

**INTRODUCTION DU PARASITOÏDE EXOTIQUE *MASTRUS RIDENS* POUR LUTTER CONTRE LE
CARPOCAPSE DES POMMES *CYDIA POMONELLA* EN FRANCE : UNE PREMIERE EN EUROPE!**

N. Borowiec¹, A. Auguste¹, B. Alison², M. Berud³, P. Borioli⁴, I. Buch¹, X. Fauvergue¹, S. Hardy⁴, B. Hucbourg⁴, I. Le Goff¹, J. Le Maguet⁵, L. Lamy¹, A. Leguillon¹, A. Lemarquand⁶, T. Malausa¹, S. Maugin⁷, D. Muru¹, M. Siegwart⁷, M. Thaon¹, E. Vercken¹, A. Verhaeghe⁸, S. Warot¹, N. Ris¹

1. INRAE, UMR Institut Sophia Agrobiotech (INRAE-CNRS-Université Côte d'Azur), 400 route des Chappes, BP167, 06903 Sophia Antipolis (contact : nicolas.borowiec@inrae.fr)
2. CTIFL / SudExpé, Mas de Carrière, 34590 Marsillargues
3. Station d'Expérimentation La Pugère, Chemin de la barque de Mallespine, 13370 Mallemort
4. GRCETA Basse Durance, 2 route de Mollegès, 13210 St Rémy de Provence
5. IFPC, Station Cidricole, La Rangée Chesnel, 61500 Sées
6. INRAE, UE HORTI, avenue Norbert Gerbier, 49071 Beaucazoué
7. INRAE, UR PSH, 228 route de l'aérodrome, 84914 Avignon
8. CTIFL / SENURA, 385A route de Saint Marcellin, 38160 Chatte

RÉSUMÉ

Cydia pomonella (Lep., Tortricidae) est un ravageur majeur en verger de pommier en France, et la pression sur la production s'accroît ces dernières années. Dans le cadre d'un programme de lutte biologique classique, les premières introductions d'un parasitoïde spécifique d'origine exotique, *Mastrus ridens* (Hym., Ichneumonidae), ont été réalisées en France en 2019. L'objectif recherché est l'établissement pérenne du parasitoïde, et le contrôle durable d'une partie des populations de carpocapse en vergers de production mais aussi dans les milieux non gérés. Le projet vise également à caractériser l'effet de certains facteurs démo-génétiques sur l'établissement de *M. ridens*. Au total, près de 7 000 *M. ridens* ont été introduits sur un dispositif expérimental composé de 23 vergers situés dans le Nord-Ouest et dans le Sud-Est de la France. Les prochaines campagnes de lâchers ainsi que les échantillonnages post-introductions nous permettront d'évaluer avec précision le taux d'établissement du parasitoïde et sa capacité à contrôler les populations de carpocapse *in natura*.

Mots-clés

Parasitoïde ; Ecologie du paysage ; Lutte biologique ; Diversité génétique ; Arboriculture

ABSTRACT

Cydia pomonella (Lep., Tortricidae) is an important pest of apple orchards in France, and the intensity of damages is increasing since few years. In the frame of a classical biological control program, first releases of the exotic parasitoid *Mastrus ridens* (Hym., Ichneumonidae), have been done in 2019. The first aim of the project is to increase the control of the codling moth by using the establishment of the parasitoid. This project will also investigate the role of some demo-genetic factors in the success/failure of *M. ridens* establishment. Almost 7 000 *M. ridens* were released within an experimental design of 23 orchards located in North-West and South-East France. The next releases as well as post-releases surveys will allow to evaluate the establishment rate of *M. ridens* as well as its ability to reduce codling moth populations in the field.

Keywords

Parasitoid; Landscape ecology; Biological control; Genetic diversity; Fruit production

