

**ÉVALUATION DU CONTROLE BIOLOGIQUE DES LIMACES EN GRANDES CULTURES – APPORT
D'ANALYSES DE REGIMES ALIMENTAIRES DES CARABES PAR BIOLOGIE MOLECULAIRE**

TOSSER V.¹, SACCO—MARTRET DE PREVILLE A.², BARRIER A.³, CHABERT A.⁴, CHAPELIN-VISCARDI J.D.⁵,
LELIEUR V.¹, PERRINEL N.⁶, PLANTEGENEST M.⁷, WARTELE R.⁸, CANARD E.²

1 Arvalis Institut du Végétal, Station expérimentale La Jaillière, 44 370 Loireauxence

2 INRAE – AgroCampus Ouest, Domaine de la Motte, BP 35327, 35653 Le Rheu Cedex

3 Chambre Régionale d'Agriculture des Pays de la Loire, 21 bd Réaumur, 85013 La Roche sur Yon Cedex

4 ACTA, AGRAPOLE, 23 rue Jean Baldassini, 69364 Lyon Cedex 07

5 Laboratoire d'Eco-Entomologie, 5 rue Antoine Mariotte, 45000 Orléans

6 Chambre d'Agriculture du Loiret, GDA du Gâtinais de l'Est, 45220 Chuelles

7 INRAE – AgroCampus Ouest, 65 rue de Saint Briec, CS 84215, 35042 Rennes Cedex

8 Chambre Régionale d'Agriculture des Hauts de France, 19 bis rue Alexandre Dumas, 80096 Amiens Cedex 3

RÉSUMÉ

Le projet ARENA (2017-2020) vise à proposer des méthodes d'observation de la régulation en grandes cultures des limaces par leurs prédateurs et des outils de prévision de ce potentiel de régulation. Afin de tester et préciser la régulation des populations de limaces par leurs principaux prédateurs connus, les coléoptères carabiques, des suivis d'abondances et de diversités ont été réalisés en parcelles agricoles pendant 3 ans (pots Barber et pièges à limaces). Lors d'une campagne culturale, des carabidés ont également été récoltés vivants sur 10 parcelles du réseau, afin d'analyser leur régime alimentaire par biologie moléculaire. La communication proposée s'attachera à lier les observations de dynamiques de populations avec celles du régime alimentaire des carabes afin de vérifier la cohérence entre les deux types d'observations et de déterminer l'intérêt de généraliser les analyses de régime alimentaire des carabes en parcelles agricoles.

Mots clés : régulation naturelle, carabes, limaces, auxiliaires, grandes cultures.

ABSTRACT

ARENA project (2017-2020) aims to propose methods to observe natural slug control by their natural enemies in arable crops, and tools to predict this potential control. To acquire references about population dynamics of slugs and its main natural enemies, carabids, field abundances and diversities were monitored during 3 years using pitfall traps and slugs traps. Moreover, carabids were collected on 10 fields during a cultural season. Their diet was analyzed with biomolecular tools. This communication will link the population dynamics observed in fields with carabid diet to check the consistency between these two types of observations and to assess the interest of analyzing carabid diet in agricultural fields.

Keywords: natural pest control, carabids, slugs, natural enemies, field crops.

Introduction

Les limaces sont parmi les ravageurs les plus problématiques en grandes cultures, causant d'importants dégâts. Une enquête réalisée dans le projet RESOLIM sur la campagne culturale 2013/2014 (Chabert *et al.*, 2018) indique que 20% des exploitations ont dû ressemer du colza, 10% des céréales à paille, 4% du maïs. Si le colza reste la culture la plus touchée par ces dégâts (lors d'une année à forte pression, jusqu'à 80% des parcelles peuvent présenter des dégâts), les autres grandes cultures sont également sensibles aux attaques (en forte pression, jusqu'à 30% des parcelles peuvent être touchées). En 2017, 712 t de substances actives molluscicides ont été vendues, dont 645 t de méthaldéhyde et 67 t de phosphate ferrique (Agreste Chiffres et Données, 2019). En cohérence avec des attentes sociétales tournées vers une diminution des impacts des pratiques agricoles sur

l'environnement, les agriculteurs se sont orientés depuis plusieurs années vers la protection intégrée des cultures ou encore l'agro-écologie. Ces démarches visent à favoriser les services écosystémiques rendus par la biodiversité et notamment le contrôle biologique des bioagresseurs par les auxiliaires (Malézieux et Ozier-Lafontaine, 2013).

Les carabidés et les staphylins sont deux familles d'insectes connues pour prédater des limaces et présenter un potentiel intéressant pour le contrôle biologique de ce ravageur (Mair et Port, 2001 ; Symondson *et al.*, 2002 ; Oberholzer *et al.*, 2003 ; Hatteland *et al.*, 2010 ; Rouabah *et al.*, 2014). Si assez peu de références ont été acquises sur les seconds, les premiers sont largement étudiés. Les carabidés sont des Coléoptères très présents en milieu agricole (leur émergence peut atteindre 133 000 individus environ par semaine et par hectare selon Chapelin-Viscardi *et al.* (2014)). Ils comptent plus de 1 000 espèces en France (Dajoz, 2002). Si les larves qui vivent dans le sol sont très majoritairement carnivores, les adultes ont un régime alimentaire plus varié : environ 70% des espèces sont majoritairement prédatrices, 20% omnivores et 8% phytophages (Larochelle, 1990). Les carabes peuvent consommer divers ravageurs des cultures : chenilles, charançons, taupins, chrysomèles, limaces, pucerons... mais aussi des organismes dits utiles : vers de terre, araignées, collembolles (Kromp, 1999 ; Jelaska et Simondson, 2016). Pour autant, la quantification du contrôle biologique réalisé par les carabidés sur les ravageurs, ainsi que son efficacité réelle pour la protection des cultures, sont peu documentées.

