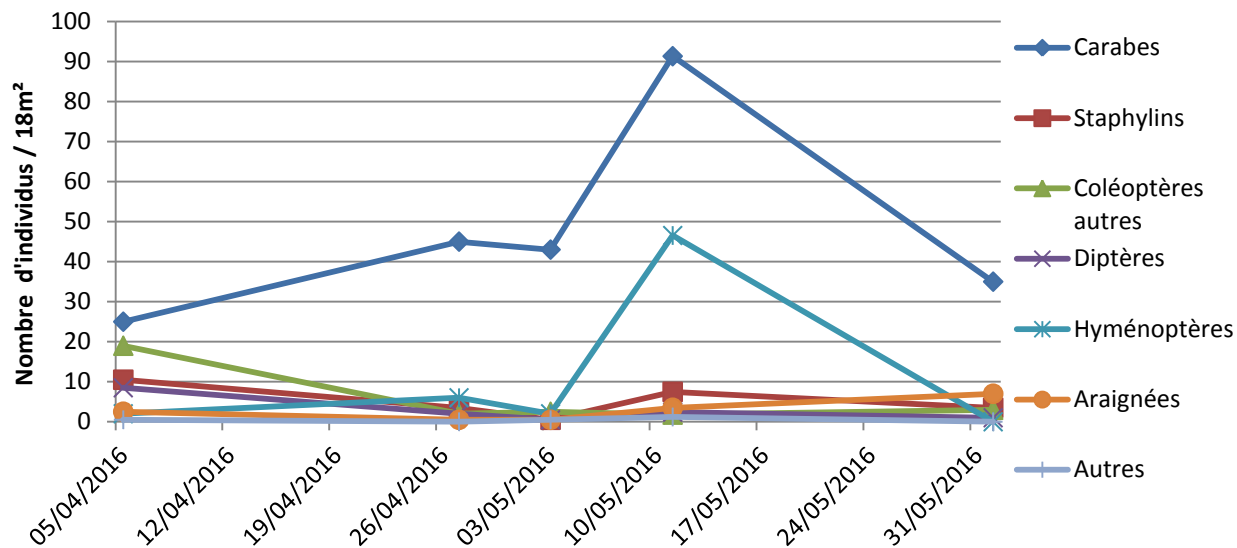


Figure 23 : Dynamique temporelle des différents ordres d'arthropodes capturés dans les pièges Barber au cours du temps, moyenne d'individus piégés sur 18m² par semaine sur la parcelle de l'INRA du Rheu.

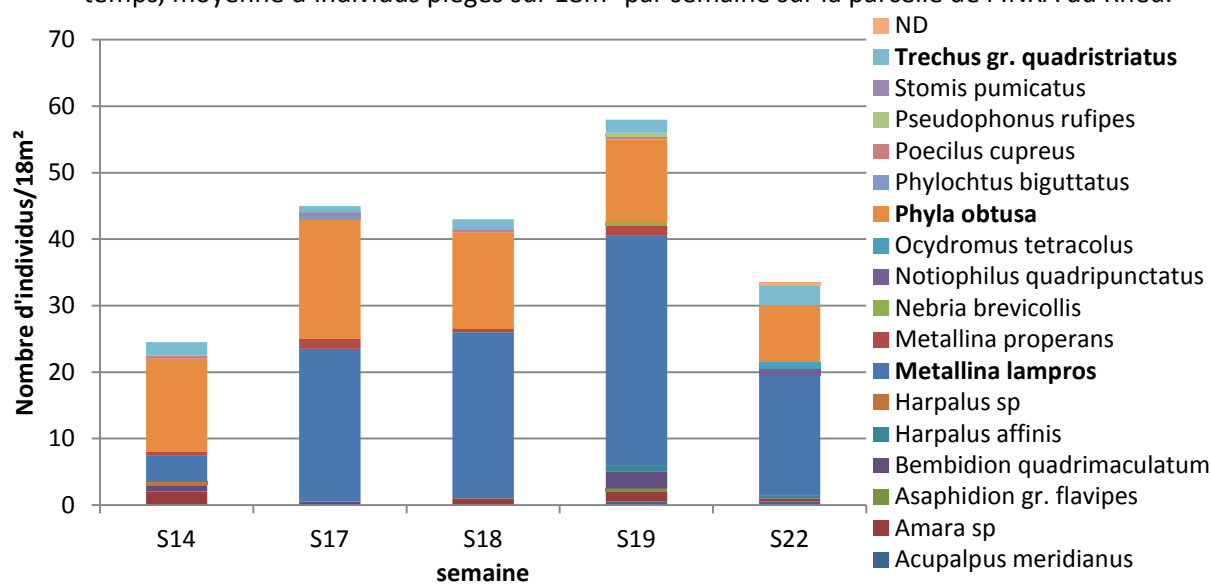


Figure 24 : Dynamique temporelle des différentes espèces de carabidés capturées dans les pièges Barber au cours du temps, moyenne d'individus piégés sur 18m² par semaine sur la parcelle de l'INRA du Rheu.

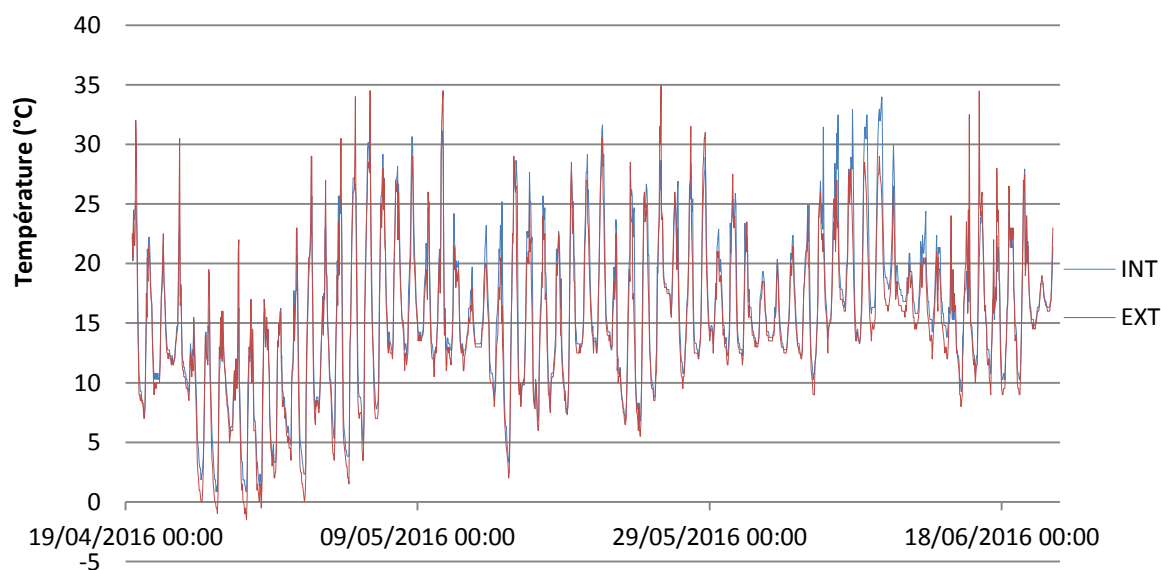


Figure 25 : Suivi des températures à l'intérieur (INT) et à l'extérieur (EXT) des cages insect-proof au cours du temps.

ont été piégés avec, respectivement, 45, 43 et 58 carabes piégés en moyenne sur 18m² au cours de ces semaines là.

Les communautés d'arthropodes piégés, en particulier les carabidés, n'atteignent jamais des niveaux de populations nuls au cours du suivi.

1.3. Suivi des températures et comparaison du développement entre extérieur et intérieur des cages insect-proof

Le relevé des sondes de température placées à l'intérieur d'une cage et sur la parcelle extérieure de brocolis révèle des températures moyennes supérieures à l'intérieur des cages (*Figure 25*). La différence s'observe en particulier sur les températures "extrêmes" de la journée avec en moyenne des températures minimales et maximales supérieure de 1 à 2°C à l'intérieur des cages par rapport à l'extérieur. On remarque en particulier qu'à l'extérieur des températures négatives sont observées en avril alors que la température ne descend jamais en dessous de 0°C dans les cages insect-proof.

Le développement des brocolis sur la parcelle extérieure a été plus lent que celui de ceux à l'intérieur des cages. En effet, lors de la récolte des brocolis sous les cages, les brocolis à l'extérieur n'avaient pas encore d'inflorescence visible, soit près de 3 semaines de retard puisque les premières inflorescences étaient visibles en semaine 22 pour les brocolis sous les cages et que la récolte a eu lieu en semaine 25.

Le poids moyen des plants de brocolis (racines + partie aérienne) a été comparé entre l'intérieur et l'extérieur des cages. En sachant que les brocolis à l'extérieur des cages avaient reçu en moyenne 50 œufs/plants (ponte naturelle suivie grâce à des pièges feutrine), la biomasse des brocolis à l'extérieur des cages est en moyenne 25 fois inférieure à celle des brocolis à l'intérieur ayant reçus un nombre d'œufs similaire (45 grammes à l'extérieur, 1120 à l'intérieur pour les plants ayant reçus 60 œufs) (*Figure 26*). Il faut cependant noter que les brocolis à l'extérieur ont subi les attaques d'autres bioagresseurs, notamment des pigeons pour les 4 premières semaines de développement et des chenilles de piéride du chou au cours des 3 dernières semaines avant la récolte.

Les brocolis cultivés sous les cages insect-proof ont donc bénéficié de températures moyennes supérieures par rapport à des brocolis cultivés en plein champ et se sont développés plus rapidement avec des biomasses au bout de 11 semaines de culture plus de 20 fois supérieures à la biomasse moyenne de brocolis à l'extérieur.

2. Evaluation de l'impact du contrôle biologique naturel

2.1. Impact des ennemis naturels sur les populations de *Delia radicum*

Les pièges feutrines nous ont permis de suivre la dynamique de ponte de la mouche du chou au cours du premier vol de la saison qui a eu lieu en mai sur le site de la station expérimentale de Pleumeur-Gautier (*Figure 27*).

Sur la parcelle suivie, le pic de ponte a eu lieu entre les semaines 18 et 21, avec un maximum de 45 œufs par feutrine en moyenne pour la semaine 19 (relevé le 12 mai).

