

Etude de l'impact de pièges sémiochimiques en culture de féverole sur *Bruchus rufimanus* Boheman, 1833 (Coleoptera : Chrysomelidae) et sur les auxiliaires de culture

Auteur : Delanglez, Louise

Promoteur(s) : Francis, Frédéric

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

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

Année académique : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/15801>

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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

**ETUDE DE L'IMPACT DE PIEGES
SEMIOCHIMIQUES EN CULTURE DE
FEVEROLE SUR *BRUCHUS RUFIMANUS*
BOHEMAN, 1833 (COLEOPTERA :
CHRYSOMELIDAE) ET SUR LES AUXILIAIRES
DE CULTURE**

LOUISE DELANGLEZ

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

ANNEE ACADEMIQUE 2021-2022

PROMOTEUR: FREDERIC FRANCIS

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique¹ de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

¹Dans ce cas, l'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre du personnel(s) enseignant de GxABT.

**ETUDE DE L'IMPACT DE PIEGES
SEMIOCHIMIQUES EN CULTURE DE
FEVEROLE SUR *BRUCHUS RUFIMANUS*
BOHEMAN, 1833 (COLEOPTERA :
CHRYSOMELIDAE) ET SUR LES AUXILIAIRES
DE CULTURE**

LOUISE DELANGLEZ

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

ANNEE ACADEMIQUE 2021-2022

PROMOTEUR: FREDERIC FRANCIS

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon promoteur, le Professeur Frédéric Francis, pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser un mémoire à la hauteur de mes attentes au sein de son département et pour l'aide qu'il m'a apportée dans la réalisation de ce travail.

Je remercie également mes encadrants doctorants, Arnaud Segers et Grégoire Noël, pour leur soutien, leurs conseils et leurs nombreuses relectures. Merci à Grégoire d'avoir toujours pris le temps de répondre à mes nombreuses questions en statistiques.

Merci à toute l'équipe de l'unité d'entomologie fonctionnelle et évolutive pour leur accueil. Je voudrais remercier particulièrement Jeannine pour sa disponibilité sans faille et Ibtissem pour sa bienveillance et son soutien au cours de ces derniers mois.

Merci à Julie Bonnet et à M. Fagot pour leur aide précieuse pour l'identification des insectes.

Merci à mes incroyables amies Claude, Manon Roscel, Emma, Marjane, Margaux, Audrey, Justine et Manon Dernelle d'avoir toujours été là, dans les meilleurs moments comme dans les plus difficiles. Sans vous ces années d'études n'auraient pas eu la même saveur et je souhaite à quiconque d'un jour rencontrer des amies comme vous. Merci à toutes les personnes fabuleuses que j'ai pu rencontrer à Gembloux que je ne peux malheureusement pas toutes citer sinon la liste serait bien trop longue.

Enfin, je termine en remerciant mes parents d'avoir toujours cru en moi. Merci tout particulièrement à ma maman d'avoir supporté mon stress et de m'avoir toujours soutenu, non seulement au cours des 6 derniers mois mais aussi tout au long de ces 5 années d'études.

Résumé

La féverole (*Vicia faba* L.) est une culture d'intérêt. Elle offre de nombreux services agronomiques et environnementaux et produit des graines riches en protéines et en amidon utilisées en alimentation humaine et animale. Cependant, *Bruchus rufimanus* Boheman, 1833 (Coleoptera : Chrysomelidae) représente un frein à l'intégration de cette culture dans les rotations. Les larves de ce ravageur se développent dans les graines et entraînent leur dévalorisation, ce qui se traduit par une perte économique considérable pour les producteurs. La lutte conventionnelle est basée sur l'application d'insecticides pyréthrinoïdes dont l'efficacité est limitée. De plus, ils sont fortement néfastes pour les insectes non ciblés et le risque d'apparition de résistance chez *B. rufimanus* est élevé. Le développement de méthodes de lutte alternatives telles que la lutte sémiochimique est dès lors essentiel. Cette étude visait à évaluer l'impact de 2 types de pièges (pièges blancs développés par AgriOdor et pièges verts de type « green funnel pan traps with cross barrier ») associés à 3 attractants sémiochimiques (un attractant de type fleur développé par AgriOdor, un attractant de type fleur développé par IPS et un attractant de type gousse développé par AgriOdor) sur *B. rufimanus* et sur les auxiliaires de culture (les taxons ciblés étaient les Apoidea, les Syrphidae et les Coccinellidae) en féverole d'hiver et de printemps. Les associations entre les pièges blancs et les deux attractants floraux se sont révélées être les plus efficaces pour le piégeage de masse de *B. rufimanus* en féverole d'hiver et les captures ont été influencées par la phénologie de la culture. En féverole de printemps, aucune différence d'efficacité n'a été révélée entre les associations mais les captures ont aussi été influencées par la phénologie de la culture. L'impact sur les auxiliaires a été considérable, un ratio d'environ 1 : 1 a été observé entre les captures de bruches et les captures d'auxiliaires dans l'ensemble des captures. De plus, en féverole d'hiver les modalités ayant eu la plus grande efficacité pour les captures de bruches sont les mêmes que celles qui ont eu le plus grand impact sur les auxiliaires en termes de richesse spécifique et d'abondance capturées. La structure des communautés d'auxiliaires capturées est davantage liée au type de piège qu'à l'attractant. Il est indispensable d'améliorer la spécificité des moyens actuellement disponibles pour le piégeage de masse de *B. rufimanus* et également de déterminer si cette stratégie permet de réduire significativement les dommages causés par le ravageur. Il faut également continuer les recherches pour le développement et l'amélioration d'autres méthodes de lutte alternatives contre ce ravageur.

Mots-clés : féverole, bruche, piégeage de masse, sémiochimiques, auxiliaires

Abstract

Faba bean (*Vicia faba* L.) is a crop of interest. It offers many agronomic and environmental services and produces protein and starch rich seeds used in food and feed. However, *Bruchus rufimanus* Boheman, 1833 (Coleoptera : Chrysomelidae) represents a hindrance to the integration of this crop in rotations. The larvae of this pest develop in the seeds and lead to their devaluation, resulting in a considerable economic loss for the producers. Conventional control is based on the application of pyrethroid insecticides which have limited effectiveness. Moreover, they are very damaging to non-target insects and the risk of resistance development in *B. rufimanus* is high. The development of alternative control methods such as semiochemical control is therefore essential. This study aimed to evaluate the impact of 2 types of traps (white traps developed by AgriOdor and green funnel pan traps with cross barrier) associated with 3 semiochemical attractants (a flower-type attractant developed by AgriOdor, a flower-type attractant developed by IPS and a pod-type attractant developed by AgriOdor) on *B. rufimanus* and on auxiliaries (the targeted taxa were Apoidea, Syrphidae and Coccinellidae) in winter and spring faba bean. The associations between the white traps and the 2 floral attractants proved to be the most efficient for mass trapping of *B. rufimanus* in winter faba bean and the captures were influenced by the phenology of the crop. In spring faba bean, no difference in efficiency was revealed between the associations but captures were also influenced by the phenology of the crop. The impact on auxiliaries was considerable, a ratio of about 1 : 1 was observed between bruchids captures and auxiliaries captures in the overall captures. Moreover, in winter faba bean the modalities that had the highest efficiency for bruchid captures were the same as those that had the highest impact on auxiliaries in terms of species richness and abundance captured. The structure of the communities of auxiliaries captured is more related to the type of trap than to the attractant. There is a need to improve the specificity of the currently available means for mass trapping of *B. rufimanus* and also to determine whether this strategy significantly reduces the damage caused by the pest. Further research is also needed on the development and improvement of alternative control methods against the pest.

Keywords : faba bean, bruchid, mass trapping, semiochemicals, auxiliaries

Table des matières

1	Introduction.....	1
1.1	La féverole : <i>Vicia faba</i> L. (Fabaceae)	1
1.1.1	Généralités.....	1
1.1.2	Atouts agronomiques et environnementaux	2
1.1.2.1	Fixation de l'azote et autres avantages dans les rotations	2
1.1.2.2	Diminution des émissions de gaz à effet de serre.....	3
1.1.2.3	Composition des graines.....	3
1.1.2.4	Ressources pour les auxiliaires de culture	4
1.1.3	Faiblesses	5
1.1.3.1	Sensibilité aux stress abiotiques	5
1.1.3.2	Sensibilité aux stress biotiques	6
1.2	<i>Bruchus rufimanus</i> Boheman, 1833 (Coleoptera : Chrysomelidae).....	7
1.2.1	Généralités.....	7
1.2.2	Cycle de vie en culture de féverole	7
1.2.3	Dégâts en culture de féverole	9
1.2.4	Les méthodes de lutte	10
1.3	Ecologie chimique et lutte sémiochimique.....	11
1.3.1	Principes généraux d'écologie chimique.....	11
1.3.2	Ecologie chimique de <i>Bruchus rufimanus</i> en culture de féverole.....	11
1.3.3	Principes généraux de lutte sémiochimique	13
1.3.4	Méthodes de lutte sémiochimique contre <i>Bruchus rufimanus</i>	14
2	Objectifs	16
3	Matériel et méthodes.....	17
3.1	L'expérimentation menée au cours de l'année 2021	17
3.1.1	Les modalités de piégeage.....	17
3.1.2	Le dispositif expérimental	17
3.1.3	La collecte des insectes et des données phénologiques des cultures.....	19
3.2	La préparation des collections entomologiques.....	20
3.2.1	La préparation des insectes.....	20
3.2.2	L'identification des insectes	22
3.2.3	Le sexage des bruches	23
3.2.4	La création de bases de données	23
3.3	Analyses statistiques.....	24
3.3.1	ANOVA à deux facteurs fixes.....	24

3.3.2	Statistiques descriptives	24
3.3.3	Analyses de structure des communautés	24
3.3.3.1	Notions de mesures de la biodiversité	24
3.3.3.2	Diversité alpha	25
3.3.3.3	Diversité bêta	26
3.3.4	Logiciels utilisés.....	26
4	Résultats	27
4.1	Détermination des associations de pièges et d'attractants les plus efficaces pour le piégeage de masse de <i>Bruchus rufimanus</i>	27
4.1.1	En féverole d'hiver	27
4.1.2	En féverole de printemps.....	28
4.2	Etude de l'influence de la phénologie de la culture et de son impact sur le cycle de vie de <i>Bruchus rufimanus</i> sur l'efficacité des modalités de piégeage	29
4.2.1	En féverole d'hiver	29
4.2.2	En féverole de printemps.....	30
4.3	Détermination de l'impact des modalités de piégeage sur les auxiliaires de cultures (Apoidea, Coccinellidae et Syrphidae)	32
4.3.1	En féverole d'hiver	32
4.3.1.1	Diversité alpha	33
4.3.1.2	Diversité bêta	38
4.3.2	En féverole de printemps.....	40
4.3.2.1	Diversité alpha	40
4.3.2.2	Diversité bêta	45
5	Discussion	47
5.1	Le piégeage de <i>Bruchus rufimanus</i> par les associations de pièges et d'attractants ...	47
5.2	L'impact des modalités de piégeage sur les auxiliaires de culture	50
5.2.1	Le choix des taxons étudiés.....	50
5.2.2	L'échantillonnage.....	50
5.2.3	Les captures d'auxiliaires par les modalités de piégeage.....	51
5.3	Maximiser les captures de <i>Bruchus rufimanus</i> et minimiser les captures d'auxiliaires : un dilemme	52
5.4	Perspectives de développement de méthodes de lutte contre <i>Bruchus rufimanus</i>	54
6	Contribution personnelle.....	55
7	Conclusion	55
8	Références bibliographiques	57
9	Annexes.....	64

Table des figures

Figure 1 : Cycle de vie de *Bruchus rufimanus* (en rose) en fonction de la phénologie de *V. faba* et des pratiques culturales associées (en vert). I. Colonisation de la culture au stade végétatif par les mâles et au stade de floraison par les femelles ; II. Accouplement après la levée de la diapause reproductive ; III. Oviposition sur les gousses en formation durant le stade de fructification de la culture et éclosion des œufs ; IV. Développement des larves durant le stade de maturation des graines ; V. Emergence des adultes avant la récolte et hivernage des adultes en diapause reproductive dans l'environnement ou hivernage en diapause larvaire ou nymphale dans les graines jusqu'au semis de l'année suivante. © A. Segers. 9

Figure 2 : Illustration des processus chimiques contrôlant les trois premières étapes du développement de *Bruchus rufimanus* en culture de féverole sur base des connaissances actuelles. I. Attraction principalement des mâles mais également des femelles par une kairomone florale de *V. faba* ; II. Attraction des femelles pour la reproduction par la combinaison de la kairomone florale de *V. faba* et d'une phéromone sexuelle émise par les mâles ; III. Attraction des femelles gravides par une kairomone émise par les gousses de *V. faba*. © A. Segers 12

Figure 3 : Piège blanc (PB), prototype développé par AgriOdor spécifiquement pour la capture de *Bruchus rufimanus*. © A. Segers 17

Figure 4 : Piège vert (PV), piège de type « green funnel pan traps with cross barrier ». © A. Segers 17

Figure 5 : Localisation des parcelles d'essais dans lesquelles ont été menés les tests de pièges et d'attractants sémiochimiques pour la lutte contre *Bruchus rufimanus* en culture de féverole en 2020 et 2021. © A. Segers..... 18

Figure 6 : Dispositif expérimental installé pour les tests de pièges et d'attractants sémiochimiques pour la lutte contre *Bruchus rufimanus* en culture de féverole d'hiver et de printemps en 2021. © A. Segers..... 19

Figure 7 : Quelques spécimens collectés dans les pièges épinglés en cours de séchage. 22

Figure 8 : Quelques spécimens collectés dans les pièges épinglés et étiquetés. 22

Figure 9 : Morphologie de *Bruchus rufimanus* adulte (a) et dimorphisme sexuel : présence d'éperons (Spu.) sur les pattes médianes des mâles (b) ; absence d'éperons sur les pattes médianes des femelles (c) ; pygidium (Pyg.) échancré chez les mâles (d) ; pygidium non échancré chez la femelle (e). © A. Segers. 23

Figure 10 : Graphique de l'évolution des captures de *Bruchus rufimanus* par les modalités de piégeage (PBAGDF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PBAGDG=association entre piège blanc et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PBIPSF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'IPS ; PVAGDF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'AgriOdor ;

PVAGDG=association entre piège vert et attractant de type gousse d'AgriOdor ;
 PVIPSF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'IPS) et des observations par
 comptage visuel dans le temps avec les stades phénologiques de la culture de féverole d'hiver.
 29

Figure 11 : Graphique de l'évolution du sexe-ratio des *Bruchus rufimanus* capturés par
 l'ensemble des modalités de piégeage dans le temps avec les stades phénologiques de la
 culture de féverole d'hiver. 30

Figure 12 : Graphique de l'évolution des captures de *Bruchus rufimanus* par les modalités de
 piégeage (PBAGDF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'AgriOdor ;
 PBAGDG=association entre piège blanc et attractant de type gousse d'AgriOdor ;
 PBIPSF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'IPS ;
 PVAGDF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'AgriOdor ;
 PVAGDG=association entre piège vert et attractant de type gousse d'AgriOdor ;
 PVIPSF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'IPS) et des observations par
 comptage visuel dans le temps avec les stades phénologiques de la culture de féverole de
 printemps..... 30

Figure 13 : Graphique de l'évolution du sexe-ratio des *Bruchus rufimanus* capturés par
 l'ensemble des modalités de piégeage dans le temps avec les stades phénologiques de la
 culture de féverole de printemps. 31

Figure 14 : Courbe d'accumulation des espèces d'auxiliaires (Apoidea, Syrphidae et
 Coccinellidae) capturées par l'ensemble des modalités de piégeage en féverole d'hiver..... 33

Figure 15 : Rang d'abondance pour l'ensemble des modalités de piégeage et rangs
 d'abondance pour chaque modalité de piégeage (PBAGDF=association entre piège blanc et
 attractant de type fleur d'AgriOdor ; PBAGDG=association entre piège blanc et attractant de
 type gousse d'AgriOdor ; PBIPSF=association entre piège blanc et attractant de type fleur
 d'IPS ; PVAGDF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'AgriOdor ;
 PVAGDG=association entre piège vert et attractant de type gousse d'AgriOdor ;
 PVIPSF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'IPS) en féverole d'hiver... 34

Figure 16 : Représentation sous forme de boxplot de la richesse spécifique, de l'abondance et
 de l'indice de diversité de Simpson par modalité de piégeage (PBAGDF=association entre
 piège blanc et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PBAGDG=association entre piège blanc et
 attractant de type gousse d'AgriOdor ; PBIPSF=association entre piège blanc et attractant de
 type fleur d'IPS ; PVAGDF=association entre piège vert et attractant de type fleur
 d'AgriOdor ; PVAGDG=association entre piège vert et attractant de type gousse d'AgriOdor ;
 PVIPSF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'IPS) en féverole d'hiver... 36

Figure 17 : Représentation des communautés d'auxiliaires capturées par modalité de piégeage
 (PBAGDF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'AgriOdor ;
 PBAGDG=association entre piège blanc et attractant de type gousse d'AgriOdor ;
 PBIPSF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'IPS ;
 PVAGDF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'AgriOdor ;
 PVAGDG=association entre piège vert et attractant de type gousse d'AgriOdor ;

PVIPSF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'IPS) en féverole d'hiver sur les deux premiers axes de la PCoA (PBIPSF en jaune ; PBAGDF en rouge ; PBAGDG en bleu ; PVIPSF en orange ; PVAGDF en magenta ; PVAGDG en vert)..... 38

Figure 18 : Représentation des communautés d'auxiliaires capturées par type de pièges (PB=piège blanc développé par AgriOdor en bleu ; PV=piège vert de type « green funnel pan traps with cross barrier » en rouge) et attractant (IPSF=attractant de type fleur développé par IPS en bleu ; AGDF=attractant de type fleur développé par AgriOdor en rouge ; AGDG=attractant de type gousse développé par AgriOdor en vert) en féverole d'hiver sur les deux premiers axes de la PCoA..... 39

Figure 19 : Courbe d'accumulation des espèces d'auxiliaires (Apoidea, Syrphidae et Coccinellidae) capturées par l'ensemble des modalités de piégeage en féverole de printemps 40

Figure 20 : Rang d'abondance pour l'ensemble des modalités de piégeage et rangs d'abondance pour chaque modalité de piégeage (PBAGDF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PBAGDG=association entre piège blanc et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PBIPSF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'IPS ; PVAGDF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PVAGDG=association entre piège vert et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PVIPSF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'IPS) en féverole de printemps..... 42

Figure 21 : Représentation sous forme de boxplot de la richesse spécifique, de l'abondance et de l'indice de diversité de Simpson par modalité de piégeage (PBAGDF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PBAGDG=association entre piège blanc et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PBIPSF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'IPS ; PVAGDF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PVAGDG=association entre piège vert et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PVIPSF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'IPS) en féverole de printemps..... 44

Figure 22 : Représentation des communautés d'auxiliaires capturées par modalité de piégeage (PBAGDF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PBAGDG=association entre piège blanc et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PBIPSF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'IPS ; PVAGDF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PVAGDG=association entre piège vert et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PVIPSF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'IPS) en féverole de printemps sur les deux premiers axes de la PCoA (PBIPSF en jaune ; PBAGDF en rouge ; PBAGDG en bleu ; PVIPSF en orange ; PVAGDF en magenta ; PVAGDG en vert). 45

Figure 23 : Représentation des communautés d'auxiliaires capturées par type de pièges (PB=piège blanc développé par AgriOdor en bleu ; PV=piège vert de type « green funnel pan traps with cross barrier » en rouge) et attractant (IPSF=attractant de type fleur développé par IPS en bleu ; AGDF=attractant de type fleur développé par AgriOdor en rouge ;

AGDG=attractant de type gousse développé par AgriOdor en vert) en féverole de printemps sur les deux premiers axes de la PCoA.	46
---	----

Table des tableaux

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des dates de relevés des pièges et des comptages visuels de *Bruchinae* en féverole d'hiver et de printemps en 2021..... 20

Tableau 2 : Tableau récapitulatif du nombre total de captures et de la moyenne $\pm$ l'écart-type des captures par piège de *Bruchus rufimanus* par type de piège (PB=piège blanc développé par AgriOdor; PV=piège vert de type « green funnel pan traps with cross barrier ») et attractant (IPSF=attractant de type fleur développé par IPS ; AGDF=attractant de type fleur développé par AgriOdor ; AGDG=attractant de type gousse développé par AgriOdor) en féverole d'hiver. Les lettres différentes après les valeurs font référence aux différences significatives selon les résultats de l'ANOVA et du test post-hoc de Tukey..... 27

Tableau 3 : Tableau récapitulatif du nombre total de captures, de la moyenne $\pm$ l'écart-type des captures par piège de *Bruchus rufimanus* par type de piège (PB=piège blanc développé par AgriOdor; PV=piège vert de type « green funnel pan traps with cross barrier ») et attractant (IPSF=attractant de type fleur développé par IPS ; AGDF=attractant de type fleur développé par AgriOdor ; AGDG=attractant de type gousse développé par AgriOdor) en féverole de printemps. Les lettres différentes après les valeurs font référence aux différences significatives selon les résultats de l'ANOVA..... 28

Tableau 4 : Tableau récapitulatif des captures totales d'Hymenoptera, de Syrphidae et de Coccinellidae par les modalités de piégeage (PBAGDF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PBAGDG=association entre piège blanc et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PBIPSF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'IPS ; PVAGDF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PVAGDG=association entre piège vert et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PVIPSF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'IPS) en féverole d'hiver... 32

Tableau 5 : Tableau récapitulatif de la richesse spécifique observée, de la richesse spécifique estimée par l'estimateur de Chao1 et du pourcentage d'espèces non détectées pour chaque modalité de piégeage (PBAGDF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PBAGDG=association entre piège blanc et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PBIPSF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'IPS ; PVAGDF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PVAGDG=association entre piège vert et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PVIPSF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'IPS) et pour l'ensemble des modalités de piégeage en féverole d'hiver. 33

Tableau 6 : Tableau récapitulatif des captures totales d'Hymenoptera, de Syrphidae et de Coccinellidae par les modalités de piégeage (PBAGDF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PBAGDG=association entre piège blanc et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PBIPSF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'IPS ; PVAGDF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PVAGDG=association entre piège vert et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PVIPSF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'IPS) en féverole de printemps..... 40

Tableau 7 : Tableau récapitulatif de la richesse spécifique observée, de la richesse spécifique estimée par l'estimateur de Chao1 et du pourcentage d'espèces non détectées pour chaque modalité de piégeage (PBAGDF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PBAGDG=association entre piège blanc et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PBIPSF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'IPS ; PVAGDF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PVAGDG=association entre piège vert et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PVIPSF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'IPS) et pour l'ensemble des modalités de piégeage en féverole de printemps..... 41

Table des équations

Équation 1 : Equation de l'estimateur de Chao1 (S_{Chao1}) où S_{obs} est le nombre d'espèces observées, F_1 est le nombre d'espèces observées ne comptant qu'1 seul individu et F_2 est le nombre d'espèces observées ne comptant que 2 individus (Magurran 2004). 25

Équation 2 : Equation de l'indice de diversité de Simpson (E) où p_s est la probabilité qu'un individu choisi aléatoirement appartienne à l'espèce s (Marcon 2015). 25

Table des annexes

Annexe 1 : Tableau récapitulatif des captures de <i>Bruchus rufimanus</i> par répétition des modalités de piégeage et par date de relevé des pièges en féverole d'hiver.....	64
Annexe 2 : Tableau récapitulatif des captures de <i>Bruchus rufimanus</i> par répétition des modalités de piégeage et par date de relevé des pièges en féverole de printemps.....	64
Annexe 3 : Tableau récapitulatif des <i>Bruchus rufimanus</i> comptés par comptage visuel en féverole d'hiver.	65
Annexe 4 : Tableau récapitulatif des <i>Bruchus rufimanus</i> comptés par comptage visuel en féverole de printemps.	65
Annexe 5 : Tableau récapitulatif du nombre de <i>Bruchus rufimanus</i> mâles et femelles capturés par l'ensemble des modalités de piégeage par date de relevé des pièges en féverole d'hiver..	66
Annexe 6 : Tableau récapitulatif du nombre de <i>Bruchus rufimanus</i> mâles et femelles capturés par l'ensemble des modalités de piégeage par date de relevé des pièges en féverole de printemps.....	66
Annexe 7 : Tableau des espèces d'auxiliaires (Apoidea, Syrphidae et Coccinellidae) capturées, des effectifs et des abondances relatives des espèces par modalité de piégeage en féverole d'hiver.....	67
Annexe 8 : Tableau des espèces d'auxiliaires (Apoidea, Syrphidae et Coccinellidae) capturées, des effectifs et des abondances relatives des espèces par modalité de piégeage en féverole de printemps.	70
Annexe 9 : Tableau récapitulatif de la richesse spécifique, de l'estimateur de Chao1, de l'abondance et de l'indice de diversité de Simpson par répétition des modalités de piégeage en féverole d'hiver.	72
Annexe 10 : Tableau récapitulatif de la richesse spécifique, de l'estimateur de Chao1, de l'abondance et de l'indice de diversité de Simpson par répétition des modalités de piégeage en féverole de printemps.	73

1 Introduction

1.1 La féverole : *Vicia faba* L. (Fabaceae)

1.1.1 Généralités

Vicia faba L. est une espèce appartenant à la famille botanique des Fabaceae et à la sous-famille des Faboideae (Mínguez et Rubiales 2021). Malgré de nombreuses recherches, l'origine de cette légumineuse ainsi que les étapes de sa domestication ne sont pas précisément connues (Duc et al. 2015). Une large diversité génétique existe au sein de cette espèce, cette variabilité est décrite sur base de différences de composition et taille des graines, de biologie florale ainsi que de tolérance à divers stress abiotiques et biotiques (Duc et al. 2010). L'espèce est divisée en quatre groupes variétaux : *major*, *minor*, *equina* et *paucijuga*. (Mínguez et Rubiales 2021). La légumineuse couramment dénommée féverole correspond aux groupes variétaux *minor* et *equina* (Le Guen, Morin, et Poisson 1983). Il existe une distinction entre les variétés d'hiver et de printemps selon la tolérance aux conditions hivernales. Cependant, la frontière est fine entre ces deux types de variétés puisque certaines variétés de printemps cultivées au nord de l'Europe peuvent l'être en hiver en région méditerranéenne. En raison de sa capacité d'adaptation à divers climats, la féverole est cultivée dans de nombreuses régions du monde. Elle est la septième légumineuse à graines la plus cultivée mondialement (Duc et al. 2015). En 2020, les cinq principaux pays producteurs ont été la Chine (1 723 598 tonnes), l'Éthiopie (1 070 637 tonnes), le Royaume-Uni (554 020 tonnes), l'Australie (313 000 tonnes) et l'Allemagne (235 800 tonnes) (« FAOSTAT » 2020).

La féverole est principalement cultivée pour ses graines de haute valeur nutritionnelle utilisées en alimentation animale et humaine. Certaines variétés produisant une quantité importante de biomasse peuvent également être valorisées pour la production de bioénergie. Cette légumineuse peut être cultivée en culture pure ou en culture intercalaire notamment avec des céréales telles que le maïs ou le blé. Avec le développement de l'agriculture intensive favorisant l'utilisation d'engrais azoté de synthèse, les associations de culture avec des légumineuses sont devenues moins courantes dans les pays industrialisés. Cependant, l'association de la féverole avec d'autres cultures présente de nombreux avantages et cette pratique agronomique se repopularise notamment avec le développement de l'agriculture biologique. Cette légumineuse peut également être utilisée comme engrais vert au sein des rotations culturales (Jensen, Peoples, et Hauggaard-Nielsen 2010). La féverole offre de nombreux services agronomiques et environnementaux qui font d'elle une culture d'intérêt. Cependant, elle présente une sensibilité à certains facteurs biotiques et abiotiques qui peuvent

nuire à son rendement et par conséquent réduire sa rentabilité par rapport à d'autres cultures telles que les cultures céréalières (Ruisi et al. 2017).

1.1.2 Atouts agronomiques et environnementaux

1.1.2.1 Fixation de l'azote et autres avantages dans les rotations

La féverole est capable d'établir une symbiose avec les bactéries du sol du genre *Rhizobium*, cette symbiose se traduit par la formation de nodules racinaires. Cette association symbiotique permet la fixation biologique de l'azote atmosphérique (Van Berkum et al. 1995). La féverole a une capacité de fixation d'azote élevée comparativement à d'autres légumineuses telles que la lentille, le pois chiche, le haricot commun ou encore le pois fourrager (Unkovich et Pate 2000; Yang et al. 2010; Liu et al. 2019). Cette aptitude offre deux avantages, d'une part la féverole est autosuffisante en termes de nutrition azotée et d'autre part elle enrichit le sol pour les cultures suivantes et les espèces cultivées en association. Les rotations culturales et les pratiques agronomiques doivent être adaptées afin que la culture succédant la féverole bénéficie au mieux de la minéralisation de l'azote et également afin de réduire les éventuels risques environnementaux liés aux pertes par lessivage ou émission de protoxyde d'azote (N_2O) dans l'atmosphère (Jensen, Peoples, et Hauggaard-Nielsen 2010). La féverole forme également une symbiose avec des champignons mycorhiziens arbusculaires du sol. Cette relation symbiotique améliore la fixation d'azote atmosphérique, particulièrement dans les sols à faible teneur en nutriments (Jensen, Peoples, et Hauggaard-Nielsen 2010; Ruisi et al. 2017). Les mycorhizes améliorent notamment la solubilisation du phosphore qui est nécessaire au fonctionnement des nodules (Köpke et Nemecek 2010; Jensen, Peoples, et Hauggaard-Nielsen 2010).