La méthode classiquement utilisée pour estimer les populations de carabidés est le piégeage par pots Barber (Woodcock, 2007 ; Hohbein et Conway, 2018). Ce piège d'interception donne des informations sur l'activité-densité des arthropodes du sol. Concernant les limaces, les pièges INRA/Bayer sont largement utilisés dans les réseaux d'épidémiologie-surveillance. Ils donnent, quant à eux, des informations instantanées sur les populations de limaces ayant choisi de s'y réfugier. Ces deux types de pièges permettent d'obtenir des données sur les dynamiques et composition des populations.

De nouvelles méthodes se développent afin de quantifier le service écosystémique de régulation des bioagresseurs. Il s'agit par exemple du recensement direct en parcelles, via l'établissement d'un ratio proie/prédateur (Holland *et al.*, 2008), de l'introduction de proies sentinelles (Winqvist, 2011), de suivis en conditions contrôlées (Tenhumberg et Poehling, 1995) ou de la caractérisation indirecte du potentiel de prédation par l'étude des traits fonctionnels (Rouabah *et al.*, 2014). Une nouvelle méthode, l'analyse de contenus stomacaux par biologie moléculaire, permet de révéler le régime alimentaire des individus, et ainsi de vérifier directement l'existence de la prédation d'un ravageur par un auxiliaire (Chen *et al.*, 2000 ; Boreau *et al.*, 2012 ; Boreau *et al.*, 2013 ; Choate et Lundgren, 2015).

L'étude présentée ici a pour but d'évaluer le contrôle biologique des limaces par les carabidés en grandes cultures. Pour cela, des suivis de populations ont été réalisés sur un réseau de parcelles agricoles en France, et des analyses de contenus stomacaux de carabes ont également été réalisées sur quelques parcelles du réseau. Notre étude discutera de l'intérêt de cette dernière méthode, en termes de résultats additionnels apportés par rapport à des méthodes d'études plus classiques.

Matériels et méthodes

Suivis des populations de carabes et de limaces

Les limaces et les carabes ont été observés sur un réseau de parcelles agricoles et expérimentales entre 2017 et 2019, au printemps et à l'automne. La carte de répartition des parcelles est donnée en Figure 1. Le nombre de parcelles suivies par saison et par culture est donné dans le Tableau I.

Tableau I - Nombre de parcelles suivies dans le cadre du projet ARENA pour chaque culture et saison
Number of fields studied during ARENA project, for each crop and season

	2017		2018		2019	
	Printemps	Automne	Printemps	Automne	Printemps	Automne
Blé	13	15	15	22	28	2
Orge	6	5	7	5	5	0
Colza	4	4	7	5	3	2
Maïs	11	0	9	0	6	0
Cultures en mélange	0	4	0	0	0	0

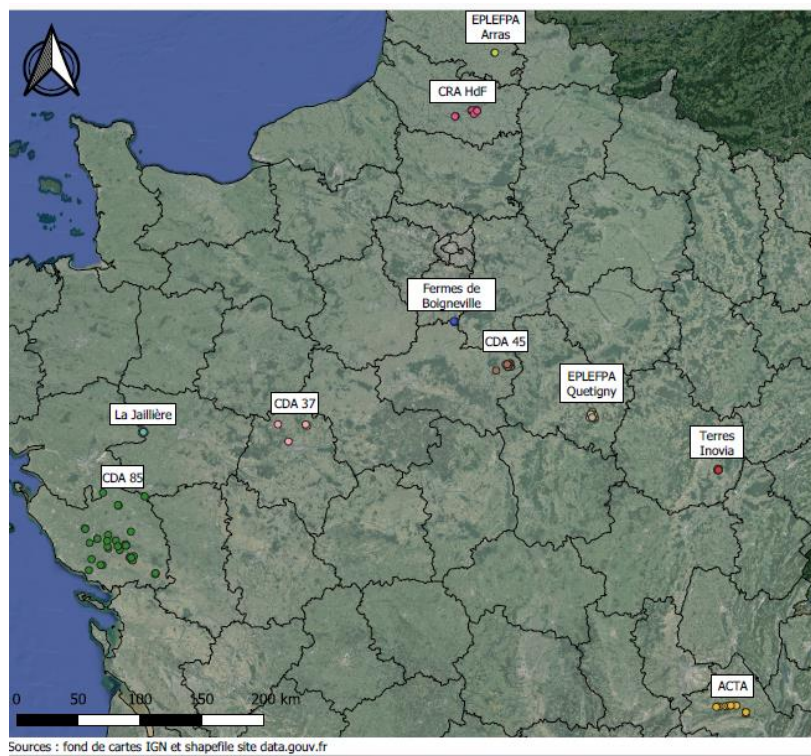


Figure 1 - Cartographie des parcelles suivies dans le cadre du projet ARENA (2017-2020) (CRA : Chambre Régionale d'Agriculture ; CDA : Chambre Départementale d'Agriculture)

Maps of fields studied during ARENA project (2017-2020) (CRA : Regionale Chamber of Agriculture ; DCA : Departemental Chamber of Agriculture)

Les observations de limaces ont été réalisées grâce à des pièges à limaces INRA/Bayer, les observations des carabes grâce à des pots Barber.