Introduction

Avec un total d'environ 12 millions de tonnes produites, la pomme est la première culture fruitière en Europe. La France se classe au 3^{ème} rang européen, derrière la Pologne et l'Italie, avec 1,2 à 1,5 millions de tonnes par an (Prognofruit, 2018). La France renferme notamment le plus grand bassin cidricole d'Europe avec plus de 200 000 tonnes de fruits transformés annuellement. Une caractéristique importante de cette culture est son niveau élevé d'intrants qui la place au deuxième rang en termes de quantité de pesticides par hectare, et au premier rang pour le nombre de traitements (Butault *et al*, 2011). En région PACA, première région productrice de pommes en France, plus de 40% des traitements insecticides ciblent le carpocapse des pommes, ce qui fait de ce ravageur un enjeu prioritaire pour la réduction de l'utilisation de produits phytosanitaires. C'est d'autant plus d'actualité que, depuis quelques années, la pression du carpocapse des pommes s'accroît. La troisième génération, incomplète et localisée à certaines régions il y a dix ans, est actuellement complète et on constate l'apparition d'un début de quatrième génération dans les régions les plus chaudes. En arboriculture biologique, et malgré une protection combinant confusion sexuelle et virus de la granulose, la situation devient souvent intenable en l'absence de protection physique (filets Alt'carpo). L'amélioration du contrôle de ce ravageur, en particulier dans les zones moins protégées (agriculture biologique, jardins, pommiers sauvages, etc.) reste donc une préoccupation majeure, et seule une diminution globale des populations de carpocapse à l'échelle du territoire permettra d'améliorer la situation. Une piste prometteuse pour améliorer le contrôle du carpocapse des pommes repose sur le déploiement d'une lutte biologique classique. Cette stratégie repose sur l'introduction délibérée dans l'environnement d'un auxiliaire spécifique et d'origine exotique, en vue de son établissement pérenne et d'un contrôle durable du ravageur (Borowiec et Sforza, 2020). Un exemple récent d'opération aboutie est l'introduction de *Torymus sinensis* pour lutter contre le cynips du châtaignier (Borowiec *et al*, 2018).

C'est au cours de prospections menées au Kazakhstan et en Chine en 1995 qu'un agent potentiel de lutte biologique a été identifié. Il s'agit d'un parasitoïde de la famille des Ichneumonidae, *Mastrus ridens* (Horstmann, 2009), cette espèce ayant été longtemps confondue avec *Mastrus ridibundus* (Gravenhost, 1829) (Horstmann, 2009 ; Kuhlmann and Mills, 1999). *M. ridens* est un ectoparasitoïde idiobionte (i.e. avec une interaction limitée dans le temps avec son hôte vivant) et grégaire (plusieurs parasitoïdes pouvant se développer sur un même hôte). La femelle parasitoïde pond ses œufs sur la cuticule du dernier stade larvaire ou sur les pré-pupes de *C. pomonella* (Charles and Dugdale, 2011 ; Devotto *et al*, 2010). En s'attaquant uniquement aux larves au stade « cocon », *M. ridens* présente *a priori* un potentiel intéressant pour réduire les populations de *Cydia pomonella* et en particulier les individus diapausants qui contribuent aux infestations précoces l'année suivante. A la suite de sa découverte au Kazakhstan, *M. ridens* a été introduit délibérément en Californie (1998), en Argentine (2003), au Chili (2006), en Nouvelle-Zélande (2013) et en Australie (2015) où il s'est systématiquement établi avec succès. Concernant l'efficacité du contrôle, les données sont plus sporadiques. C'est ainsi que Mills (2005) a observé des taux de parasitisme supérieurs à 40% dans l'aire native, et pouvant atteindre 70% sur cocons hivernants en Californie. Il est toutefois difficile d'en inférer la régulation effective (comparaison des populations du ravageur avec et sans *M. ridens*), et encore moins le gain économique et la réduction des IFT (Charles *et al*, 2019 ; Mills, 2007 ; Tortosa *et al*, 2014). En 2015, des collaborations entre INRAE (Institut Sophia Agrobiotech – Centre PACA) et le Plant and Food Research Institute (Nouvelle-Zélande) ont permis d'importer une souche de *M. ridens* en France puis de la maintenir dans le bâtiment de quarantaine Entomopolis, après obtention des autorisations officielles d'importation. Les tests de laboratoire menés ont confirmé la spécificité de *M. ridens* vis-à-vis du ravageur ciblé (Borowiec *et al*, 2016 ; Muru *et al*, 2018) et, en 2017, un Arrêté des Ministères de l'Agriculture et de l'Environnement a été délivré, autorisant les introductions de *M. ridens* dans l'environnement.