Outre l'amélioration de la fertilité des sols grâce à la fixation biologique de l'azote, l'intégration de la féverole au sein des rotations culturales apporte de nombreux autres bénéfices. Parmi ceux-ci peuvent être cités de manière non exhaustive : la diversification des espèces cultivées grâce à l'ajout d'une espèce au sein des rotations ce qui entraîne l'amélioration indirecte de la biodiversité associée (Köpke et Nemecek 2010), la rupture des cycles des bioagresseurs au sein des rotations (Jensen, Peoples, et Hauggaard-Nielsen 2010; Köpke et Nemecek 2010), l'amélioration des caractéristiques biologiques du sol via la stimulation de l'activité microbienne (Wahbi et al. 2016; Aschi et al. 2017), l'amélioration des caractéristiques physiques du sol via l'amélioration de la structure du sol (Rochester et al. 2001) et l'amélioration des caractéristiques chimiques du sol via notamment la mobilisation

d'éléments nutritifs non azotés tels que le phosphore et le potassium (Köpke et Nemecek 2010).

1.1.2.2 Diminution des émissions de gaz à effet de serre

L'agriculture intensive utilise des quantités importantes d'engrais azotés de synthèse. La production de ce type d'engrais nécessite l'utilisation d'une quantité importante d'énergie fossile et nucléaire, entre 42 et 90 MJ d'énergie sont nécessaires pour produire 1 kg d'azote. En prenant en compte la fabrication et le transport, 1 kg d'azote produit représente une émission de gaz à effet de serre comprise entre 2,8 kg et 16,1 kg équivalent CO₂ (Köpke et Nemecek 2010). L'enrichissement naturel du sol en azote par la féverole permet de limiter considérablement l'apport d'engrais azotés de synthèse aux cultures suivantes. Par exemple, la mise en place d'une culture de féverole précédemment à une culture de blé d'hiver permet une économie d'environ 30 kg d'engrais azotés par hectare pour obtenir un rendement similaire à celui obtenu avec un précédent blé (McEwen et al. 1990). Également, dans une rotation sans légumineuse la culture de coton nécessite en moyenne 180 kg d'engrais azotés par hectare tandis qu'elle nécessite approximativement 90 kg d'engrais azotés par hectare lorsque la rotation inclut une légumineuse (Rochester et al. 2001). En plus des émissions de gaz à effet de serre liées à la production et au transport de l'engrais, des émissions de N₂O se produisent après son application. Cependant, l'impact de la fixation biologique de l'azote par les légumineuses sur les émissions de N₂O est aussi controversé (Köpke et Nemecek 2010). Plusieurs études ont démontré que les émissions de N₂O sont tout de même plus faibles pour les sols où sont cultivées des légumineuses que pour ceux sous cultures non légumineuses fertilisées à l'azote (Jensen et al. 2012; Ruisi et al. 2017). Par conséquent, l'introduction de la féverole dans les rotations permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre liées à l'utilisation d'engrais azotés de synthèse (Ruisi et al. 2017).

1.1.2.3 Composition des graines

Les graines de féverole sont largement utilisées à travers le monde en alimentation humaine et animale principalement pour leurs teneurs importantes en protéines et en amidon. En revanche, le choix de la variété cultivée doit être réfléchi en fonction de l'utilisation souhaitée des graines. En effet, la large variabilité génétique au sein de l'espèce *V. faba* entraîne des teneurs variables en tanins qui sont des composés polyphénoliques dans les téguments des graines et en vicine et convicine qui sont des glucopyranosides dans les cotylédons. Ces éléments sont connus pour avoir des effets antinutritionnels, principalement dans l'alimentation des monogastriques. De plus, en alimentation humaine, la vicine et la convicine

sont des précurseurs de la divicine et de l'isouramile. Ces composés peuvent provoquer le favisme chez les individus ayant une déficience de l'enzyme glucose-6-phosphate déshydrogénase (G6PD). Grâce à l'amélioration génétique, des variétés contenant de faibles teneurs en tanins, vicine et convicine sont disponibles (Crépon et al. 2010).

Dans les pays occidentaux industrialisés, les besoins en protéines et en énergie des animaux d'élevage sont principalement satisfaits par l'importation de soja. La féverole peut se substituer, au moins en partie, au tourteau de soja dans l'alimentation des monogastriques et des ruminants. La production locale de féverole permet de réduire la dépendance des systèmes de production animale à l'importation de tourteau de soja et permet par conséquent de réduire la consommation d'énergie et les impacts environnementaux liés à la culture et au transport de ce dernier (Köpke et Nemecek 2010). En ce qui concerne l'alimentation humaine, l'augmentation de la consommation de féverole peut remplacer partiellement la consommation de protéines animales et ainsi réduire les charges environnementales liées à la production de ces dernières (Multari, Stewart, et Russell 2015). Outre la possibilité de remplacement des protéines animales, la féverole est reconnue comme bénéfique pour la santé humaine grâce notamment à son apport de fibres, de nombreux autres nutriments et de métabolites secondaires. La graine contient également de la L-3,4-dihydroxyphénylalanine (L-DOPA) naturelle, une molécule utilisée pour traiter la maladie de Parkinson (Multari, Stewart, et Russell 2015; Etemadi et al. 2019).

1.1.2.4 Ressources pour les auxiliaires de culture

La féverole joue un rôle important dans le maintien de la diversité et de l'abondance de nombreux pollinisateurs en leur offrant une source de pollen et de nectar (Köpke et Nemecek 2010). De plus, la féverole étant partiellement allogame, la présence de pollinisateurs profite à son rendement. La pollinisation croisée permet d'augmenter le nombre de gousses par plantes, le nombre de graines par gousses et le poids des graines, ce qui peut augmenter le rendement total jusqu'à 185% par rapport à l'autopollinisation (Nayak et al. 2015). Les principaux pollinisateurs observés en culture de féverole en régions tempérées sont les bourdons (*Bombus* Latreille, 1802) avec principalement les espèces *Bombus terrestris* (Linnaeus, 1758), *Bombus hortorum* (Linnaeus, 1761), *Bombus pascuorum* (Scopoli, 1763), *Bombus lapidarius* (Linnaeus, 1758), *Bombus hypnorum* (Linnaeus, 1758) et *Bombus pratorum* (Linnaeus, 1761), les abeilles mellifères *Apis mellifera* Linnaeus, 1758 ainsi que quelques abeilles solitaires telles que des espèces appartenant aux genres *Lasioglossum* Curtis, 1833 et *Andrena* Fabricius, 1775. Cependant, tous ces insectes ne participent pas au même degré à la

pollinisation croisée de la féverole. Les espèces de bourdons à longues langues (*B. hortorum* et *B. pascuorum*) et à langues intermédiaires (*B. lapidarius*) sont les pollinisateurs les plus efficaces. Les fleurs de féverole ayant une corolle profonde, ces insectes sont particulièrement adaptés à la morphologie florale de la plante. Les abeilles mellifères et solitaires ainsi que les bourdons à courtes langues se nourrissent du nectar des fleurs mais participent nettement moins à la pollinisation croisée (Garratt et al. 2014; Nayak et al. 2015; Marzinzig et al. 2018).

Outre les insectes pollinisateurs, la féverole est également attractive pour d'autres auxiliaires de culture. Les fleurs ainsi que les nectaires extrafloraux fournissent une source de nourriture pour certains insectes dont les larves sont prédatrices tels que les syrphes (Diptera : Syrphidae) et les chrysopes (Neuroptera : Chrysopidae) et pour certaines espèces de parasitoïdes (Schulz-Kesting et al. 2021). Le nectar extrafloral de *V. faba* est notamment consommé par certains Ichneumonidae (Hymenoptera) (Bugg, Ellis, et Carlson 1989; Jamont, Crépellière, et Jaloux 2013). De plus, la féverole offre des sites de ponte pour de nombreux parasitoïdes (Schulz-Kesting et al. 2021) puisqu'elle est généralement infestée par divers insectes hôtes de ceux-ci (Stoddard et al. 2010). La présence de coccinelles (Coleoptera : Coccinellidae) est également observée dans cette culture (Nuessly et al. 2004).

1.1.3 Faiblesses

1.1.3.1 Sensibilité aux stress abiotiques

La féverole a des besoins spécifiques en eau, en éléments nutritifs et en température pour assurer son développement et sa croissance. Lorsque les conditions optimales ne sont pas réunies, cela engendre un stress chez la plante. Le principal stress abiotique affectant la culture de féverole est la sécheresse (Duc et al. 2015). Le taux de fixation symbiotique d'azote diminue lorsque la disponibilité en eau est réduite. Certaines variétés supportent cependant mieux le déficit hydrique notamment en réduisant leur taux de transpiration foliaire précocement lorsque le sol s'assèche (Kibbou et al. 2022). La féverole est également sensible au stress thermique. Elle supporte relativement bien les basses températures mais peut tout de même être affectée par les fortes gelées. Les températures trop hautes ont un effet néfaste sur la culture en affectant notamment le développement des gousses. L'engorgement du sol en eau est également susceptible d'impacter la féverole même si celle-ci est plus tolérante à ce facteur que de nombreuses autres légumineuses. La tolérance au stress thermique et à l'engorgement en eau est, comme pour la tolérance au stress hydrique, variable selon les variétés (Duc et al. 2015).

1.1.3.2 Sensibilité aux stress biotiques

L'espèce *V. faba* est confrontée à de nombreux stress biotiques provoqués par la présence d'organismes vivants tels que des champignons, des plantes parasites, des arthropodes ou encore des nématodes (Stoddard et al. 2010; Duc et al. 2015).

La féverole peut être affectée par plusieurs maladies fongiques. Les maladies les plus répandues et les plus dommageables sont la maladie de la tache chocolat causée par *Botrytis fabae* Sard., l'ascochytose causée par *Ascochyta fabae* Speg., la rouille causée par *Uromyces viciae-fabae* (Pers.) J. Schröt., le mildiou causé par *Peronospora viciae* f. sp. *fabae* (Berk.) Caspary et la cercosporiose causée par *Cercospora zonata* G. Winter. La féverole présente également une sensibilité à d'autres agents pathogènes généralistes tels que *Rhizoctonia solani* J.G. Kühn, *Fusarium oxysporum* Schltdl., *Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) de Bary et *Alternaria alternata* (Fr.) Keissl. (Stoddard et al. 2010; Duc et al. 2015).

Les orobanches sont les principales plantes parasites affectant la féverole. Trois espèces peuvent parasiter la culture. La plus répandue est l'orobanche crénelée (*Orobanche crenata* Forssk.), mais l'orobanche égyptienne (*Phelipanche aegyptiaca* (Pers.) Pomel) et l'orobanche fétide (*Orobanche foetida* Poir.) sont également dommageables (Stoddard et al. 2010; Duc et al. 2015).

Différents nématodes peuvent s'attaquer à la féverole. Tout d'abord les nématodes des tiges qui sont un ensemble d'espèces de *Ditylenchus dipsaci* (Kühn, 1857) Filipjev, 1936, ensuite les nématodes des racines qui sont des espèces du genre *Pratylenchus* Filipjev, 1936 et enfin les nématodes à galles *Meloidogyne incognita* (Kofoid and White, 1919) Chitwood, 1949 et *Meloidogyne javanica* (Treub, 1885) Chitwood, 1949 (Stoddard et al. 2010; Duc et al. 2015).

La féverole est également la cible de plusieurs arthropodes nuisibles, principalement des insectes. Parmi ceux présents en Europe, les plus importants sont le puceron noir *Aphis fabae* Scopoli, 1763 (Hemiptera : Aphididae), la sitone du pois *Sitona lineatus* (Linnaeus, 1758) (Coleoptera : Curculionidae) et la bruche de la fève *Bruchus rufimanus* Boheman, 1833 (Coleoptera : Chrysomelidae) (Stoddard et al. 2010; Duc et al. 2015).

1.2 *Bruchus rufimanus* Boheman, 1833 (Coleoptera : Chrysomelidae)

1.2.1 Généralités

Bruchus rufimanus Boheman, 1833 est un ravageur majeur de *V. faba* présent dans de nombreux pays et particulièrement dans les régions du monde où la féverole est cultivée. Cet insecte appartient à l'ordre des Coleoptera, à la famille des Chrysomelidae et à la sous-famille des Bruchinae (Ward 2018; Segers et al. 2021). Cette sous-famille regroupe 1700 espèces dont environ 30 entraînent d'importants dommages économiques, 9 espèces parmi ces dernières sont cosmopolites (Segers et al. 2021). Les espèces appartenant à cette sous-famille sont divisées en deux groupes, d'une part les espèces univoltines qui engendrent des dégâts durant la saison de culture de la plante hôte mais pas en post-récolte et d'autre part les espèces multivoltines qui occasionnent des dégâts pendant la période de culture et en post-récolte durant le stockage des graines, *B. rufimanus* fait partie du premier groupe (Ward 2018; Segers et al. 2021). Le stade dommageable est le stade larvaire, les larves se nourrissent de l'endosperme des graines en formation. Huit espèces du genre *Vicia* et trois espèces du genre *Lathyrus* sont identifiées comme plantes hôtes des larves. Le régime alimentaire des adultes est quant à lui constitué de nectar et de pollen de ces mêmes plantes hôtes mais également d'autres plantes selon la disponibilité en ressources (Segers et al. 2021).

1.2.2 Cycle de vie en culture de féverole

Au printemps, lorsque les températures atteignent 15°C, les adultes en diapause reproductive commencent à coloniser les cultures de féverole (Medjdoub-Bensaad, Khelil, et Huignard 2007; Roubinet 2016; Segers et al. 2021). Ce sont les mâles qui colonisent en premier les cultures lorsque celles-ci sont au stade végétatif (Medjdoub-Bensaad, Khelil, et Huignard 2007; Segers et al. 2021), ils consomment alors le nectar présent dans les nectaires extrafloraux (Pölitiz et Reike 2019; Segers et al. 2021). Lorsque la floraison débute, les femelles colonisent à leur tour les cultures (Medjdoub-Bensaad, Khelil, et Huignard 2007; Segers et al. 2021). Par conséquent, au début de la colonisation, le nombre de mâles est plus important que le nombre de femelles (Medjdoub-Bensaad, Khelil, et Huignard 2007; Hamidi, Taupin, et Frérot 2021). La levée de la diapause reproductive nécessite une augmentation de la photopériode jusqu'à 16 heures et chez les femelles, outre le besoin d'une photopériode de 16 heures, la consommation de pollen de féverole est essentielle (Tran et Huignard 1992; Segers et al. 2021). Ces facteurs ne permettent la levée de la diapause que si celle-ci a duré 6 à 7 mois (Tran, Darquenne, et Huignard 1993; Segers et al. 2021). La plus forte densité de

bruches est observée pendant le pic de floraison des cultures (Gailis et al. 2022) et le sexe-ratio s'équilibre (Hamidi, Taupin, et Frérot 2021). La reproduction a lieu durant 2 à 3 semaines, principalement sur les fleurs des plantes (Segers et al. 2021) et est optimale lorsque les températures sont comprises entre 20°C et 25°C (Roubinet 2016; Segers et al. 2021). Lorsque la période de floraison touche à sa fin, les mâles quittent les cultures tandis que les femelles y restent afin de pondre sur les jeunes gousses durant la période de fructification (Segers et al. 2021). Une inversion du sexe-ratio par rapport au début de la colonisation a lieu, le nombre de femelles devient plus important que le nombre de mâles (Medjdoub-Bensaad, Khelil, et Huignard 2007; Hamidi, Taupin, et Frérot 2021). La ponte commence dès que les premières gousses se forment et dure approximativement 6 semaines (Segers et al. 2021). La période de ponte est variable selon les régions et les climats, en Lettonie par exemple elle dure en moyenne 4 à 5 semaines et peut durer jusqu'à 9 semaines dans d'autres régions du monde (Gailis et al. 2022). Une femelle est capable de pondre en moyenne entre 50 et 100 œufs (Roubinet 2016). L'éclosion des œufs a lieu 1 à 3 semaines après la ponte mais la majorité éclosent après 10 jours. Les larves percent la paroi des gousses et entrent par la suite dans les graines où elles consomment l'endosperme. Deux à trois larves peuvent être présentes par graine (Roubinet 2016; Segers et al. 2021). Le développement larvaire comprend quatre stades et après ceux-ci, la nymphose a lieu (Segers et al. 2021). Deux stratégies de développement existent chez *B. rufimanus* en fonction du moment de la nymphose. La première stratégie consiste en l'émergence des adultes à la fin de l'été, ils se nourrissent alors de fleurs présentes dans leur environnement avant de rechercher un habitat approprié pour passer l'hiver en diapause reproductive tel que des haies, du lichen ou encore des écorces d'arbres. La seconde stratégie consiste en un ralentissement du développement post-embryonnaire qui permet aux individus de passer l'hiver dans les graines en diapause larvaire ou nymphale et de reprendre leur développement au printemps suivant après le semis des graines (Medjdoub-Bensaad, Khelil, et Huignard 2007; Segers et al. 2021). Environ la moitié des individus emploie la première stratégie et par conséquent l'autre moitié la seconde (Gailis et al. 2022). Ceci implique qu'il existe deux types de colonisation au printemps : la colonisation par les individus ayant passé l'hiver dans l'environnement en diapause reproductive, celle-ci débute lorsque les températures atteignent 15°C et la colonisation par les individus ayant passé l'hiver dans les graines en diapause larvaire ou nymphale, cette dernière est levée lorsque les conditions d'humidité et de température du sol sont optimales pour permettre la reprise du développement des individus (Medjdoub-Bensaad, Khelil, et Huignard 2007; Roubinet 2016; Segers et al. 2021).

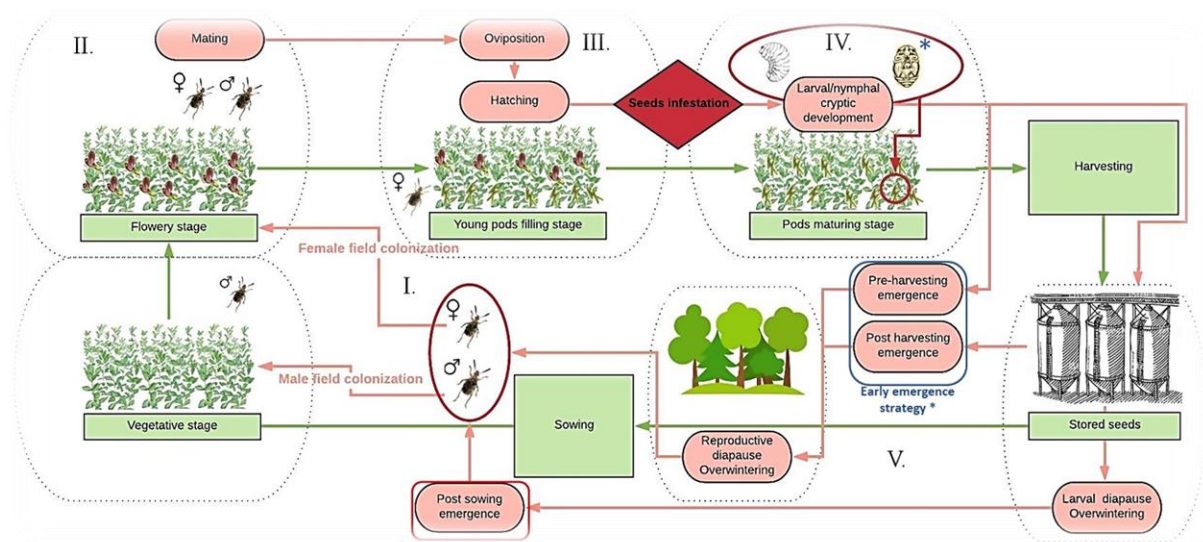


Figure 1 : Cycle de vie de *Bruchus rufimanus* (en rose) en fonction de la phénologie de *V. faba* et des pratiques culturales associées (en vert). I. Colonisation de la culture au stade végétatif par les mâles et au stade de floraison par les femelles ; II. Accouplement après la levée de la diapause reproductive ; III. Oviposition sur les gousses en formation durant le stade de fructification de la culture et éclosion des œufs ; IV. Développement des larves durant le stade de maturation des graines ; V. Emergence des adultes avant la récolte et hivernage des adultes en diapause reproductive dans l'environnement ou hivernage en diapause larvaire ou nymphale dans les graines jusqu'au semis de l'année suivante. © A. Segers.

Il existe quelques différences entre la colonisation des cultures de féverole d'hiver et de printemps par *B. rufimanus*. La période de floraison a lieu plus tardivement en féverole de printemps. L'évolution du sexe-ratio au cours de la colonisation des variétés de printemps diffère de celle décrite précédemment. Les individus sont en majorité déjà matures sexuellement dès le début de l'infestation, c'est-à-dire dès le début de la floraison de la culture, et le sexe-ratio est déséquilibré en faveur des femelles. De plus, une grande proportion des femelles arrivant dans les cultures sont gravides. Ensuite, comme en féverole d'hiver, le sexe-ratio s'équilibre au cours de la période de floraison et est déséquilibré en faveur des femelles durant la période de fructification de la culture qui correspond à la période de ponte. La densité de bruches est plus importante en féverole d'hiver qu'en féverole de printemps. Également, la période de fructification est plus précoce et plus longue pour les variétés semées en hiver, ce qui permet une plus longue période de ponte et par conséquent plus de dégâts en féverole d'hiver (Hamidi, Taupin, et Frérot 2021).

1.2.3 Dégâts en culture de féverole

Les larves de *B. rufimanus* se développent à l'intérieur des graines de *V. faba*. La consommation des réserves de la graine par les larves entraîne une réduction du poids des graines et diminue la capacité de germination de celles-ci (Kaniuczak 2004; Titouhi, Amri, et

Mediouni Ben Jemâa 2015; Khelfane-Goucem et Medjdoub-Bensaad 2016; Segers et al. 2021). La capacité de germination de la graine diminue à mesure que le nombre de larves qui s'y développent augmente (Khelfane-Goucem et Medjdoub-Bensaad 2016). De plus, les larves laissent des excréments dans les galeries qu'elles creusent à l'intérieur de la graine (Khelfane-Goucem et Medjdoub-Bensaad 2016; Segers et al. 2021). Lorsque les adultes émergent, ils perforent la graine ce qui entraîne la formation de trous dans celle-ci (Segers et al. 2021). Les graines endommagées sont plus susceptibles d'être infestées par d'autres organismes phytopathogènes (Kaniuczak 2004; Segers et al. 2021) tels que des champignons appartenant aux genres *Penicillium* Link et *Aspergillus* P.Micheli ex Haller (Boughdad et Lauge 1995) dont certaines espèces produisent des mycotoxines toxiques pour les animaux et les humains (Baliukoniene, Bakutis, et Stankevicius 2003). Par conséquent, des pertes qualitatives et quantitatives dans la production de féverole sont causées par *B. rufimanus* (Kaniuczak 2004; Khelfane-Goucem et Medjdoub-Bensaad 2016; Segers et al. 2021). Les dommages causés par ce ravageur peuvent toucher 3% à 70% de la production selon les variétés cultivées (Kaniuczak 2004; Khelfane-Goucem et Medjdoub-Bensaad 2016). Les normes de qualité imposées par les marchés entraînent une dévalorisation des graines et par conséquent une réduction des exportations. Cela provoque une perte économique importante pour les producteurs. Pour les graines destinées à la consommation humaine, le taux de graines infestées par *B. rufimanus* ne doit pas excéder 3% et il ne doit pas excéder 10% pour celles destinées à l'alimentation animale (Hamidi, Taupin, et Frérot 2021; Segers et al. 2021).

1.2.4 Les méthodes de lutte

La lutte conventionnelle contre *B. rufimanus* en culture de féverole est basée sur l'application d'insecticides pyréthrinoïdes durant la floraison et au début de la période de fructification de la culture afin de viser les adultes avant la période de ponte (Ward 2018; Segers et al. 2021). Les substances actives autorisées en Europe sont la zeta-cyperméthrine, la lambda-cyhalothrine et la deltaméthrine. Leur utilisation est limitée à un maximum de deux applications pendant la floraison et est même interdite lorsque la culture est déclarée comme surface d'intérêt écologique (SIE) (Segers et al. 2021). De plus, l'efficacité de ces insecticides est loin d'être optimale. Le couvert végétal dense de la féverole représente un obstacle pour la bonne répartition des produits sur les plantes et les températures élevées réduisent la persistance de ceux-ci et favorisent l'activité du ravageur (Ward 2018; Segers et al. 2021). Ward (2018) a d'ailleurs démontré que les traitements aux pyréthrinoïdes ne permettent pas toujours de réduire le nombre de graines infestées. De plus, le risque d'apparition de

résistance chez *B. rufimanus* est important et les pyréthriinoïdes sont fortement néfastes pour les pollinisateurs (Ward 2018; Segers et al. 2021). Pour ces raisons, le développement et la mise en œuvre de méthodes de lutte alternatives telles que l'utilisation de substances sémiochimiques (Bruce et al. 2011; Frerot et Leppik 2018; Segers et al. 2021) sont indispensables. L'utilisation de substances sémiochimiques est prometteuse dans le cadre du développement de stratégies « Integrated Pest Management » (IPM) (Heuskin et al. 2011; Segers et al. 2021). Les molécules utilisées ont un impact sur l'environnement et la santé humaine nettement moindre que celui des pesticides de synthèse (Heuskin et al. 2011).

1.3 Ecologie chimique et lutte sémiochimique

1.3.1 Principes généraux d'écologie chimique

Les interactions insectes-insectes et plantes-insectes sont médiées par des substances sémiochimiques. Celles-ci peuvent être définies comme des substances informatives émises par des individus qui influencent le comportement et la physiologie d'autres individus. Deux groupes de substances sémiochimiques peuvent être distingués : les substances allélochimiques qui sont impliquées dans les relations interspécifiques et les phéromones qui sont impliquées dans les relations intraspécifiques. Les substances allélochimiques sont subdivisées en plusieurs catégories : les allomones qui sont des substances offrant un avantage à l'espèce émettrice, les kairomones offrant un avantage à l'espèce réceptrice et les synomones qui offrent un avantage à l'espèce émettrice et réceptrice (Nordlund et Lewis 1976; Heuskin et al. 2011; Blassioli-Moraes et al. 2019). Les phéromones sont elles aussi subdivisées en catégories. Les plus communes sont les phéromones sexuelles qui sont émises pour attirer les partenaires pour l'accouplement, les phéromones d'agrégation émises pour attirer les autres individus dans le but de partager une ressource, les phéromones d'alarme qui permettent d'informer les autres d'une menace, les phéromones de piste utilisées chez les insectes sociaux pour indiquer la piste permettant d'atteindre une ressource et les phéromones de marquage de l'hôte qui ont pour but de réduire la compétition intraspécifique (Heuskin et al. 2011; Blassioli-Moraes et al. 2019).

1.3.2 Ecologie chimique de *Bruchus rufimanus* en culture de féverole

Le cycle de développement de *B. rufimanus* est contrôlé par trois étapes indispensables : les adultes doivent pouvoir trouver des ressources alimentaires, ils doivent ensuite être capable de localiser des partenaires sexuels pour réaliser la reproduction et enfin, les femelles doivent être en mesure de localiser le substrat de ponte qui permettra la survie de leur progéniture. Différentes substances chimiques émises par *B. rufimanus* et *V. faba* sont captées par *B.*

rufimanus et régulent ces étapes (Segers et al. 2021). Tout d'abord, une kairomone florale de *V. faba* permet aux bruches adultes de localiser les fleurs de la plante pour venir s'y nourrir après leur émergence au printemps. Elle est plus attractive pour les mâles que pour les femelles. Elle est composée de (R)-linalool (27,5%), de α et β caryophyllène (50,6%), de (R)-limonène (10,4%), de 4-allylanisole (4,5%), de myrcène (2,7%), de (E)-ocimène (1,8%), de cinnamaldéhyde (1,2%) et d'alcool cinnamique (0,6%). Ensuite, une phéromone sexuelle est émise par les mâles afin d'attirer les femelles pour la reproduction. Elle est composée de 1-undécène. Cependant, elle n'est pas efficace seule, elle agit en synergie avec la kairomone florale de *V. faba* (Bruce et al. 2011; Ward 2018; Segers et al. 2021). Enfin, une kairomone émise par les gousses de *V. faba* permet aux femelles gravides de localiser leur substrat de ponte. Elle est composée d'acétate de cis-3-hexényle (30-40%), d'ocimène (15-20%), de linalool (10-20%), de α et β caryophyllène (10-20%) et de limonène (15-20%) (Frerot et Leppik 2018; Segers et al. 2021).