Deux modalités de suivis ont été mises en place : intensive et allégée. Elles diffèrent par le nombre de pièges mis en place (4 pots Barber et 4 pièges à limaces en modalité allégée versus 6 de chaque en modalité intensive), par la fréquence de relevé (respectivement une semaine sur deux en modalité allégée versus hebdomadaire en intensive) et par le niveau d'identification des carabes capturés (respectivement identification de 5 espèces et simple comptage par taille pour les autres versus à l'espèce pour tous les individus en modalité intensive). Les pièges ont été disposés selon le schéma de la Figure 2. La Figure 2 indique la mise en place des pièges en modalité intensive. En modalité allégée, le dispositif était identique, excepté que les pièges 5 et 6 n'ont pas été mis en place. Des notations des dégâts dus aux limaces ont également été réalisées deux fois par campagne culturale.

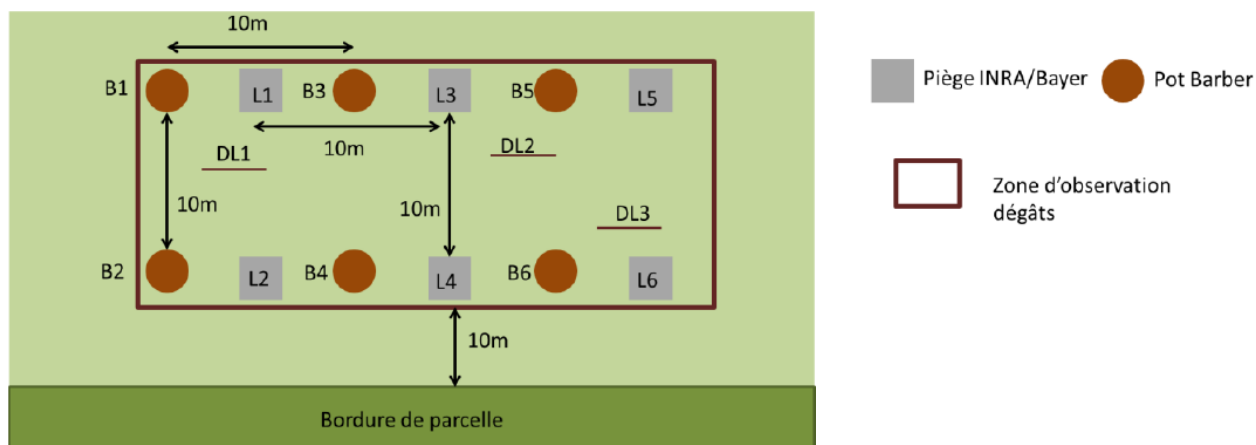


Figure 2 - Disposition des pièges / dispositifs d'observations sur les parcelles
Layout of traps on the fields

Analyse du régime alimentaire des carabes

En plus des suivis de populations « classiques », l'un des objectifs d'ARENA était de mettre en place des méthodes permettant d'évaluer la régulation des ravageurs par les auxiliaires de culture. L'une d'elles est l'analyse de contenus stomacaux de carabes. Cette analyse permet d'acquérir *in situ* des connaissances sur le régime alimentaire des carabes qui peuvent consommer divers ravageurs des cultures (limaces, pucerons...) mais également des vers de terre et autres organismes utiles.

Les collectes de carabes vivants ont eu lieu sur 8 parcelles en agriculture conventionnelle, dont 6 sur lesquelles les observations limaces et carabes décrites plus haut étaient également réalisées (sur au moins une partie de la période pendant laquelle les collectes de carabes ont eu lieu) : à Boigneville (Ile-de-France), La Jaillière (Pays de la Loire), en Vendée (Pays de la Loire) et à proximité de Rennes (Bretagne). De plus, des suivis ont aussi eu lieu à Nancy sur 6 parcelles, présentant un gradient d'utilisation des produits phytosanitaires. Afin de s'affranchir de l'effet de la culture sur les populations d'auxiliaires et de ravageurs, les parcelles pour lesquelles les analyses de contenu stomacal ont été réalisées étaient toutes cultivées en blé tendre d'hiver. Au cours de la campagne culturale, 6 sessions de prélèvement ont été conduites sur chaque parcelle : en novembre (S1) et décembre 2018 (S2), puis avril (S3), mai (S4), juin (S5) et juillet 2019 (S6) (les suivis s'étalant donc sur une campagne culturale complète). Chaque session a duré 3 jours. La Figure 3 indique le calendrier suivi pour récolter des carabes vivants pour l'expérimentation lors des différentes sessions.