Parallèlement à l'objectif agronomique de régulation des populations de carpocapse, cette primo-introduction en France, et même en Europe, de *Mastrus ridens* offre une opportunité unique d'étudier certains facteurs impliqués dans le succès ou l'échec de l'établissement de populations introduites (Fauvergue *et al*, 2012). Cet objectif plus académique doit permettre, sur le long terme, d'améliorer/optimiser les méthodes de lutte biologique. Dans ce cadre, deux problématiques sont plus particulièrement abordées. La première vise à documenter le rôle de la complexité de l'habitat sur l'établissement et/ou la dispersion de l'auxiliaire introduit ainsi que sur le contrôle du ravageur. Il s'agit d'approches désormais courantes en lutte biologique par conservation (Rusch *et al*, 2010, Bianchi *et al*, 2006), mais encore peu développées dans le cadre de la lutte biologique classique. Un enjeu pourtant immédiat pour optimiser les stratégies de déploiement de nouveaux auxiliaires serait d'être capable d'interpréter la structure d'un paysage agricole au niveau fonctionnel, incluant notamment l'évaluation quantitative des barrières à la dispersion, des puits démographiques et de l'influence de la distribution d'un ravageur-hôte. La seconde problématique de recherche concerne les risques liés à l'« érosion génétique » dans les populations d'auxiliaires introduits. Cette question est particulièrement cruciale concernant *M. ridens*, le sexe des individus étant gouverné par un déterminisme particulier, le *sl-CSD* (« Single-locus Complementary Sex Determination »). En cas d'homozygotie au gène du *sl-CSD*, l'individu diploïde qui aurait dû se développer en femelle se développe finalement en mâle non viable ou stérile (Retamal *et al*, 2016), et la proportion de ces mâles diploïdes dans les populations augmente lorsque la diversité allélique à ce locus diminue. Ce gène, également décrit chez l'abeille (Beye *et al*, 2013), est donc responsable d'un phénomène particulier de dépression de consanguinité, comparable à ce qui peut être observé dans les populations en déclin d'espèces menacées (Frankham, 1998). Des modèles théoriques de biologie des populations ont démontré qu'un tel phénomène peut entraîner les populations vers l'extinction (Zayed and Packer, 2005).

C'est dans ce contexte, et après une introduction « pionnière » de *M. ridens* dans la région d'Avignon en 2018 (Muru, non publié), qu'a démarré en 2019, le projet FranceAgriMer « BIOCCYD-Mastrus » dont les deux principaux objectifs sont, d'une part, de tester, au champ et en conditions de production, l'efficacité de *M. ridens* dans le contrôle des populations de carpocapse des pommes et, d'autre part, d'étudier les facteurs démographiques, génétiques et environnementaux affectant le succès d'établissement, la capacité de dispersion et/ou l'efficacité du parasitoïde introduit. Nous présenterons ici les premiers résultats de la campagne de lâchers menée en 2019.

Matériels et Méthodes

Production d'insectes

Elevage de l'hôte Cydia pomonella

M. ridens s'attaque exclusivement au dernier stade larvaire de *C. pomonella* (larves en cocons), qui est également le stade diapausant chez cette espèce. L'élevage de l'hôte consiste donc à produire en quantité des larves diapausantes. Pour cela, 1 000 à 2 000 œufs de carpocapse sont envoyés chaque semaine depuis l'INRAE d'Avignon (UMR PSH) où se trouve un élevage de masse. Ce dernier est issu d'une population provenant initialement de la région d'Avignon et maintenue au laboratoire depuis plus de 20 ans (Guennelon *et al*, 1981). A leur arrivée sur le site INRAE de Sophia Antipolis, les œufs sont placés dans des conditions contrôlées particulières (température : 19°C ; Photopériode jour/nuit : 8h/16h ; Humidité relative : 60%) afin d'induire la diapause des larves. A l'éclosion des œufs, les larves néonates sont placées individuellement dans des tubes en plastique (diamètre : 12mm ; Hauteur : 55mm) contenant 2ml de milieu artificiel et fermés avec un morceau de coton. Au bout d'un mois environ, les larves sortent du milieu pour aller tisser leur cocon. A ce moment, elles sont prélevées et placées dans des plaques PCR (96 puits par plaque ; diamètre d'un puits : 6,8mm ; Volume d'un puits : 250µL) afin qu'elles y tissent leur cocon. Un grillage fin en plastique (maille de 1mm) est ajouté pour

éviter toute fuite de larves. Ces plaques sont ensuite stockées dans les mêmes conditions abiotiques jusqu'à leur utilisation pour les élevages de *M. ridens*.