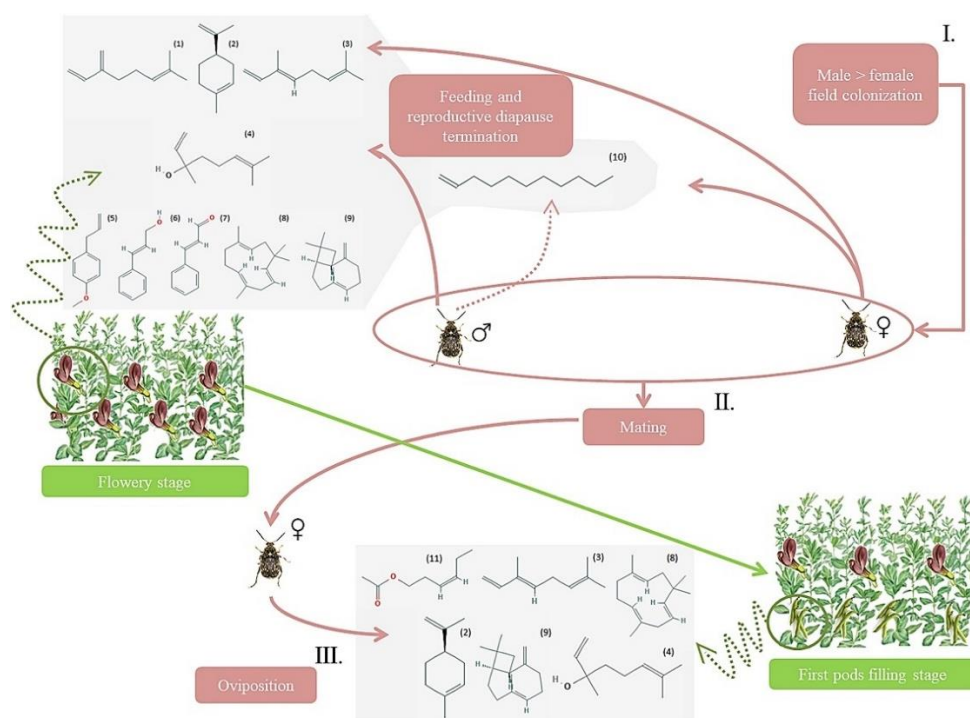


Figure 2 : Illustration des processus chimiques contrôlant les trois premières étapes du développement de *Bruchus rufimanus* en culture de féverole sur base des connaissances actuelles. I. Attraction principalement des mâles mais également des femelles par une kairomone florale de *V. faba* ; II. Attraction des femelles pour la reproduction par la combinaison de la kairomone florale de *V. faba* et d'une phéromone sexuelle émise par les mâles ; III. Attraction des femelles gravides par une kairomone émise par les gousses de *V. faba*. © A. Segers

1.3.3 Principes généraux de lutte sémiochimique

Les méthodes de lutte sémiochimique consistent à formuler et utiliser des substances sémiochimiques pour manipuler le comportement des ravageurs. Différentes stratégies peuvent être mises en place (Heuskin et al. 2011).

La surveillance consiste à détecter la présence des ravageurs et à suivre l'évolution des populations à l'aide de pièges contenant des attractants spécifiques. L'objectif est de pouvoir agir contre les ravageurs au moment opportun par exemple en appliquant un traitement insecticide (Baker et Heath 2005; Witzgall, Kirsch, et Cork 2010).

Le piégeage de masse consiste à capturer un grand nombre de ravageurs grâce à l'utilisation d'un leurre attractif afin d'éliminer une part importante de la population (Baker et Heath 2005; Witzgall, Kirsch, et Cork 2010).

Une variante du piégeage de masse est la stratégie « attract and kill ». Cette stratégie consiste à attirer les ravageurs avec un leurre attractif et à associer à ce leurre une substance toxique permettant de tuer les individus (El-Sayed et al. 2009). Au lieu d'une substance toxique, des microorganismes entomopathogènes peuvent être utilisés. Ceux-ci peuvent ensuite être disséminés dans la population par l'intermédiaire des individus contaminés et permettent finalement d'éliminer les ravageurs (Lopes et al. 2014; Blassioli-Moraes et al. 2019).

La confusion sexuelle consiste à perturber l'accouplement des individus grâce à l'utilisation de phéromones sexuelles spécifiques. Les individus sont alors incapables de trouver des partenaires pour la reproduction (Byers 2007; Miller et al. 2010).

La stratégie « push-pull » consiste quant à elle à utiliser une substance répulsive dans la culture pour repousser les ravageurs hors de celle-ci et à simultanément attirer les insectes dans une autre zone à l'aide d'une substance attractive. Dans cette zone les ravageurs sont éliminés, par exemple grâce à la mise en place de stratégies qui visent à favoriser la présence de leurs ennemis naturels (Cook, Khan, et Pickett 2007).

Pour être optimales, les méthodes de lutte sémiochimiques doivent minimiser leur impact sur les auxiliaires. Les pièges utilisés doivent être spécifiques aux ravageurs ciblés et minimiser les captures d'autres insectes (Mori et Evenden 2013; Fountain et al. 2017). Cependant, certains types de pièges et d'attractants sémiochimiques peuvent avoir un impact considérable sur les auxiliaires de cultures (Hendrix et Showers 1990; Gross et Carpenter 1991; Mori et Evenden 2013; Fountain et al. 2017).

1.3.4 Méthodes de lutte sémiochimique contre *Bruchus rufimanus*

Des méthodes de lutte sémiochimique pour *B. rufimanus* en culture de féverole sont en cours de développement. Les stratégies principalement développées jusqu'aujourd'hui sont la surveillance et le piégeage de masse. La stratégie de confusion sexuelle n'est actuellement pas possible à mettre en place à cause d'un manque de connaissance sur les phéromones sexuelles de l'espèce (Segers et al. 2021). Bruce et al. (2011) ont réalisé une étude sur le développement d'une stratégie de surveillance basée sur l'utilisation de pièges appâtés avec un attractant sémiochimique. Dans cette étude, un attractant imitant l'odeur des fleurs de féverole composé de (R)-linalool (17,7 mg/jour), d'alcool cinnamique (0,4 mg/jour) et de cinnamaldéhyde (0,77 mg/jour) a été utilisé et s'est avéré être efficace. Cependant, dans une expérimentation menée par Ward (2018) cet attractant s'est révélé être trop peu concurrentiel face à l'odeur naturellement émise par les fleurs de féverole. La surveillance n'est pas la stratégie la plus intéressante. En effet, elle permet de raisonner l'application des traitements insecticides mais elle inclut tout de même le recours à ces derniers. Le piégeage de masse semble par conséquent plus intéressant (Segers et al. 2021). Cette méthode est utilisée dans de nombreux programmes de lutte intégrée contre divers insectes ravageurs (El-Sayed et al. 2006) dont des coléoptères appartenant à la famille des Chrysomelidae tels que *Diabrotica undecimpunctata howardi* Barber, 1947 et *Acalymma vittatum* (Fabricius, 1775) (Piñero 2018). L'Institut National de Recherche pour l'Agriculture et l'Environnement (INRAE) a développé deux attractants efficaces pour le piégeage de masse, l'un imitant l'odeur des fleurs dont le brevet et la composition sont indisponibles (Segers et al. 2021) et l'autre imitant l'odeur des gousses, composé d'acétate de (3Z)-hex-3-èn-1-yle (30% à 40% en poids), d'ocimène (15% à 20% en poids), de linalool (10% à 20% en poids), de caryophyllène (10% à 20% en poids) et de limonène (15% à 20% en poids) (Frerot et Leppik 2018). Ces attractants sont actuellement exploités par la société AgriOdor qui a également développé un piège spécifique pour *B. rufimanus* (Segers et al. 2021).

Les principales possibilités d'évolution en termes de développement de la lutte sémiochimique contre *B. rufimanus* sont le développement de stratégies « attract and kill » et « push-pull ». La stratégie « attract and kill » se baserait sur l'utilisation d'attractants sémiochimiques associés à un champignon entomopathogène. Les insectes contaminés par les conidies pourraient ensuite disséminer le pathogène à leurs congénères ce qui permettrait d'éliminer une part importante de la population (Segers et al. 2021). Les espèces de champignons entomopathogènes *Metarhizium anisopliae* (Metschn.) Sorokīn et *Beauveria*

bassiana (Bals.-Criv.) Vuill. semblent avoir du potentiel pour une telle application (Sabbour et Abd El-Aziz 2007). La stratégie « push-pull » se baserait quant à elle sur l'utilisation d'une substance répulsive dans la culture telle que l'huile végétale de nigelle, de moutarde (Sabbour et Abd El-Aziz 2007) ou encore d'*Artemisia campestris* L. (Titouhi et al. 2017) associée à une substance attractive qui permettrait d'attirer *B. rufimanus* hors de la culture. Idéalement, il faudrait également que les ennemis naturels du ravageur soient attirés dans la zone où le ravageur va se concentrer. Cependant, actuellement aucune information n'est disponible concernant les stratégies à mettre en œuvre pour favoriser leur présence (Segers et al. 2021). De nombreuses espèces d'Hyménoptères parasitoïdes de *B. rufimanus* sont identifiées. Dans la famille des Braconidae les espèces *Sigalphus gibberosus* Szépligeti, 1901, *Triaspis similis* (Szépligeti, 1901), *Triaspis luteipes* (Thomson, 1874), *Triaspis pallipes* (Nees, 1816), *Triaspis thoracica* (Curtis, 1860), *Chrémylus elaphus* Haliday, 1833, *Triaspis stictostiba* Martin, 1956 et *Triaspis obscurella* (Nees, 1816) sont identifiées (Titouhi et al. 2017; Bellifa et Chapelin-Viscardi 2021; Segers et al. 2021). Plusieurs espèces appartenant à la famille des Pteromalidae sont également identifiées, notamment *Anisopteromalus calandrae* (Howard, 1881), *Dinarmus acutus* (Thomson, 1878), *Dinarmus basalis* (Rondani, 1877), *Dinarmus magnus* (Rohwer, 1934), *Lariophagus distinguendus* (Förster, 1841). L'espèce *Eupelmus swezeyi* (Crawford, 1915) appartenant à la famille des Eupelmidae, l'espèce *Eurytoma wachtli* Mayr, 1878 de la famille des Eurytomidae (Bellifa et Chapelin-Viscardi 2021) ainsi que l'espèce *Uscana semifumipennis* Girault, 1911 de la famille des Trichogrammatidae (Bellifa et Chapelin-Viscardi 2021; Segers et al. 2021) sont également des parasitoïdes de la bruche de la fève. L'espèce *Zelus renardii* Kolenati, 1857 (Hemiptera : Reduviidae) est quant à elle prédatrice de la bruche (Bellifa et Chapelin-Viscardi 2021).

2 Objectifs

Dans ce contexte, ce travail de fin d'étude vise à évaluer l'impact d'associations entre deux types de pièges et trois attractants sémiochimiques sur l'entomofaune des cultures de féveroles. Plus précisément, les trois objectifs sont :

- (1) La détermination des associations de pièges et d'attractants les plus efficaces pour le piégeage de masse de *B. rufimanus* en féverole d'hiver et de printemps.
- (2) L'étude de l'influence de la phénologie de la culture sur le nombre de captures et le sexe-ratio des captures de *B. rufimanus* par les modalités de piégeage en féverole d'hiver et de printemps.
- (3) La détermination de l'impact des modalités de piégeage sur les auxiliaires de cultures en féverole d'hiver et de printemps, les groupes d'auxiliaires ciblés sont les Apoidea (Hymenoptera), les Coccinellidae (Coleoptera) et les Syrphidae (Diptera).

3 Matériel et méthodes

3.1 L'expérimentation menée au cours de l'année 2021

3.1.1 Les modalités de piégeage

Trois types d'attractants sémiologiques associés à deux types de pièges, soit six modalités de piégeage, ont été testés pour le piégeage de masse de *B. rufimanus*.

Les deux types de pièges qui ont été testés sont des pièges blancs (PB) et des pièges verts (PV). Les pièges blancs sont des pièges qui ont été développés par AgriOdor spécifiquement pour la capture de *B. rufimanus* (figure 3). Ce type de piège est composé d'un bol de collecte contenant de l'eau et un agent tensioactif inodore (TRITON X-100, 0,1% v/v) et d'un cylindre d'interception dans lequel est placé un leurre sémiologique. Les pièges verts sont des pièges de type « green funnel pan traps with cross barrier » (figure 4). Ce type de piège est composé d'un récipient de collecte contenant de l'eau et un agent tensioactif inodore (TRITON X-100, 0,1% v/v) et de plaques d'interception au centre desquelles un leurre sémiologique est placé.



Figure 3 : Piège blanc (PB), prototype développé par AgriOdor spécifiquement pour la capture de *Bruchus rufimanus*. © A. Segers



Figure 4 : Piège vert (PV), piège de type « green funnel pan traps with cross barrier ». © A. Segers

Les trois attractants kairomonaux qui ont été testés sont un attractant de type gousse développé par AgriOdor (AGDG), un attractant de type fleur également développé par AgriOdor (AGDF) et un attractant de type fleur développé par IPS (IPSF).

3.1.2 Le dispositif expérimental

L'expérimentation a été menée dans une parcelle d'essai de l'ASBL CePiCOP (figure 5) où différents essais en culture de protéagineux sont réalisés. La parcelle se situe dans la commune de Gembloux (Belgique) au lieu-dit « Les Isnes ». Elle se trouve à une altitude de 173,38 m et ses coordonnées géographiques sont les suivantes : 50°50'N ; 4°73'E. Afin d'assurer des conditions d'hyperinfestation, c'est-à-dire d'assurer la présence d'un nombre

important de bruches, l'expérimentation a été réalisée à côté de la parcelle où les essais de 2020 ont été menés et lors desquels une importante présence de bruches a été constatée.

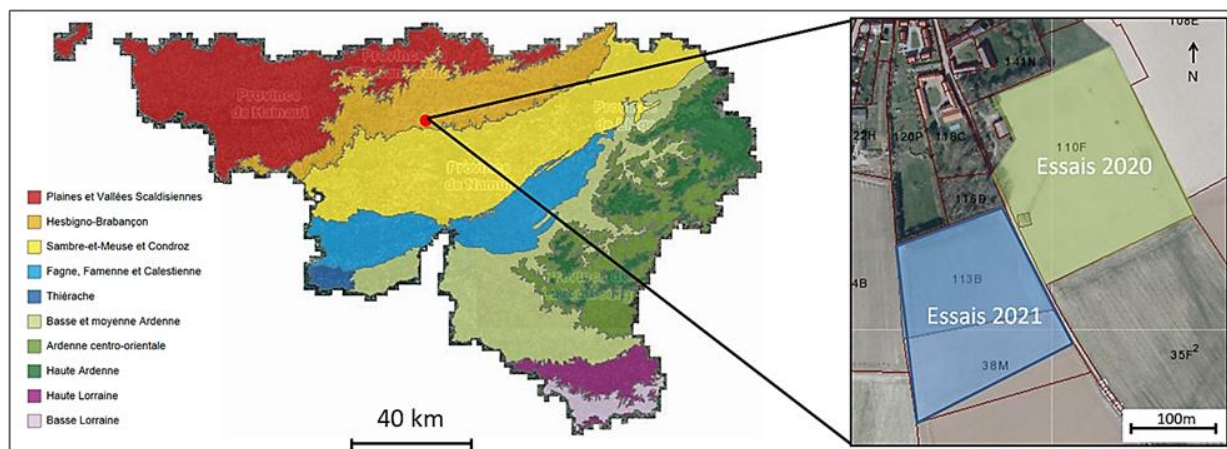


Figure 5 : Localisation des parcelles d'essais dans lesquelles ont été menés les tests de pièges et d'attractants sémiachimiques pour la lutte contre *Bruchus rufimanus* en culture de féverole en 2020 et 2021. © A. Segers

Deux dispositifs adjacents ont été installés, l'un en féverole d'hiver et l'autre en féverole de printemps (figure 6). Dans chaque dispositif, 4 répétitions de toutes les associations croisées entre les types de pièges et les attractants ont été placées. Au total 24 pièges ont été installés dans chaque dispositif. Les pièges ont été positionnés en doublets, chaque doublet est constitué d'un piège blanc et d'un piège vert associé au même attractant, les doublets ont été espacés d'une distance de 20 m. La mise en place des pièges a été faite dès l'apparition de boutons floraux dans les cultures. En féverole d'hiver, les pièges ont été installés le 15 avril 2021 et retirés le 29 juillet 2021. En féverole de printemps, ils ont été installés le 6 juin 2021 et retirés le 2 août 2021. Les attractants sémiachimiques ont été remplacés toutes les deux semaines.

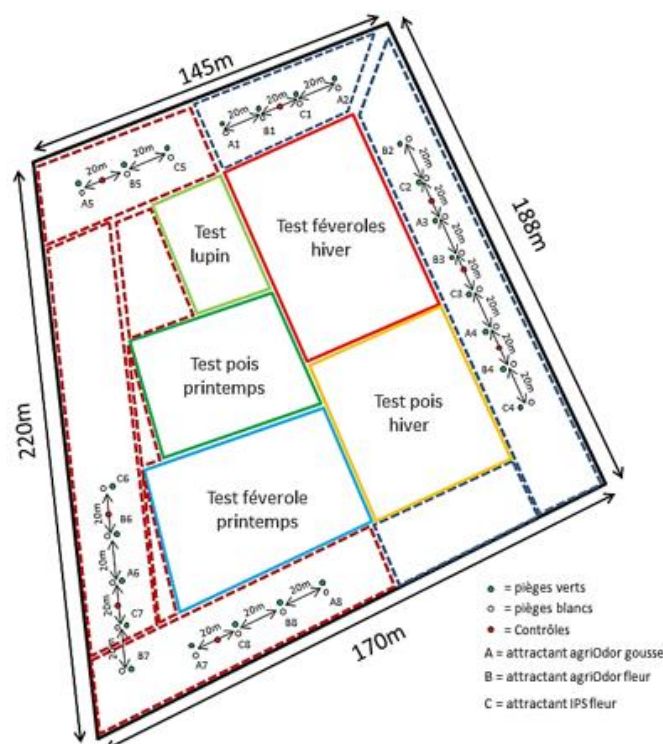


Figure 6 : Dispositif expérimental installé pour les tests de pièges et d'attractants sémiochimiques pour la lutte contre *Bruchus rufimanus* en culture de féverole d'hiver et de printemps en 2021. © A. Segers

3.1.3 La collecte des insectes et des données phénologiques des cultures

Le relevé des pièges a été réalisé une à deux fois par semaine. Les données phénologiques de la culture ont été mesurées à la même fréquence. La hauteur, le nombre de nœuds, le nombre de fleurs et le nombre de gousses ont été à chaque fois mesurés sur 5 plants sélectionnés aléatoirement. Également, des comptages visuels de bruches présentes dans les cultures ont été effectués par un opérateur selon un parcours standardisé. Les dates de l'ensemble des relevés des pièges et comptages visuels sont reprises dans le tableau 1.

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des dates de relevés des pièges et des comptages visuels de Bruchinae en féverole d'hiver et de printemps en 2021.

Dates des comptages visuels de Bruchinae en féverole d'hiver	Dates des relevés des pièges en féverole d'hiver	Dates des comptages visuels de Bruchinae en féverole de printemps	Dates des relevés des pièges en féverole de printemps
26/04/2021	29/04/2021	10/06/2021	10/06/2021
29/04/2021	03/05/2021	15/06/2021	17/06/2021
03/05/2021	07/05/2021	17/06/2021	25/06/2021
10/05/2021	10/05/2021	22/06/2021	06/07/2021
17/05/2021	13/05/2021	25/06/2021	12/07/2021
20/05/2021	20/05/2021	01/07/2021	19/07/2021
31/05/2021	24/05/2021	06/07/2021	26/07/2021
03/06/2021	27/05/2021	08/07/2021	02/08/2021
07/06/2021	31/05/2021	16/07/2021	
10/06/2021	03/06/2021	19/07/2021	
15/06/2021	07/06/2021	23/07/2021	
17/06/2021	15/06/2021	26/07/2021	
22/06/2021	22/06/2021	29/07/2021	
25/06/2021	01/07/2021	02/08/2021	
01/07/2021	08/07/2021		
06/07/2021	16/07/2021		
	23/07/2021		
	29/07/2021		

Les insectes collectés ont été triés par ordre entomologique, placés dans des flacons remplis d'éthanol à 70% (v/v) et ces derniers ont été étiquetés avec un code unique. Une base de données reprenant l'ensemble des informations relatives à chaque flacon a été créée.

3.2 La préparation des collections entomologiques

3.2.1 La préparation des insectes

Les insectes appartenant à l'ordre des Hymenoptera, à la famille des Syrphidae (Diptera), à la famille des Coccinellidae (Coleoptera) ainsi que ceux appartenant à la sous-famille des Bruchinae (Coleoptera : Chrysomelidae) ont été préparés en laboratoire afin de permettre leur

identification ultérieure. Le protocole utilisé pour la préparation des insectes a été inspiré de celui proposé par Mouret et al. (2007) et est décrit ci-après.

Chaque individu est extrait du flacon rempli d'éthanol dans lequel il est conservé à l'aide d'une pince molle. L'insecte est déposé dans un premier récipient contenant de l'eau à température ambiante et est légèrement agité dans cette eau pendant quelques secondes. L'insecte est déplacé dans un second récipient contenant également de l'eau à température ambiante dans lequel il reste immergé pendant environ une minute. L'insecte est ensuite rincé sous un jet d'éthanol à 70% (v/v) puis placé sur du papier absorbant pour un premier séchage. L'insecte est par la suite déposé entre deux feuilles de papier absorbant sec et est frictionné délicatement jusqu'à ce que le papier n'absorbe plus de liquide.

Les individus sont ensuite épinglés. Pour ce faire, l'insecte est déposé sur la face ventrale sur une plaque de frigolite et une aiguille entomologique de taille adaptée à celle de l'individu (taille 1, 0, 00 ou 000) est plantée perpendiculairement à travers le corps. La partie du corps où l'aiguille est plantée varie selon l'ordre entomologique auquel appartient l'individu, au centre du thorax pour les Hymenoptera et les Syrphidae et au centre de l'élytre droite pour les Coleoptera. L'insecte doit se trouver à 10 mm sous la tête de l'aiguille. A l'aide d'aiguilles entomologiques, les différentes parties du corps de l'insecte sont placées de manière à permettre une observation aisée des critères nécessaires à l'identification. Les pattes antérieures sont positionnées vers l'avant et les pattes médianes et postérieures vers l'arrière. Pour les individus appartenant à la sous-famille des Bruchinae, seules les pattes médianes sont étalées. Les antennes sont décollées de la tête et placées vers l'avant. Pour les Hymenoptera et les Syrphidae, les ailes doivent être étalées, elles sont placées perpendiculairement au corps. Les Hymenoptera ayant une importante pilosité sont brossés à l'aide d'un pinceau afin de leur donner un aspect plus naturel. Les individus épinglés sont ensuite laissés 3 à 5 jours dans un environnement sec pour permettre leur séchage. Les spécimens ayant un corps de largeur inférieure à 1 mm ne sont pas épinglés, ils sont conservés dans de l'éthanol à 70% (v/v) et seront ultérieurement identifiés dans celui-ci. Leur taille trop réduite ne permet pas de les préparer selon le protocole exposé sans les endommager.

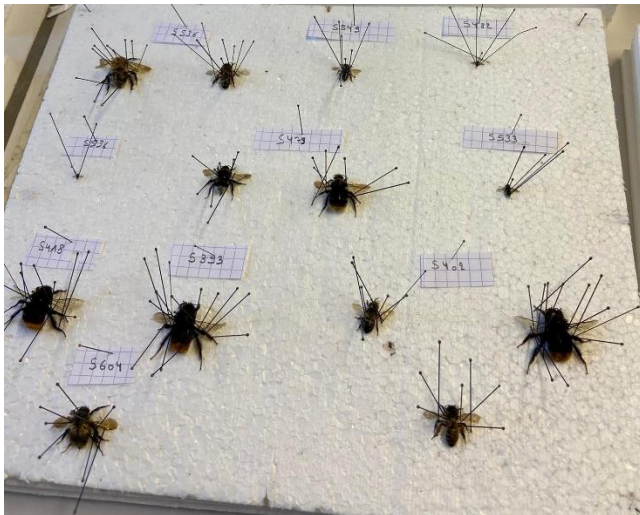


Figure 7 : Quelques spécimens collectés dans les pièges épinglés en cours de séchage.

Les individus épinglés et secs sont étiquetés. Deux étiquettes sont placées sous l'insecte. La première indique la localité de la capture, le nom du collecteur, la date de la capture et le numéro d'identification unique de l'insecte. La seconde indique la longitude et la latitude du lieu de capture et la modalité de piégeage.



Figure 8 : Quelques spécimens collectés dans les pièges épinglés et étiquetés.

3.2.2 L'identification des insectes

L'ensemble des identifications a été réalisé à l'aide d'un binoculaire. L'identification des Coccinellidae jusqu'à l'espèce a été réalisée à l'aide des clés d'identification « Clef de terrain pour la reconnaissance des principales coccinelles de Wallonie (Chilocorinae, Coccinellinae et Epilachninae) » de Bagnée et Branquart (2000) et « Ladybirds » de Roy et al. (2013). L'identification des Syrphidae jusqu'à l'espèce a été effectuée à l'aide des clés d'identification « Syrphides (Syrphidae) » de Verlinden (1994) et « Hoverflies » de Gilbert

(2015). L'identification des syrphes les plus difficiles a été réalisée par Prof. Frédéric Francis. L'identification jusqu'à l'espèce des Apoidea (Hymenoptera) a été effectuée par Mme Bonnet Julie. Les identifications des individus appartenant à cette super-famille que Mme Bonnet n'a pas été en mesure de réaliser ont été faites par M. Noël Grégoire. Les Hymenoptera parasitoïdes ont été envoyés à M. Rasplus Jean-Yves pour leur identification jusqu'à l'espèce, cependant les résultats n'ont pas été traités dans cette étude. L'identification jusqu'à l'espèce des Hymenoptera n'appartenant pas à la super-famille des Apoidea et n'étant pas des parasitoïdes n'a pas été réalisée dans le cadre de cette étude. Enfin, l'identification jusqu'à l'espèce des Bruchinae a été réalisée par M. Fagot Jean.

3.2.3 Le sexage des bruches

Le sexe de l'ensemble des bruches a été déterminé. Le sexage a été réalisé sur base de deux critères morphologiques. Le premier critère est la présence d'éperons sur les pattes médianes chez le mâle et l'absence de ces derniers chez la femelle. Le second critère est visible en observant la face ventrale des insectes, chez le mâle le pygidium est échancré et ne l'est pas chez la femelle.

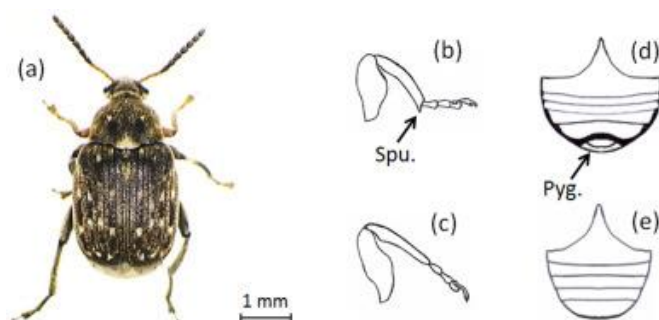


Figure 9 : Morphologie de *Bruchus rufimanus* adulte (a) et dimorphisme sexuel : présence d'éperons (Spu.) sur les pattes médianes des mâles (b) ; absence d'éperons sur les pattes médianes des femelles (c) ; pygidium (Pyg.) échancré chez les mâles (d) ; pygidium non échancré chez la femelle (e). © A. Segers.

3.2.4 La création de bases de données

Des bases de données dans lesquelles l'ensemble des informations relatives aux insectes collectés et préparés ont été créées. Le numéro d'identification unique de chaque individu, la date à laquelle il a été collecté, ses informations taxonomiques (ordre, famille, genre et espèce), son sexe (uniquement pour les Bruchinae), la modalité de piégeage (type de piège et attractant) qui l'a capturé et le numéro de la répétition de cette modalité sont renseignés dans une base de données.

3.3 Analyses statistiques

3.3.1 ANOVA à deux facteurs fixes

Afin de déterminer les associations de pièges et d'attractants les plus efficaces pour le piégeage de masse de *B. rufimanus* en féverole d'hiver et de printemps, des ANOVA à deux facteurs fixes ont été réalisées. L'ANOVA permet de déterminer si le type de piège et l'attractant exercent une influence significative sur le nombre de *B. rufimanus* capturés. Préalablement à ces analyses, une transformation logarithmique des données a été réalisée afin de permettre le respect des conditions d'application de normalité et d'homogénéité des résidus. Un test post-hoc de Tukey a ensuite été effectué lorsque les résultats de l'ANOVA démontraient une influence significative du type de piège et/ou de l'attractant sur le nombre de captures.

3.3.2 Statistiques descriptives

L'étude de l'influence de la phénologie de la culture sur le nombre de captures et le sexe-ratio des captures de *B. rufimanus* par les modalités de piégeage en féverole d'hiver et de printemps a été faite à l'aide de statistiques descriptives. L'évolution des captures totales de bruches par modalité ainsi que l'évolution du sexe-ratio de l'ensemble des captures ont été représentées sur des graphiques sur lesquels sont également représentés les stades phénologiques des cultures.