		2018												2019																							
		Novembre				Décembre				Janvier				Février				Mars				Avril				Mai				Juin				Juillet			
Région	Parcelle	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4				
Boigneville (PL)	PL3-11-01	S1				S2												S3								S4					S5			S6			
	PL3-09-01	S1				S2												S3								S4					S5			S6			
Jaillière (IF)	IF1-08-01			S1		S2												S3								S4					S5			S6			
	IF1-08-02			S1		S2												S3								S4					S5			S6			
Vendée	PL14-01			S1		S2												S3								S4					S5			Ø			
	PL19-02			S1		S2												S3								S4					S5			Ø			
Rennes	VEZ-L				S1			S2										S3								S4				S5				S6			
	BDS-L				S1			S2										S3								S4				S5				S6			
Nancy	CA			Ø		Ø																															
	G-phyto			Ø		Ø																															
	Eco-phyto			Ø		Ø																															

Figure 3 - Calendrier des sessions de collecte de carabes sur les différents sites
Calendar of collect sessions of carabids on the studied sites

Le protocole expérimental repose sur la collecte de carabes vivants récoltés *via* 20 pots Barber par parcelle. Les pots sont posés « à sec », c'est-à-dire sans liquide de conservation, mais avec des billes d'argile dans le fond (afin de fournir des refuges et limiter les rencontres, pour éviter la prédation à

l'intérieur du pot). Ces pots sont relevés matin et soir pendant 3 jours à chaque session, afin de garantir la fraîcheur du matériel génétique récolté. Ceci permet, de plus, de dissocier les analyses sur la faune diurne et nocturne. Les carabes ont ensuite été identifiés puis congelés rapidement, individuellement dans des tubes eppendorf, en attendant leur analyse.

Sur les 5 843 carabes échantillonnés, 1 900 ont été analysés. Une sélection *au prorata* a été mise en place afin de représenter correctement la communauté, se traduisant par une cinquantaine d'individus par lieu et moment de collecte. Certains groupes de carabes étaient particulièrement abondants, 4 groupes majeurs dont l'abondance totale est supérieure à 300 ont été distingués : *Poecilus*, *Trechus*, *Nebria* et *Anchomenus*, et 5 groupes abondants (>50) : *Amara*, *Harpalus*, *Bembidion*, *Notiophilus* et *Brachinus*. Afin d'éviter que ces groupes ne soient les seuls représentés, un seuil maximum de 30 individus analysés a été fixé pour chaque espèce ou groupe d'espèces par point. Une fois ce seuil fixé, les différents groupes taxonomiques ont été sélectionnés *au prorata*, c'est-à-dire sous les mêmes proportions que celles de leur présence au champ et en prenant en compte le seuil maximum.

Les 2 premières sessions peu abondantes en carabes ont été fusionnées en une unique session d'automne. La dernière session S6 a été ignorée, l'échantillonnage ayant été particulièrement difficile à mettre en place et le nombre d'individus collectés peu abondant.

Les carabes ont ensuite été analysés par PCR Diagnostique en respectant les différentes étapes de la méthode :

- Lyse des cellules de proies présentes dans le système digestif de l'individu (après broyage des individus) pour accéder à l'ADN (dont l'ADN de proies),
- Extraction de l'ADN proprement dite,
- Amplification d'une séquence de l'ADN par PCRs ciblant spécifiquement 5 types de proies (vers de terre, limaces, pucerons, araignées, collemboles). Un multiplex d'amorces spécifiques à ces types de proies a été établi lors d'un essai-développement et a été utilisé,
- Analyse des résultats grâce à la machine eGene et son logiciel. Le programme utilisé est Standard AM320-30s. Les tailles des amplicons sont les suivantes : 85bp pour les vers de terre, 120bp pour les collemboles, 205bp pour les pucerons, 260bp pour les araignées et 360bp pour les limaces. Ces différences de taille d'amplicons se traduisent par des différences de migration lors de l'électrophorèse, permettant la différenciation des différents types de proies consommés.

Analyses de données

Seules les parcelles avec un piégeage simultané des carabes et des limaces, et avec au moins 3 relevés dans une saison, ont été sélectionnées pour les analyses, afin de garantir un nombre suffisant de données.

Plusieurs indicateurs relatifs aux dynamiques de populations de carabes et limaces ont été calculés, pour chaque parcelle et chaque session de relevés : abondances moyennes par semaine et par piège, taux d'accroissement entre deux dates de relevés, abondances cumulées sur plusieurs dates de relevés.

Des tests de Kendall et Spearman ont été réalisés afin de mettre en relation : (i) le taux d'accroissement en limaces avec l'abondance en carabes, (ii) l'abondance cumulée en limaces avec celle en carabes, (iii) l'abondance moyenne en carabes avec l'abondance moyenne en limaces.

Les résultats du diagnostic-PCR ont été traduits en taux de détection des 5 types de proies testées dans les prédateurs. Différents indicateurs sont calculés pour décrire les contenus stomacaux révélés : pourcentage de carabes positifs aux différentes proies par site et par session, identification des groupes de carabes ayant principalement consommé les différentes proies.

Résultats

Relations entre les populations locales de carabes et de limaces

Les analyses sont réalisées sur les données de 34 parcelles. Le jeu de données comprend 12 062 carabes et 1 525 limaces.