En ponte cumulée sur l'ensemble de la période, on obtient une moyenne de 103 œufs par plant, ce qui vérifie bien notre hypothèse initiale de forte pression du ravageur dans cette

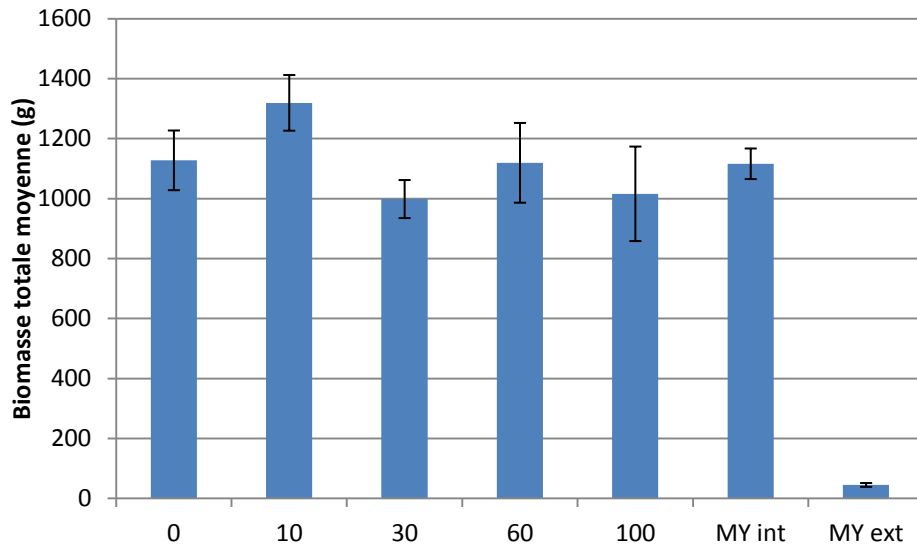


Figure 26 : Biomasse totale moyenne des plants en fonction du nombre d'œufs reçus, biomasse moyenne des brocolis sous les cages (MY int) et biomasse moyenne des brocolis sur la parcelle extérieure (MY ext). Barres d'erreur = erreur standard.

Pontes de *Delia radicum*

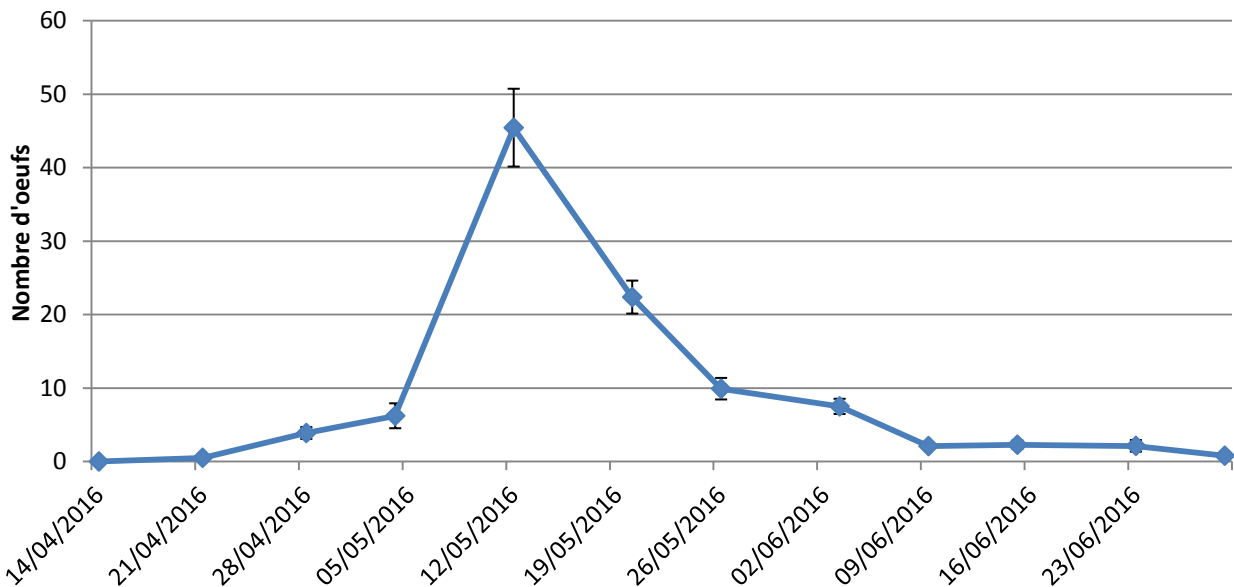


Figure 27 : Dynamique temporelle de ponte de *Delia radicum*. Moyenne des comptages relevés sur les 32 feutrine par semaine sur la parcelle de brocolis de la station expérimentale de Pleumeur-Gautier. Barres d'erreur = erreur standard.

Nombre de pupes *D. radicum*

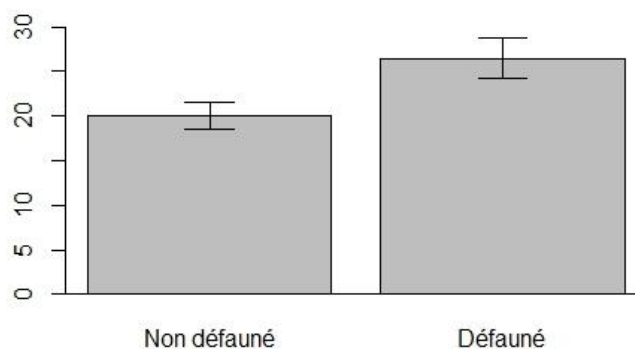


Figure 28 : Nombre de pupes de *Delia radicum* relevées dans les prélèvements de sol autour de chaque plant à Pleumeur-Gautier. Moyenne pour les deux modalités observées (défauné ou non). Barres d'erreur = erreur standard.

zone de culture légumière. Par comparaison, la valeur moyenne d'œufs pondus par plant sur l'ensemble de la période de culture de brocoli de printemps pour les relevés entre 2001 et 2015 en Bretagne est d'environ 40 œufs/plant avec un pic autour de 10 œufs par plant (BSV Bretagne – Légumes frais, 2016).

Le suivi des pièges feutrines au cours du temps permet aussi de comparer la ponte entre nos deux modalités : défauné ou non, afin de savoir si le dispositif de défaunage impacte la ponte de *D. radicum*. Le dispositif n'a pas d'effet significatif sur la ponte ($p=0,45$), nous pouvons donc considérer la ponte homogène sur l'ensemble des blocs suivis.

2.1.1. Effet de la prédation sur les populations de *Delia radicum*

Le nombre de pupes retrouvées dans le sol au moment de la récolte a été analysé en fonction des deux modalités expérimentales : micro-parcelle défaunée ou non (Figure 28). Il y a un effet significatif du défaunage sur le nombre de pupes ($p \leq 0,05^*$) avec en moyenne plus de pupes dans les blocs défaunés que dans les blocs non défaunés : **26** en moyenne pour les blocs défaunés, **20** pupes pour les blocs non défaunés.

Sachant que le nombre d'œufs était similaire quelle que soit la modalité, il y a donc une mortalité plus grande des individus de *D. radicum* avant d'atteindre le stade de pupes dans les blocs non défaunés. Cette mortalité est estimée à **81%** pour les blocs non-défaunés contre **69%** lorsque ces insectes sont piégés.

2.1.2. Effet du parasitisme sur les populations de *Delia radicum*

L'analyse des pupes a permis de calculer, pour chaque échantillon, un taux de parasitisme. Le taux de parasitisme moyen pour l'ensemble des pupes de *D. radicum* récoltées est de **47,2%**.

Les trois espèces majoritaires de parasitoïdes de mouche du chou sont des espèces qui peuvent voler, donc qui ne devraient pas être impactées par le dispositif de défaunage mis en place. Cette hypothèse a été vérifiée sur les *T. rapae* et sur les *Aleochara sp.*. Le dispositif de défaunage n'a pas d'effet significatif sur le nombre de pupes parasitées par *T. rapae* mais un effet significatif sur le nombre de pupes parasitées par *Aleochara sp.* ($p \leq 0,01^{**}$), avec plus d'*Aleochara sp.* retrouvés dans les pupes des blocs non défaunés que dans les pupes des blocs défaunés. Les pupes sont en moyenne parasitées à 24% par des *Aleochara sp.* et 17% par des *T. rapae* dans les blocs non défaunés contre 22% pour les *Aleochara sp.* et 19% pour les *T. rapae* dans les blocs défaunés.

Le parasitisme permet donc de réduire de près de la moitié les individus de *D. radicum* entre le stade larvaire et le stade adulte, limitant ainsi les émergences pour la génération suivante.

On observe donc une meilleure régulation des populations de *D. radicum* dans les blocs défaunés, avec une mortalité totale (entre les œufs et les adultes) supérieure, la différence étant principalement causée par le retrait des potentiels prédateurs du ravageur. Le défaunage impacte la régulation naturelle, expliquant cette différence de mortalité de la mouche du chou.