3.3.3 Analyses de structure des communautés

Afin de déterminer l'impact des modalités de piégeage sur les auxiliaires de culture en féverole d'hiver et de printemps, des analyses de structure des communautés d'auxiliaires capturés par les modalités de piégeage ont été réalisées. Les auxiliaires ciblés sont les Apoidea, les Coccinellidae et les Syrphidae.

3.3.3.1 Notions de mesures de la biodiversité

La biodiversité est divisée en trois niveaux nommés biodiversité alpha, beta et gamma. La biodiversité gamma est la biodiversité totale du système étudié, la biodiversité alpha est la biodiversité des sous-systèmes du système étudié, la biodiversité bêta est la comparaison de la biodiversité entre les sous-systèmes du système étudié (Gardener 2014; Marcon 2015). Dans le cadre de cette étude, le système étudié est le champ de féverole et les sous-systèmes sont les modalités de piégeage.

La biodiversité peut être mesurée en prenant en compte ses deux composantes. La première composante est la richesse spécifique qui est le nombre d'espèces différentes dans le système

étudié, la seconde est l'abondance relative de ces espèces dans le système (Gardener 2014; Marcon 2015).

3.3.3.2 Diversité alpha

La richesse spécifique associée à chaque modalité de piégeage a été mesurée. Afin de déterminer si l'échantillonnage a été exhaustif ou non, l'utilisation de courbes d'accumulation et le calcul de l'estimateur de Chao1 ont été réalisés. Une courbe d'accumulation représente l'accumulation de nouvelles espèces en fonction de l'effort d'échantillonnage (Magurran 2004; Gardener 2014) et l'estimateur de Chao1 estime la richesse spécifique total à partir des données collectées (Magurran 2004) selon la formule suivante :

$$S_{chao1} = S_{obs} + \frac{F_1^2}{2F_2}$$

Équation 1 : Equation de l'estimateur de Chao1 (S_{chao1}) où S_{obs} est le nombre d'espèces observées, F_1 est le nombre d'espèces observées ne comptant qu'un seul individu et F_2 est le nombre d'espèces observées ne comptant que 2 individus (Magurran 2004).

Ensuite, l'abondance relative des espèces a été étudiée. De l'abondance relative des espèces découle l'utilisation de rangs d'abondance et le calcul de l'indice de diversité de Simpson. Un rang d'abondance est un graphe qui classe les espèces par ordre décroissant d'abondance, ce type de graphique permet de mettre en évidence la dominance et la rareté d'espèces au sein d'une communauté (Gardener 2014). L'indice de diversité de Simpson indique la probabilité que deux individus choisis au hasard au sein d'une communauté appartiennent à deux espèces différentes. Sa valeur est comprise entre 0 et 1, au plus celle-ci est proche de 1 au plus les abondances relatives des espèces au sein de la communauté sont équitables, il permet donc de mettre en évidence les patrons de dominance-rareté au sein d'une communauté (Gardener 2014). Cet indice se calcule selon la formule suivante :

$$E = 1 - \sum_{s=1}^s p_s^2$$

Équation 2 : Equation de l'indice de diversité de Simpson (E) où p_s est la probabilité qu'un individu choisi aléatoirement appartienne à l'espèce s (Marcon 2015).

Afin de déterminer si les modalités de piégeage exercent une influence sur la diversité alpha, des ANOVA à un facteur ont été réalisées. Dans le cas où les conditions d'application de l'ANOVA n'étaient pas respectées, autrement dit lorsque les hypothèses de normalité et/ou d'homogénéité des résidus ont été rejetées même après une transformation logarithmique des

données, un test de Kruskal-Wallis a été effectué au lieu d'une analyse de la variance (Gardener 2014). Lorsque les résultats de l'ANOVA indiquaient une influence significative des modalités de piégeage sur la variable étudiée le test post-hoc de Tukey a été réalisé et lorsque les résultats du test de Kruskal-Wallis indiquait une influence significative le test post-hoc de Dunn a été réalisé.

3.3.3.3 Diversité bêta

Afin de comparer les communautés capturées par les différentes modalités de piégeage, des PCoA ont été réalisées. Une PCoA permet de représenter un ensemble d'objets dans un nouveau système d'axes orthogonaux aux dimensions réduites, les distances entre les objets reflètent leurs similarités. Le choix des axes orthogonaux est fait de façon à minimiser la perte d'informations (Fenty 2004). La PCoA offre donc une représentation graphique des (dis)similarités entre les communautés capturées par les différentes modalités de piégeage.

3.3.4 Logiciels utilisés

Les logiciels qui ont été utilisés pour ces analyses sont le logiciel Excel (version 2206) de la suite Microsoft Office 365 et le logiciel RStudio (version 4.2.1).

4 Résultats

4.1 Détermination des associations de pièges et d'attractants les plus efficaces pour le piégeage de masse de *Bruchus rufimanus*

4.1.1 En féverole d'hiver

L'identification des Bruchinae a permis de déterminer que tous les individus de cette sous-famille capturés par les différentes modalités de piégeage appartiennent à l'espèce *B. rufimanus*. Au total, 882 individus ont été capturés (tableau 2).

Tableau 2 : Tableau récapitulatif du nombre total de captures et de la moyenne $\pm$ l'écart-type des captures par piège de *Bruchus rufimanus* par type de piège (PB=piège blanc développé par AgriOdor; PV=piège vert de type « green funnel pan traps with cross barrier ») et attractant (IPSF=attractant de type fleur développé par IPS; AGDF=attractant de type fleur développé par AgriOdor; AGDG=attractant de type gousse développé par AgriOdor) en féverole d'hiver. Les lettres différentes après les valeurs font référence aux différences significatives selon les résultats de l'ANOVA et du test post-hoc de Tukey.

	PB		PV		Total	
	Total des captures	Moyenne par piège	Total des captures	Moyenne par piège	Total des captures	Moyenne par piège
IPSF	442	110,50 $\pm$ 72,93a	97	24,25 $\pm$ 11,59b	539	67,37 $\pm$ 66,80C
AGDF	174	43,50 $\pm$ 15,72ab	43	10,75 $\pm$ 3,86c	217	27,12 $\pm$ 20,46D
AGDG	92	23,00 $\pm$ 4,97b	34	8,50 $\pm$ 2,65c	126	15,75 $\pm$ 8,58D
Total	708	59,00 $\pm$ 55,21A	174	14,50 $\pm$ 9,77B	882	36,75 $\pm$ 44,94

Un tableau récapitulatif des captures de bruches par répétition de chaque modalité de piégeage et par date de relevé des pièges est présenté en annexe 1.

Les résultats de l'ANOVA à 2 facteurs fixes montrent qu'il n'y a pas d'interaction entre les types de pièges et les attractants (Dl=2 ; F-valeur=0,39 ; p-valeur=0,679), que le type de piège exerce une influence très hautement significative sur le nombre de captures (Dl=1 ; F-valeur=40,52 ; p-valeur<0,001) et que l'attractant exerce également une influence très hautement significative sur le nombre de captures (Dl=2 ; F-valeur=12,05 ; p-valeur<0,001).

Le test post-hoc de Tukey démontre qu'en termes de captures de bruches il existe une différence très hautement significative entre les types de pièges PB et PV (p-valeur<0,001). En ce qui concerne les attractants, il y a une différence très hautement significative entre les attractants IPSF et AGDG (p-valeur<0,001) et une différence significative entre les attractants IPSF et AGDF (p-valeur=0,015). En revanche, il n'y a pas de différence significative entre les attractants AGDF et AGDG. Enfin, il existe une différence très hautement significative entre les modalités PBIPSF et PVAGDF (p-valeur<0,001) et entre les modalités PBIPSF et

PVAGDG (p-valeur<0,001), une différence hautement significative entre les modalités PVAGDF et PBAGDF (p-valeur=0,008), PVAGDG et PBAGDF (p-valeur=0,002) et PVIPSF et PBIPSF (p-valeur=0,009) et une différence significative entre les modalités PBIPSF et PBAGDG (p-valeur=0,010). Il n'y a pas de différence significative entre les autres modalités.

Les résultats de ces analyses permettent d'affirmer statistiquement que les pièges blancs sont plus efficaces que les pièges verts, que l'attractant IPSF est plus efficace que les attractants AGDF et AGDG, que la modalité PBIPSF est plus efficace que les modalités PVIPSF, PBAGDG, PVAGDF et PVAGDG et que la modalité PBAGDF est plus efficace que les modalités PVAGDF et PVAGDG.

4.1.2 En féverole de printemps

L'identification des Bruchinae a permis de déterminer que tous les individus de cette-sous famille capturés par les différentes modalités de piégeage appartiennent à l'espèce *B. rufimanus*. Au total, 498 individus ont été capturés (tableau 3).

Tableau 3 : Tableau récapitulatif du nombre total de captures, de la moyenne $\pm$ l'écart-type des captures par piège de *Bruchus rufimanus* par type de piège (PB=piège blanc développé par AgriOdor; PV=piège vert de type « green funnel pan traps with cross barrier ») et attractant (IPSF=attractant de type fleur développé par IPS; AGDF=attractant de type fleur développé par AgriOdor; AGDG=attractant de type gousse développé par AgriOdor) en féverole de printemps. Les lettres différentes après les valeurs font référence aux différences significatives selon les résultats de l'ANOVA.

	PB		PV		Total	
	Total des captures	Moyenne par piège	Total des captures	Moyenne par piège	Total des captures	Moyenne par piège
IPSF	168	42,00 $\pm$ 32,32a	55	13,75 $\pm$ 6,18a	223	27,87 $\pm$ 26,31C
AGDF	53	13,25 $\pm$ 12,69a	41	10,25 $\pm$ 3,77a	94	11,75 $\pm$ 8,81C
AGDG	138	34,50 $\pm$ 27,72a	43	10,75 $\pm$ 8,42a	181	22,62 $\pm$ 22,82C
Total	359	29,92 $\pm$ 26,46A	139	11,58 $\pm$ 6,02A	498	20,75 $\pm$ 20,97

Un tableau récapitulatif des captures de bruches par répétition de chaque modalité de piégeage et par date de relevé des pièges est présenté en annexe 2.

Les résultats de l'ANOVA à 2 facteurs fixes montrent qu'il n'y a pas d'interaction entre les types de pièges et les attractants (Dl=2 ; F-valeur=1,43 ; p-valeur=0,265), que le type de piège n'exerce pas d'influence significative sur le nombre de captures (Dl=1 ; F-valeur=3,72 ; p-valeur=0,070) et que l'attractant n'exerce pas non plus d'influence significative sur le nombre de captures (Dl=2 ; F-valeur=1,52 ; p-valeur=0,245).

Les résultats de cette analyse indiquent que statistiquement il n'y a pas de différence d'efficacité entre les types de pièges, entre les attractants et entre les modalités de piégeage.

4.2 Etude de l'influence de la phénologie de la culture et de son impact sur le cycle de vie de *Bruchus rufimanus* sur l'efficacité des modalités de piégeage

4.2.1 En féverole d'hiver

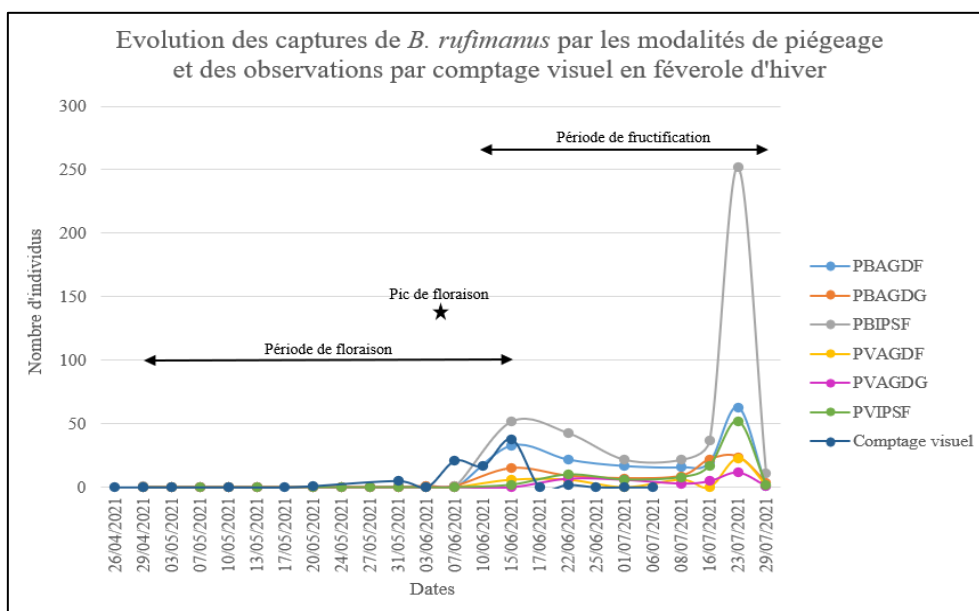


Figure 10 : Graphique de l'évolution des captures de *Bruchus rufimanus* par les modalités de piégeage (PBAGDF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PBAGDG=association entre piège blanc et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PBIPSF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'IPS ; PVAGDF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PVAGDG=association entre piège vert et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PVIPSF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'IPS) et des observations par comptage visuel dans le temps avec les stades phénologiques de la culture de féverole d'hiver.

La figure 10 illustre que les captures de bruches commencent à augmenter à partir du pic de floraison, un premier pic de captures surtout marqué pour les modalités PBIPSF et PBAGDF est observé à la fin de la période de floraison. Un second pic de captures est observé en fin de période de fructification, ce pic est fortement marqué pour la modalité PBIPSF mais également pour les modalités PBAGDF et PVIPSF. En ce qui concerne le comptage visuel, le nombre de bruches augmente à partir du pic de floraison et jusqu'à la fin de celle-ci puis diminue fortement. Les données relatives au comptage visuel sont présentées en annexe 3.

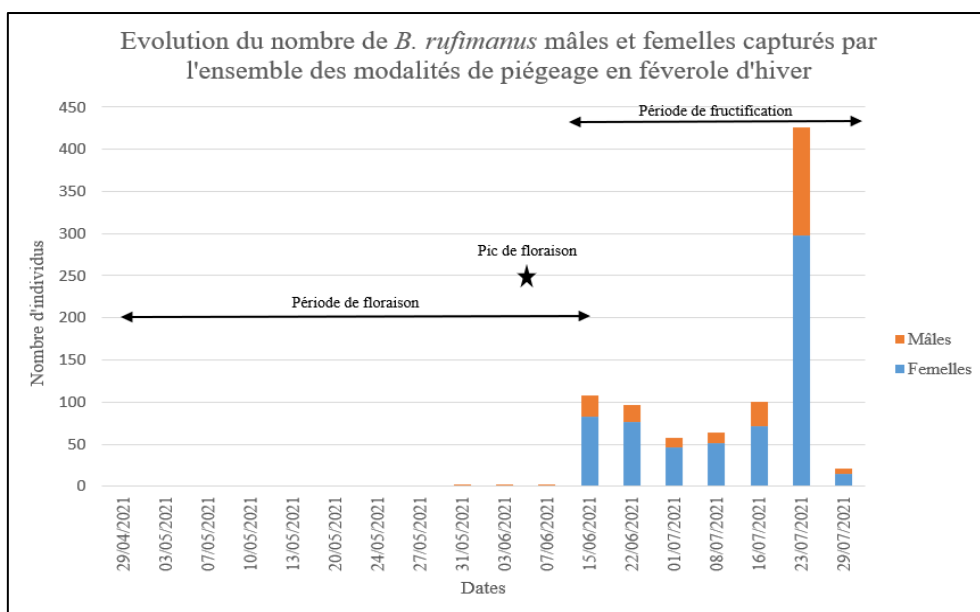


Figure 11 : Graphique de l'évolution du sexe-ratio des *Bruchus rufimanus* capturés par l'ensemble des modalités de piégeage dans le temps avec les stades phénologiques de la culture de féverole d'hiver.

Le nombre de bruches femelles est toujours supérieur au nombre de mâles dans les captures par l'ensemble des modalités de piégeage (figure 11). Les effectifs de mâles et de femelles capturés par l'ensemble des modalités de piégeage par date de relevé des pièges sont présentés en annexe 5.

4.2.2 En féverole de printemps

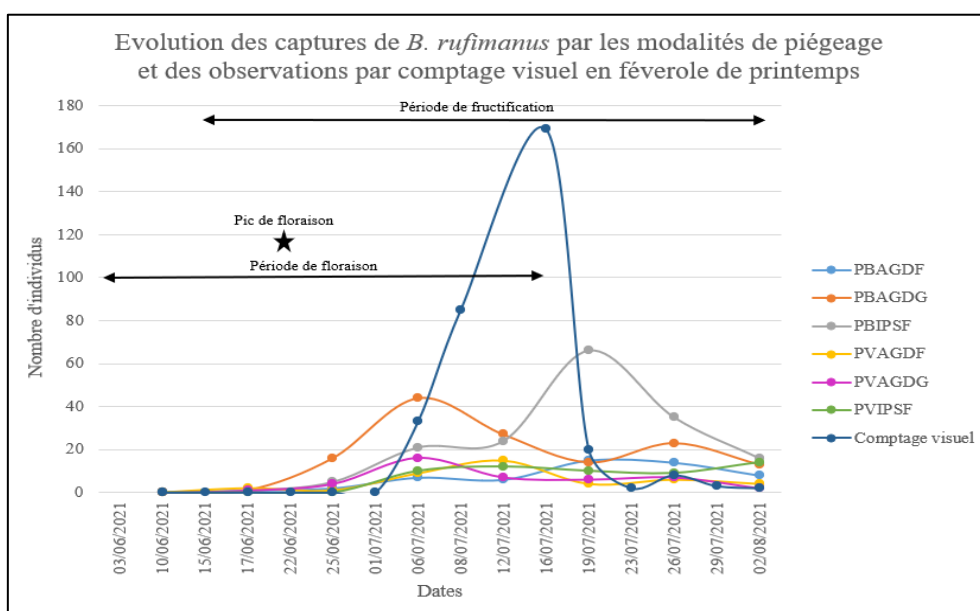


Figure 12 : Graphique de l'évolution des captures de *Bruchus rufimanus* par les modalités de piégeage (PBAGDF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PBAGDG=association entre piège blanc et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PBIPSF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'IPS ; PVAGDF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PVAGDG=association entre piège vert et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PVIPSF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'IPS) et des observations par comptage visuel dans le temps avec les stades phénologiques de la culture de féverole de printemps.

La figure 12 illustre que les captures de bruches commencent à augmenter à partir du pic de floraison sauf pour la modalité PBAGDG pour laquelle elles commencent quelques jours après le début de la période de fructification. Un pic de capture par cette modalité est observé peu avant le milieu de la période de fructification. Un pic de captures par la modalité PBIPSF a lieu à la fin de la période de floraison. En ce qui concerne le comptage visuel, le nombre de bruches augmente fortement après le pic de floraison et jusqu'à la fin de celle-ci puis diminue drastiquement. Les données relatives au comptage visuel sont présentées en annexe 4.

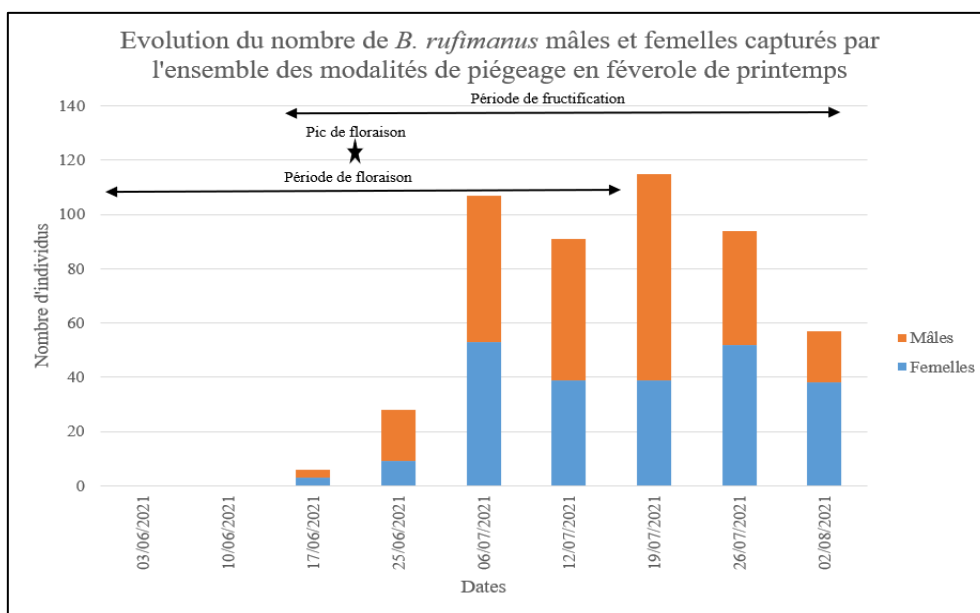


Figure 13 : Graphique de l'évolution du sexe-ratio des *Bruchus rufimanus* capturés par l'ensemble des modalités de piégeage dans le temps avec les stades phénologiques de la culture de féverole de printemps.

Le nombre de bruches mâles est supérieur au nombre de femelles dans les captures par l'ensemble des modalités de piégeage durant la période de floraison et jusqu'après la moitié de la période de fructification. Ensuite, le nombre de femelles devient supérieur au nombre de mâles jusqu'à la fin de la période de fructification (figure 13). Les effectifs de mâles et de femelles capturés par l'ensemble des modalités de piégeage par date de relevé des pièges sont présentés en annexe 6.

4.3 Détermination de l'impact des modalités de piégeage sur les auxiliaires de cultures (Apoidea, Coccinellidae et Syrphidae)

4.3.1 En féverole d'hiver

Tableau 4 : Tableau récapitulatif des captures totales d'Hymenoptera, de Syrphidae et de Coccinellidae par les modalités de piégeage (PBAGDF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PBAGDG=association entre piège blanc et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PBIPSF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'IPS ; PVAGDF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PVAGDG=association entre piège vert et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PVIPSF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'IPS) en féverole d'hiver.

Modalité de piégeage	Hymenopta		Syrphidae	Coccinellidae	Total
	Apoidea	Autres			
PBAGDF	103	14	78	19	214
PBAGDG	74	19	27	17	137
PBIPSF	187	17	128	19	351
PVAGDF	21	11	3	40	75
PVAGDG	18	6	4	43	71
PVIPSF	46	14	6	23	89
Total	449	81	246	161	937

Au total, 937 insectes appartenant à l'ordre des Hymenoptera et aux familles des Syrphidae et des Coccinellidae ont été capturés par l'ensemble des modalités de piégeage, c'est-à-dire par les 24 pièges (tableau 4). Dans la suite des analyses, les 81 Hyménoptères n'appartenant pas à la super-famille des Apoidea ne sont pas pris en considération. Également, 4 Hyménoptères de la famille des Halictidae ne sont pas pris en compte car leurs espèces n'ont pas pu être déterminées.

4.3.1.1 Diversité alpha

Courbe d'accumulation pour l'ensemble des modalités de piégeage en féverole d'hiver

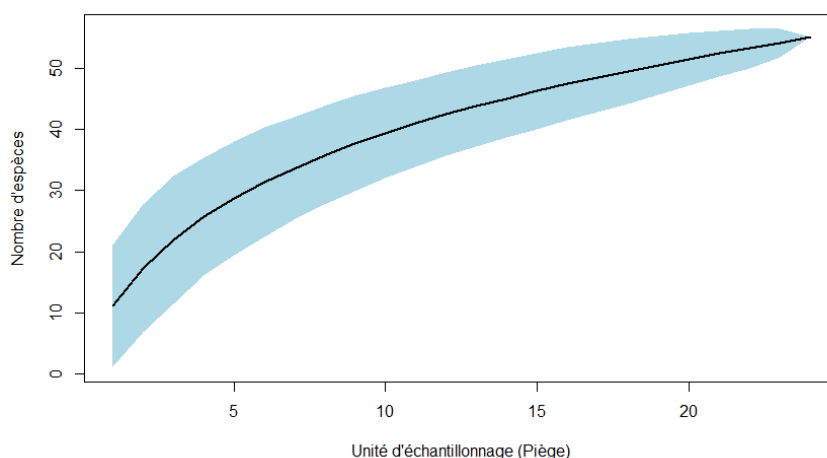


Figure 14 : Courbe d'accumulation des espèces d'auxiliaires (Apoidea, Syrphidae et Coccinellidae) capturées par l'ensemble des modalités de piégeage en féverole d'hiver.

La courbe d'accumulation pour l'ensemble des modalités de piégeage (figure 14) tend vers un plateau mais n'atteint pas l'asymptote. L'écart-type (en bleu) se réduit à mesure que l'effort d'échantillonnage augmente.

Tableau 5 : Tableau récapitulatif de la richesse spécifique observée, de la richesse spécifique estimée par l'estimateur de Chao1 et du pourcentage d'espèces non détectées pour chaque modalité de piégeage (PBAGDF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PBAGDG=association entre piège blanc et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PBIPSF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'IPS ; PVAGDF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PVAGDG=association entre piège vert et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PVIPSF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'IPS) et pour l'ensemble des modalités de piégeage en féverole d'hiver.

Modalité de piégeage	Richesse spécifique observée	Richesse spécifique estimée (Chao1)	Pourcentage d'espèces non détectées
PBAGDF	35	45,1	22,4%
PBAGDG	24	51,5	53,4%
PBIPSF	32	47,6	32,8%
PVAGDF	12	14,5	17,2%
PVAGDG	15	24,3	38,3%
PVIPSF	20	38,3	47,8%
Toutes les modalités	55	82,1	32,8%

Les trois modalités qui ont capturé le plus grand nombre d'espèces sont par ordre décroissant PBAGDF, PBIPSF et PBAGDG. Selon l'estimateur de Chao1, les trois modalités qui capturent la plus grande richesse spécifique sont par ordre décroissant PBAGDG, PBIPSF et PBAGDF (tableau 5).

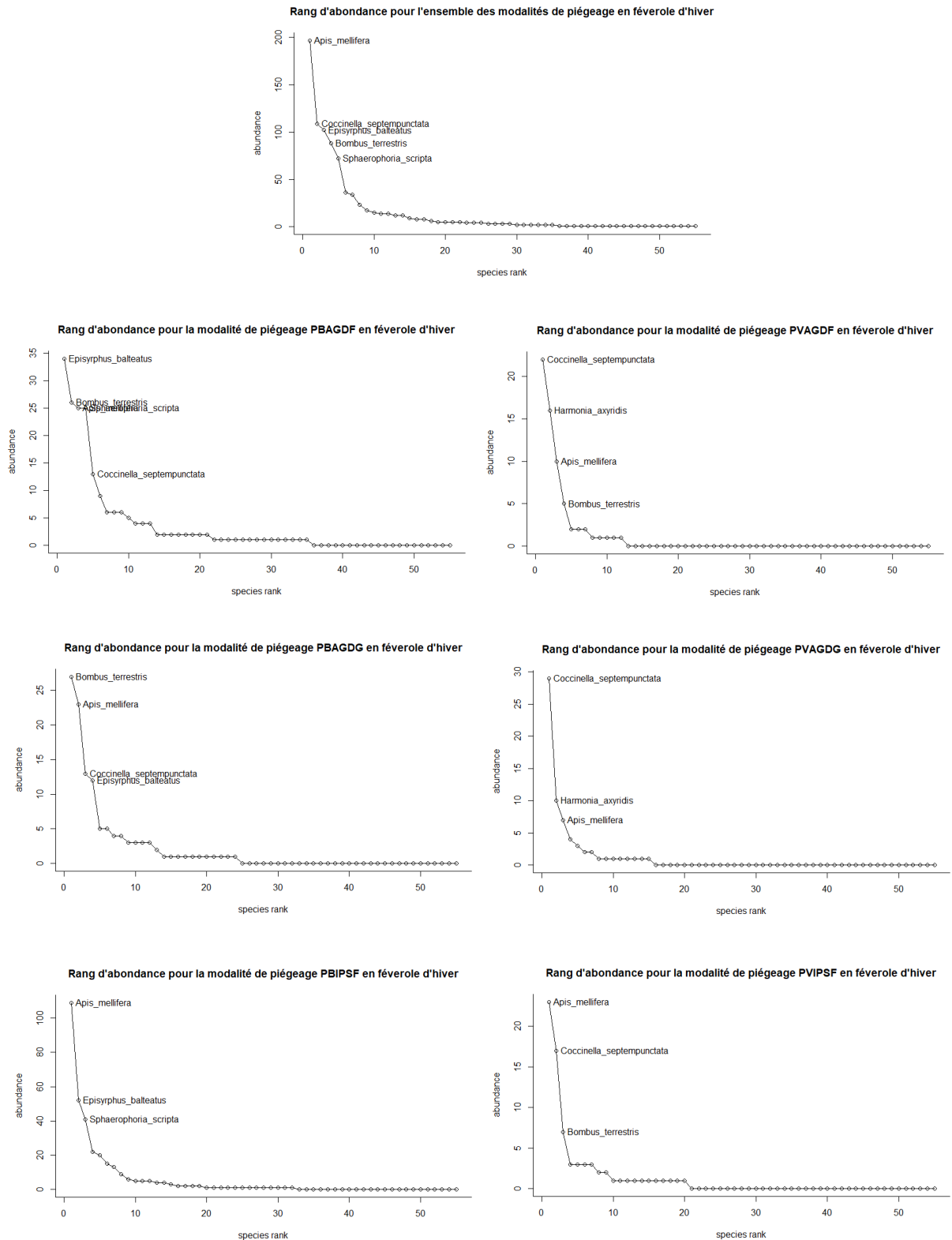


Figure 15 : Rang d'abondance pour l'ensemble des modalités de piégeage et rangs d'abondance pour chaque modalité de piégeage (PBAGDF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PBAGDG=association entre piège blanc et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PBIPSF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'IPS ; PVAGDF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PVAGDG=association entre piège vert et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PVIPSF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'IPS) en février de l'hiver.