L'ensemble des tests de corrélations réalisés entre les variables synthétisant les dynamiques de populations de limaces et de carabes sur notre jeu de données ne montre aucune relation significative entre les populations de ces deux organismes (ceci est probablement dû à la petite taille du jeu de données, et notamment au faible nombre relatif de limaces observées) :

- Corrélation entre taux d'accroissement des populations de limaces et abondance des carabes : p-value = 0.81
- Corrélation entre abondance des carabes et abondance des limaces : p-value = 0.61
- Corrélation entre abondance cumulée des carabes et abondance cumulée des limaces : p-value = 0.2

Contenus stomacaux des carabes

Ce sont 1 819 carabes qui ont été analysés. Seuls les résultats portant sur les consommations de limaces sont présentés dans cet article.

Sur l'ensemble des carabes analysés (tous sites et sessions confondus), 8 % ont consommé des limaces. Cette détection des limaces dans le régime alimentaire des carabes est variable dans le temps et dans l'espace. Ainsi, au cours de la saison, la détection des limaces augmente, pour être maximale en mai, puis décroître au mois de juin (Figure 4). De même, la proportion de carabes ayant consommé des limaces est variable selon les différents sites étudiés (Figure 6) : s'il est très faible sur les parcelles analysées à proximité de Nancy, il est compris entre 9 et 10% sur les autres sites.

Au total, 15 genres de carabes ont consommé des limaces. Le principal genre ayant consommé des limaces est *Poecilus* (11,7% des carabes analysés ont consommé au moins une limace), suivi de *Nebria* (10,1%), *Harpalus* (9,5%), *Amara* (7,4%), *Anchomenus* (6,1%). La Figure 7 présente cette même information, déclinée pour chaque session de collecte de carabes.

Ainsi, si au printemps ce sont principalement les carabes du genre *Poecilus* qui ont consommé des limaces, à l'automne il s'agit des espèces du genre *Nebria*. Les espèces du genre *Amara* sont surtout présentes en avril, et celles du genre *Anchomenus* en mai et juin.

Discussion

Difficultés rencontrées dans la mise en évidence de la régulation des limaces par les carabes

Les analyses réalisées sur les relations entre la dynamique des populations de carabes et de limaces à partir de notre jeu de données n'ont pas mis en évidence de relation entre les abondances et dynamiques de ce ravageur et de ces auxiliaires. Ce n'est pas pour autant que ces relations sont absentes. Ceci peut s'expliquer par plusieurs éléments : l'exploitation des données est rendue compliquée par la diversité des protocoles et situations. Le choix du protocole détermine la fréquence des suivis et la précision des données (nombre de pièges mis en place et détermination de l'organisme à l'espèce en protocole élaboré). Trouver un protocole commun, avec les mêmes durées de suivi, les mêmes fréquences d'échantillonnage et la même précision des données permettrait une meilleure harmonisation des résultats. De plus, plusieurs parcelles ont été suivies sur une période courte (environ 3 semaines). Augmenter le nombre de dates permettrait de mieux décrire la dynamique des populations et aussi d'envisager l'application de modèles proies-prédateur(s). Par

ailleurs, le projet ARENA s'est déroulé pendant des années particulièrement sèches peu favorables
au développement des populations de limaces.

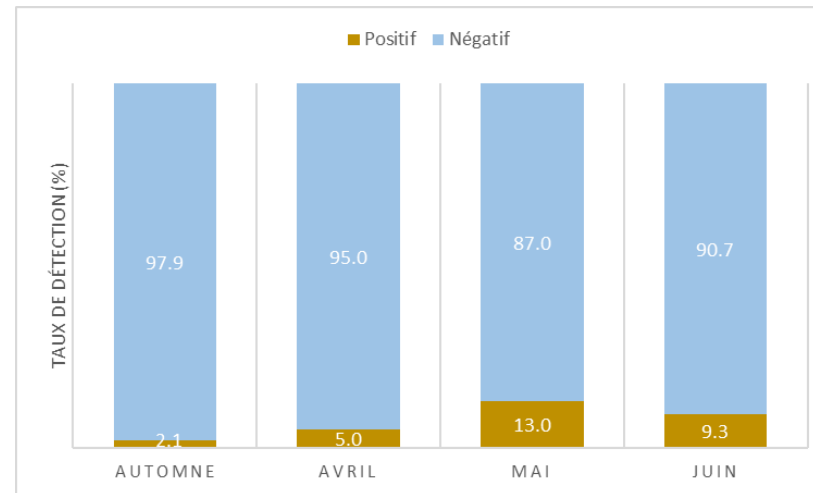


Figure 4 - Taux de détection des limaces chez les carabes analysés au cours du temps (n = 1819)
Detection rate of slugs for analyzed carabid over time