Nombre de feuilles

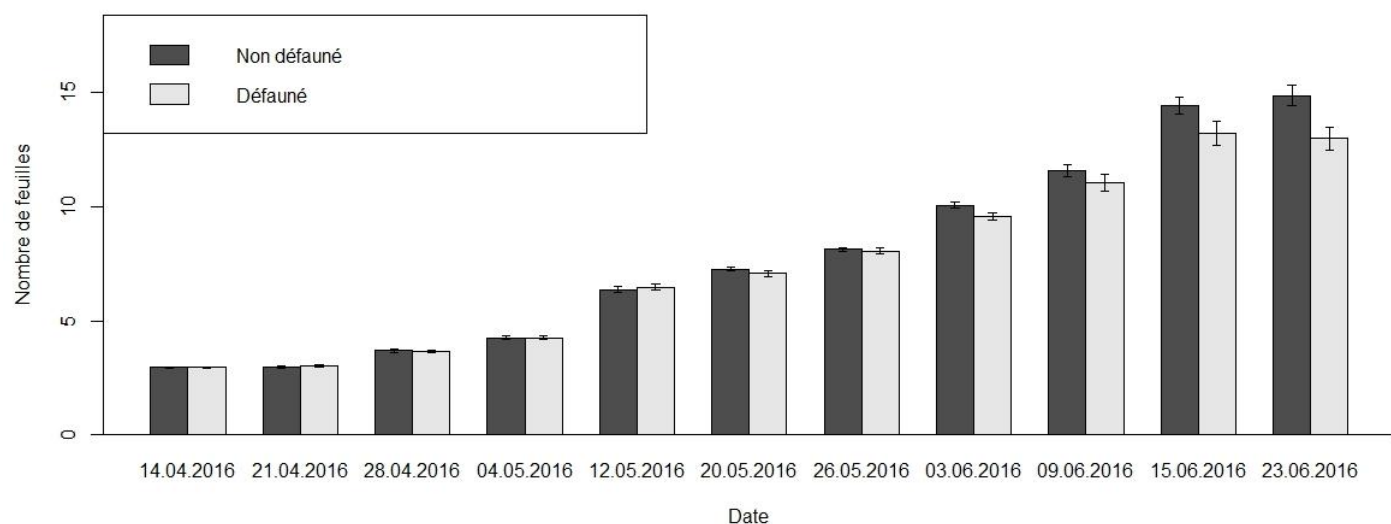


Figure 29 : Evolution du nombre de feuilles des plants dans les blocs défaunés et non défaunés au cours du temps à Pleumeur-Gautier. Barres d'erreur = erreur standard.

Mortalité

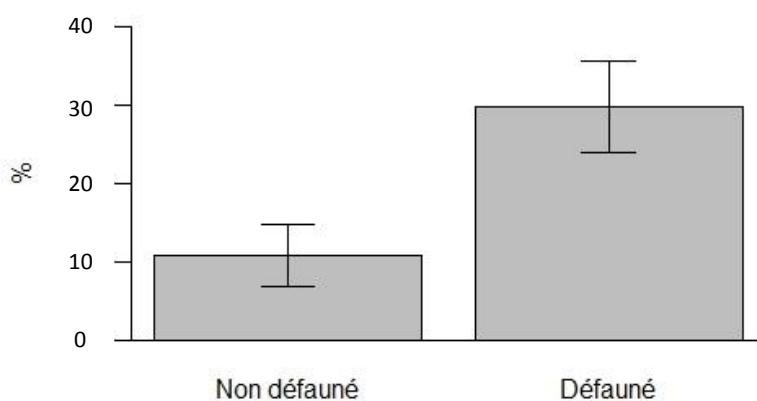
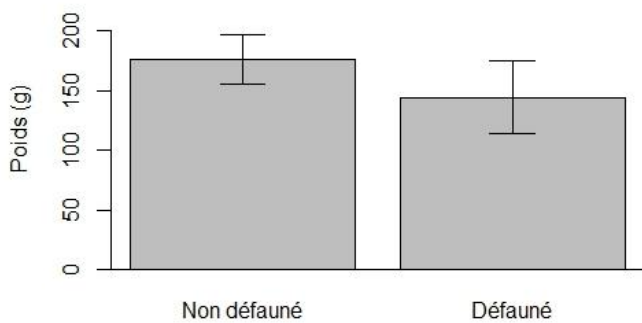


Figure 30 : Pourcentage de plants morts dans chaque modalité (défauné ou non), à Pleumeur-Gautier. Barres d'erreur = erreur standard.

Poids des pommes



Poids des pommes

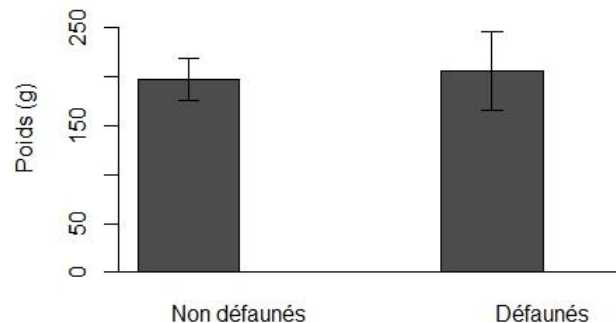


Figure 31 : Poids des pommes de brocolis à la récolte sur la parcelle de Pleumeur-Gautier. Moyenne pour les deux modalités observées (défauné ou non) en comptabilisant les plants morts (a), ou non (b). Barres d'erreur = erreur standard.

2.2. Impact du contrôle biologique naturel sur le développement des plants et la production

2.2.1. Développement des plants

De la plantation à la récolte, le développement des plants s'est fait en 13 semaines. Les premières pousses latérales sont apparues en semaine 19 soit 5 semaines après la plantation, et les premières inflorescences en semaine 22 soit 8 semaines après la plantation.

Les variables mesurées au cours du développement des plants ont été étudiées face aux deux modalités d'expérimentation : défauné ou non. Ces différentes mesures de développement et de croissance des plants ne semblent pas impactées par le défaunage excepté le nombre de feuilles. En effet, il y a un effet significatif du défaunage sur le nombre de feuilles des plants ($p \leq 0,05^*$) avec moins de feuilles pour les plants dans les blocs défaunés (Figure 29).

Cet effet est d'autant plus marqué que le développement des plants est avancé avec, pour la dernière semaine de mesure, une moyenne de 13 feuilles pour les plants dans les blocs défaunés et une moyenne de 15 feuilles pour les plants dans les blocs non défaunés.

2.2.2. Mortalité de plants

La mortalité des plants a aussi été comparée entre les deux modalités. Pour cela, les données utilisées sont celles relevées à la récolte. Un modèle linéaire généralisé (loi binomiale) a été utilisé. Le défaunage a un effet significatif ($p \leq 0,05^*$) sur la mortalité des plants avec plus de mortalité dans les blocs défaunés que dans les blocs non défaunés (Figure 30). La mortalité moyenne des plants est de **11%** dans les blocs non défaunés et de **30%** dans les blocs défaunés, soit une mortalité 3 fois plus importante dans les blocs défaunés.

2.2.3. Production

Enfin, si on s'intéresse à la production, le poids moyen des pommes dans les blocs défaunés est de 144,6 grammes (3,2 t/ha à la densité plantée) contre 175,9 grammes (3,9 t/ha) dans les blocs non défaunés. Ce poids moyen comptabilise aussi les plants morts qui ont donc un poids nul. Le rendement est donc inférieur dans les blocs défaunés avec une différence de 0,7 tonnes à l'hectare. Cette différence n'est cependant pas significative (Figure 31, a). De plus, si on compare uniquement les plants vivants, on obtient des poids moyens très similaires (Figure 31, b).

2.2.4. Etat du système racinaire des plants

Un autre critère potentiel de l'évaluation des dégâts est l'état du système racinaire. Les racines de tous les plants ont été notées et cette note a été évaluée en fonction des deux modalités expérimentales. Le défaunage a un effet significatif sur l'état du système racinaire ($p \leq 0,05^*$) avec en moyenne des notes plus élevées (donc plus de surface racinaire attaquée) pour les plants dans les blocs défaunés que dans les blocs non défaunés (Figure 32).

On peut cependant noter que la différence entre les plants dans les blocs défaunés et ceux dans les autres est très faible avec en moyenne 53,4% de la surface racinaire attaquée pour les brocolis dans les blocs non défaunés contre 62,7% pour ceux dans les blocs défaunés.

Etat du système racinaire
pourcentage moyen de surface attaquée

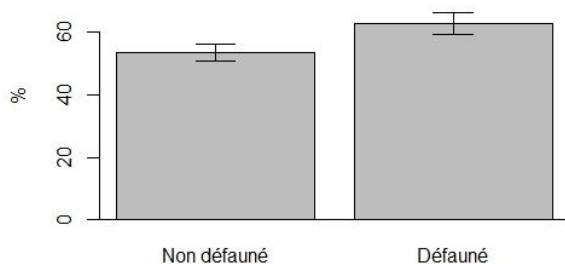


Figure 32 : Pourcentage moyen de surface du système racinaire attaquée pour les plants des blocs non défaunés et ceux des blocs défaunés, à Pleumeur-Gautier. Barres d'erreur = erreur standard.

Etat du système racinaire en fonction du nombre de pupes de *Delia radicum*

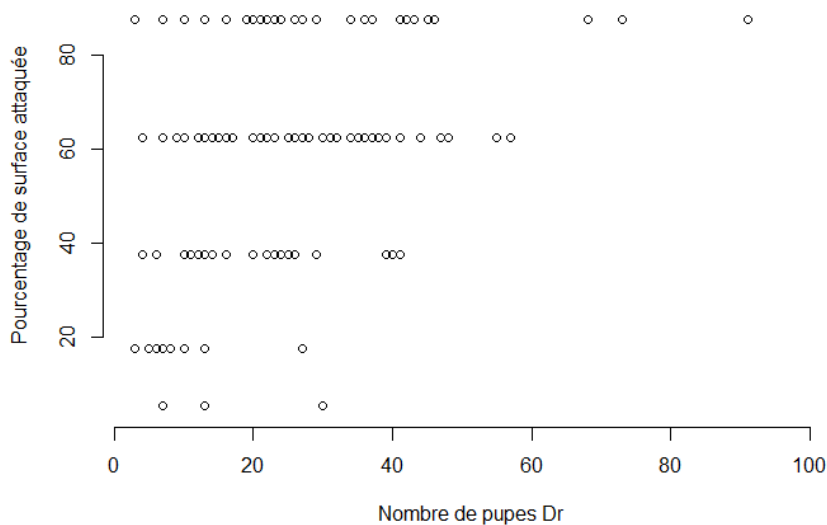


Figure 33 : Etat du système racinaire des plants en fonction du nombre de pupes de *Delia radicum* retrouvées à leur pied.