Un total de 852 individus a été capturé par l'ensemble des modalités de piégeage, parmi ces individus les espèces les plus abondantes sont *A. mellifera* (23,1%), *Coccinella septempunctata* Linnaeus, 1758 (12,8%), *Episyrphus balteatus* (De Geer, 1776) (12,0%), *B. terrestris* (10,3%) et *Sphaerophoria scripta* (Linnaeus, 1758) (8,5%).

La modalité PBAGDF a capturé au total 197 spécimens, les espèces les plus abondantes sont *E. balteatus* (17,3%), *B. terrestris* (13,2%), *A. mellifera* (12,7%), *S. scripta* (12,7%) et *C. septempunctata* (6,6%).

La modalité PBAGDG a capturé au total 118 spécimens, les espèces les plus abondantes sont *B. terrestris* (22,9%), *A. mellifera* (19,5%), *C. septempunctata* (11,0%) et *E. balteatus* (10,2%).

La modalité PBIPSF a capturé au total 334 spécimens, les espèces les plus abondantes sont *A. mellifera* (32,6%), *E. balteatus* (15,6%) et *S. scripta* (12,3%).

La modalité PVAGDF a capturé au total 64 spécimens, les espèces les plus abondantes sont *C. septempunctata* (34,4%), *Harmonia axyridis* (Pallas, 1773) (25,0%), *A. mellifera* (15,6%) et *B. terrestris* (7,8%).

La modalité PVAGDG a capturé au total 65 spécimens, les espèces les plus abondantes sont *C. septempunctata* (44,6%), *H. axyridis* (15,4%) et *A. mellifera* (10,8%).

La modalité PVIPSF a capturé au total 74 spécimens, les espèces les plus abondantes sont *A. mellifera* (31,1%), *C. septempunctata* (23,0%) et *B. terrestris* (9,5%).

Seules les espèces dominantes des communautés capturées sont présentées dans cette section, l'ensemble des espèces capturées par chaque modalité de piégeage ainsi que leurs abondances et leurs abondances relatives sont disponibles en annexe 7.

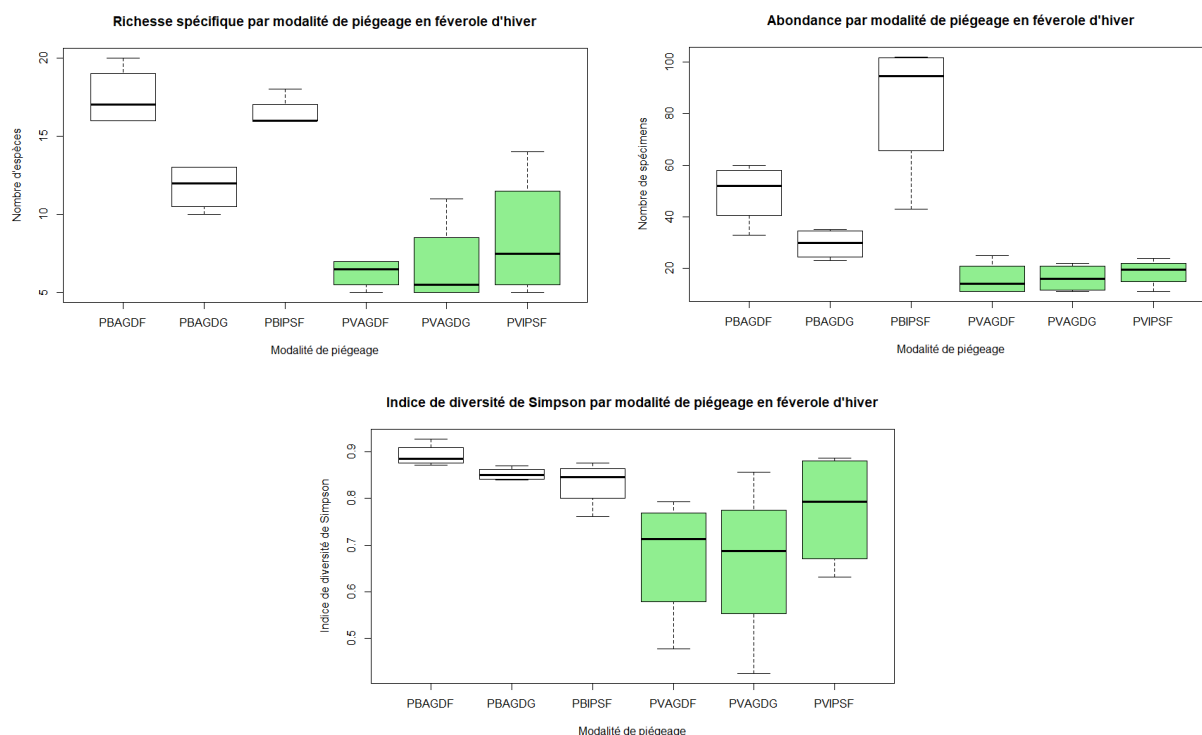


Figure 16 : Représentation sous forme de boxplot de la richesse spécifique, de l'abondance et de l'indice de diversité de Simpson par modalité de piégeage (PBAGDF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PBAGDG=association entre piège blanc et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PBIPSF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'IPS ; PVAGDF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PVAGDG=association entre piège vert et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PVIPSF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'IPS) en féverole d'hiver.

Un tableau récapitulatif de la richesse spécifique, de l'estimateur de Chao1, de l'abondance et de l'indice de diversité de Simpson par répétition de chaque modalité de piégeage est disponible en annexe 9.

Concernant la richesse spécifique, les résultats de l'ANOVA à 1 facteur fixe démontrent que la modalité de piégeage exerce une influence très hautement significative sur le nombre d'espèces d'auxiliaires capturées ($Df=5$; $F\text{-valeur}=17,72$; $p\text{-valeur}<0,001$). Le test post-hoc de Tukey démontre qu'il existe une différence très hautement significative entre les modalités PVAGDF et PBAGDF ($p\text{-valeur}<0,001$), PVAGDG et PBAGDF ($p\text{-valeur}<0,001$), PVIPSF et PBAGDG ($p\text{-valeur}<0,001$), PVAGDF et PBIPSF ($p\text{-valeur}<0,001$) et PVAGDG et PBIPSF ($p\text{-valeur}<0,001$). Il y a également une différence hautement significative entre les modalités PVIPSF et PBIPSF ($p\text{-valeur}=0,001$) et une différence significative entre les modalités PBAGDG et PBAGDF ($p\text{-valeur}=0,026$) et PVAGDF et PBAGDG ($p\text{-valeur}=0,036$). Il n'y a pas de différence significative entre les autres modalités. Ces résultats permettent d'affirmer statistiquement que la modalité PBAGDF capture plus d'espèces d'auxiliaires que les modalités PBAGDG, PVAGDF, PVAGDG et PVIPSF, que la modalité

PBIPSF capture plus d'espèces que les modalités PVAGDF, PVAGDG et PVIPSF et que la modalité PBAGDG capture plus d'espèces que la modalité PVAGDF.

Pour l'abondance, les résultats de l'ANOVA à 1 facteur fixe démontrent que la modalité de piégeage exerce également une influence très hautement significative sur le nombre d'auxiliaires capturés ($Df=5$; $F\text{-valeur}=16,39$; $p\text{-valeur}<0,001$). Les résultats du test post-hoc de Tukey démontrent qu'il y a une différence très hautement significative entre les modalités PVAGDF et PBIPSF ($p\text{-valeur}<0,001$), PVAGDG et PBIPSF ($p\text{-valeur}<0,001$) et PVIPSF et PBIPSF ($p\text{-valeur}<0,001$) et une différence hautement significative entre les modalités PVAGDF et PBAGDF ($p\text{-valeur}=0,001$), PVAGDG et PBAGDF ($p\text{-valeur}=0,002$), PVIPSF et PBAGDF ($p\text{-valeur}=0,006$) et PBIPSF et PBAGDG ($p\text{-valeur}=0,006$). Ceci permet de conclure que statistiquement la modalité PBAGDF capture plus d'auxiliaires que les modalités PVAGDF, PVAGDG et PVIPSF et que la modalité PBIPSF capture plus d'auxiliaires que les modalités PBAGDG, PVAGDF, PVAGDG et PVIPSF.

Pour l'indice de diversité de Simpson, les résultats du test de Kruskal-Wallis démontrent que la modalité de piégeage exerce aussi une influence significative sur l'équitabilité des espèces au sein des communautés d'auxiliaires capturés ($Df=5$; $khi\text{-carré}=12,56$; $p\text{-valeur}=0,028$). Les résultats du test post-hoc de Dunn démontrent qu'il y a une différence significative entre les modalités PBAGDF et PVAGDF ($p\text{-valeur}=0,034$) et PBAGDF et PVAGDG ($p\text{-valeur}=0,048$). Ces résultats permettent de conclure que statistiquement l'abondance relative des espèces capturées est plus équitable pour la modalité PBAGDF que pour les modalités PVAGDF et PVAGDG.

4.3.1.2 Diversité bêta

PCoA (1,2) pour les modalités de piégeage en féverole d'hiver

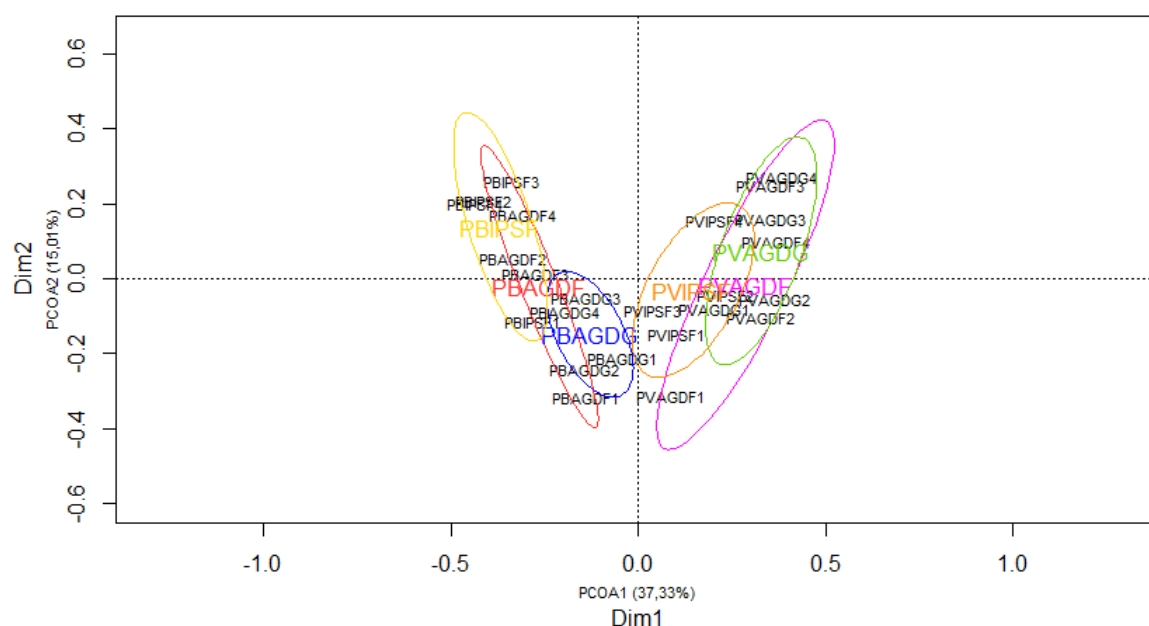


Figure 17 : Représentation des communautés d'auxiliaires capturées par modalité de piégeage (PBAGDF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PBAGDG=association entre piège blanc et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PBIPSF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'IPS ; PVAGDF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PVAGDG=association entre piège vert et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PVIPSF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'IPS) en féverole d'hiver sur les deux premiers axes de la PCoA (PBIPSF en jaune ; PBAGDF en rouge ; PBAGDG en bleu ; PVIPSF en orange ; PVAGDF en magenta ; PVAGDG en vert).

Deux groupes de modalités se distinguent sur le premier axe de la PCoA (figure 17). Le premier groupe est composé des modalités PBIPSF (jaune), PBAGDF (rouge) et PBAGDG (bleu). Ces modalités sont relativement similaires entre elles en termes de composition des communautés d'auxiliaires capturées, ce qui s'illustre par le chevauchement des ellipses. En revanche, elles se distinguent des trois modalités du second groupe, à savoir les modalités PVIPSF (orange), PVAGDF (magenta) et PVAGDG (vert) qui capturent des communautés dont les compositions sont similaires entre elles. Il y a également une variabilité au sein des communautés capturées par les modalités PBIPSF, PBAGDF, PVAGDF et PVAGDG, ceci est représenté par un étalement important des ellipses. Le premier et le second axe expliquent respectivement 37,33% et 15,01% de l'information.

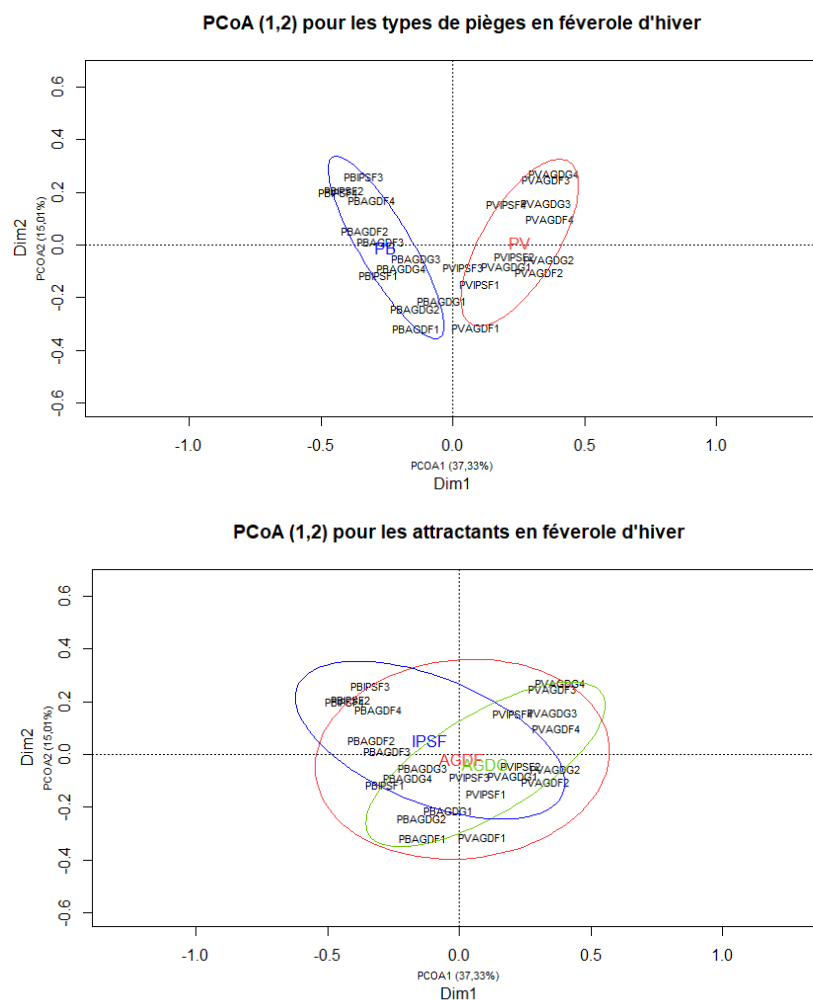


Figure 18 : Représentation des communautés d'auxiliaires capturées par type de pièges (PB=piège blanc développé par AgriOdor en bleu ; PV=piège vert de type « green funnel pan traps with cross barrier » en rouge) et attractant (IPSF=attractant de type fleur développé par IPS en bleu ; AGDF=attractant de type fleur développé par AgriOdor en rouge ; AGDG=attractant de type gousse développé par AgriOdor en vert) en féverole d'hiver sur les deux premiers axes de la PCoA.

La figure 18 illustre que les dissimilarités observées entre les compositions des communautés capturées par les modalités de piégeage sont dues principalement au type de piège et non à l'attractant.

4.3.2 En féverole de printemps

Tableau 6 : Tableau récapitulatif des captures totales d'Hymenoptera, de Syrphidae et de Coccinellidae par les modalités de piégeage (PBAGDF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PBAGDG=association entre piège blanc et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PBIPSF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'IPS ; PVAGDF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PVAGDG=association entre piège vert et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PVIPSF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'IPS) en féverole de printemps.

Modalité de piégeage	Hymenopta		Syrphidae	Coccinellidae	Total
	Apoidea	Autres			
PBAGDF	52	6	21	19	98
PBAGDG	55	18	19	12	104
PBIPSF	111	12	20	10	153
PVAGDF	41	4	3	39	87
PVAGDG	43	1	2	31	77
PVIPSF	71	7	5	19	102
Total	373	48	70	130	621

Au total, 621 insectes appartenant à l'ordre des Hymenoptera et aux familles des Syrphidae et des Coccinellidae ont été capturés par l'ensemble des modalités de piégeage, c'est-à-dire par les 24 pièges (tableau 6). Dans la suite des analyses, les 48 Hyménoptères n'appartenant pas à la super-famille des Apoidea ne sont pas pris en considération. Également, 3 syrphes et 1 Hyménoptère de la famille des Halictidae ne sont pas pris en compte car leurs espèces n'ont pas pu être déterminées.

4.3.2.1 Diversité alpha

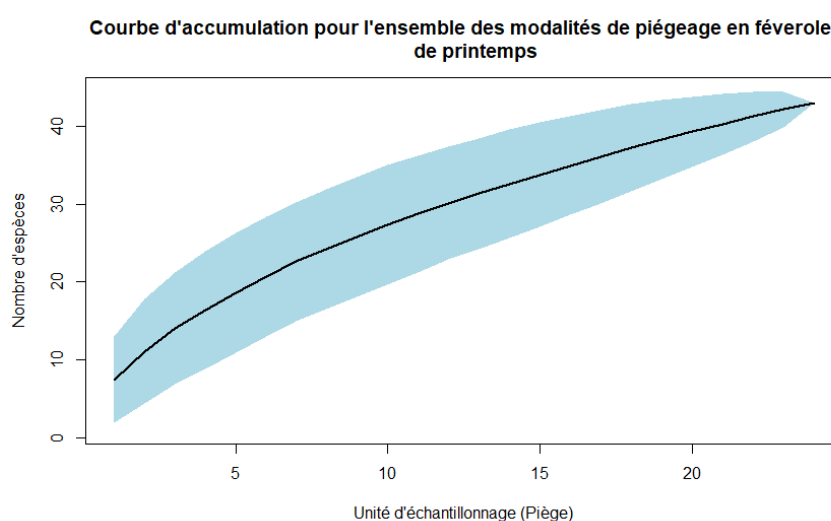


Figure 19 : Courbe d'accumulation des espèces d'auxiliaires (Apoidea, Syrphidae et Coccinellidae) capturées par l'ensemble des modalités de piégeage en féverole de printemps

La courbe d'accumulation pour l'ensemble des modalités de piégeage (figure 19) n'atteint pas l'asymptote. L'écart-type (en bleu) se réduit à mesure que l'effort d'échantillonnage augmente.

Tableau 7 : Tableau récapitulatif de la richesse spécifique observée, de la richesse spécifique estimée par l'estimateur de Chao1 et du pourcentage d'espèces non détectées pour chaque modalité de piégeage (PBAGDF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PBAGDG=association entre piège blanc et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PBIPSF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'IPS ; PVAGDF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PVAGDG=association entre piège vert et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PVIPSF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'IPS) et pour l'ensemble des modalités de piégeage en février de printemps.

Modalité de piégeage	Richesse spécifique observée	Richesse spécifique estimée (Chao1)	Pourcentage d'espèces non détectées
PBAGDF	20	27,2	26,5%
PBAGDG	22	33,0	33,3%
PBIPSF	19	37,0	48,6%
PVAGDF	12	17,0	29,4%
PVAGDG	8	14,0	42,9%
PVIPSF	14	21,5	34,9%
Toutes les modalités	43	67,4	36,2%

Les trois modalités qui ont capturé le plus d'espèces sont par ordre décroissant PBAGDG, PBAGDF et PBIPSF. Selon l'estimateur de Chao1, les modalités qui capturent la plus grande richesse spécifique sont par ordre décroissant PBIPSF, PBAGDG et PBAGDF (tableau 7).

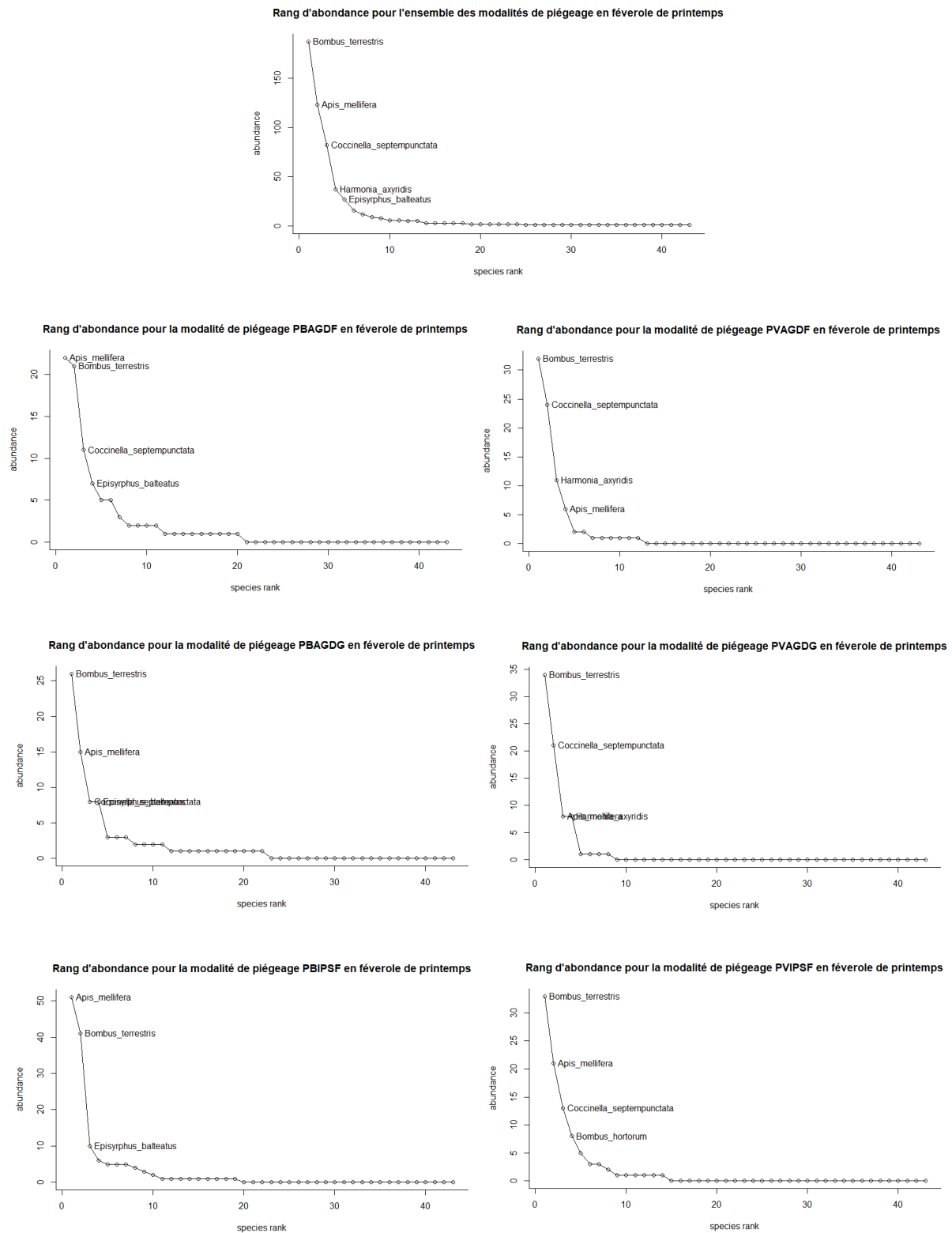


Figure 20 : Rang d'abondance pour l'ensemble des modalités de piégeage et rangs d'abondance pour chaque modalité de piégeage (PBAGDF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PBAGDG=association entre piège blanc et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PBIPSF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'IPS ; PVAGDF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PVAGDG=association entre piège vert et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PVIPSF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'IPS) en février de printemps.

Un total de 569 individus a été capturé par l'ensemble des modalités de piégeage, parmi ces individus les espèces les plus abondantes sont *B. terrestris* (32,9%), *A. mellifera* (21,6%), *C. septicapunctata* (14,4%), *H. axyridis* (6,5%) et *E. balteatus* (4,7%).

La modalité PBAGDF a capturé au total 91 spécimens, les espèces les plus abondantes sont *A. mellifera* (24,2%), *B. terrestris* (23,1%), *C. septicapunctata* (12,1%) et *E. balteatus* (7,7%).

La modalité PBAGDG a capturé au total 85 spécimens, les espèces les plus abondantes sont *B. terrestris* (30,6%), *A. mellifera* (17,6%), *C. septicapunctata* (9,4%) et *E. balteatus* (9,4%).

La modalité PBIPSF a capturé au total 141 spécimens, les espèces les plus abondantes sont *A. mellifera* (36,2%), *B. terrestris* (29,1%) et *E. balteatus* (7,1%).

La modalité PVAGDF a capturé au total 83 spécimens, les espèces les plus abondantes sont *B. terrestris* (38,6%), *C. septicapunctata* (28,9%), *H. axyridis* (13,3%) et *A. mellifera* (7,2%).

La modalité PVAGDG a capturé au total 75 spécimens, les espèces les plus abondantes sont *B. terrestris* (45,3%), *C. septicapunctata* (28,0%), *A. mellifera* (10,7%) et *H. axyridis* (10,7%).

La modalité PVIPSF a capturé au total 94 spécimens, les espèces les plus abondantes sont *B. terrestris* (35,1%), *A. mellifera* (22,3%), *C. septicapunctata* (13,8%) et *B. hortorum* (8,5%).

Seules les espèces dominantes des communautés capturées sont présentées dans cette section, l'ensemble des espèces capturées par chaque modalité de piégeage ainsi que leurs abondances et leurs abondances relatives sont disponibles en annexe 8.

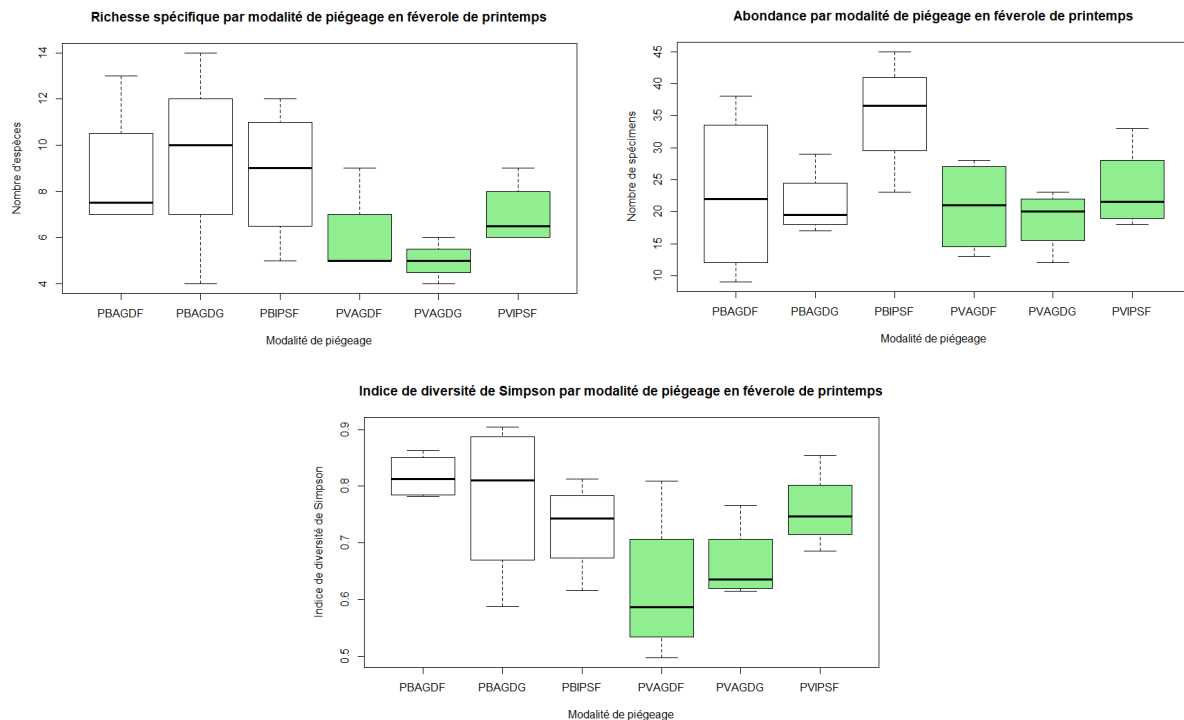


Figure 21 : Représentation sous forme de boxplot de la richesse spécifique, de l'abondance et de l'indice de diversité de Simpson par modalité de piégeage (PBAGDF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PBAGDG=association entre piège blanc et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PBIPSF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'IPS ; PVAGDF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PVAGDG=association entre piège vert et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PVIPSF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'IPS) en février de printemps.