Elevage de Mastrus ridens

Les élevages de *M. ridens* ont été constitués grâce à l'importation d'individus provenant de trois sources :

- de l'élevage « historique » maintenu au Plant and Food Research Institute (Auckland, Nouvelle-Zélande) et initialement importé depuis la Californie (via l'Argentine) en 2006 [LOA FR-15-PA00001 du 22/05/2015]
- d'un élevage maintenu à l'Université Catholique du Chili (Santiago, Chili) et constitué d'un mélange entre des individus provenant de l'élevage « historique » et d'autres spécimens récoltés dans la zone native (Kazakhstan) en 2015 [LOA FR-16-PA00001 du 11/01/2016 ; LOA FR-16-PA00002 du 1/03/2016]
- d'individus collectés dans la zone native (Kazakhstan) en 2018 [LOA FR-18-PA00005 du 3/09/2018]

Les élevages sont maintenus dans le bâtiment de quarantaine Entomopolis (Thaon *et al*, 2019) en conditions contrôlées (Température : 24°C ; Photopériode jour/nuit : 14h/10h ; Humidité relative : 60%). Les adultes de *M. ridens* sont maintenus dans des cages « insect-proof » (24,5 x 24,5 x 24,5cm) approvisionnées en nourriture (eau + miel) à raison de 50 femelles et 40 mâles par cage. Chaque semaine, 4 nouvelles cages sont constituées (individus âgés de 5 à 10 jours) dans lesquelles on place un lot de 50 cocons de *C. pomonella* diapausants. Ces cocons sont laissés en place pendant une semaine pour permettre aux *M. ridens* femelles de pondre. Ils sont ensuite retirés et placés dans une nouvelle cage. Au bout d'environ 20 jours, les individus émergeant de ces cages sont récupérés, sexés puis utilisés pour les élevages et/ou pour les lâchers de terrain. Des informations complémentaires sur l'élevage sont disponibles dans l'article de Sandanayaka *et al* (2011).

A partir de 2020, et afin de disposer d'une souche d'élevage de faible diversité génétique, des lignées isofemelles ont été constituées et augmentées jusqu'à production du nombre d'individus nécessaire aux lâchers, soit 200 femelles et 100 mâles par site et pour chaque lignée. Pour chacune de ces lignées, nous effectuerons une estimation indirecte de la diversité génétique au locus du CSD et nous la comparerons avec celle de l'élevage « de routine » qui présente *a priori* une diversité génétique plus importante (Retamal *et al*, 2016).

Dispositif expérimental

La sélection de sites de lâcher s'opère selon plusieurs critères. Le premier concerne le niveau des populations de carpocapse, qui doit être suffisamment élevé pour *a priori* limiter la dispersion de *M. ridens* et ainsi favoriser sa recapture. Le second critère de sélection concerne l'itinéraire cultural, les parcelles devant être conduite en Agriculture Biologique, et les traitements potentiellement préjudiciables à l'établissement du parasitoïde (Spinosad par exemple) devant être limités voire proscrits. Le troisième critère important est la distance minimale entre les sites (au moins 7 kilomètres), de façon à assurer, au moins pendant un temps, une indépendance entre les sites. En complément, des sites témoins seront sélectionnés à proximité (1 à 2 km) de certains sites de lâcher afin de vérifier les capacités de dispersion de *M. ridens*. La culture ciblée prioritairement est la pomme mais, compte-tenu des problèmes que ce ravageur peut poser sur la culture de la noix, quelques sites composés de noyers seront également sélectionnés au cours du projet.

Chaque site sélectionné fait l'objet d'une cartographie dans un rayon de 1km. Pour cela, nous utilisons des photos aériennes additionnées du registre parcellaire graphique 2018 (IGN, 2019) complétées par des visites pour identifier les principales catégories d'environnement : forêt, prairie, friche, zone urbaine, cultures susceptibles d'héberger du carpocapse (pommier, poirier, cognassier, noyer), autres cultures (vigne, grandes cultures, autres vergers...).