Poids des pommes
en fonction de la note attribuée au système racinaire

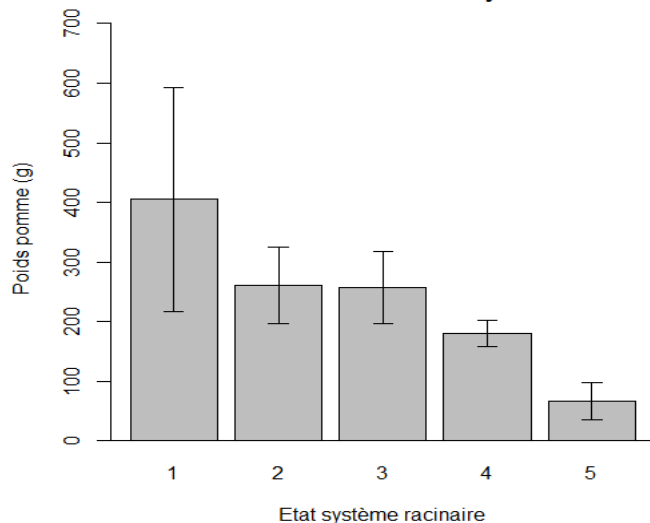


Figure 34 : Poids des pommes de brocolis à la récolte en fonction de la note d'attaque attribuée au système racinaire : 0 = pas de dégât, 1 = dégâts < 10% de la surface racinaire, 2 = dégâts recouvrant entre 10 et 25% de la surface racinaire, 3 = entre 25 et 50% de la surface racinaire, 4 = entre 50 et 75% et 5 = dégâts > 75%. Barres d'erreur = erreur standard.

Nous avons ensuite cherché à savoir si cet état du système racinaire était lié au nombre de pupes que l'on retrouvait au pied du plant. On constate un effet significatif du nombre de pupes sur l'état du système racinaire ($p \leq 0,001^{***}$). Plus le nombre de pupes augmente, plus la surface du système racinaire est attaquée (Figure 33).

Enfin, l'état du système racinaire étant directement corrélé au nombre de pupes, nous avons cherché à savoir s'il pouvait expliquer le poids des pommes à la récolte. On constate que plus la note sur le système racinaire est grande, plus le poids de la pomme de brocoli est faible ($p \leq 0,01^{**}$) (Figure 34).

La diminution de la pression de prédation sur la mouche du chou grâce au défaunage entraîne donc des pertes de récolte plus importantes. Cela se traduit par un développement des plants moins bon, une mortalité précoce des plants supérieure et un système racinaire plus attaqué.

2.3. Efficacité du défaunage et suivi des populations d'arthropodes telluriques au cours du temps

Bien que les populations n'atteignent jamais un niveau nul, le suivi des individus capturés dans les pièges Barber au cours du temps révèle une diminution globale de l'abondance des différents taxons (Figure 35). On observe, de plus, un pic d'émergence relevé le 12 mai.

Les communautés les plus présentes sont les coléoptères en général (carabes, staphylins et autres).

Le dispositif de défaunage mis en place ne présente donc pas une efficacité totale mais parvient à réduire les populations d'ennemis naturels.

Si on s'intéresse plus particulièrement aux populations de carabes, on peut remarquer une évolution dans la diversité des espèces collectées au cours du temps, avec un total de 26 espèces différentes observées (Figure 36). Les espèces majoritaires sont : *Metallina lampros*, *Acupalpus meridianus*, *Ocydromus tetracolus*, *Amara* sp. et *Pterostichus melanarius*. Les espèces qui apparaissent le plus tôt dans la saison sont plutôt des espèces de petite taille (<10mm) tandis que les espèces de plus grande taille n'émergent principalement qu'à partir de début juin (Tableau 3).

Les espèces présentes au moment du pic de ponte (entre les semaines 18 et 21) et donc potentiellement intéressantes pour la prédation des œufs et des larves sont : *Metallina lampros*, *Acupalpus meridianus*, *Ocydromus tetracolus*, *Amara* sp., *Poecilus cupreus* et *Nebria brevicollis* (Tableau 3).

Discussion

Les deux expériences menées ont montré que la nuisibilité de la mouche du chou s'exprimait au cours du développement des plants et jusqu'à la récolte. En effet, plus l'attaque est sévère (niveaux de populations plus élevés) plus les plants de brocolis présentent une mortalité précoce importante. Le développement et la croissance des plants sont aussi ralentis. De plus, à la récolte, on constate que le poids des pommes est moindre

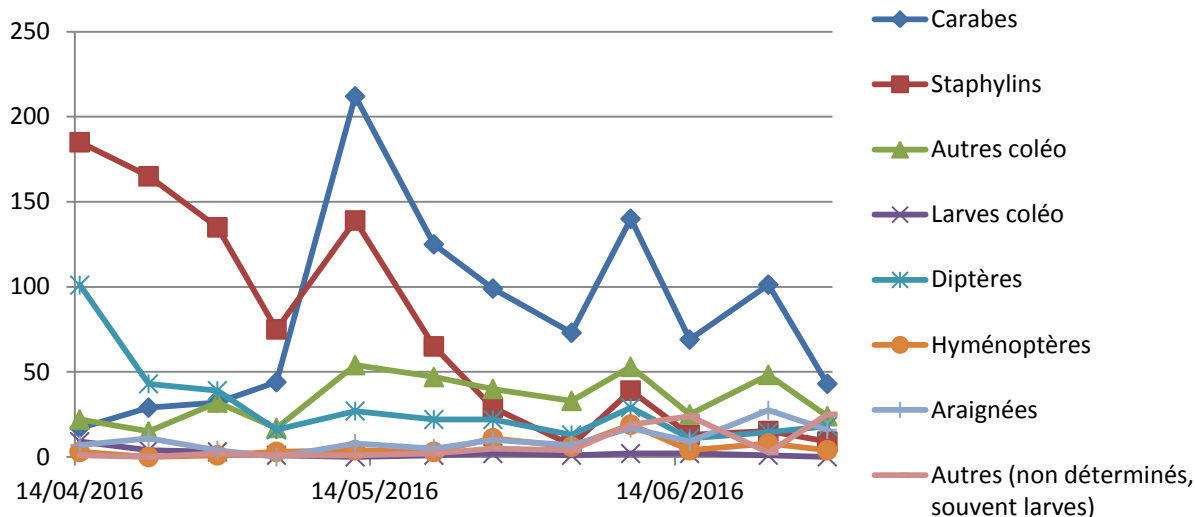


Figure 35 : Dynamique temporelle des différents ordres d'arthropodes capturés dans les pièges Barber au cours du temps, moyenne des individus piégés par semaine sur une surface de 9m², à Pleumeur-Gautier.

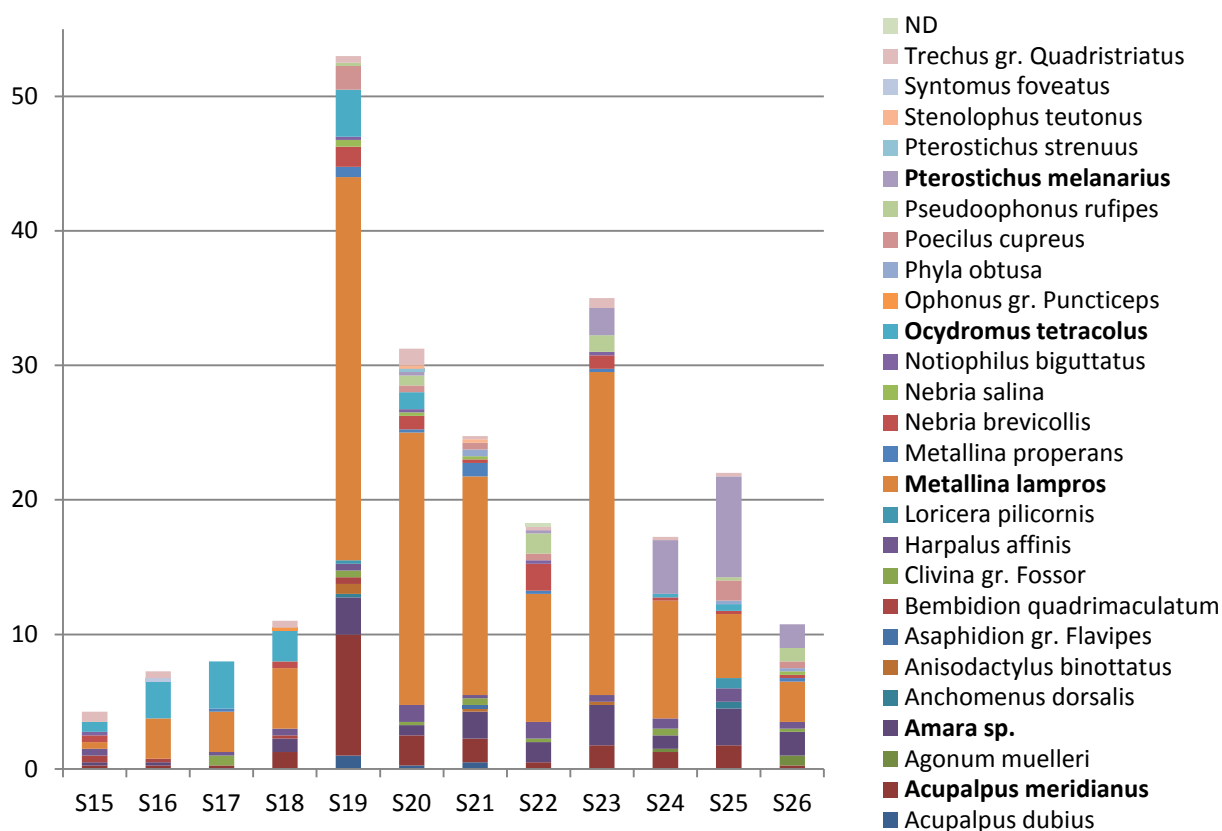


Figure 36 : Dynamique temporelle des différentes espèces de carabidés capturés dans les pièges Barber au cours du temps avec abondance de chaque espèce. Moyenne des individus piégés par semaine sur 9m² à Pleumeur-Gautier.

Nom de l'espèce	Taille (mm)	Nombre d'œufs consommés par jour
Acupalpus meridianus	3,5	20
Amara sp.	7,5	81
Metallina lampros	3,7	12
Nebria brevicollis	12	0
Ocydromus tetracolus	5,5	45
Poecilus cupreus	12,2	112
Pterostichus melanarius	15	0

Tableau 3 : Taille moyenne des principaux carabes capturés dans les Côtes d'Armor à la station expérimentale de Pleumeur-Gautier et nombre moyen d'œufs consommés par jour pour ces espèces (tiré de Finch et al., 1996).

pour les plants les plus attaqués. Cette nuisibilité s'exprime notamment par un système racinaire plus attaqué.