Un tableau récapitulatif de la richesse spécifique, de l'estimateur de Chao1, de l'abondance et de l'indice de diversité de Simpson par répétition de chaque modalité de piégeage est disponible en annexe 10.

Les résultats des ANOVA à 1 facteur fixe démontrent que la modalité de piégeage n'exerce pas d'influence significative sur la richesse spécifique capturée ($Df=5$; $F\text{-valeur}=1,87$; $p\text{-valeur}=0,151$), sur l'abondance d'auxiliaires capturés ($Df=5$; $F\text{-valeur}=2,05$; $p\text{-valeur}=0,120$) et sur l'indice de diversité de Simpson ($Df=5$; $F\text{-valeur}=2,34$; $p\text{-valeur}=0,084$).

4.3.2.2 Diversité bêta

PCoA (1,2) pour les modalités de piégeage en féverole de printemps

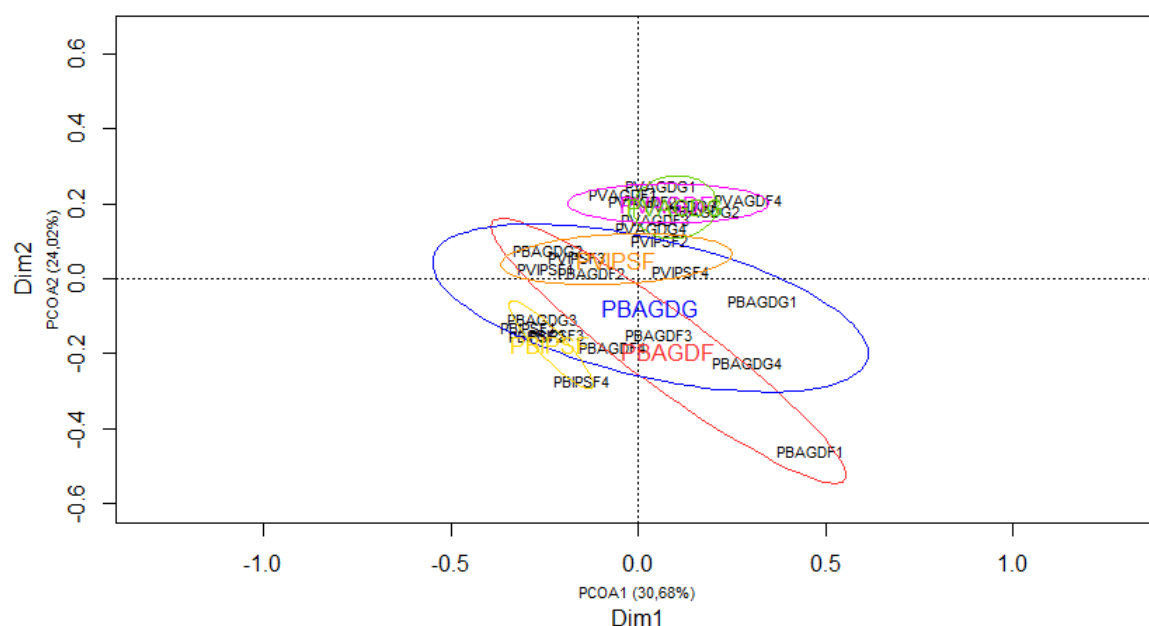


Figure 22 : Représentation des communautés d'auxiliaires capturées par modalité de piégeage (PBAGDF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PBAGDG=association entre piège blanc et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PBIPSF=association entre piège blanc et attractant de type fleur d'IPS ; PVAGDF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'AgriOdor ; PVAGDG=association entre piège vert et attractant de type gousse d'AgriOdor ; PVIPSF=association entre piège vert et attractant de type fleur d'IPS) en féverole de printemps sur les deux premiers axes de la PCoA (PBIPSF en jaune ; PBAGDF en rouge ; PBAGDG en bleu ; PVIPSF en orange ; PVAGDF en magenta ; PVAGDG en vert).

Des similarités et dissimilarités entre les modalités de piégeage en termes de structure des communautés d'auxiliaires capturées se distinguent sur le second axe de la PCoA (figure 22). Le chevauchement des ellipses associées aux modalités PVAGDF (magenta) et PVAGDG (vert) démontrent une forte similarité entre les compositions des communautés que ces modalités capturent. La communauté capturée par la modalité PVAGDG partage également des similitudes avec celle capturée par la modalité PVIPSF (orange) ce qui s'illustre par un léger recouvrement des ellipses. Les communautés capturées par les modalités PVIPSF, PBAGDG (bleu) et PBAGDF (rouge) sont assez similaires entre elles également. Enfin, la communauté de la modalité PBIPSF (jaune) présente des similarités avec celle de la modalité PBAGDG. L'étalement important des ellipses associées aux modalités PBAGDG et PBAGDF témoigne d'une variabilité particulièrement importante au sein des communautés capturées par ces modalités. Le premier et le second axe expliquent respectivement 30,31% et 24,02% de l'information.

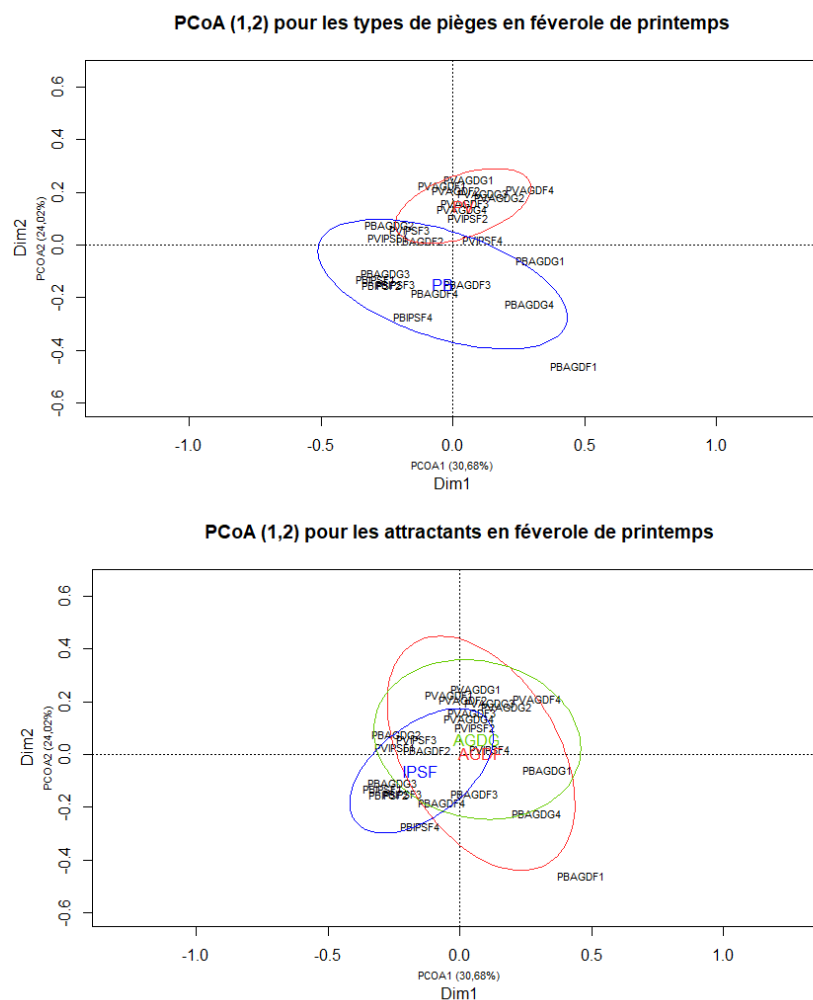


Figure 23 : Représentation des communautés d'auxiliaires capturées par type de pièges (PB=piège blanc développé par AgriOdor en bleu ; PV=piège vert de type « green funnel pan traps with cross barrier » en rouge) et attractant (IPSF=attractant de type fleur développé par IPS en bleu ; AGDF=attractant de type fleur développé par AgriOdor en rouge ; AGDG=attractant de type gousse développé par AgriOdor en vert) en féverole de printemps sur les deux premiers axes de la PCoA.

La figure 23 illustre que les dissimilarités observées entre les structures des communautés capturées par les modalités de piégeage sont principalement dues au type de piège et non à l'attractant. Cependant un léger chevauchement entre les ellipses associées aux deux types de pièges indique que la distinction entre les communautés capturées par ceux-ci n'est pas nette et par conséquent qu'il y a tout de même des similarités entre elles.

5 Discussion

5.1 Le piégeage de *Bruchus rufimanus* par les associations de pièges et d'attractants

En féverole d'hiver, les pièges blancs ont été plus efficaces que les pièges verts et l'attractant IPSF a été plus efficace que les 2 autres attractants pour le piégeage de *B. rufimanus*. Pour ce qui est des associations, les modalités PBIPSF et PBAGDF ont été les plus efficaces. En féverole de printemps, aucune différence significative d'efficacité n'a été démontrée entre les types de pièges, les attractants et les associations. Cependant, en féverole de printemps les résultats obtenus sont potentiellement biaisés par un effort d'échantillonnage trop faible. En effet, la durée de l'expérimentation a été plus réduite qu'en féverole d'hiver. L'augmentation de la durée de l'expérimentation n'est pas envisageable puisque celle-ci est basée sur l'évolution phénologique de la culture. En revanche, l'augmentation du nombre de répétitions par modalités de piégeage permettrait potentiellement de faire apparaître des différences significatives d'efficacité entre types de pièges, attractants et modalités en féverole de printemps qui n'ont pas pu être mises en évidence dans cette étude. La méthode d'analyse statistique employée est également susceptible d'avoir entraîné des biais. Les données collectées et analysées sont des comptages d'individus, ce type de données ne suit pas une distribution normale. Une transformation logarithmique des données a été réalisée pour permettre le respect des conditions de normalité et d'homoscédasticité de l'ANOVA. Cette manipulation des données fait de l'ANOVA une méthode d'analyse raisonnablement fiable. Cependant, la réalisation d'une analyse GLM au lieu d'une ANOVA serait tout de même plus adaptée pour éviter les biais potentiellement engendrés par la transformation des données (Warton et al. 2016; Chadidjah et Jaya 2021).

En féverole d'hiver, les captures par les modalités PBIPSF et PBAGDF ont augmenté à partir du pic de floraison jusqu'à atteindre un maximum à la fin de celle-ci, c'est-à-dire que les captures ont augmenté à mesure que le nombre de fleurs dans la culture a diminué. Un second pic de captures, surtout marqué pour la modalité PBIPSF mais également pour les modalités PBAGDF et PVIPSF, a été observé à la fin de la période de fructification. Ceci peut s'expliquer par la proximité des cultures de féverole d'hiver et de printemps dans le dispositif expérimental. En effet, l'augmentation des captures par ces modalités en féverole d'hiver coïncide avec la fin de la floraison en féverole de printemps et donc avec la diminution du nombre de fleurs dans cette culture. Ces observations démontrent que les attractants floraux IPSF et AGDF sont peu concurrentiels face à l'odeur naturellement émise par les fleurs de

féverole. Un constat similaire a été fait par Ward (2018) dans des expérimentations où des pièges appâtés avec un attractant floral développé par Bruce et al. (2011) ont été utilisés pour la capture de *B. rufimanus*, les captures durant la période de floraison ont été très peu nombreuses et ont augmenté après celle-ci. Concernant les autres modalités, les captures sont restées peu nombreuses et peu de variations ont été observées, ce qui témoigne de leur faible efficacité. De légères augmentations du nombre de captures par la modalité PBAGDG en début et en fin de fructification ont tout de même été relevées, ce qui indique une trop faible concurrence du leurre de type gousse face à l'odeur émise par les gousses présentes dans la culture lorsque celles-ci sont nombreuses. Les comptages visuels ont commencé à augmenter peu avant le pic de floraison et ce jusqu'à la fin de celle-ci avant de chuter brusquement. Deux éléments peuvent expliquer cette évolution. Premièrement, selon Gailis et al. (2022) le pic de floraison de la culture est la période durant laquelle la plus grande densité de bruches est observée. Deuxièmement, la reproduction a lieu durant la période de floraison et celle-ci se fait sur les fleurs (Segers et al. 2021), ces dernières étant situées sur les parties supérieures des plantes, les individus s'y trouvant sont facilement visibles par l'opérateur réalisant le comptage. Après la floraison, les mâles quittent la culture et les femelles pondent sur les gousses (Segers et al. 2021), celles-ci étant situées dans les parties inférieures des plantes, les individus s'y trouvant sont plus difficilement observables.

En féverole de printemps, les captures par la modalité PBAGDG ont augmenté peu après le début de la période de fructification jusqu'à atteindre un pic peu avant le milieu de cette période. La même évolution a été observée pour la modalité PVAGDG mais les captures ont été nettement moins nombreuses. Ceci peut s'expliquer par le fait que lorsque les gousses sont encore peu nombreuses dans la culture, c'est-à-dire au début de la période de fructification, le leurre imitant l'odeur des gousses est suffisamment concurrentiel. Cependant, lorsque le nombre de gousse devient trop important, l'attractivité du leurre diminue par manque de concurrence face à l'odeur naturellement émise. Les captures par la modalité PBIPSF ont augmenté à mesure que le nombre de fleurs dans la culture a diminué jusqu'à atteindre un pic à la fin de la floraison. Cette observation témoigne, comme en féverole d'hiver, de la trop faible concurrence de l'attractant IPSF face à la kairomone florale naturellement émise. Pour les autres modalités, peu de captures et peu de variations du nombre de captures ont été observées, ce qui démontre leur faible efficacité. Concernant les comptages visuels, la même évolution que celle constatée en féverole d'hiver a été faite et peut être expliquée selon les mêmes arguments.

Quant à l'évolution du sexe-ratio des captures par l'ensemble des modalités de piégeage, elle ne reflète pas l'évolution du sexe-ratio des populations de bruches déterminée sur base de captures manuelles par Hamidi, Taupin, et Frérot (2021) que ce soit en féverole d'hiver ou en féverole de printemps. Il aurait été judicieux d'effectuer des captures manuelles régulièrement durant les expérimentations et de sexer les individus collectés. En effet, cela aurait permis de déterminer si les différences constatées entre les résultats de notre étude, dans laquelle les bruches ont été capturées avec des pièges sémiachimiques, et les résultats de l'étude de Hamidi, Taupin, et Frérot (2021), dans laquelle les bruches ont été capturées manuellement, sont dues à la méthode de capture des bruches ou à une réelle différence d'évolution du sexe-ratio des populations dans la culture. En supposant que les différences viennent effectivement de la méthode de captures utilisée, plusieurs faits surprenants ont été relevés. En féverole d'hiver, ce sont les modalités PBIPSF et PBAGDF qui ont capturé le plus de bruches tout au long de la période d'expérimentation. Par conséquent, il était attendu que le nombre de mâles capturés soit supérieur au nombre de femelles et non l'inverse puisque selon Bruce et al. (2011) la kairomone florale de *V. faba* est plus attractive pour les mâles. En féverole de printemps, du début de la période de fructification jusqu'à environ la moitié de celle-ci, la modalité PBAGDG est celle qui a capturé le plus de bruches. Le nombre de femelles capturées aurait donc dû être supérieur au nombre de mâles durant cette période puisque la kairomone de type gousse est plus attractive pour les femelles (Frerot et Leppik 2018). Toujours en féverole de printemps, du milieu de la période de fructification jusqu'à la fin de celle-ci, la modalité PBIPSF est celle qui a capturé le plus d'individus. Il était donc attendu que le nombre de mâles capturés soit supérieur au nombre de femelles (Bruce et al. 2011). Ces constatations suggèrent qu'en pratique les attractants floraux ne sont pas plus attractifs pour les mâles et que l'attractant de type gousse n'est pas plus attractif pour les femelles.

L'étude menée avait pour objectif de déterminer les meilleures associations de pièges et d'attractants pour le piégeage de *B. rufimanus* parmi 6 modalités de piégeage. Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour déterminer si le piégeage de masse à l'aide de ces associations permet de réduire significativement les dommages causés par le ravageur et de maintenir le taux de graines infestées sous les seuils imposés par les normes de qualité. De manière similaire à ce qui a été fait dans une étude menée par Johansson (2022), il serait intéressant de comparer le rendement en matière sèche et le taux de graines infestées entre une culture de féverole où les pièges sont utilisés et une culture témoin où aucun moyen de lutte contre *B. rufimanus* n'est employé. L'étude de Johansson (2022) visait à déterminer l'impact

d'une culture piège de féverole à floraison précoce dans laquelle sont placés des pièges sémiochimiques sur les dommages causés par *B. rufimanus* en culture de féverole à floraison plus tardive. Les pièges utilisés étaient les mêmes pièges blancs que ceux utilisés dans notre étude et les attractants étaient l'attractant de type gousse d'AgriOdor également utilisé dans notre étude et l'attractant floral développé par Bruce et al. (2011). Les résultats ont démontré un impact favorable de l'association entre la culture piège et les pièges sémiochimiques sur les dommages causés par le ravageur mais il n'a pas été déterminé si les pièges seuls avaient un impact.

5.2 L'impact des modalités de piégeage sur les auxiliaires de culture

5.2.1 Le choix des taxons étudiés

Au vu du temps nécessaire pour la préparation et l'identification des insectes, un choix a dû être fait concernant les taxons d'auxiliaires étudiés. Ce choix s'est porté sur les Apoidea, les Syrphidae et les Coccinellidae, d'une part car ces taxons ont été abondamment retrouvés dans les échantillons collectés (ils représentent environ 7% des captures hors bruches, féverole d'hiver et de printemps confondues) et d'autre part car les services écosystémiques qu'ils offrent sont bien connus. Les apoïdes sont reconnus comme étant des pollinisateurs d'importance capitale pour les plantes cultivées et les plantes sauvages (Hristov et al. 2020; Lorenzo-Felipe, Blanco, et Corona 2020). Les syrphes adultes sont également d'importants pollinisateurs (Doyle et al. 2020). Les larves de syrphes ainsi que les coccinelles sont aphidiphages et jouent donc un rôle important dans le contrôle des populations de pucerons (Bugg et al. 2008). Il serait intéressant d'approfondir cette étude en prenant en compte d'autres taxons d'auxiliaires qui ont également été retrouvés dans les pièges, bien que leurs abondances soient moins élevées que celles des taxons ciblés dans cette étude, par exemple les Chrysopidae, les Lepidoptera ou encore les Hymenoptera parasitoïdes.

5.2.2 L'échantillonnage

Dans notre étude les différentes modalités de piégeage peuvent être assimilées à des milieux et selon Gardener (2014), il est peu probable que toutes les espèces présentes dans un milieu soient retrouvées dans les échantillons collectés. Effectivement, les courbes d'accumulation pour l'ensemble des modalités de piégeage en féverole d'hiver et de printemps n'atteignent pas d'asymptote, ce qui démontre que l'échantillonnage n'a pas été exhaustif (Magurran 2004). L'estimateur de Chao1 confirme cette information. Selon cet estimateur, 32,8 % des espèces d'auxiliaires en féverole d'hiver et 36,2 % des espèces d'auxiliaires en féverole de printemps n'ont pas été détectées dans l'ensemble des captures et l'échantillonnage n'a été

exhaustif pour aucune modalité de piégeage que ce soit en février de l'hiver ou de printemps. Il est donc important de garder en mémoire que les résultats obtenus en termes d'espèces d'auxiliaires capturées par les modalités de piégeage sont sous-estimés et par conséquent que l'impact des modalités sur les auxiliaires l'est également.

5.2.3 Les captures d'auxiliaires par les modalités de piégeage

En février de l'hiver, les modalités de piégeage PBAGDF et PBIPSF ont capturé une plus grande richesse spécifique et une plus grande abondance d'auxiliaires que les modalités PVAGDF, PVAGDG et PVIPSF. La modalité PBAGDF a également capturé une plus grande richesse spécifique et la modalité PBIPSF une plus grande abondance que la modalité PBAGDG. Ce sont donc les associations entre les pièges blancs et les attractants floraux qui ont eu le plus grand impact sur les auxiliaires. En février de printemps, aucune modalité ne s'est avérée plus impactante que les autres sur les auxiliaires. Cette absence de différence significative entre les modalités en février de printemps est potentiellement due à un effort d'échantillonnage trop réduit. En effet, même si le nombre de pièges placés dans le dispositif expérimental est le même qu'en février de l'hiver, la durée de l'expérimentation a été plus réduite en février de printemps comme évoqué précédemment.

Plusieurs grandes tendances ressortent de l'analyse des effectifs de chaque taxon et des espèces dominantes des communautés capturées. Tout d'abord, en février de l'hiver comme en février de printemps, la presque totalité des syrphes a été capturée par les associations avec les pièges blancs. L'espèce *E. balteatus* en février de printemps et cette même espèce ainsi que *S. scripta* en février de l'hiver apparaissent d'ailleurs dans les espèces dominantes des communautés capturées par les pièges blancs. Ces résultats concordent avec les études menées par Rodriguez-Saona, Byers, et Schiffhauer (2012) et par Atakan et Pehlivan (2015) qui ont démontré que les pièges de couleur blanche sont nettement plus attractifs pour les syrphes que les pièges de couleur verte. Ensuite, les apoïdes ont été capturés en plus grand nombre par les associations avec les pièges blancs et par la modalité PVIPSF dans les deux cultures. L'espèce *A. mellifera* a été retrouvée parmi les espèces dominantes de toutes les modalités mais les modalités PVAGDF et PVAGDG capturent tout de même moins d'individus de cette espèce que les autres. Les abeilles mellifères ont donc été globalement plus attirées par les pièges blancs que par les pièges verts comme cela a été démontré dans plusieurs études (Clare et al. 2000; Rodriguez-Saona, Byers, et Schiffhauer 2012; Atakan et Pehlivan 2015) et il semble que l'attractant IPSF soit également particulièrement attractif pour cette espèce. Conformément à plusieurs études (Caron et Morse 1972; Clare et al. 2000; Mori

et Evenden 2013), il était attendu que les pièges blancs soient plus attractifs que les pièges verts pour l'espèce *B. terrestris*. En février de l'hiver l'espèce *B. terrestris* fait partie des espèces dominantes des modalités PBAGDF, PBAGDG, PVAGDF et PVIPSF mais son abondance est effectivement plus faible dans les deux dernières. Cependant, en février de printemps, cette espèce est largement dominante dans toutes les modalités et il n'y a pas de différence notable en termes de nombre d'individus capturés. Il semble donc que les pièges blancs n'ont pas été plus attractifs que les pièges verts pour cette espèce dans notre étude. Enfin, les associations avec les pièges verts ont capturé globalement plus de coccinelles que celles avec les pièges blancs dans les deux cultures. Selon Kemp et Cottrell (2015), les pièges de couleur verte capturent plus d'individus de l'espèce *C. septempunctata* que ceux de couleur blanche. Effectivement cela se confirme dans notre étude, bien que cette espèce soit retrouvée parmi les espèces dominantes dans toutes les modalités de piégeage sauf la modalité PBIPSF, son abondance est plus importante dans les associations avec les pièges verts en février de l'hiver et de printemps. L'espèce *H. axyridis* est quant à elle retrouvée parmi les espèces dominantes des modalités PVAGDF et PVAGDG en février de l'hiver et de printemps. Ceci contraste avec les résultats de l'étude de Kemp et Cottrell (2015) qui ont démontré que les pièges de couleur blanche capturent plus d'individus de cette espèce que ceux de couleur verte.

Les PCoA ont mis en évidence que les différences entre les structures des communautés capturées par les modalités de piégeage sont davantage dues au type de piège qu'à l'attractant. En février de l'hiver, une nette dissimilarité entre les structures des communautés capturées par les pièges blancs et verts a été distinguée. En février de printemps, cette dissimilarité est moins évidente mais elle se distingue tout de même. L'influence de l'attractant sur les captures d'auxiliaires n'est pas à négliger pour autant. Plusieurs études ont démontré que la composition, c'est-à-dire les molécules utilisées mais également leurs taux, des leurres sémiologiques utilisés pour le piégeage de divers ravageurs influence les prises accessoires (Meagher et Mitchell 1999; Sipolski et al. 2019; Grocock et al. 2020). Cependant, il n'est pas possible de comparer l'impact des attractants utilisés dans cette étude en fonction de leurs compositions puisque celles-ci ne sont pas disponibles.

5.3 Maximiser les captures de *Bruchus rufimanus* et minimiser les captures d'auxiliaires : un dilemme

Il est essentiel de limiter les captures d'insectes non ciblés dans les pièges sémiologiques, d'une part pour éviter la réduction de l'espace disponible dans les pièges qui affecterait

l'efficacité contre le ravageur ciblé et d'autre part pour ne pas nuire à des espèces offrant des services écosystémiques essentiels tels que la pollinisation ou la lutte biologique (Spears et al. 2016; Fountain et al. 2017). Dans cette étude, l'ensemble des modalités de piégeage a capturé 882 bruches et 852 auxiliaires en février de l'hiver et 498 bruches et 569 auxiliaires en février de printemps. Ce rapport d'environ 1 : 1 démontre un impact majeur des modalités de piégeage sur les auxiliaires de culture, d'autant plus que les auxiliaires considérés dans cette étude sont uniquement ceux appartenant à la super-famille des Apoidea et aux familles des Syrphidae et Coccinellidae.

Le dilemme qui ressort de cette étude est qu'en février de l'hiver ce sont les modalités PBIPSF et PBAGDF qui ont présenté la meilleure efficacité pour la capture de *B. rufimanus* mais ce sont ces mêmes modalités qui se sont avérées être les plus impactantes pour les auxiliaires. En février de printemps, aucune conclusion ne peut être tirée puisque aucune modalité ne s'est avérée plus efficace pour le piégeage du ravageur ou plus impactante pour les auxiliaires. Des solutions peuvent éventuellement être mise en place pour minimiser les captures d'auxiliaires. Par exemple, l'installation d'une grille par-dessus l'ouverture des pièges comme proposé par Fountain et al. (2017) peut être envisagée. La taille des mailles doit être adaptée pour permettre de limiter les captures d'auxiliaires sans affecter les captures de bruches, ceci est faisable puisque globalement les espèces d'auxiliaires les plus abondamment capturées ont une taille supérieure à celle des bruches. La réduction de la période où les pièges sont mis en place en les installant uniquement à partir du moment où les captures de bruches commencent, c'est-à-dire à partir du pic de floraison, permettrait également de limiter les captures d'auxiliaires. Le développement d'attractants sémiocimiques plus spécifiques peut être une piste, par exemple des attractants reproduisant les phéromones sexuelles ou d'agrégation de l'espèce, mais des efforts de recherche supplémentaires sont nécessaires. Cependant, même si les phéromones sont par définition spécifiques aux interactions entre individus d'une même espèce contrairement aux kairomones qui sont impliquées dans les relations interspécifiques (Nordlund et Lewis 1976; Heuskin et al. 2011; Blassioli-Moraes et al. 2019), il faut rester prudent quant à leur spécificité dans les stratégies de lutte sémiocimique. Des études ont démontré que les attractants sémiocimiques reproduisant des phéromones de ravageurs, notamment des phéromones sexuelles et d'agrégation, peuvent également être attractifs pour des insectes non ciblés (Gross et Carpenter 1991; Grocock et al. 2020; Bracalini et al. 2021). Le changement de la couleur des pièges ne semble en revanche pas être une solution intéressante. En effet, il ne semble déjà pas exister de couleur qui ne soit pas attractive pour

tous les taxons d'auxiliaires (Rodriguez-Saona, Byers, et Schiffhauer 2012) donc il est très peu probable de trouver une couleur qui soit fortement attractive pour les bruches tout en ne l'étant pas pour l'ensemble des auxiliaires.