Lâchers

En tenant compte des contraintes de production et de logistique, nous avons décidé d'effectuer des lâchers de 200 femelles et 100 mâles de *M. ridens* sur chaque site. Pour synchroniser au mieux les émergences de parasitoïdes, nous avons eu parfois recours au stockage au froid des *M. ridens*. Cela consiste à placer à 4°C des larves de *M. ridens* âgées d'environ 7 jours et de les laisser jusqu'à 4 semaines dans ces conditions. Lors du retour à la température d'élevage (24°C), les larves reprennent leur développement en même temps, sans que cela n'ait d'incidence sur la fitness des individus (Sandanayaka *et al*, 2015), ce qui nous permet d'obtenir des émergences groupées dans le temps. Deux ou trois jours avant les lâchers, les adultes de *M. ridens* sont conditionnés pour le transport. Pour cela, 20 femelles et 10 mâles sont placés dans des tubes en plastique (diamètre : 50mm ; Hauteur : 100mm) contenant un coton imbibé d'eau et quelques gouttes de miel et fermés d'un bouchon en mousse. Ces tubes sont ensuite placés « en attente », à une température constante de 15°C pour limiter le métabolisme des insectes. Le jour des lâchers, les individus sont transportés dans une glacière isotherme et relâchés sur le terrain entre 10h et 15h.

Afin que la ressource en hôte ne soit pas limitante pour *M. ridens*, les lâchers sont réalisés à une période de l'année où une grande proportion de larves de *C. pomonella* entre en diapause (2^{ème} génération dans le Nord de la France, 3^{ème} génération dans les régions plus méridionales), c'est-à-dire entre fin août et mi-octobre.

Echantillonnages pré- et post-introductions

Préalablement à tout lâcher de *M. ridens*, chaque site (lâcher et témoin) fait l'objet d'une évaluation pré-lâcher des communautés de parasitoïdes associés à *C. pomonella*. Pour cela, des bandes pièges cartonnées (10 cm de hauteur) sont placées en début d'été (1^{ère} quinzaine de Juillet) à raison de 20 à 30 bandes pièges par parcelle. Ces bandes sont placées à la base des troncs et seront utilisées par les larves de carpocapse lorsqu'elles tisseront leur cocon. Ces bandes sont retirées au moment des lâchers puis ramenées à Sophia Antipolis où elles sont dépouillées. Toutes les larves de *C. pomonella* voire d'autres Tortricidae suspectées d'être parasitées sont placées individuellement dans des boîtes « insect-proof » et tous les adultes de parasitoïdes émergents sont placés en alcool 96° pour analyses morphologique et moléculaire ultérieures.

Les recaptures de *M. ridens* sont basées sur 2 méthodes. La première est l'utilisation de bandes pièges cartonnées placées à la base des troncs, selon les mêmes modalités que celles décrites ci-dessus. La seconde méthode est l'utilisation de larves « sentinelles ». Pour cela, des larves de carpocapse de dernier stade sont prélevées dans les élevages et placées dans des rouleaux de carton ondulé (diamètre : 4 cm ; épaisseur 1cm ; 10 larves par rouleau) pour qu'elles y tissent leur cocon. Elles sont ensuite maintenues en conditions diapausantes jusqu'à utilisation sur le terrain. Pour l'exposition au champ, 50 rouleaux sont utilisés par parcelle, et accrochés dans la frondaison des arbres à une hauteur comprise entre 1,5 et 2m. Au bout de 10 jours d'exposition, les rouleaux sont retirés et placés au laboratoire pour suivre les émergences. Tous les individus (parasitoïdes et papillons) émergents sont placés en alcool 96° pour analyses morphologique et moléculaire ultérieures. Ces recaptures seront effectuées sur chaque site de lâcher et sites témoins, et au plus tôt 1 an après les premiers lâchers réalisés.

Estimation des populations de *C. pomonella*

L'estimation des populations de carpocapse est effectuée, chaque année, selon 2 méthodes. La première consiste à comparer le nombre de larves de carpocapse dénombrées dans les bandes pièges des sites chaque année (cf. plus haut). De plus, une estimation des dégâts sur fruit sera réalisée en début puis en fin d'été. Sur chaque site, cela consistera à se déplacer dans la parcelle et dénombrer le nombre de fruits piqués par le carpocapse parmi 1 000 fruits choisis aléatoirement.