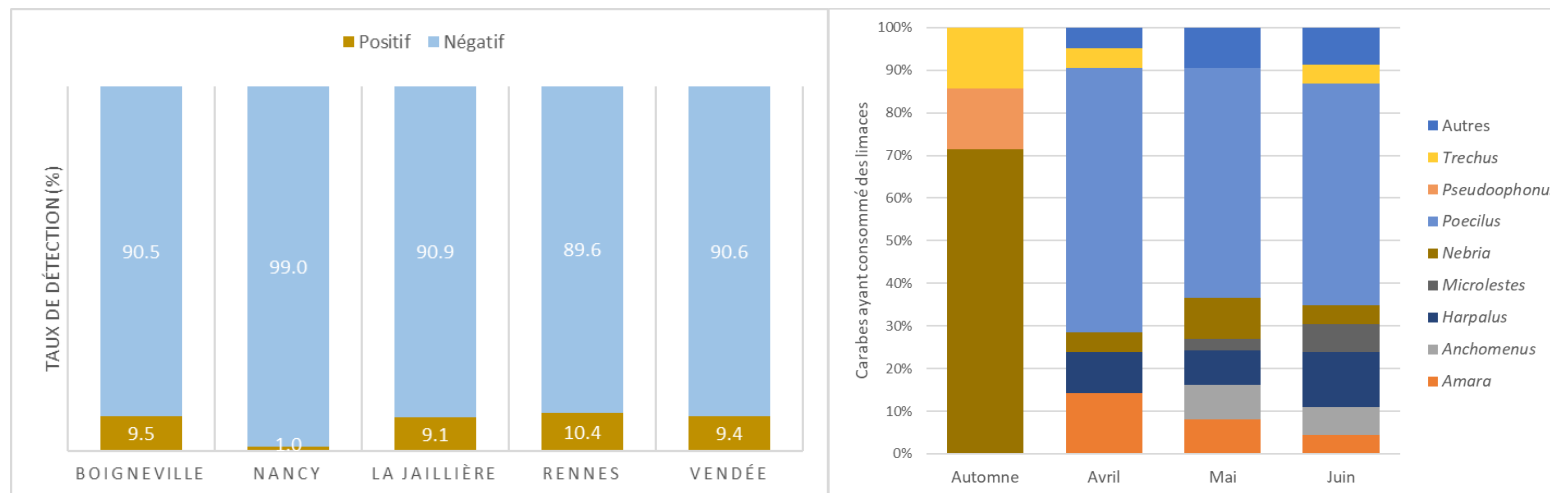


Figure 5 - Taux de détection des limaces chez les carabes analysés par site (n = 1819)
Detection rate of slugs for analyzed carabids for each site of sampling

Figure 6 – Genres de carabes ayant consommé des limaces au cours du temps (en proportion) (n = 148)
Carabid genders that haved consumed slugs over time (percentage)

Dans le cadre d'un suivi de relation proie(s)-prédateur(s), avoir le maximum de données permet d'établir un modèle avec précision. Ici, près de 50% des dispositifs sélectionnés ne comptaient qu'une limace au m² ou moins par date de relevé. Près d'un quart des dispositifs n'ont révélé aucune limace. Étendre les observations à d'autres années et une période de suivi plus/suffisamment longue pourrait apporter des résultats plus probants, à condition que ces années soient plus humides et révèlent plus de limaces. Une autre solution pourrait être de compléter ces études par des situations artificielles où des tests de prédation de limaces seraient menés en laboratoire ou au champ en apportant le ravageur et en observant l'action d'éventuels prédateurs de la parcelle afin de vérifier si celles-ci sont bien consommées. Enfin, le choix des méthodes d'observation est primordial. Les pots Barber permettent un suivi de population sur une période complète, ces pièges étant destructifs. La méthode d'observation des limaces induit plus d'erreurs. En effet, ces pièges forment des abris pour les limaces, et représentent la population lors du relevé du piège. Le nombre de limaces relevées sur un même piège peut varier d'un moment à l'autre si les conditions climatiques ne sont pas favorables au maintien des limaces sous les pièges, notamment en fonction de l'humidité, des pluies, de l'ensoleillement. Il est nécessaire d'identifier une méthode de suivi des limaces pouvant être comparée aux pots Barber. Une possibilité pourrait être d'utiliser des caméras au champ comptant et déterminant les organismes passant dans son champ de vision (MIRAGE, PiScope). Une autre possibilité pourrait être de mutualiser nos données avec celles de travaux antérieurs afin de les retravailler et de compléter les résultats par dire d'experts.

Outre les considérations méthodologiques, il convient de préciser que deux écueils sont souvent relevés quant à la mise en lien des populations de carabes et de limaces : les carabes ne sont pas les seuls régulateurs des limaces ; les carabes sont majoritairement opportunistes généralistes et ne sont donc pas des spécialistes dans la prédation des limaces. Il est donc peut être normal de ne pas observer de relations directes comme déjà observé pour d'autres prédateurs généralistes.

Régulation des limaces par les carabes

Les analyses de contenus stomacaux permettent, quant à elles, d'affirmer l'existence d'une prédation des limaces par les carabes (8,1 % des carabes analysés ont consommé au moins une limace). Les ordres de grandeur des résultats obtenus sont cohérents par rapport à des études précédentes. Dans les parcelles suivies pour cette étude, 80% des carabes ont consommé au moins une des 5 proies recherchées. Pour Kamenova *et al.* (2018), ce chiffre n'était que de 31% (sur 265 carabes récoltés au printemps dans des parcelles de blé et de colza). Il est tout de même indispensable de préciser que les méthodes utilisées dans notre étude et celle de Kamenova *et al.* (2018) sont différentes (PCR Diagnostique contre métabarcoding, cette seconde méthode ne ciblant pas spécifiquement les proies d'intérêt agricole) Dans notre étude, 8% des carabes ont consommé des limaces en moyenne sur toutes les parcelles et saisons suivies. Ce chiffre est de 9,3% en juin. Les travaux de Bohan *et al.* (2000) mentionnent une proportion de 11% de carabes ayant consommé des protéines de limaces en juin et juillet (sur 739 carabes échantillonnés au printemps sur une parcelle de blé d'hiver). Enfin, les travaux de Hatteland *et al.* (2013) indiquent une proportion moyenne de carabes ayant consommé des limaces de 8% (sur 173 carabes analysés, capturés au printemps en prairie).