5.4 Perspectives de développement de méthodes de lutte contre

Bruchus rufimanus

Le développement de méthodes de lutte alternatives contre *B. rufimanus* est essentiel afin de pouvoir s'affranchir de l'utilisation d'insecticides pyréthrinoïdes. Cette étude a démontré que la stratégie de piégeage de masse à l'aide des pièges et des attractants actuellement disponibles n'est pas idéale en raison de son important manque de sélectivité. Des améliorations peuvent être envisagées mais les prises accessoires restent une conséquence inéluctable des stratégies de piégeage de masse (Spears et Ramirez 2015). De plus, l'efficacité de cette stratégie pour le contrôle du ravageur n'est encore pas prouvée. D'autres méthodes de lutttes semblent prometteuses. Une première méthode est l'utilisation de variétés résistantes (Seidenglanz et Huñady 2016; Carrillo-Perdomo et al. 2019; Segers et al. 2022). Segers et al. (2022) ont démontré que certains cultivars commerciaux sont particulièrement résistants aux attaques de bruches et peuvent présenter des taux de graines non infestées supérieurs à 70%. L'utilisation d'huiles végétales en tant que biopesticides semble également être une méthode intéressante, plusieurs huiles ont démontré leur potentiel notamment l'huile d'*Artemisia campestris* L. qui a une forte activité insecticide sur *B. rufimanus* (Titouhi et al. 2017). L'huile de *Cistus ladanifer* L. a aussi un effet insecticide et provoque de surcroît la diminution de la fécondité des femelles (Bouchikhi-Tani et Khelil 2013). Les huiles de nigelle (genre *Nigella* L.) et de moutarde (genre *Sinapsis* L.) ont ces mêmes effets mais ont en plus un effet répulsif sur *B. rufimanus* (Sabbour et Abd El-Aziz 2007). L'utilisation d'agents de lutte microbienne comme bioinsecticides est également une possibilité, les champignons *B. bassiana* et *M. anisopliae* ont été identifiés comme offrant une protection efficace contre les infestations de *B. rufimanus* (Sabbour et Abd El-Aziz 2007). L'adaptation des pratiques culturales peut également limiter les infestations. Par exemple, effectuer la récolte plus précocement, c'est-à-dire avant que les graines atteignent un taux maximum de 70% de matière sèche, permet de limiter les émergences d'adultes au champ et donc de réduire les infestations l'année suivante. Cette stratégie implique que les graines soient traitées après la récolte et qu'elles ne soient pas utilisées pour le semis l'année suivante (Bachmann et al. 2020). Retarder la date de semis peut aussi permettre de réduire les dommages causés par le ravageur mais semble également réduire le rendement (Szafirowska 2012). L'efficacité ainsi

que les éventuels effets collatéraux de ces méthodes doivent être étudiés afin de pouvoir mettre au point un programme de lutte intégrée spécifique et efficace permettant de maintenir les taux de graines infestées sous les seuils imposés par les normes de qualité.

6 Contribution personnelle

L'étudiante a réalisé des recherches bibliographiques afin d'appréhender au mieux le sujet de l'étude. Elle a fait preuve de rigueur et de méthodologie pour la mise en collection des 2938 insectes, l'identification des syrphes et des coccinelles, le sexage des bruches et la création de bases de données reprenant les informations relatives à chaque insecte. Elle a également développé des compétences en statistiques, plus particulièrement en analyse de structure des communautés, afin de pouvoir réaliser les analyses adéquates. Elle a synthétisé les résultats obtenus, effectué des recherches dans la littérature et fait preuve d'esprit critique afin d'interpréter ces résultats.

7 Conclusion

Le premier objectif de ce mémoire était de déterminer les associations de pièges et d'attractants les plus efficaces pour le piégeage de masse de *B. rufimanus*. En féverole d'hiver, les associations entre les pièges blancs développés par la société AgriOdor et les attractants imitant l'odeur des fleurs des sociétés IPS et AgriOdor se sont révélées être les plus efficaces des 6 associations testées. En féverole de printemps, aucune différence d'efficacité entre les associations de pièges et d'attractants n'a été démontrée. Il serait intéressant de réitérer l'expérimentation avec un nombre plus élevé de répétitions par modalités de piégeage pour faire éventuellement apparaître des différences d'efficacité qui n'ont pas pu être mises en évidence dans cette étude.

Le second objectif était d'étudier l'influence de la phénologie de la culture sur les captures de bruches (nombre de captures et sexe-ratio) par les modalités de piégeage. En féverole d'hiver, la phénologie a influencé le nombre de captures par les modalités PBAGDF et PBIPSF principalement. Pour ces modalités, les captures ont augmenté lorsque le nombre de fleurs dans la culture a commencé à diminuer, ce qui témoigne d'une trop faible concurrence des attractants floraux face à l'odeur naturelle des fleurs, et elles ont diminué lorsque la floraison s'est terminée. En revanche, la phénologie n'a pas influencé le sexe-ratio des captures. En féverole de printemps, le nombre de captures a aussi été influencé par la phénologie de la culture, surtout pour les modalités PBAGDG et PBIPSF. Pour la modalité PBAGDG, les

captures ont eu lieu lorsque le nombre de gousses dans la culture était encore suffisamment faible, lorsqu'il a augmenté les captures ont diminué par manque de concurrence de l'attractant. Pour la modalité PBIPSF, comme en féverole d'hiver, les captures ont augmenté lorsque le nombre de fleurs s'est amoindri puis elles ont diminué après la période de floraison. Quant au sexe-ratio des captures, il semble avoir été légèrement influencé par la phénologie des captures puisqu'une inversion a eu lieu à la fin de la fructification.

Le troisième et dernier objectif était de déterminer l'impact des modalités de piégeage sur les auxiliaires (Apoidea, Syrphidae et Coccinellidae). L'impact sur les auxiliaires a été très important puisque qu'un rapport d'environ 1 : 1 a été constaté entre les captures de bruches et les captures d'auxiliaires (Apoidea, Syrphidae et Coccinellidae) en féverole d'hiver et de printemps. En féverole d'hiver, ce sont les modalités PBIPSF et PBAGDF qui ont capturé le plus d'espèces et le plus grand nombre d'auxiliaires tandis qu'en féverole de printemps aucune différence n'a été démontrée en termes de richesse spécifique et d'abondance capturées entre les modalités. Les communautés d'auxiliaires capturées sont variables entre les modalités mais leur structure est davantage influencée par le type de piège que par l'attractant que ce soit en féverole d'hiver ou en féverole de printemps

Cette étude a permis de démontrer qu'actuellement, le piégeage de masse n'est pas une stratégie de lutte optimale en raison de son impact sur les auxiliaires dû à un sévère manque de sélectivité des pièges et attractants disponibles. D'autant plus que les modalités les plus efficaces pour la capture des bruches sont également les plus impactantes pour les auxiliaires. Des améliorations doivent absolument être apportées pour rendre le piégeage de masse plus spécifique. Il reste également à évaluer si cette stratégie permet une lutte efficace contre le ravageur, c'est-à-dire si elle permet de réduire significativement les dommages causés par celui-ci. D'autres méthodes de luttés alternatives sont prometteuses et se doivent d'être approfondies telles que l'utilisation de variétés résistantes (Seidenglanz et Huňady 2016; Carrillo-Perdomo et al. 2019; Segers et al. 2022), d'huiles végétales (Sabbour et Abd El-Aziz 2007; Bouchikhi-Tani et Khelil 2013; Titouhi et al. 2017), d'agents de lutte microbienne (Sabbour et Abd El-Aziz 2007) ou encore l'adaptation des pratiques culturales (Szafirowska 2012; Bachmann et al. 2020).

8 Références bibliographiques

- Aschi, Amira, Michaël Aubert, Wassila Riah-Anglet, Sylvie Nélieu, Caroline Dubois, Marthe Akpa-Vinceslas, et Isabelle Trinsoutrot-Gattin. 2017. « Introduction of Faba Bean in Crop Rotation: Impacts on Soil Chemical and Biological Characteristics ». *Applied Soil Ecology* 120: 219-28. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.08.003>.
- Atakan, Ekrem, et Serkan Pehlivan. 2015. « Attractiveness of various colored sticky traps to some pollinating insects in apple ». *TURKISH JOURNAL OF ZOOLOGY* 39 (3): 474-81. <https://doi.org/10.3906/zoo-1403-62>.
- Bachmann, Martin, Christian Kuhnitzsch, Siriwan D. Martens, Olaf Steinhöfel, et Annette Zeyner. 2020. « Control of Bean Seed Beetle Reproduction through Cultivar Selection and Harvesting Time ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 300: 107005. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107005>.
- Baker, T.C., et J.J. Heath. 2005. « Pheromones: Function and Use in Insect Control ». *Comprehensive Molecular Insect Science* 6: 407-59. <https://doi.org/10.1016/B0-44-451924-6/00087-9>.
- Baliukoniene, Violeta, Bronius Bakutis, et Henrikas Stankevicius. 2003. « Mycological and mycotoxicological evaluation of grain ». *Annals of agricultural and environmental medicine : AAEM* 10 (2): 223-27.
- Baugnée, Jean-Yves, et Etienne Branquart. 2000. « Clef de terrain pour la reconnaissance des principales coccinelles de Wallonie (Chilocorinae, Coccinellinae et Epilachninae) ». Jeunes & Nature asbl et Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux.
- Bellifa, Maxime, et Jean-David Chapelin-Viscardi. 2021. « Synthesis of the interactions between the European species of the genus Bruchus (Coleoptera: Chrysomelidae: Bruchinae) and their natural enemies ». *Annales de la Société entomologique de France (N.S.)* 57 (3): 189-204. <https://doi.org/10.1080/00379271.2021.1927180>.
- Blassioli-Moraes, Maria C., Raúl A. Laumann, Mirian F. F. Michereff, et Miguel Borges. 2019. « Semiochemicals for Integrated Pest Management ». In *Sustainable Agrochemistry: A Compendium of Technologies*, édité par Sílvio Vaz Jr., 85-112. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-17891-8_3.
- Bouchikhi-Tani, Zoheir, et Mohamed Anouar Khelil. 2013. « Lutte contre trois bruches Bruchus rufimanus, Callosobruchus maculatus et Acanthoscelides obtectus avec les huiles essentielles extraites de Cistus ladaniferus (Cistaceae) ». *Ecologia Mediterranea* 39 (2): 85-92. <https://doi.org/10.3406/ecmed.2013.1282>.
- Boughdad, Ahmed, et Ginette Lauge. 1995. « Vicia faba L. seed infestation and losses due to Bruchus rufimanus Boh. (Coleoptera: Bruchidae) in Morocco. » *FABIS Newsletter* 36/37: 20-25.
- Bracalini, Matteo, Francesco Croci, Emanuele Ciardi, Giulio Mannucci, Emanuele Papucci, Giulia Gestri, Rizio Tiberi, et Tiziana Panzavolta. 2021. « Ips Sexdentatus Mass-Trapping: Mitigation of Its Negative Effects on Saproxylic Beetles Larger Than the Target ». *Forests* 12 (2): 175. <https://doi.org/10.3390/f12020175>.
- Bruce, Toby JA, Janet L Martin, Lesley E Smart, et John A Pickett. 2011. « Development of Semiochemical Attractants for Monitoring Bean Seed Beetle, Bruchus Rufimanus ». *Pest Management Science* 67 (10): 1303-8. <https://doi.org/10.1002/ps.2186>.
- Bugg, Robert L., Ramy G. Colfer, William E. Chaney, Hugh A. Smith, et James Cannon. 2008. « Flower Flies (Syrphidae) and Other Biological Control Agents for Aphids in Vegetable Crops ». *Agriculture and Natural Resources Publication*, n° 8285: 1-25. <https://doi.org/10.3733/ucanr.8285>.
- Bugg, Robert L., Ruth Tracy Ellis, et Robert W. Carlson. 1989. « Ichneumonidae (Hymenoptera) Using Extrafloral Nectar of Faba Bean (Vicia Faba L., Fabaceae) in Massachusetts ». *Biological Agriculture & Horticulture* 6 (2): 107-14. <https://doi.org/10.1080/01448765.1989.9754509>.
- Byers, John A. 2007. « Simulation of Mating Disruption and Mass Trapping with Competitive Attraction and Camouflage ». *Environmental Entomology* 36 (6): 1328-38. [https://doi.org/10.1603/0046-225X\(2007\)36\[1328:SOMDAM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1603/0046-225X(2007)36[1328:SOMDAM]2.0.CO;2).

- Caron, Dewey M., et Roger A. Morse. 1972. « Attraction of Japanese Beetle Traps to Honey Bees, Bumble Bees, and Other Apoidea ». *Environmental Entomology* 1 (3): 272-74. <https://doi.org/10.1093/ee/1.3.272>.
- Carrillo-Perdomo, Estefanía, Blandine Raffiot, Damien Ollivier, Chrystel Deulvot, Jean-Bernard Magnin-Robert, Nadim Tayeh, et Pascal Marget. 2019. « Identification of Novel Sources of Resistance to Seed Weevils (*Bruchus* spp.) in a Faba Bean Germplasm Collection ». *Frontiers in Plant Science* 9: 1914. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01914>.
- Chadidjah, Anna, et I. G. N. M. Jaya. 2021. « An evaluation of the log-transformed strategy for count data in ecological studies ». *Commun. Math. Biol. Neurosci.*, 41. <https://doi.org/10.28919/cmbn/5596>.
- Clare, G., D. M. Suckling, S. J. Bradley, J. T. S. Walker, P. W. Shaw, J. M. Daly, G. F. McLaren, et C. H. Wearing. 2000. « Pheromone Trap Colour Determines Catch of Nontarget Insects ». *New Zealand Plant Protection* 53: 216-20. <https://doi.org/10.30843/nzpp.2000.53.3638>.
- Cook, Samantha M., Zeyaur R. Khan, et John A. Pickett. 2007. « The Use of Push-Pull Strategies in Integrated Pest Management ». *Annual Review of Entomology* 52 (1): 375-400. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.52.110405.091407>.
- Crépon, Katell, Pascal Marget, Corinne Peyronnet, Benoit Carrouée, Paolo Arese, et Gérard Duc. 2010. « Nutritional Value of Faba Bean (*Vicia Faba* L.) Seeds for Feed and Food ». *Field Crops Research, Faba Beans in Sustainable Agriculture*, 115 (3): 329-39. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.09.016>.
- Doyle, Toby, Will L. S. Hawkes, Richard Massy, Gary D. Powney, Myles H. M. Menz, et Karl R. Wotton. 2020. « Pollination by hoverflies in the Anthropocene ». *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 287 (1927): 20200508. <https://doi.org/10.1098/rspb.2020.0508>.
- Duc, Gérard, Jelena M. Aleksić, Pascal Marget, Aleksandar Mikic, Jeffrey Paull, Robert J. Redden, Olaf Sass, et al. 2015. « Faba Bean ». In *Grain Legumes*, édité par Antonio M. De Ron, 10:141-78. Handbook of Plant Breeding. New York, NY: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2797-5_5.
- Duc, Gérard, Shiyang Bao, Michael Baum, Bob Redden, Mohammed Sadiki, Maria Jose Suso, Margarita Vishniakova, et Xuxiao Zong. 2010. « Diversity Maintenance and Use of *Vicia Faba* L. Genetic Resources ». *Field Crops Research, Faba Beans in Sustainable Agriculture*, 115 (3): 270-78. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.10.003>.
- El-Sayed, A. M., D. M. Suckling, J. A. Byers, E. B. Jang, et C. H. Wearing. 2009. « Potential of “Lure and Kill” in Long-Term Pest Management and Eradication of Invasive Species ». *Journal of Economic Entomology* 102 (3): 815-35. <https://doi.org/10.1603/029.102.0301>.
- El-Sayed, A. M., D. M. Suckling, C. H. Wearing, et J. A. Byers. 2006. « Potential of Mass Trapping for Long-Term Pest Management and Eradication of Invasive Species ». *Journal of Economic Entomology* 99 (5): 1550-64. <https://doi.org/10.1093/jee/99.5.1550>.
- Etemadi, Fatemeh, Masoud Hashemi, Allen V. Barker, Omid Reza Zandvakili, et Xiaobing Liu. 2019. « Agronomy, Nutritional Value, and Medicinal Application of Faba Bean (*Vicia Faba* L.) ». *Horticultural Plant Journal* 5 (4): 170-82. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2019.04.004>.
- « FAOSTAT ». 2020. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2020. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>.
- Fenty, Justin. 2004. « Analyzing Distances ». *The Stata Journal* 4 (1): 1-26. <https://doi.org/10.1177/1536867X0100400101>.
- Fountain, Michelle T., Catherine Baroffio, Anna-Karin Borg-Karlson, Phil Brain, Jerry V. Cross, Dudley I. Farman, David R. Hall, et al. 2017. « Design and Deployment of Semiochemical Traps for Capturing *Anthonomus Rubi* Herbst (Coleoptera: Curculionidae) and *Lygus Rugulipennis* Poppius (Heteroptera: Miridae) in Soft Fruit Crops ». *Crop Protection* 99: 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.05.001>.
- Frerot, Brigitte, et Ené Leppik. 2018. Composition attractive pour la bruche de la féverole. 3035775, filed 5 mai 2015, et issued 21 septembre 2018. <https://patentimages.storage.googleapis.com/b3/7e/62/aea7b485c2c76b/FR3035775B1.pdf>.

- Gailis, Jānis, Nameda Astašova, Edīte Jākobsone, et Laura Ozoliņa-Pole. 2022. « Biology of broadbean seed beetle (*Bruchus rufimanus*; Coleoptera: Chrysomelidae) in Latvia ». *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science* 72 (1): 4-16.
<https://doi.org/10.1080/09064710.2021.1977841>.
- Gardener, Mark. 2014. *Community Ecology Analytical Methods Using R and Excel*. Pelagic Publishing.
- Garratt, M. P. D., D. J. Coston, C. L. Truslove, M. G. Lappage, C. Polce, R. Dean, J. C. Biesmeijer, et S. G. Potts. 2014. « The Identity of Crop Pollinators Helps Target Conservation for Improved Ecosystem Services ». *Biological Conservation* 169: 128-35.
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.11.001>.
- Gilbert, Francis S. 2015. *Hoverflies*. Vol. 5. Naturalists' Handbooks. Pelagic Publishing.
- Grocock, Nicholas L., Ronald E. Batallas, Emily A. McNamara, Ashton B. Sturm, Jessamyn S. Manson, et Maya L. Evenden. 2020. « Bumble Bees (Hymenoptera: Apidae) Respond to Moth (Lepidoptera: Noctuidae) Pheromone Components, Leading to Bee Bycatch in Monitoring Traps Targeting Moth Pests ». *Frontiers in Ecology and Evolution* 8.
<https://doi.org/10.3389/fevo.2020.576692>.
- Gross, H. R., et J. E. Carpenter. 1991. « Role of the Fall Armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) Pheromone and Other Factors in the Capture of Bumblebees (Hymenoptera: Aphidae) by Universal Moth Traps ». *Environmental Entomology* 20 (1): 377-81.
<https://doi.org/10.1093/ee/20.1.377>.
- Hamidi, Rachid, Pierre Taupin, et Brigitte Frérot. 2021. « Physiological Synchrony of the Broad Bean Weevil, *Bruchus rufimanus* Boh., to the Host Plant Phenology, *Vicia faba* L. ». *Frontiers in Insect science* 1: 707323. <https://doi.org/10.3389/finsc.2021.707323>.
- Hendrix, William H., et William B. Showers. 1990. « Evaluation of Differently Colored Bucket Traps for Black Cutworm and Armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) ». *Journal of Economic Entomology* 83 (2): 596-98. <https://doi.org/10.1093/jee/83.2.596>.
- Heuskin, Stéphanie, François J. Verheggen, Éric Haubruge, Jean-Paul Wathelet, et Georges Lognay. 2011. « The Use of Semiochemical Slow-Release Devices in Integrated Pest Management Strategies ». *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* 15 (3): 459-70.
- Hristov, Peter, Boyko Neov, Rositsa Shumkova, et Nadezhda Palova. 2020. « Significance of Apoidea as Main Pollinators. Ecological and Economic Impact and Implications for Human Nutrition ». *Diversity* 12 (7): 280. <https://doi.org/10.3390/d12070280>.
- Jamont, Marie, Solène Crépellère, et Bruno Jaloux. 2013. « Effect of Extrafloral Nectar Provisioning on the Performance of the Adult Parasitoid *Diaeretiella rapae* ». *Biological Control* 65 (2): 271-77. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2013.01.010>.
- Jensen, Erik S., Mark B. Peoples, Robert M. Boddey, Peter M. Gresshoff, Henrik Hauggaard-Nielsen, Bruno J. R. Alves, et Malcolm J. Morrison. 2012. « Legumes for Mitigation of Climate Change and the Provision of Feedstock for Biofuels and Biorefineries. A Review ». *Agronomy for Sustainable Development* 32 (2): 329-64. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0056-7>.
- Jensen, Erik S., Mark B. Peoples, et Henrik Hauggaard-Nielsen. 2010. « Faba Bean in Cropping Systems ». *Field Crops Research*, Faba Beans in Sustainable Agriculture, 115 (3): 203-16.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.10.008>.
- Johansson, Ylva. 2022. « Scent Traps and Trap Crops for Broad Bean Weevil (*Bruchus rufimanus*) Control ». Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences.
<https://stud.epsilon.slu.se/17521/>.
- Kaniuczak, Zdzisław. 2004. « Seed Damage of Field Bean (*Vicia faba* L. Var. Minor Harz.) Caused by Bean Weevils (*Bruchus rufimanus* Boh.) (Coleoptera: Bruchidae) ». *Journal of Plant Protection Research* 44 (2): 125-29.
- Kemp, E. A., et T. E. Cottrell. 2015. « Effect of Lures and Colors on Capture of Lady Beetles (Coleoptera: Coccinellidae) in Tedders Pyramidal Traps ». *Environmental Entomology* 44 (5): 1395-1406. <https://doi.org/10.1093/ee/nvv108>.

- Khelfane-Goucem, Karima, et Ferroudja Medjdoub-Bensaad. 2016. « Impact of Bruchus Rufimanus Infestation upon Broad Bean Seeds Germination ». *Advances in Environmental Biology* 10 (5): 144-52.
- Kibbou, Fatimaezzhara, Keltoum El Bouhmedi, Hélène Marrou, Thomas R Sinclair, et Michel E Ghanem. 2022. « Impact of drought and temperature constraints on development and growth of faba bean (*Vicia faba* L.) ». *Journal of Crop Improvement* 36 (1): 57-72. <https://doi.org/10.1080/15427528.2021.1906811>.
- Köpke, Ulrich, et Thomas Nemecek. 2010. « Ecological Services of Faba Bean ». *Field Crops Research, Faba Beans in Sustainable Agriculture*, 115 (3): 217-33. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.10.012>.
- Le Guen, Joël, Gérard Morin, et Jeanine Poisson. 1983. « Incompatibilité unilatérale chez *Vicia faba* L. I. Analyse globale de croisements intraspécifiques entre quatre sous-espèces ». *Agronomie* 3 (5): 443-49. <https://doi.org/10.1051/agro:19830507>.
- Liu, Liting, J. Diane Knight, Reynald L. Lemke, et Richard E. Farrell. 2019. « A Side-by-Side Comparison of Biological Nitrogen Fixation and Yield of Four Legume Crops ». *Plant and Soil* 442 (1): 169-82. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04167-x>.
- Lopes, Rogério B., Raul A. Laumann, Dave Moore, Márcio W. M. Oliveira, et Marcos Faria. 2014. « Combination of the Fungus *Beauveria Bassiana* and Pheromone in an Attract-and-Kill Strategy against the Banana Weevil, *Cosmopolites Sordidus* ». *Entomologia Experimentalis et Applicata* 151 (1): 75-85. <https://doi.org/10.1111/eea.12171>.
- Lorenzo-Felipe, Israel, Carlos A Blanco, et Miguel Corona. 2020. « Impact of Apoidea (Hymenoptera) on the World's Food Production and Diets ». *Annals of the Entomological Society of America* 113 (6): 407-24. <https://doi.org/10.1093/aesa/saaa016>.
- Magurran, Anne E. 2004. *Measuring Biological Diversity*. Blackwell Science Ltd.
- Marcon, Eric. 2015. « Mesures de la Biodiversité ».
- Marzinzig, Birgit, Lisa Brünjes, Siria Biagioni, Hermann Behling, Wolfgang Link, et Catrin Westphal. 2018. « Bee Pollinators of Faba Bean (*Vicia faba* L.) Differ in Their Foraging Behaviour and Pollination Efficiency ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 264: 24-33. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.05.003>.
- McEwen, J., R. J. Darby, M. V. Hewitt, et D. P. Yeoman. 1990. « Effects of field beans, fallow, lupins, oats, oilseed rape, peas, ryegrass, sunflowers and wheat on nitrogen residues in the soil and on the growth of a subsequent wheat crop ». *The Journal of Agricultural Science* 115 (2): 209-19. <https://doi.org/10.1017/S0021859600075146>.
- Meagher, Robert L., Jr, et Everett R. Mitchell. 1999. « Nontarget Hymenoptera Collected in Pheromone- and Synthetic Floral Volatile-Baited Traps ». *Environmental Entomology* 28 (3): 367-71. <https://doi.org/10.1093/ee/28.3.367>.
- Medjdoub-Bensaad, F., M. A. Khelil, et J. Huignard. 2007. « Bioecology of Broad Bean Bruchid *Bruchus Rufimanus* Boh. (Coleoptera : Bruchidae) in a Region of Kabylia in Algeria ». *African Journal of Agricultural Research* 2 (9): 412-17. <https://doi.org/10.5897/AJAR.9000086>.
- Miller, J. R., P. S. McGhee, P. Y. Siegert, C. G. Adams, J. Huang, M. J. Grieshop, et L. J. Gut. 2010. « General principles of attraction and competitive attraction as revealed by large-cage studies of moths responding to sex pheromone ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107 (1): 22-27. <https://doi.org/10.1073/pnas.0908453107>.
- Mínguez, M. Inés, et Diego Rubiales. 2021. « Chapter 15 - Faba Bean ». In *Crop Physiology Case Histories for Major Crops*, édité par Victor O. Sadras et Daniel F. Calderini, 452-81. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819194-1.00015-3>.
- Mori, Boyd A., et Maya L. Evenden. 2013. « Factors Affecting Pheromone-Baited Trap Capture of Male *Coleophora deauratella*, an Invasive Pest of Clover in Canada ». *Journal of Economic Entomology* 106 (2): 844-54. <https://doi.org/10.1603/EC12437>.
- Mouret, Hugues, Gabriel Carré, Stuart P. M. Roberts, Nicolas Morison, et Bernard E. Vaissière. 2007. « Mise en place d'une collection d'abeilles (Hymenoptera, Apoidea) dans le cadre d'une étude de la biodiversité ». *Osmia* 1: 8-15. <https://doi.org/10.47446/OSMIA1.4>.