Nous avons aussi pu montrer que le contrôle biologique naturel, exercé principalement par les communautés de carabes, par les espèces du genre *Aleochara* et par *T. rapae*, avait un impact significatif sur les niveaux de population de mouche du chou. En effet, la prédation par les individus épigés permet d'augmenter la mortalité entre le stade œuf et le stade pupes des mouches du chou (de 69% à 81%) et le parasitisme de réduire de moitié les individus adultes émergents des pupes.

Nos résultats montrent que le contrôle biologique naturel permet de réduire les dégâts causés par *D. radicum* sur la culture de brocoli et donc de réduire les pertes de récolte engendrées par la présence de ce ravageur. En particulier, en conditions de forte pression de mouche du chou, le contrôle biologique naturel permet de réduire par 3 la mortalité précoce des plants causée par les attaques de mouche du chou.

Enfin, il a été estimé qu'à la densité de plantation choisie pour les expériences, le contrôle biologique naturel permettrait de diminuer les pertes de rendement de 0,7 tonnes par hectare.

1. Méthodologie

1.1. Infestation artificielle en conditions contrôlées

Le choix de mener l'expérience en plein champ sous des cages insect-proof en réalisant une infestation artificielle n'a permis de répondre que partiellement à l'objectif fixé, déterminer la nuisibilité réelle de la mouche du chou sur brocoli de printemps. En effet, nous avons observé un effet significatif du nombre d'œufs apportés sur le développement et la croissance des plants ainsi que sur la production, mais en revanche les dégâts sont limités au regard des densités d'œufs maximales apportées et aucune pupes n'a été retrouvée dans les prélèvements de sol autour des plants, traduisant une mortalité complète des insectes apportés.

Ces résultats peuvent tout d'abord s'expliquer par l'impact des cages sur le développement des plants. Nous avons pu constater que la température sous les cages était en moyenne supérieure à celle à l'extérieur. De plus, la comparaison des brocolis à l'intérieur et de ceux sur la parcelle extérieure révèle un développement et une croissance beaucoup plus rapides sous les cages (décalage de végétation de plus de 3 semaines). Pour d'autres essais en plein champ sur la même variété de brocolis, la récolte débute habituellement 14 semaines après la plantation contre 11 semaines ici pour notre expérience (GRAB, 2010). Cette croissance rapide pourrait produire des plants plus vigoureux, moins sensibles aux attaques du ravageur au moment du pic de ponte. Des plants moins stressés et plus développés sont supposés en effet avoir un potentiel de résistance voire même de compensation face aux attaques de bioagresseurs supérieur à des jeunes plants (Pedigo *et al.*, 1986 ; Ellis *et al.*, 1979).

Malgré cela, on observe un effet significatif du nombre d'œufs apportés sur le développement et la production des plants. Cela signifie donc que des œufs ont éclos sous les cages et que des larves ont pu attaquer les plants, ces larves n'ayant pas survécu jusqu'au stade pupes. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer la mortalité des individus.

Nous avons choisi d'apporter des œufs. Traditionnellement, c'est le stade biologique de la mouche du chou utilisé dans la surveillance des populations du ravageur. Il s'agit d'un stade probablement assez sensible aux manipulations. Cependant, il aurait été complexe d'apporter des larves ou des adultes. En effet, le stade larvaire est un stade encore plus sensible que les œufs, avec une mortalité naturelle souvent supérieure à 60% (Hughes et al., 1959). De plus, l'apport d'adultes ou de pupes n'aurait pas permis de contrôler le nombre d'œufs pondus sur chaque plant.

Les œufs ont été déposés au pinceau au collet des plants juste au-dessus du niveau du sol. Cela les expose plus qu'avec une ponte naturelle puisque les femelles pondent en général dans les aspérités à la surface du sol (2 premiers centimètres), protégeant ainsi mieux leurs œufs (Finch et al., 1975). Sachant que la température dans les cages était supérieure à la température en plein champ, il est possible que ces œufs aient été plus sensibles au dessèchement par exemple. Une expérience préliminaire réalisée en chambre climatique sur des brocolis cultivés dans des pots avait permis de tester la méthode d'apport des œufs, mais elle n'a pas permis d'anticiper la situation rencontrée au champ. En effet, l'efficacité supérieure à celle obtenue dans l'expérience sous cages s'explique probablement par un faible nombre de facteurs de variation (pas de prédation, température, humidité, vent, contrôlés, qualité du sol...).

Enfin, la dernière hypothèse possible est la présence de prédateurs de la mouche du chou qui pourraient impacter les populations du ravageur apporté artificiellement. Le défaunage réalisé dans les cages n'a été en effet que partiellement efficace (voir §1.2 ci-dessous). Les carabes relevés dans les pièges, notamment *Metallina lampros* et *Phyla obtusa*, sont capables de consommer une grande quantité d'œufs et/ou de larves ce qui pourrait expliquer la mortalité du ravageur (Finch et al., 1996 ; Hughes et al., 1959). Les fourmis capturées dans les pièges Barber et présentes en grande quantité dans les cages pourraient aussi être responsables d'une prédation sur les œufs (Schoene, 1916). De plus, les cages insect-proof pourraient apporter un biais sur le comportement des individus qui échappent au piégeage. En effet, si elles empêchent toute entrée d'insectes venus de l'extérieur, elles limitent aussi les sorties. Ainsi, elles pourraient amplifier le phénomène de prédation en concentrant de potentiels ennemis naturels de la mouche du chou dans les cages. Si ces populations trouvent peu de ressources alimentaires à l'intérieur des cages, elles ne peuvent pas se disperser à l'extérieur et pourraient alors se concentrer sur la ressource disponible à l'intérieur des cages : les œufs de mouche du chou apportés.

D'autres expériences d'évaluation de la nuisibilité de ravageurs sont réalisées en infestation naturelle, ce qui peut aussi être une alternative à l'infestation artificielle (Rueda et al., 2007). Cependant, cette approche corrélative, ne permet pas de contrôler tous les effets agissant sur le nombre de ravageurs ou sur le développement des plants. Elle exige d'étudier un grand nombre de situations différentes pour avoir des conditions d'infestation naturelle différentes à comparer en terme de nuisibilité (Cortesero & Le Ralec, 2014), mais cela multiplie la variabilité d'autres facteurs tels que les conditions climatiques ou l'environnement parcellaire, et rend difficile la comparaison entre les différentes situations.

1.2. Pertinence des variables de croissance et développement mesurées sur les plants de brocoli

Afin d'évaluer la nuisibilité de la mouche du chou, différentes variables ont été mesurées, en particulier des variables qui concernent directement la production. Ce type de

variables est souvent utilisé dans l'étude la nuisibilité de ravageurs (Pedigo *et al.*, 1986 ; Zadocks, 1985).

Cependant, d'autres variables concernant indirectement la production peuvent être utilisées, par exemple lorsqu'il s'agit d'organes aériens (feuillage), la sévérité (nombre d'organes de la plante attaqués) est souvent choisie comme variable, ce qui n'est pas réalisable dans le cas d'attaques du système racinaire (Maleki *et al.*, 2015 ; Savary *et al.*, 2000). Nous avons choisi de mesurer des variables liées à la physiologie de la plante dans le but d'avoir un suivi de la nuisibilité tout au long de la période de culture. Deux types de variables avaient été sélectionnées : des variables liées au développement des plants (nombre de feuilles, nombre de pousses latérales, apparition de l'inflorescence), et des variables indiquant la croissance (hauteur des plants, longueur et largeur du limbe de la plus grande feuille).

Les deux expériences menées présentent des résultats différents, dans un cas seul le nombre de feuilles est impacté significativement par le niveau de population du ravageur, dans l'autre toutes les variables sont impactées sauf le nombre de feuilles. On ne peut donc pas généraliser l'utilisation de ces variables pour évaluer la nuisibilité dans le système mouche du chou-brocoli. On peut cependant relever un effet significatif du ravageur sur le développement et la croissance des plants de brocolis dans nos expériences.

1.3. Dispositif de défaunage

Dans les deux expériences menées, un dispositif de défaunage a été mis en place. Ce dispositif est principalement composé de pièges Barber. Le suivi des individus capturés dans les pièges Barber montre une efficacité partielle de ce dispositif. Deux hypothèses sont possibles pour expliquer cette observation : soit le stock initial d'individus était trop important et la densité de pièges insuffisante pour les capturer tous, soit les individus peuvent passer outre le dispositif de barrières mis en place à Pleumeur-Gautier.

Les pièges Barber sont des pièges passifs, ils pourraient donc ne pas avoir une efficacité suffisante sur le piégeage des insectes. Une augmentation de la densité de pièges au mètre carré ne suffirait sans doute pas à augmenter l'efficacité de piégeage, du fait de la dynamique d'émergence des insectes (émergences étalées dans le temps).

Quant au dispositif de barrières semi-enterrées il est possible que certains arthropodes puissent passer cet obstacle, en particulier les insectes qui volent ou encore les araignées (Maret *et al.*, 2014). Ce système est *a priori* efficace sur les communautés de Carabidés puisqu'elles tendent à diminuer au cours du temps ce qui prouve que les carabes ne parviennent pas à recoloniser la micro-parcelle (Carrillo *et al.*, 2007). Ce dispositif ne peut cependant pas avoir d'effet sur les ennemis naturels de la mouche du chou capables de vol, en particulier *T. rapae*. Cela devrait être le cas des *Aleochara* sp. qui peuvent aussi voler cependant on remarque que ces insectes sont impactés par le dispositif de défaunage avec moins de parasitisme des pupes dans les blocs défaunés que dans les blocs non défaunés. De plus on constate que les piégeages de staphylins (non identifiés au genre) présentent la même dynamique décroissante que les carabes. Il semblerait donc que ces insectes aient un déplacement terrestre pour leur recherche de proies. Ces résultats sont confirmés par des observations faites au champ ou en laboratoire sur des individus vivants.