La proportion de carabes ayant consommé des limaces évolue au cours du temps : elle est minimale à l'automne (2,1% de carabes positifs), augmente au cours du printemps (5% en avril) et est maximale en mai (13%) puis redescend en juin (9,3%). Cette évolution n'est pas la même que celle donnée par Hatteland *et al.* (2013) : le maximum de carabes positifs est atteint en avril (12,8%) et redescend en mai (7%) et juin (5%). Elle reste similaire à ces résultats : la période de prédation principale est celle du printemps-été, potentiellement en accord avec une plus grande activité des carabes et disponibilité de proies ?. Une hypothèse complémentaire est que les carabes se nourrissent d'œufs et/ou de juvéniles de limaces car les optimums de prédation mentionnés dans notre étude correspondent à la période de ponte et d'éclosion. Les adultes seraient trop grands et

auraient une quantité de mucus trop importante pour être prédatés par la majorité des carabes. La météo pourrait également avoir influencé nos résultats, la première quinzaine de mai ayant été très pluvieuse, ce qui a pu influencer les densités de limaces.

Nos données ne permettent pas de vérifier si la proportion de carabes ayant consommé des limaces est en cohérence avec la dynamique des populations en parcelles (il aurait été nécessaire d'accentuer les observations de limaces sur les parcelles ayant fait l'objet des collectes de carabes pour analyse de leur contenu stomacal). Cependant, plusieurs études indiquent que la consommation de limaces reflète effectivement la densité des limaces en parcelles (par ex. Hatteland *et al.*, 2013).

Les résultats suggèrent que *Poecilus cupreus* et les carabes du genre *Nebria* sont les deux principaux consommateurs de limaces. La prédation de limaces par ces carabes est par ailleurs documentée dans la littérature (Mair et Port, 2001 ; Oberholzer et Franck, 2003 ; Oberholzer *et al.*, 2003)

Conclusions

L'étude présentée ici a porté sur la quantification du contrôle biologique des limaces par les carabes en grandes cultures. Pour cela, deux types d'expérimentations ont été mises en place : la première, réalisée sur un nombre important de parcelles, a consisté à observer ce ravageur et ses prédateurs par des méthodes d'échantillonnages régulièrement appliquées dans le cadre d'études scientifiques. La seconde a visé à capturer des carabes afin d'analyser leur contenu stomacal. Les premières données n'ont pas permis de mettre en évidence une relation entre les populations de carabes et de limaces (du fait d'années sèches où peu de limaces ont été observées et de difficultés d'harmonisation des données issues de plusieurs protocoles). Des analyses complémentaires sur d'autres jeux de données permettraient d'apporter des compléments d'informations sur les relations entre ce ravageur et ses auxiliaires. L'analyse des contenus stomacaux de carabes a, quant à elle, mis en évidence l'existence d'une prédation sur limaces (8% des carabes analysés comportaient des protéines de limaces dans leur tube digestif). De plus, les résultats suggèrent l'existence de variation du taux de prédation dans la saison (il est minimal à l'automne et maximal au milieu du printemps) entre les différents sites étudiés (le taux de carabes positifs étant particulièrement faible sur les parcelles à proximité de Nancy) et entre les différents genres de carabes. Ainsi, ces approches de metabarcoding apportent une réelle plus-value aux travaux portant sur le contrôle biologique des bioagresseurs. Il serait intéressant, pour de prochaines études, de chercher à vérifier si une proportion de carabes consommant des limaces aux alentours de 10% est suffisante pour réduire les dégâts des populations de limaces sur les cultures (ce qui supposerait de définir précisément une méthodologie expérimentale adaptée). Enfin, ces techniques moléculaires permettent d'étudier largement le régime alimentaire des carabes. Ceux-ci étant connus pour consommer des graines d'adventices, il pourrait être intéressant d'acquérir des connaissances plus détaillées sur leur potentiel de régulation des ravageurs mais également des adventices.

Remerciements

Nos remerciements vont à l'ensemble des personnes ayant participé à la collecte des carabes et limaces sur le réseau de parcelles ARENA, ainsi qu'à l'analyse des données de cette étude.

Bibliographie

- Agreste Chiffres et Données ; 2019. Données de vente des produits phytopharmaceutiques 2016-2017. <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Chd1905/cd2019-5bsva.pdf>
- Boreau de Roince C., Lavigne C., Ricard J.M., Franck P., Bouvier J.C., Garcin A., Symondson W.O.C. ; 2012. Predation by generalist predators on the codling moth vs. a closely related emerging pest the oriental fruit moth: a molecular analysis. *Agricultural and Forest Entomology*, 14, 260–269.