- Multari, Salvatore, Derek Stewart, et Wendy R. Russell. 2015. « Potential of Fava Bean as Future Protein Supply to Partially Replace Meat Intake in the Human Diet ». *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 14 (5): 511-22. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12146>.
- Nayak, Geetha K., Stuart P. M. Roberts, Michael Garratt, Thomas D. Breeze, Thomas Tscheulin, Jenn Harrison-Cripps, Ioannis N. Vogiatzakis, Maria T. Stirpe, et Simon G. Potts. 2015. « Interactive Effect of Floral Abundance and Semi-Natural Habitats on Pollinators in Field Beans (*Vicia Faba*) ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 199: 58-66. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.08.016>.
- Nordlund, Donald A., et W. J. Lewis. 1976. « Terminology of Chemical Releasing Stimuli in Intraspecific and Interspecific Interactions ». *Journal of Chemical Ecology* 2 (2): 211-20. <https://doi.org/10.1007/BF00987744>.
- Nuessly, G. S., M. G. Hentz, R. Beiriger, et B. T. Scully. 2004. « INSECTS ASSOCIATED WITH FABIA BEAN, VICIA FABIA (FABALES: FABACEAE), IN SOUTHERN FLORIDA ». *Florida Entomologist* 87 (2): 204-11. [https://doi.org/10.1653/0015-4040\(2004\)087\[0204:IWFVBV\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1653/0015-4040(2004)087[0204:IWFVBV]2.0.CO;2).
- Piñero, Jaime C. 2018. « A Comparative Assessment of the Response of Two Species of Cucumber Beetles (Coleoptera: Chrysomelidae) to Visual and Olfactory Cues and Prospects for Mass Trapping ». *Journal of Economic Entomology* 111 (3): 1439-45. <https://doi.org/10.1093/jee/toy094>.
- Pölit, Birgit, et Hans-Peter Reike. 2019. « Untersuchungen zu Biologie und Befallsdynamik des Ackerbohnenkäfers (Coleoptera, Bruchidae: Bruchus rufimanus) in Sachsen ». *Gesunde Pflanzen* 71 (2): 79-85. <https://doi.org/10.1007/s10343-019-00459-5>.
- Rochester, I. J., M. B. Peoples, N. R. Hulugalle, R. R. Gault, et G. A. Constable. 2001. « Using Legumes to Enhance Nitrogen Fertility and Improve Soil Condition in Cotton Cropping Systems ». *Field Crops Research* 70 (1): 27-41. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(00\)00151-9](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(00)00151-9).
- Rodriguez-Saona, Cesar R., John A. Byers, et Daniel Schiffhauer. 2012. « Effect of Trap Color and Height on Captures of Blunt-Nosed and Sharp-Nosed Leafhoppers (Hemiptera: Cicadellidae) and Non-Target Arthropods in Cranberry Bogs ». *Crop Protection* 40: 132-44. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2012.05.005>.
- Roubinet, Eve. 2016. « Management of the Broad Bean Weevil (*Bruchus rufimanus* Boh.) in Faba Bean (*Vicia Faba* L.) ». Report. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences. <https://pub.epsilon.slu.se/13631/>.
- Roy, Helen E., Peter M. J. Brown, Richard F. Comont, Remy L. Poland, et John J. Sloggett. 2013. *Ladybirds*. Vol. 10. Naturalists' Handbooks. Pelagic Publishing.
- Ruisi, Paolo, Gaetano Amato, Giuseppe Badagliacca, Alfonso Salvatore Frenda, Dario Giambalvo, et Giuseppe Di Miceli. 2017. « Agro-Ecological Benefits of Faba Bean for Rainfed Mediterranean Cropping Systems ». *Italian Journal of Agronomy* 12 (3): 233-45. <https://doi.org/10.4081/ija.2017.865>.
- Sabbour, Magda, et Shadia Abd El-Aziz. 2007. « Efficiency of some bioinsecticides against broad bean beetle, *Bruchus rufimanus* (Coleoptera: Bruchidae) ». *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences* 3 (2): 67-72.
- Schulz-Kesting, Katharina, Jan Thiele, Georg Everwand, et Jens Dauber. 2021. « Neighbourhood Effect of Faba Bean (*Vicia Faba* L.) on Density of Vegetation-Dwelling Natural Biocontrol Agents in Winter Wheat ». *Biological Control* 160: 104673. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104673>.
- Segers, Arnaud, Rudy Caparros Megido, Georges Lognay, et Frédéric Francis. 2021. « Overview of *Bruchus rufimanus* Boheman 1833 (Coleoptera: Chrysomelidae): Biology, Chemical Ecology and Semiochemical Opportunities in Integrated Pest Management Programs ». *Crop Protection* 140: 105411. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105411>.
- Segers, Arnaud, Lionel Dumoulin, Rudy Caparros Megido, Nicolas Jacquet, Christine Cartryse, Paul Malumba Kamba, Jérôme Pierreux, Aurore Richel, Christophe Blecker, et Frédéric Francis. 2022. « Varietal and Environmental Effects on the Production of Faba Bean (*Vicia Faba* L.) Seeds for the Food Industry by Confrontation of Agricultural and Nutritional Traits with

- Resistance against *Bruchus* Spp. (Coleoptera: Chrysomelidae, Bruchinae) ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 327: 107831. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107831>.
- Seidenglanz, Marek, et Igor Huňady. 2016. « Effects of faba bean (*Vicia faba*) varieties on the development of *Bruchus rufimanus* ». *Czech Journal of Genetics and Plant Breeding* 52 (1): 22-29. <https://doi.org/10.17221/122/2015-CJGPB>.
- Sipolski, Steven J, Sara W Datson, Michael Reding, Jason B Oliver, et Steven R Alm. 2019. « Minimizing Bee (Hymenoptera: Apoidea) Bycatch in Japanese Beetle Traps ». *Environmental Entomology* 48 (5): 1203-13. <https://doi.org/10.1093/ee/nvz098>.
- Spears, Lori R., Chris Looney, Harold Ikerd, Jonathan B. Koch, Terry Griswold, James P. Strange, et Ricardo A. Ramirez. 2016. « Pheromone Lure and Trap Color Affects Bycatch in Agricultural Landscapes of Utah ». *Environmental Entomology* 45 (4): 1009-16. <https://doi.org/10.1093/ee/nvw085>.
- Spears, Lori R., et Ricardo A. Ramirez. 2015. « Learning to Love Leftovers: Using By-Catch to Expand Our Knowledge in Entomology ». *American Entomologist* 61 (3): 168-73. <https://doi.org/10.1093/ae/tmv046>.
- Stoddard, F. L., A. H. Nicholas, D. Rubiales, J. Thomas, et A. M. Villegas-Fernández. 2010. « Integrated Pest Management in Faba Bean ». *Field Crops Research, Faba Beans in Sustainable Agriculture*, 115 (3): 308-18. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.07.002>.
- Szafirowska, Anna. 2012. « The Role of Cultivars and Sowing Date in Control of Broad Bean Weevil (*Bruchus Rufimanus* Boh.) in Organic Cultivation ». *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research* 77 (1): 29-36. <https://doi.org/10.2478/v10032-012-0013-2>.
- Titouhi, Faten, Moez Amri, et Jouda Mediouni Ben Jemâa. 2015. « Status of coleopteran insects infesting faba bean in Tunisia with emphasis on population dynamics and damage of *Bruchus rufimanus* (Chrysomylidae) ». *Basic Research Journal of Agricultural Science and Review* 4 (8): 225-33.
- Titouhi, Faten, Moez Amri, Chokri Messaoud, Soumaya Haouel, Sondes Youssfi, Amira Cherif, et Jouda Mediouni Ben Jemâa. 2017. « Protective Effects of Three Artemisia Essential Oils against *Callosobruchus Maculatus* and *Bruchus Rufimanus* (Coleoptera: Chrysomelidae) and the Extended Side-Effects on Their Natural Enemies ». *Journal of Stored Products Research* 72: 11-20. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2017.02.007>.
- Tran, B., J. Darquenne, et J. Huignard. 1993. « Changes in Responsiveness to Factors Inducing Diapause Termination in *Bruchus Rufimanus* (Boh.) (Coleoptera: Bruchidae) ». *Journal of Insect Physiology* 39 (9): 769-74. [https://doi.org/10.1016/0022-1910\(93\)90052-S](https://doi.org/10.1016/0022-1910(93)90052-S).
- Tran, B., et J. Huignard. 1992. « Interactions between Photoperiod and Food Affect the Termination of Reproductive Diapause in *Bruchus Rufimanus* (Boh.), (Coleoptera, Bruchidae) ». *Journal of Insect Physiology* 38 (8): 633-42. [https://doi.org/10.1016/0022-1910\(92\)90115-T](https://doi.org/10.1016/0022-1910(92)90115-T).
- Unkovich, Murray J., et John S. Pate. 2000. « An Appraisal of Recent Field Measurements of Symbiotic N₂ Fixation by Annual Legumes ». *Field Crops Research* 65 (2): 211-28. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(99\)00088-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00088-X).
- Van Berkum, Peter, Desta Beyene, Francisco Temprano Vera, et Harold H. Keyser. 1995. « Variability among *Rhizobium* Strains Originating from Nodules of *Vicia faba* ». *Applied and Environmental Microbiology* 61 (7): 2649-53. <https://doi.org/10.1128/aem.61.7.2649-2653.1995>.
- Verlinden, Lucien. 1994. *Syrphides (Syrphidae)*. Faune de Belgique. Bruxelles: Institut royal des Sciences naturelles de Belgique.
- Wahbi, Sanâa, Yves Prin, Jean Thioulouse, Hervé Sanguin, Ezékiel Baudoin, Tasnime Maghraoui, Khalid Oufdou, et al. 2016. « Impact of Wheat/Faba Bean Mixed Cropping or Rotation Systems on Soil Microbial Functionalities ». *Frontiers in Plant Science* 7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01364>.
- Ward, Rebecca Louise. 2018. « The Biology and Ecology of *Bruchus Rufimanus* (Bean Seed Beetle) ». Thesis, Newcastle University. <http://theses.ncl.ac.uk/jspui/handle/10443/4358>.

- Warton, David I., Mitchell Lyons, Jakub Stoklosa, et Anthony R. Ives. 2016. « Three Points to Consider When Choosing a LM or GLM Test for Count Data ». *Methods in Ecology and Evolution* 7 (8): 882-90. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12552>.
- Witzgall, Peter, Philipp Kirsch, et Alan Cork. 2010. « Sex Pheromones and Their Impact on Pest Management ». *Journal of Chemical Ecology* 36: 80-100. <https://doi.org/10.1007/s10886-009-9737-y>.
- Yang, J. Y., C. F. Drury, X. M. Yang, R. De Jong, E. C. Huffman, C. A. Campbell, et V. Kirkwood. 2010. « Estimating Biological N₂ Fixation in Canadian Agricultural Land Using Legume Yields ». *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Special section Harvested perennial grasslands: Ecological models for farming's perennial future, 137 (1): 192-201. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.02.004>.

9 Annexes

Annexe 1 : Tableau récapitulatif des captures de *Bruchus rufimanus* par répétition des modalités de piégeage et par date de relevé des pièges en féverole d'hiver.

Dates	PBAGDF				PBAGDG				PBIPSF				PVAGDF				PVAGDG				PVIPSF			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
29/04/21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
03/05/21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
07/05/21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10/05/21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13/05/21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20/05/21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24/05/21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27/05/21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31/05/21	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
03/06/21	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
07/06/21	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15/06/21	4	11	5	13	1	4	6	4	3	25	10	14	0	2	3	1	0	0	0	0	1	0	0	1
22/06/21	2	9	4	7	0	1	3	5	3	34	0	6	1	1	3	1	7	0	0	0	0	3	6	1
01/07/21	11	2	2	2	1	1	2	3	6	9	5	2	0	0	0	0	0	4	0	2	0	1	5	0
08/07/21	3	9	1	3	5	0	2	2	5	8	7	2	5	1	0	0	2	1	0	0	4	0	1	3
16/07/21	4	13	0	3	10	12	0	0	11	9	3	14	0	0	0	0	2	2	0	1	3	0	8	6
23/07/21	0	12	24	27	1	0	12	11	0	101	48	103	1	8	8	6	1	0	5	6	4	12	11	25
29/07/21	1	0	0	0	0	0	0	4	0	6	4	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1
Total	25	58	36	55	20	18	25	29	28	194	77	143	7	13	15	8	12	7	6	9	13	16	31	37

Annexe 2 : Tableau récapitulatif des captures de *Bruchus rufimanus* par répétition des modalités de piégeage et par date de relevé des pièges en féverole de printemps.

Dates	PBAGDF				PBAGDG				PBIPSF				PVAGDF				PVAGDG				PVIPSF			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
03/06/21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10/06/21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17/06/21	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
25/06/21	2	0	0	0	5	0	0	11	3	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0
06/07/21	0	2	0	5	6	5	4	29	7	7	4	3	2	1	0	6	0	3	2	10	4	4	2	0
12/07/21	0	0	1	5	1	2	12	12	7	2	4	11	1	5	4	5	0	3	3	1	1	6	4	1
19/07/21	0	0	6	9	0	0	5	9	6	1	22	37	0	2	0	2	0	1	3	2	0	2	4	4
26/07/21	0	2	3	9	1	2	13	7	0	3	6	26	0	2	3	1	0	0	5	2	0	1	4	4
02/08/21	0	0	6	2	1	2	9	1	0	1	6	9	0	1	2	1	0	0	2	0	0	4	5	5
Total	2	5	16	30	14	11	43	70	24	14	43	87	6	11	9	15	1	7	15	20	5	17	19	14

Annexe 3 : Tableau récapitulatif des *Bruchus rufimanus* comptés par comptage visuel en féverole d'hiver.

Dates	Nombre d'individus
26/04/2021	0
29/04/2021	0
03/05/2021	0
10/05/2021	0
17/05/2021	0
20/05/2021	1
31/05/2021	5
03/06/2021	0
07/06/2021	21
10/06/2021	17
15/06/2021	38
17/06/2021	0
22/06/2021	2
25/06/2021	0
01/07/2021	0
06/07/2021	0
Total	84

Annexe 4 : Tableau récapitulatif des *Bruchus rufimanus* comptés par comptage visuel en féverole de printemps.

Dates	Nombre d'individus
10/06/2021	0
15/06/2021	0
17/06/2021	0
22/06/2021	0
25/06/2021	0
01/07/2021	0
06/07/2021	33
08/07/2021	85
16/07/2021	169
19/07/2021	20
23/07/2021	2
26/07/2021	8
29/07/2021	3
02/08/2021	2
Total	322

Annexe 5 : Tableau récapitulatif du nombre de *Bruchus rufimanus* mâles et femelles capturés par l'ensemble des modalités de piégeage par date de relevé des pièges en féverole d'hiver.

Date	Femelles capturées	Mâles capturés
29/04/2021	1	0
03/05/2021	0	0
07/05/2021	0	0
10/05/2021	0	0
13/05/2021	0	0
20/05/2021	0	0
24/05/2021	0	0
27/05/2021	0	0
31/05/2021	1	1
03/06/2021	1	1
07/06/2021	1	1
15/06/2021	83	25
22/06/2021	76	21
01/07/2021	46	12
08/07/2021	51	13
16/07/2021	72	29
23/07/2021	298	128
29/07/2021	15	6
Total	645	237

Annexe 6 : Tableau récapitulatif du nombre de *Bruchus rufimanus* mâles et femelles capturés par l'ensemble des modalités de piégeage par date de relevé des pièges en féverole de printemps.

Dates	Femelles capturées	Mâles capturés
03/06/2021	0	0
10/06/2021	0	0
17/06/2021	3	3
25/06/2021	9	19
06/07/2021	53	54
12/07/2021	39	52
19/07/2021	39	76
26/07/2021	52	42
02/08/2021	38	19
Total	233	265

Annexe 7 : Tableau des espèces d'auxiliaires (Apoidea, Syrphidae et Coccinellidae) capturées, des effectifs et des abondances relatives des espèces par modalité de piégeage en février de l'hiver.

Modalité	Espèce	Effectif	Abondance relative (%)
PBAGDF	<i>Episyrphus balteatus</i>	34	17,3
	<i>Bombus terrestris</i>	26	13,2
	<i>Apis mellifera</i>	25	12,7
	<i>Sphaerophoria scripta</i>	25	12,7
	<i>Coccinella septempunctata</i>	13	6,6
	<i>Melanostoma mellinum</i>	9	4,6
	<i>Bombus pascuorum</i>	6	3,0
	<i>Lasioglossum pauxillum</i>	6	3,0
	<i>Metasyrphus corollae</i>	6	3,0
	<i>Propylea quatuordecimpunctata</i>	5	2,5
	<i>Andrena nigroaenea</i>	4	2,0
	<i>Andrena subopaca</i>	4	2,0
	<i>Lasioglossum minutissimum</i>	4	2,0
	<i>Andrena bicolor</i>	2	1,0
	<i>Andrena cineraria</i>	2	1,0
	<i>Andrena nitida</i>	2	1,0
	<i>Bombus lapidarius</i>	2	1,0
	<i>Eristalis tenax</i>	2	1,0
	<i>Hylaeus communis</i>	2	1,0
	<i>Lasioglossum calceatum</i>	2	1,0
	<i>Seladonia tumulorum</i>	2	1,0
	<i>Andrena dorsata</i>	1	0,5
	<i>Andrena haemorrhoa</i>	1	0,5
	<i>Andrena minutula</i>	1	0,5
	<i>Epistrophe nitidicollis</i>	1	0,5
	<i>Halictus scabiosae</i>	1	0,5
	<i>Harmonia axyridis</i>	1	0,5
	<i>Hylaeus hyalinatus</i>	1	0,5
	<i>Lasioglossum laticeps</i>	1	0,5
	<i>Lasioglossum lativentre</i>	1	0,5
	<i>Lasioglossum leucozonium</i>	1	0,5
	<i>Metasyrphus luniger</i>	1	0,5
	<i>Nomada flavoguttata</i>	1	0,5
	<i>Osmia bicornis</i>	1	0,5
	<i>Stelis signata</i>	1	0,5
PBAGDG	<i>Bombus terrestris</i>	27	22,9
	<i>Apis mellifera</i>	23	19,5
	<i>Coccinella septempunctata</i>	13	11,0
	<i>Episyrphus balteatus</i>	12	10,2
	<i>Melanostoma mellinum</i>	5	4,2
	<i>Sphaerophoria scripta</i>	5	4,2
	<i>Lasioglossum pauxillum</i>	4	3,4
	<i>Metasyrphus corollae</i>	4	3,4
	<i>Andrena cineraria</i>	3	2,5
	<i>Andrena minutula</i>	3	2,5
	<i>Andrena nigroaenea</i>	3	2,5
	<i>Andrena ovatula</i>	3	2,5
	<i>Harmonia axyridis</i>	2	1,7

	<i>Andrena bicolor</i>	1	0,8
	<i>Andrena carantonica</i>	1	0,8
	<i>Andrena haemorrhoa</i>	1	0,8
	<i>Andrena nitida</i>	1	0,8
	<i>Bombus pratorum</i>	1	0,8
	<i>Eristalis tenax</i>	1	0,8
	<i>Hippodamia variegata</i>	1	0,8
	<i>Lasioglossum calceatum</i>	1	0,8
	<i>Lasioglossum lativentre</i>	1	0,8
	<i>Lasioglossum minutulum</i>	1	0,8
	<i>Psyllobora vigintiduopunctata</i>	1	0,8
PBIPSE	<i>Apis mellifera</i>	109	32,6
	<i>Episyrphus balteatus</i>	52	15,6
	<i>Sphaerophoria scripta</i>	41	12,3
	<i>Melanostoma mellinum</i>	22	6,6
	<i>Bombus terrestris</i>	20	6,0
	<i>Coccinella septempunctata</i>	15	4,5
	<i>Bombus hortorum</i>	13	3,9
	<i>Metasyrphus corollae</i>	9	2,7
	<i>Bombus lapidarius</i>	6	1,8
	<i>Andrena nigroaenea</i>	5	1,5
	<i>Bombus pascuorum</i>	5	1,5
	<i>Lasioglossum lativentre</i>	5	1,5
	<i>Andrena cineraria</i>	4	1,2
	<i>Lasioglossum pauxillum</i>	4	1,2
	<i>Andrena fulva</i>	3	0,9
	<i>Andrena bicolor</i>	2	0,6
	<i>Harmonia axyridis</i>	2	0,6
	<i>Lasioglossum laticeps</i>	2	0,6
	<i>Metasyrphus luniger</i>	2	0,6
	<i>Andrena flavipes</i>	1	0,3
	<i>Andrena gravida</i>	1	0,3
	<i>Andrena ovatula</i>	1	0,3
	<i>Andrena wilkella</i>	1	0,3
	<i>Bombus pratorum</i>	1	0,3
	<i>Lasioglossum calceatum</i>	1	0,3
	<i>Lasioglossum leucozonium</i>	1	0,3
	<i>Lasioglossum morio</i>	1	0,3
	<i>Lasioglossum parvulum</i>	1	0,3
	<i>Propylea quatuordecimpunctata</i>	1	0,3
	<i>Psyllobora vigintiduopunctata</i>	1	0,3
	<i>Scaeva pyrastris</i>	1	0,3
	<i>Syrphus vitripennis</i>	1	0,3
PVAGDF	<i>Coccinella septempunctata</i>	22	34,4
	<i>Harmonia axyridis</i>	16	25,0
	<i>Apis mellifera</i>	10	15,6
	<i>Bombus terrestris</i>	5	7,8
	<i>Bombus lapidarius</i>	2	3,1
	<i>Episyrphus balteatus</i>	2	3,1
	<i>Propylea quatuordecimpunctata</i>	2	3,1
	<i>Andrena haemorrhoa</i>	1	1,6
	<i>Andrena minutula</i>	1	1,6

	<i>Lasioglossum lativentre</i>	1	1,6
	<i>Metasyrphus corollae</i>	1	1,6
	<i>Seladonia tumulorum</i>	1	1,6
PVAGDG	<i>Coccinella septempunctata</i>	29	44,6
	<i>Harmonia axyridis</i>	10	15,4
	<i>Apis mellifera</i>	7	10,8
	<i>Propylea quatuordecimpunctata</i>	4	6,2
	<i>Bombus terrestris</i>	3	4,6
	<i>Andrena subopaca</i>	2	3,1
	<i>Bombus lapidarius</i>	2	3,1
	<i>Andrena fulva</i>	1	1,5
	<i>Bombus hortorum</i>	1	1,5
	<i>Episyrphus balteatus</i>	1	1,5
	<i>Megachile ericetorum</i>	1	1,5
	<i>Metasyrphus corollae</i>	1	1,5
	<i>Nomada signata</i>	1	1,5
	<i>Syrphus vitripennis</i>	1	1,5
	<i>Xylota lenta</i>	1	1,5
PVIPSE	<i>Apis mellifera</i>	23	31,1
	<i>Coccinella septempunctata</i>	17	23,0
	<i>Bombus terrestris</i>	7	9,5
	<i>Andrena minutula</i>	3	4,1
	<i>Bombus hortorum</i>	3	4,1
	<i>Harmonia axyridis</i>	3	4,1
	<i>Propylea quatuordecimpunctata</i>	3	4,1
	<i>Bombus lapidarius</i>	2	2,7
	<i>Metasyrphus corollae</i>	2	2,7
	<i>Andrena fulva</i>	1	1,4
	<i>Andrena ovatula</i>	1	1,4
	<i>Bombus hypnorum</i>	1	1,4
	<i>Bombus pascuorum</i>	1	1,4
	<i>Epistrophe diaphana</i>	1	1,4
	<i>Episyrphus balteatus</i>	1	1,4
	<i>Lasioglossum laticeps</i>	1	1,4
	<i>Lasioglossum minutissimum</i>	1	1,4
	<i>Lasioglossum morio</i>	1	1,4
	<i>Metasyrphus luniger</i>	1	1,4
	<i>Sphaerophoria scripta</i>	1	1,4

Annexe 8 : Tableau des espèces d'auxiliaires (Apoidea, Syrphidae et Coccinellidae) capturées, des effectifs et des abondances relatives des espèces par modalité de piégeage en février de printemps.

Modalité	Espèce	Effectif	Abondance relative (%)
PBAGDF	<i>Apis mellifera</i>	22	24,2
	<i>Bombus terrestris</i>	21	23,1
	<i>Coccinella septempunctata</i>	11	12,1
	<i>Episyrphus balteatus</i>	7	7,7
	<i>Harmonia axyridis</i>	5	5,5
	<i>Sphaerophoria scripta</i>	5	5,5
	<i>Metasyrphus corollae</i>	3	3,3
	<i>Andrena subopaca</i>	2	2,2
	<i>Hippodamia variegata</i>	2	2,2
	<i>Melanostoma mellinum</i>	2	2,2
	<i>Syrphus vitripennis</i>	2	2,2
	<i>Adalia bipunctata</i>	1	1,1
	<i>Andrena barbilabris</i>	1	1,1
	<i>Bombus lapidarius</i>	1	1,1
	<i>Bombus pratorum</i>	1	1,1
	<i>Chelostoma campanularum</i>	1	1,1
	<i>Epistrophe euchroma</i>	1	1,1
	<i>Lasioglossum calceatum</i>	1	1,1
	<i>Sphecodes ephippius</i>	1	1,1
	<i>Sphecodes puncticeps</i>	1	1,1
PBAGDG	<i>Bombus terrestris</i>	26	30,6
	<i>Apis mellifera</i>	15	17,6
	<i>Coccinella septempunctata</i>	8	9,4
	<i>Episyrphus balteatus</i>	8	9,4
	<i>Andrena dorsata</i>	3	3,5
	<i>Harmonia axyridis</i>	3	3,5
	<i>Sphaerophoria scripta</i>	3	3,5
	<i>Bombus hortorum</i>	2	2,4
	<i>Melanostoma mellinum</i>	2	2,4
	<i>Metasyrphus luniger</i>	2	2,4
	<i>Scaeva pyrastris</i>	2	2,4
	<i>Andrena minutula</i>	1	1,2
	<i>Andrena ovatula</i>	1	1,2
	<i>Bombus vestalis</i>	1	1,2
	<i>Lasioglossum laticeps</i>	1	1,2
	<i>Lasioglossum punctatissimum</i>	1	1,2
	<i>Metasyrphus corollae</i>	1	1,2
	<i>Nomada flavoguttata</i>	1	1,2
	<i>Osmia bicornis</i>	1	1,2
	<i>Osmia caerulea</i>	1	1,2
	<i>Psyllobora vigintiduopunctata</i>	1	1,2
	<i>Syrphus vitripennis</i>	1	1,2
PBIPSF	<i>Apis mellifera</i>	51	36,2
	<i>Bombus terrestris</i>	41	29,1
	<i>Episyrphus balteatus</i>	10	7,1
	<i>Bombus hortorum</i>	6	4,3
	<i>Coccinella septempunctata</i>	5	3,5
	<i>Harmonia axyridis</i>	5	3,5

	<i>Melanostoma mellinum</i>	5	3,5
	<i>Sphaerophoria scripta</i>	4	2,8
	<i>Lasioglossum laticeps</i>	3	2,1
	<i>Andrena minutula</i>	2	1,4
	<i>Andrena flavipes</i>	1	0,7
	<i>Andrena fulva</i>	1	0,7
	<i>Bombus lapidarius</i>	1	0,7
	<i>Bombus pratorum</i>	1	0,7
	<i>Halictus scabiosae</i>	1	0,7
	<i>Melitta leporina</i>	1	0,7
	<i>Metasyrphus corollae</i>	1	0,7
	<i>Nomada fuscicornis</i>	1	0,7
	<i>Seladonia tumulorum</i>	1	0,7
PVAGDF	<i>Bombus terrestris</i>	32	38,6
	<i>Coccinella septempunctata</i>	24	28,9
	<i>Harmonia axyridis</i>	11	13,3
	<i>Apis mellifera</i>	6	7,2
	<i>Eristalis tenax</i>	2	2,4
	<i>Hippodamia variegata</i>	2	2,4
	<i>Adalia bipunctata</i>	1	1,2
	<i>Andrena minutula</i>	1	1,2
	<i>Bombus lapidarius</i>	1	1,2
	<i>Episyrphus balteatus</i>	1	1,2
	<i>Megachile ericetorum</i>	1	1,2
	<i>Propylea quatuordecimpunctata</i>	1	1,2
PVAGDG	<i>Bombus terrestris</i>	34	45,3
	<i>Coccinella septempunctata</i>	21	28,0
	<i>Apis mellifera</i>	8	10,7
	<i>Harmonia axyridis</i>	8	10,7
	<i>Andrena minutula</i>	1	1,3
	<i>Hippodamia variegata</i>	1	1,3
	<i>Metasyrphus corollae</i>	1	1,3
	<i>Propylea quatuordecimpunctata</i>	1	1,3
PVIPSF	<i>Bombus terrestris</i>	33	35,1
	<i>Apis mellifera</i>	21	22,3
	<i>Coccinella septempunctata</i>	13	13,8
	<i>Bombus hortorum</i>	8	8,5
	<i>Harmonia axyridis</i>	5	5,3
	<i>Bombus lapidarius</i>	3	3,2
	<i>Bombus pascuorum</i>	3	3,2
	<i>Metasyrphus corollae</i>	2	2,1
	<i>Bombus pratorum</i>	1	1,1
	<i>Episyrphus balteatus</i>	1	1,1
	<i>Hippodamia variegata</i>	1	1,1
	<i>Lasioglossum laticeps</i>	1	1,1
	<i>Metasyrphus luniger</i>	1	1,1
	<i>Osmia bicornis</i>	1	1,1

Annexe 9 : Tableau récapitulatif de la richesse spécifique, de l'estimateur de Chao1, de l'abondance et de l'indice de diversité de Simpson par répétition des modalités de piégeage en féverole d'hiver.

Modalité	Répétition	Richesse spécifique	Chao1	Abondance	Simpson
PBAGDF	1	20	35,6	33	0,927
PBAGDF	2	18	27,0	56	0,889
PBAGDF	3	16	20,2	48	0,879
PBAGDF	4	16	34,0	60	0,871
PBAGDG	1	13	49,0	26	0,870
PBAGDG	2	10	11,5	23	0,854
PBAGDG	3	13	27,0	35	0,844
PBAGDG	4	11	11,7	34	0,839
PBIPSF	1	16	18,5	43	0,876
PBIPSF	2	18	23,6	102	0,762
PBIPSF	3	16	19,0	88	0,840
PBIPSF	4	16	16,5	101	0,851
PVAGDF	1	7	7,2	25	0,682
PVAGDF	2	6	7,5	11	0,793
PVAGDF	3	5	6,5	17	0,478
PVAGDF	4	7	22,0	11	0,744
PVAGDG	1	11	21,5	22	0,855
PVAGDG	2	5	8,0	11	0,694
PVAGDG	3	5	5,3	12	0,681
PVAGDG	4	6	16,0	20	0,425
PVIPSF	1	14	23,0	24	0,885
PVIPSF	2	9	16,0	11	0,876
PVIPSF	3	6	9,0	20	0,710
PVIPSF	4	5	8,0	19	0,632

Annexe 10 : Tableau récapitulatif de la richesse spécifique, de l'estimateur de Chao1, de l'abondance et de l'indice de diversité de Simpson par répétition des modalités de piégeage en février de printemps.

Modalité	Répétition	Richesse spécifique	Chao1	Abondance	Simpson
PBAGDF	1	7	10,3	9	0,840
PBAGDF	2	8	11,0	29	0,787
PBAGDF	3	7	10,0	15	0,782
PBAGDF	4	13	14,0	38	0,863
PBAGDG	1	14	25,2	20	0,905
PBAGDG	2	4	5,0	17	0,588
PBAGDG	3	10	31,0	29	0,751
PBAGDG	4	10	13,3	19	0,870
PBIPSF	1	8	8,2	36	0,731
PBIPSF	2	5	5,0	23	0,616
PBIPSF	3	10	11,0	45	0,754
PBIPSF	4	12	17,0	37	0,812
PVAGDF	1	5	11,0	13	0,497
PVAGDF	2	5	5,3	16	0,570
PVAGDF	3	9	12,0	28	0,809
PVAGDF	4	5	6,0	26	0,604
PVAGDG	1	6	7,5	23	0,647
PVAGDG	2	4	5,0	12	0,625
PVAGDG	3	5	8,0	19	0,615
PVAGDG	4	5	5,0	21	0,766
PVIPSF	1	6	12,0	18	0,685
PVIPSF	2	7	13,0	20	0,745
PVIPSF	3	6	6,0	33	0,749
PVIPSF	4	9	10,0	23	0,854