L'efficacité partielle du défaunage a eu des conséquences pour les deux expériences menées. Pour l'expérience d'infestation artificielle, tous les ennemis naturels de la mouche du chou n'ont pas été éliminés et ils ont eu semble-t-il un effet très fort sur les populations apportées artificiellement. Pour l'expérience sur le contrôle biologique en condition d'infestation naturelle, l'effet des ennemis naturels de la mouche du chou, en particulier les Carabidés, est probablement sous-estimé. En effet, on compare les effets observés sur le développement, la mortalité et la production des plants dans les blocs non défaunés et dans les blocs défaunés, en associant ces effets aux communautés d'ennemis naturels piégés. Cependant, puisqu'on ne piège pas tous ces ennemis naturels, il est possible que les communautés réellement présentes aient un effet encore plus important. Une expérience conduite en 2014 comparant des parcelles défaunées à des parcelles en milieu ouvert de même surface avec la même densité de pièges, montre que l'abondance des arthropodes capturés a tendance à augmenter à cette saison en milieu ouvert alors que le dispositif de défaunage permet une diminution suffisante pour limiter la pression de ces individus sur les populations de mouche du chou (Maret *et al.*, 2014). Le niveau de défaunage obtenu dans notre expérience permet de diminuer fortement la pression de prédation et d'en observer les effets.

2. Impact de la mouche du chou sur la culture de brocolis

Les deux expériences menées montrent un effet significatif de la mouche du chou sur la culture de brocolis. En effet, plus il y a d'individus (œufs apportés ou ponte naturelle), plus le développement des plants et la croissance sont ralentis. De même, plus il y a de ravageurs, plus la mortalité précoce des plants est importante, diminuant ainsi la production. Dans les deux expériences, la présence du ravageur s'accompagne d'une diminution du poids moyen des pommes et donc d'un rendement moindre. La représentation de la nuisibilité en fonction du nombre d'individus ne présente cependant pas d'effet seuil. On observe en effet un effet continu, avec une nuisibilité mesurable dès les plus faibles densités et qui augmente avec le nombre d'œufs.

De plus, nous observons une très grande variabilité de réponse des plants aux attaques de mouche du chou. Cette variabilité entre les plants est notamment très importante à la récolte, au niveau du poids des pommes. Elle peut s'expliquer par la variabilité naturelle qui existe entre les plants d'une même variété. En effet, l'homogénéité est un critère très important en sélection des variétés, avec pour les choux en général un objectif de récolte en un seul passage qui n'est pour le moment pas encore atteint (Brand *et al.*, 2013). Cette variabilité naturelle oblige les producteurs à réaliser la récolte en plusieurs fois. En Bretagne par exemple, les brocolis sont en moyenne récoltés sur 7 à 10 jours, en 3 à 5 passages. De plus, pour le poids des pommes, même en étalant la récolte on obtient des pommes variant entre 200 et 800 grammes pour chaque passage (V. Estorgues, communication personnelle). Cela peut donc expliquer la variabilité que l'on observe quant au poids des pommes de brocolis à la récolte, ces pommes ayant été récoltées toutes à la même date.

Malgré cette variabilité, le nombre de ravageurs a un effet significatif sur le poids des pommes : plus il y a d'œufs au pied d'un plant, plus le poids de la pomme diminue.

Un possible effet de compensation face aux attaques de la mouche du chou a été relevé sur les plants de brocolis. En effet, l'estimation du poids moyen des pommes à la récolte pour les brocolis cultivés à la station expérimentale de Pleumeur-Gautier montre des pommes en moyenne plus grosses pour les brocolis ayant survécu aux attaques de la mouche du chou dans les blocs défaunés que pour ceux des blocs non défaunés. Ce résultat paraît surprenant car les brocolis des blocs défaunés ont subi une pression plus importante de la mouche du chou : on trouve en effet en moyenne plus de pupes à leur pied. Il est possible que les plants aient un potentiel de compensation face aux attaques de ravageurs assez important, en particulier en reformant des racines adventives. Une attaque pourrait même stimuler le développement du plant si celui-ci y résiste, il s'agit du phénomène d' "overcompensation" décrit dans Pedigo *et al.* (1986). De plus, la mortalité supérieure dans les blocs défaunés pourrait conduire à une diminution de la compétition entre les plants, favorisant ainsi les plants qui survivent. Cela pourrait aussi expliquer le meilleur développement des plants survivants dans les blocs défaunés par rapport à ceux dans les blocs non défaunés où la mortalité est moindre.

3. Impact du contrôle biologique naturel sur la nuisibilité de la mouche du chou

3.1. Comparaison des communautés de carabes entre les 2 sites expérimentaux

Le suivi des communautés de carabidés sur les deux sites d'étude montre une augmentation de la diversité au cours du temps, d'avril à juillet, avec l'émergence d'abord des espèces de petite taille (*Metallina lampros*, *Phyla obtusa*) puis des plus grandes (*Poecilus cupreus*, *Pterostichus melanarius*). Certaines espèces, en particulier *Metallina lampros*, sont communes aux deux sites et prédominantes dans les deux cas. On remarque cependant une diversité beaucoup plus faible sur la parcelle de l'INRA au Rheu que dans la station expérimentale de Pleumeur-Gautier avec 17 espèces différentes dont deux espèces très majoritaires toute la saison contre 26 espèces différentes et 5 à 6 espèces principales à la station expérimentale. Notamment, les espèces de grande taille sont très peu observées sous les cages.

Les niveaux de populations des individus piégés présentent une évolution similaire sur les deux sites avec un pic d'abondance autour du 12 mai, probablement lié aux fortes températures de la semaine précédente, accélérant les émergences. L'abondance des individus est également plus grande à Pleumeur-Gautier qu'au Rheu. Les populations de carabes sont quatre fois plus abondantes sur la parcelle de la station expérimentale de Pleumeur-Gautier.

Plusieurs hypothèses pourraient permettre d'expliquer cette différence entre les populations des communautés de carabes des deux sites expérimentaux. La station expérimentale est en agriculture biologique contrairement aux parcelles de l'INRA au Rheu. Or, il est prouvé que l'agriculture biologique favorise la présence et la diversité des ennemis naturels, en particulier les carabes (Meyling *et al.*, 2013 ; Dritschilo *et al.*, 1980 ; Da Silva *et al.*, 2008).

Le contexte agronomique pourrait aussi expliquer cette différence. En effet, la station expérimentale se trouve dans une zone de cultures légumières, les ravageurs associés à ces

cultures sont donc très souvent présents et en grande quantité dans cette zone par rapport à un zone de polyculture comme au Rheu. Les auxiliaires associés à ces ravageurs pourraient également être plus présents dans ces zones.

Sur la station expérimentale, l'étude en parallèle des dynamiques de population de carabidés et des pontes de mouche du chou permet de dégager les espèces *a priori* les plus intéressantes pour la prédation des œufs et des larves de ce ravageur. Mais le potentiel de prédation des ces espèces dépend aussi de leur régime alimentaire, spécialisé sur les œufs et/ou larves de mouche ou plus généraliste. Les espèces présentes au moment clé par rapport aux pontes de mouche sont *Metallina lampros*, *Acupalpus meridianus*, *Ocydromus tetracolus*, *Amara* sp., *Poecilus cupreus* et *Nebria brevicollis*. Les capacités de prédation des œufs de mouche du chou de ces espèces ont été évaluées au laboratoire (Finch *et al.*, 1996) : ces espèces sont capables de manger entre une dizaine et plus de 80 œufs par jour. Cependant, cette intensité de prédation n'est pas directement transposable aux conditions de plein champ, où il peut y avoir un large choix de proies. Les espèces du genre *Amara* sont par exemple plutôt connus pour être phytophages (Roger *et al.*, 2013). Si on compare ces espèces potentiellement intéressantes pour la prédation de la mouche du chou avec celles observées dans les cages sur la parcelle de l'INRA du Rheu, on constate que *Metallina lampros* est, en abondance, très important en particulier au moment de l'apport des œufs et donc pourrait être responsable d'une forte pression de prédation sur les individus apportés artificiellement.

3.2. Impact des ennemis naturels sur les populations de *Delia radicum* et sur les dégâts causés par ce ravageur sur la culture de brocolis

L'expérience menée en excluant en plein champ les ennemis naturels épigés a montré que ceux-ci avaient un impact significatif sur les populations de *D. radicum*. En effet, la prédation, en particulier celle due aux carabes, augmente la mortalité du ravageur avant pupaison. De plus, la présence de parasitoïdes permet de réduire les émergences d'adultes de plus de 50%, permettant ainsi de réduire les populations pour les vols suivants. L'estimation de la mortalité de *D. radicum* entre le stade larvaire et le stade adulte par parasitisme est facilement estimable puisque le contenu de l'ensemble des pupes récoltées a été évalué. En revanche, la mortalité par prédation entre le stade œuf et le stade pupa est beaucoup plus difficile à évaluer. Ici, l'estimation a été faite en comparant la ponte cumulée moyenne au sein d'un bloc, au nombre moyen de pupes retrouvées au pied de chaque plant du même bloc. Il s'agit donc du suivi de deux populations sur des plants différents. De plus, il est possible que les comptages dans les feutres sous-estiment le nombre réel d'œufs pondus (Bligaard *et al.*, 1999).

Nous avons aussi montré que la présence d'ennemis naturels était corrélée à une diminution significative des dégâts causés par la mouche du chou sur la culture de brocolis. Jusqu'à présent, très peu d'études parvenaient à faire le lien entre diminution des populations de ravageurs et réduction des pertes engendrées par ce ravageur. Nos résultats apportent des éléments objectifs pour justifier l'intérêt de développer des méthodes de gestion des cultures favorisant ces ennemis naturels.

L'approche utilisée pour cette étude présente une certaine originalité. En effet, le potentiel de régulation des ennemis naturels est souvent évalué grâce à la mise en place de proies artificielles dans les parcelles, par exemple en utilisant des cartes de prédation (Geiger *et al.*, 2010), comme dans le projet SEBIOPAG qui est un réseau pour l'étude des Services Ecosystémiques assurés par la Biodiversité dans les Paysages Agricoles (Sebiopag, 2013). Dans notre expérience, nous avons choisi d'utiliser des proies naturelles et d'exclure ou non les ennemis naturels. Cette approche d'exclusion des ennemis naturels, aussi utilisée dans l'étude de Rusch *et al.* (2016), nous permet d'évaluer le potentiel réel de régulation qui existe sur une parcelle avec une pression naturelle de ravageurs. De plus, la prédation a ainsi lieu sur des individus vivants, capables de déplacement, il s'agit donc bien des conditions observées naturellement, contrairement à une carte de prédation. Connaissant la nuisibilité de la mouche du chou sur brocoli (relation linéaire observée entre nombre d'individus et pertes de récolte), il est donc possible de discuter et de préciser l'impact de ses ennemis naturels.