- Boreau de Roince C., Lavigne C., Mandrin J.F., Rollard C., Symondson W.O.C ; 2013. Early-season predation on aphids by winter-active spiders in apple orchards revealed by diagnostic PCR. *Bulletin of entomological research*, 103, 148-154.
- Chabert A., Taupin P., Peigne J., Brun F., Gervois S., Robert C., Crebassa X., Puysservert M., Lajoie C., Boulin P., Thibord J.B., Mottin E., Charrier M. ; 2018. Evaluation et prévision du risque lié aux populations de limaces nuisibles aux grandes cultures : constitution d'un réseau expérimental permettant de comprendre l'impact des pratiques agricoles et des facteurs environnementaux (RESOLIM). *Innovations Agronomiques*, 63, 321-365.
- Chapelin-Viscardi J.D., Maillet-Mezeray J., Tosser V., Wartelle R. ; 2014. Emergences de Carabidés en milieux agricoles : intérêt des habitats, diversité et exigences spécifiques (Coleoptera Carabidae). *Bulletin mensuel de la Société linnéenne de Lyon*, 83 (7-8), 157-170.
- Chen Y., Giles K.L., Payton M.E., Greenstone M.H. ; 2000. Identifying Key Cereal Aphid Predators by Molecular Gut Analysis. *Molecular Ecology*, 9 (11), 1887-1898.
- Choate B.A., Lundgren J.G. ; 2015. Invertebrate communities in spring wheat and the identification of cereal aphid predators through molecular gut content analysis. *Crop Protection*, 77, 110-118.
- Dajoz R., 2002. Les Coléoptères Carabidés et Ténébrionidés : Ecologie et Biologie. Edition Tec & Doc.
- Hatteland B.A., Grutle K., Mong C.E., Skartveit J., Symondson W.O.C., Solhøy T. ; 2010. Predation by beetles (Carabidae, Staphylinidae) on eggs and juveniles of the Iberian slug *Arion lusitanicus* in the laboratory. *Bulletin of Entomological Research*, 100, 559-567.
- Hatteland B.A., Haukeland S., Roth S., Brurberg M.B., Vaughan I.P., Symondson W.O.C. ; 2013. Spatiotemporal Analysis of Predation by Carabid Beetles (Carabidae) on Nematode Infected and Uninfected Slugs in the Field. *PloS One*, 8 (12).
- Hohbein R., Conway C.J. ; 2018. Pitfall Traps : A Review of Methods for Estimating Arthropod Abundance. *Wildlife Society Bulletin*, 1-10.
- Holland J.M., Oaten Southway S., Moreby S. ; 2008. The effectiveness of field margin enhancement for cereal aphid control by different natural enemy guilds. *Biological Control*, 47 (1), 71-76.
- Kamenova S., Bretagnolle V., Plantegenest M., Canard E. ; 2018. DNA Metabarcoding diet analysis reveals dynamic feeding behaviour and biological control potential of carabid farmland communities. Preprint.
- Kromp B. ; 1999. Carabid beetles in sustainable agriculture: a review on pest control efficacy, cultivation impacts and enhancement. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 74, 187-228.
- Jelaska L.S., Symondson W.O.C. ; 2016. Predation on epigeic, endogeic and anecic earthworms by carabids active in spring and autumn. *Periodicum Biologorum*, 118 (3), 281-289.
- Laroche A. ; 1990. The Food of Carabid Beetles (Coleoptera: Carabidae, including Cicindelidae). *Faberies Supplement* 5.
- Mair J. et Port G.R. ; 2001. Predation on the slug *Deroceras reticulatum* by the carabid beetles *Pterostichus madidus* and *Nebria brevicollis* in the presence of alternative prey. *Agricultural and Forest Entomology*, 3 (2), 99-106.
- Malézieux E., Ozier-Lafontaine H. ; 2013. Agro-écologie : quels principes dans les agro-écosystèmes tropicaux ? Quelles recherches en agro-écologie ? Les rencontres de l'INRA, Salon International de l'Agriculture, 25 février 2013, Paris, France. Communication orale.
- Oberholzer F. et Frank T. ; 2003. Predation by the Carabid Beetles *Pterostichus melanarius* and *Poecilus cupreus* on Slugs and Slug Eggs. *Biocontrol Science and Technology*, 13(1), 99-110.
- Oberholzer F., Escher N., Franck T. ; 2003. The potential of carabid beetle (Coleoptera) to reduce slug damage to oilseed rape in the laboratory. *European Journal of Entomology*, 100, 81-85.
- Rouabah A., Lasserre-Joulin F., Amiaud B., Plantureux S. ; 2014. Emergent effects of ground beetle size diversity on the strength of prey suppression. *Ecological Entomology*, 39, 47-57.
- Symondson W.O.C., Glen D.M., Ives A.R., Langdon C.J., Wiltshire C.W. ; 2002. Dynamics of a relationship between a generalist predator and slugs over five years. *Ecology*, 83 (1), 137-147.
- Tenhumberg B., Poehling H.M. ; 1995. Syrphids as natural enemies of cereal aphids in Germany: Aspects of their biology and efficacy in different years and regions. *Faculty Publications in the Biological Sciences*.

- Winqvist C. ; 2011. *Biodiversity and Biological Control Effects of Agricultural Intensity at the Farm and Landscape Scale*. Uppsala: Department of Ecology, Swedish University of Agricultural Sciences, 2011.
- Woodcock B.A. ; 2005. Chapter 3 : insect sampling in ecological studies. Insect sampling in forest ecosystems, p. 37-57. Blackwell Publishing.