Conclusion

Les objectifs de cette étude étaient de déterminer la nuisibilité de la mouche du chou grâce à une infestation artificielle de ce ravageur en conditions contrôlées. Cette meilleure connaissance de la nuisibilité de *D. radicum* devait nous permettre d'évaluer l'impact de la régulation de ce ravageur par ses ennemis naturels, en conditions naturelles de culture biologique de plein champ. Les résultats obtenus montrent qu'il existe une relation linéaire entre le nombre d'individus de *D. radicum* et les dégâts causés sur la culture telle que plus il y a de mouche du chou, plus il y a de dégâts et ce à partir du premier individu présent sur un plant. Cette nuisibilité s'exprime :

- par une mortalité précoce des plants plus importante,
- au cours du développement des plants, avec une croissance et un développement ralentis,
- et à la récolte avec un rendement inférieur pour les plants plus attaqués.

La présence d'ennemis naturels, Carabidés, Staphylinidae du genre *Aleochara* et *Trybliographa rapae* pour les plus abondants, permet une réduction significative des niveaux de populations du ravageur. Cette réduction du nombre de ravageurs s'accompagne d'une réduction des dégâts occasionnés sur la culture. En effet, nous avons observé que la présence d'ennemis naturels permettait de réduire significativement la nuisibilité de la mouche du chou.

La démarche utilisée pour le système mouche du chou – brocoli pourrait être appliquée à d'autres ravageurs des cultures. La notion de nuisibilité utilisée pour estimer les niveaux de populations à atteindre pourrait permettre de promouvoir l'utilisation de méthodes de lutte alternatives auprès des agriculteurs, grâce à une meilleure quantification des objectifs à atteindre. Connaissant la nuisibilité du ravageur et l'impact de la régulation naturelle sur cette nuisibilité, il devient possible de déterminer l'effort à mettre en place pour optimiser l'impact des ennemis naturels et atteindre l'objectif de régulation souhaité, par exemple avec la mise en place de structures agroécologiques, et de réfléchir à la combinaison de méthodes de lutte, ayant chacune une efficacité mesurable.

Bibliographie

ACTA. (2016). Index phytosanitaire.

Agreste. (2016). Structure de la production légumière. https://stats.agriculture.gouv.fr/disar/faces/report/tabDocBySource.jsp;jsessionid=72DA9355F24E21130C687DE73CD40344.to-disar-v04_orion_50000. [consulté le 01/09/2016].

Alim'agri. (2016). Bulletins de santé du végétal. <http://agriculture.gouv.fr/bulletins-de-sante-du-vegetal> [consulté le 01/09/2016].

APREL. Filets anti insectes : efficacité contre la mouche du chou *Delia radicum* et incidence agronomique en culture de navet et radis japonais.

Aviron, S., Poggi, S., Varennes, Y. D., & Lefèvre, A. (2016). Local landscape heterogeneity affects crop colonization by natural enemies of pests in protected horticultural cropping systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 227, 1-10.

Barzman, M., Bàrberi, P., Birch, A. N. E., Boonekamp, P., Dachbrodt-Saaydeh, S., Graf, B., ... & Lamichhane, J. R. (2015). Eight principles of integrated pest management. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 1199-1215.

Bligaard, J., Meadow, R., Nielsen, O., & Percy-Smith, A. (1999). Evaluation of felt traps to estimate egg numbers of cabbage root fly, *Delia radicum*, and turnip root fly, *Delia floralis* in commercial crops. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 90(2), 141-148.

Bracken, G. K. (1990). Susceptibility of first-instar cabbage maggot, *Delia radicum* (L.)(Anthomyiidae: Diptera), to strains of the entomogenous nematodes *Steinernema feltiae* Filipjev, *S. bibionis* (Bovien), *Heterorhabditis bacteriophora* Poinar, and *H. heliothidis* (Khan, Brooks, and Hirschmann). *The Canadian Entomologist*, 122(04), 633-639.

Brand, R., & Audergeon, J.M. (2013). La sélection des variétés d'espèces légumières et fruitières en France et en Europe 1960-2012 - Innovations variétales et impact sur la production et la mise en marché des produits. *Le sélectionneur français*, 64, 71-100.

Bruck, D. J., Snelling, J. E., Dreves, A. J., & Jaronski, S. T. (2005). Laboratory bioassays of entomopathogenic fungi for control of *Delia radicum* (L.) larvae. *Journal of invertebrate pathology*, 89(2), 179-183.

Brunel, E., & Ladeveze, L. (1988). Perspectives d'avertissement agricole "mouche du chou" sur chou-fleur en Bretagne. *Phytoma*, 403, 34-38.

BSV Bretagne – Légumes frais. (2015). Choux – Mouche du chou : ce qu'il faut savoir. *Bulletin de santé du végétal*, 1, 2.

BSV Bretagne – Légumes frais. (2016). Bulletin de santé du végétal, 12.

Bueno, A. F., Paula-Moraes, S. V., Gazzoni, D. L., & Pomari, A. F. (2013). Economic thresholds in soybean-integrated pest management: old concepts, current adoption, and adequacy. *Neotropical entomology*, 42(5), 439-447.

- Cappuccino, N. (1995). Novel approaches to the study of population dynamics. *Population dynamics: new approaches and synthesis*, 3-16.
- Carrillo, R., Alarcón, R., & Neira, M. (2007). The effects of carabid beetles (Coleoptera: Carabidae) on the arthropod fauna of wheat fields in Chile. *Revista de biología tropical*, 55(1), 101-111.
- Caussanel, J. P. (1989). Nuisibilité et seuils de nuisibilité des mauvaises herbes dans une culture annuelle : situation de concurrence bispécifique. *Agronomie, EDP Sciences*, 9 (3), 219-240..
- Chambre d'agriculture du Finistère. (2006). Protéger ses choux contre la mouche.
- Collier, R. H., & Finch, S. (1983). Completion of diapause in field populations of the cabbage root fly (*Delia radicum*). *Entomologia experimentalis et applicata*, 34(2), 186-192.
- Cortesero, A. M., & Le Ralec, A. (2014). PBI-Paysage en cultures de Brassicacées. *Rapport final 2010-2013*.
- Da Silva, P. M., Aguiar, C. A., Niemelä, J., Sousa, J. P., & Serrano, A. R. (2008). Diversity patterns of ground-beetles (Coleoptera: Carabidae) along a gradient of land-use disturbance. *Agriculture, ecosystems & environment*, 124(3), 270-274.
- Directive 2009/128/CE du Parlement Européen et du Conseil du 21 octobre 2009 instaurant un cadre d'action communautaire pour parvenir à une utilisation des pesticides compatible avec le développement durable. *Journal officiel de l'Union Européenne*, Annexe III.
- Dritschilo, W., & Wanner, D. (1980). Ground beetle abundance in organic and conventional corn fields. *Environmental Entomology*, 9(5), 629-631.
- Duan, J. J., Abell, K. J., Bauer, L. S., Gould, J., & Van Driesche, R. (2014). Natural enemies implicated in the regulation of an invasive pest: a life table analysis of the population dynamics of the emerald ash borer. *Agricultural and Forest Entomology*, 16(4), 406-416.
- Du Toit, F., & Walters, M. C. (1984). Damage assessment and economic threshold values for the chemical control of the Russian wheat aphid, *Diuraphis noxia* (Mordvilko) on winter wheat. *Technical communication-South Africa, Department of Agriculture*.
- Eilenberg, J., Hajek, A., & Lomer, C. (2001). Suggestions for unifying the terminology in biological control. *BioControl*, 46(4), 387-400.
- Ellis, P. R., Hardman, J. A., Crisp, P., & Johnson, A. G. (1979). The influence of plant age on resistance of radish to cabbage root fly egg-laying. *Annals of Applied Biology*, 93(2), 125-131.
- E-phy. (2016). Le catalogue des produits phytopharmaceutiques et de leurs usages, des matières fertilisantes et des supports de culture autorisés en France. <https://ephy.anses.fr/>. [consulté le 01/09/2016].
- Ephytia. (2014). *Delia radicum* (Mouche du chou) : Dégâts. <http://ephytia.inra.fr/fr/C/20068/Biocontrol-Degats>. [consulté le 01/09/2016].
- Estorgues, V., Cochard, L. (2004). Maladies et ravageurs des choux : synthèse de 4 années de suivis et d'observations dans le Finistère (2001-2004).

- Estorgues, V. (2005). Maladies et ravageurs des légumes de plein champ en Bretagne. 64-65.
- Faraway, J. J. (2016). *Extending the linear model with R: generalized linear, mixed effects and nonparametric regression models* (Vol. 124). CRC press.
- Finch, S., & Coaker, T. H. (1969). A method for the continuous rearing of the cabbage root fly *Erioischia brassicae* (Bch.) and some observations on its biology. *Bulletin of Entomological Research*, 58(03), 619-627.
- Finch, S., Skinner, G., & Freeman, G. H. (1975). The distribution and analysis of cabbage root fly egg populations. *Annals of applied biology*, 79(1), 1-18.
- Finch, S., & Skinner, G. (1982). Trapping cabbage root flies in traps baited with plant extracts and with natural and synthetic isothiocyanates. *Entomologia experimentalis et applicata*, 31(2-3), 133-139.
- Finch, S. (1993). Integrated pest management of the cabbage root fly and the carrot fly. *Crop protection*, 12(6), 423-430.
- Finch, S. (1996). Effect of beetle size on predation of cabbage root fly eggs by ground beetles. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 81(2), 199-206.
- Fournet, S., Stapel, J. O., Kacem, N., Nenon, J. P., & Brunel, E. (2000). Life history comparison between two competitive *Aleochara* species in the cabbage root fly, *Delia radicum*: implications for their use in biological control. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 96(3), 205-211.
- Fournet, S. (2002). Mise au point de la lutte biologique au champ contre la mouche du chou en Bretagne à l'aide du staphylin *Aleochara bilineata*.
- Freuler, J., & Fisher, S. (1983). Le piège à œufs, nouveau moyen de prévision d'attaque pour la mouche du chou, *Delia radicum* (*brassicae*) L.. *Revue suisse Viticulture Arboriculture Horticulture*, 15(2), 107-110.
- Geiger, F., Bengtsson, J., Berendse, F., Weisser, W. W., Emmerson, M., Morales, M. B., ... & Eggers, S. (2010). Persistent negative effects of pesticides on biodiversity and biological control potential on European farmland. *Basic and Applied Ecology*, 11(2), 97-105.
- GRAB. (2010). Choux de Milan, Romanesco et Brocoli – Essais variétaux en plein champ.
- Greenslade, P. J. M. (1964). Pitfall trapping as a method for studying populations of Carabidae (Coleoptera). *The Journal of Animal Ecology*, 301-310.
- Hairston, N. G., Smith, F. E., & Slobodkin, L. B. (1960). Community structure, population control, and competition. *American naturalist*, 421-425.
- Hughes, R. D., & Salter, D. D. (1959). Natural mortality of *Erioischia brassicae* (Bouche)(Diptera, Anthomyiidae) during the immature stages of the first generation. *The Journal of Animal Ecology*, 231-241.
- HYPpz. Mouche du chou. <http://www7.inra.fr/hypz/RAVAGEUR/3delrad.htm>. [consulté le 01/09/2016].

- Interfel – Les fruits et légumes frais. *Brocoli*. <http://www.lesfruitsetlegumesfrais.com/fruits-legumes/choux/brocoli/carte-identite>. [consulté le 01/09/2016].
- Jones, T. H. (1986). *Patterns of parasitism by Trybliographa rapae (Westw.), a cynipid parasitoid of the cabbage root fly* (Doctoral dissertation, Imperial College London (University of London)).
- Josso, C., Le Ralec, A., Raymond, L., Saulais, J., Baudry, J., Poinso, D., & Cortesero, A. M. (2013). Effects of field and landscape variables on crop colonization and biological control of the cabbage root fly *Delia radicum*. *Landscape ecology*, 28(9), 1697-1715.
- Kergunteuil, A. (2013). *Des odeurs pour protéger les cultures: utilisation de composés volatils pour modifier le comportement de la mouche du chou, Delia radicum et de ses ennemis naturels* (Doctoral dissertation, Rennes 1).
- LaMondia, J. A., Elmer, W. H., Mervosh, T. L., & Cowles, R. S. (2002). Integrated management of strawberry pests by rotation and intercropping. *Crop Protection*, 21(9), 837-846.
- Lepage, M. P. (2011). Étude de l'impact de la température et de l'humidité sur la survie et la dynamique de la ponte de la mouche du chou (*Delia radicum* L.).
- Maleki, N. (2015). Determination of economic injury level for first and second generations of *Pulvinaria aurantii* (Hem: Coccidae) in Thomson navel orange orchards. *Arthropods*, 4(1), 13.
- Marra, M. C., & Carlson, G. A. (1983). An economic threshold model for weeds in soybeans (*Glycine max*). *Weed Science*, 604-609.
- Maret, M., Le Ralec, A., Cortesero, A.M., Faloya, V. (2014). Evaluation et amélioration du potentiel de contrôle biologique des ravageurs en cultures légumières de plein champ. *Rapport scientifique FranceAgriMer*.
- Meyling, N. V., Navntoft, S., Philipsen, H., Thorup-Kristensen, K., & Eilenberg, J. (2013). Natural regulation of *Delia radicum* in organic cabbage production. *Agriculture, ecosystems & environment*, 164, 183-189.
- Millenium Ecosystem Assessment, M. E. (2005). Ecosystems and human well-being. *Syntesis*.
- Mosweu, R. L., Obopile, M., & Tshagofatso, A. B. (2015). Economic injury level and yield loss assessment caused by cabbage aphid (*Brevicoryne brassicae*) on rape (*Brassica napus*). *Journal of Entomological Research*, 39(2), 101-104.
- Park, H. H., Lee, J. H., & Uhm, K. B. (2007). Economic thresholds of western flower thrips (Thysanoptera: Thripidae) for unripe red pepper in greenhouse. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 10(1), 45-53.
- Pedigo, L. P., Hutchins, S. H., & Higley, L. G. (1986). Economic injury levels in theory and practice. *Annual review of entomology*, 31(1), 341-368.
- Plantegenest, M., Pierre, J. S., Dedryver, C. A., & Kindlmann, P. (2001). Assessment of the relative impact of different natural enemies on population dynamics of the grain aphid *Sitobion avenae* in the field. *Ecological Entomology*, 26(4), 404-410.
- Riba, G., & Silvy, C. (1989). *Combattre les ravageurs des cultures: enjeux et perspectives*. Quae.

- Rosenheim, J. A. (1998). Higher-order predators and the regulation of insect herbivore populations. *Annual review of entomology*, 43(1), 421-447.
- Roger, J. L., Jambon, O., & Bouger, G. (2013). Clé de détermination des Carabidae, Paysages agricoles du Nord Ouest de la France.
- Rueda, A., Badenes-Perez, F. R., & Shelton, A. M. (2007). Developing economic thresholds for onion thrips in Honduras. *Crop protection*, 26(8), 1099-1107.
- Rusch, A., Chaplin-Kramer, R., Gardiner, M. M., Hawro, V., Holland, J., Landis, D., ... & Woltz, M. (2016). Agricultural landscape simplification reduces natural pest control: A quantitative synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 221, 198-204.
- Savary, S., Willocquet, L., Elazegui, F. A., Castilla, N. P., & Teng, P. S. (2000). Rice pest constraints in tropical Asia: quantification of yield losses due to rice pests in a range of production situations. *Plant disease*, 84(3), 357-369.
- Schoene, W. J. (1916). *The cabbage maggot: its biology and control* (No. 419). New York Agricultural Experiment Station.
- Sebiopag. (2013). Un réseau pour l'étude des Services Ecosystémiques assurés par la Biodiversité dans les Paysages Agricoles. <http://sebiopag.inra.fr/>. [consulté le 13/09/2016]
- Soroka, J. J., Dosedall, L. M., Olfert, O. O., & Seidle, E. (2004). Root maggots (*Delia* spp., Diptera: Anthomyiidae) in prairie canola (*Brassica napus* L. and *B. rapa* L.): spatial and temporal surveys of root damage and prediction of damage levels. *Canadian journal of plant science*, 84(4), 1171-1182.
- Terresinovia. (2014). Les méligèthes du colza. <http://www.terresinovia.fr/espaces-regionaux/messages-techniques/regions-nord-et-est/2014/mypic-les-meligethes-du-colza/>. [consulté le 12/09/2016]
- Titi, A. E. (1979). Weitere Untersuchungen zur Frage der wirtschaftlichen Schadensschwelle für die Kleine Kohlflye (*Erioischia brassicae* Bouché) im Blumenkohlanbau/Further experiments on the determination of the economic threshold of the cabbage root fly (*Erioischia brassicae* Bouché) in early cauliflower. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz/Journal of Plant Diseases and Protection*, 65-74.
- Université de Rennes 1. Ecobiologie des insectes parasitoïdes – Modèles biologiques. <http://www.parasitoïdes.univ-rennes1.fr/modeles.htm#delia>. [consulté le 01/09/2016].
- Zadoks, J. C. (1985). On the conceptual basis of crop loss assessment: the threshold theory. *Annual Review of Phytopathology*, 23(1), 455-473.

Résumé

Une alternative possible à l'utilisation des produits phytosanitaires de synthèse est la lutte biologique par conservation, mobilisant les ennemis naturels des ravageurs des cultures. Les ennemis naturels de la mouche du chou (*Delia radicum* L.) réduiraient les populations de ce ravageur, mais sans que l'on puisse démontrer un impact sur le rendement de la culture. Il apparaît nécessaire de préciser la nuisibilité réelle de la mouche du chou afin d'évaluer l'efficacité du contrôle biologique sur les populations de ce ravageur et les dégâts dont il est responsable en culture de brassicacées légumières.

Pour cela, deux expériences ont été mises en place. Une première pour évaluer la nuisibilité de *D. radicum* avec un suivi de brocolis cultivés en conditions contrôlées sous cages insect-proof, l'infestation étant réalisée artificiellement par apport d'œufs à des densités croissantes. Afin d'évaluer l'impact de la régulation naturelle, une deuxième expérience a été mise en place en conditions d'infestation naturelle, en excluant ou non les potentiels prédateurs de ce ravageur.

Les résultats montrent une nuisibilité croissante de la mouche du chou lorsque les populations de ce ravageur augmentent. Les ennemis naturels permettent une réduction des populations de *D. radicum*, mais aussi une diminution des dégâts causés par la mouche du chou, avec un meilleur développement des plants, un système racinaire moins attaqué, une mortalité précoce inférieure et un rendement supérieur. La régulation naturelle permet donc de réduire la nuisibilité de la mouche du chou.

Mots-clés : *Delia radicum*, Brassicaceae légumières, lutte biologique par conservation, ennemis naturels, seuil de nuisibilité.

Abstract

A possible alternative to pesticide use is biological control using natural enemies of pests. Natural enemies of the cabbage root fly (*Delia radicum* L.) are supposed to reduce pest populations, but so far no study has demonstrated an impact of this regulation on the yield losses caused by this pest. To evaluate the efficiency of biological control on the populations of *D. radicum* and the damages caused on Brassica vegetables, it would be necessary to know better the harmfulness of the cabbage root fly.

Two experiments were carried out for this purpose. The first one aimed to evaluate the harmfulness of the cabbage root fly on brocolis. Plants were grown in the field under insect-proof cages and artificially infested by eggs of *D. radicum*, at various densities. To evaluate the impact of the natural control of the pest, we did a second experiment where the brocolis were field scale grown, and naturally infested by the cabbage root fly, excluding or not the potential predators of this pest.

Results show a growing impact of the pest on the culture when populations of *D. radicum* increase. The natural enemies allow a diminution of the cabbage root fly populations. Moreover, these natural enemies permit a reduction of the damages caused by the pest with: a better development of the plants, less attacks on the root system, an inferior premature mortality and a higher yield. We can conclude that the natural regulation of the cabbage root fly allows a reduction of the harmfulness of this pest.

Key-words: *Delia radicum*, Brassica vegetables, biological control by conservation, natural enemies, harmfulness threshold.