Résultats

Dispositif expérimental

Le dispositif retenu pour la première campagne d'introduction de *M. ridens* en France a été de 23 sites répartis dans différents bassins de production (Figure 1). On retrouve ainsi 19 vergers de pommes de table (Occitanie, PACA et Pays de la Loire), 3 vergers cidricoles (Normandie) et un verger de noyer (Auvergne-Rhône-Alpes). Tous sont conduits en Agriculture Biologique et 1 site est sous filet Alt'carpo monoparcelle. La surface des parcelles varie de 0,2 à 5ha, et la majorité des sites possède une surface de 1 à 3 ha. La plupart des vergers étant présents dans des zones de production, l'environnement parcellaire est très souvent constitué d'autres vergers de fruits (pommiers conduits en conventionnel par exemple) ou d'autres cultures (vigne, grandes culture, maraîchage). La moitié des sites est située à moins de 10km d'un autre site de lâcher, et ¼ des sites à plus de 20 km. Les distances minimale et maximale entre deux sites de lâcher d'un même bassin de production sont respectivement de 7 et de 78 km (Tableau 1).

Lâchers de *M. ridens*

Les lâchers de parasitoïdes ont été réalisés entre le 27/08 et le 02/10/2019 selon la séquence suivante : 27/08 (3 sites), 28/08 (3 sites), 04/09 (3 sites), 12/09 (2 sites), 18/09 (2 sites), 25/09 (1 site), 26/09 (3 sites), 01/10 (1 site), 02/10 (2 sites). Compte-tenu de la logistique à mobiliser, les introductions sur les 6 sites du Nord-Ouest de la France ont été réalisées en premier.

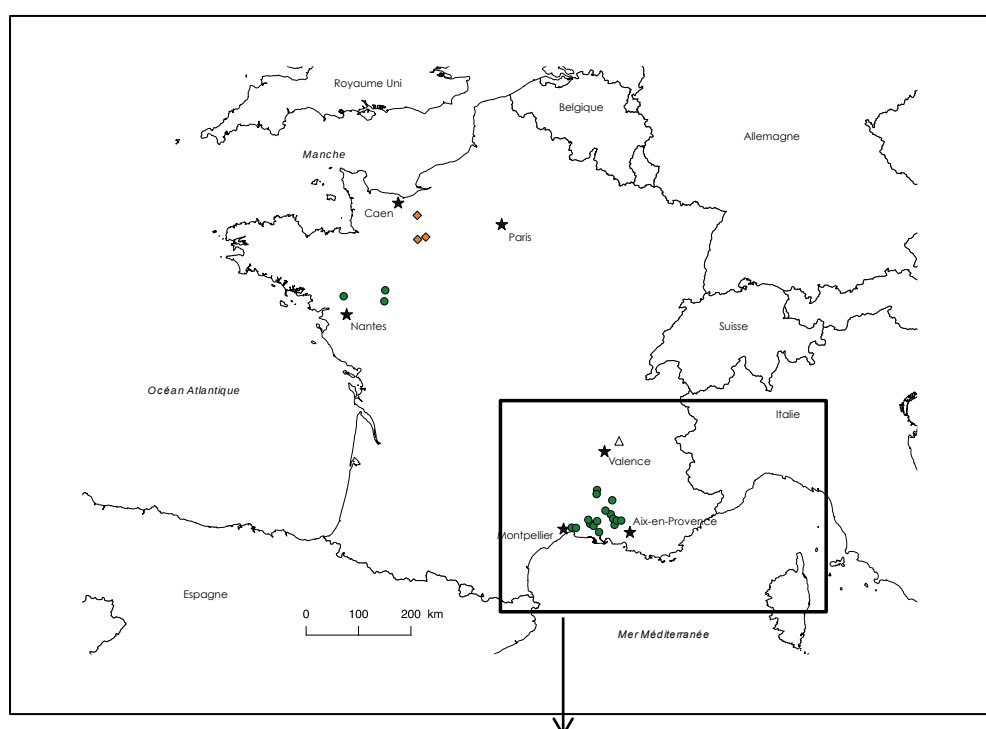
Pour cette première campagne, plus de 15 000 *M. ridens* ont été produits au laboratoire, pour un total de près de 4 600 femelles et 2 300 mâles lâchés sur le terrain. Tous ces individus provenaient de l'élevage « de routine ». Globalement, la logistique s'est bien déroulée puisqu'une très faible mortalité des femelles parasitoïdes pendant le transport a été constatée. En effet, seuls 5 sites ont reçu moins que le nombre prévu de *M. ridens* femelles (Tableau 1).

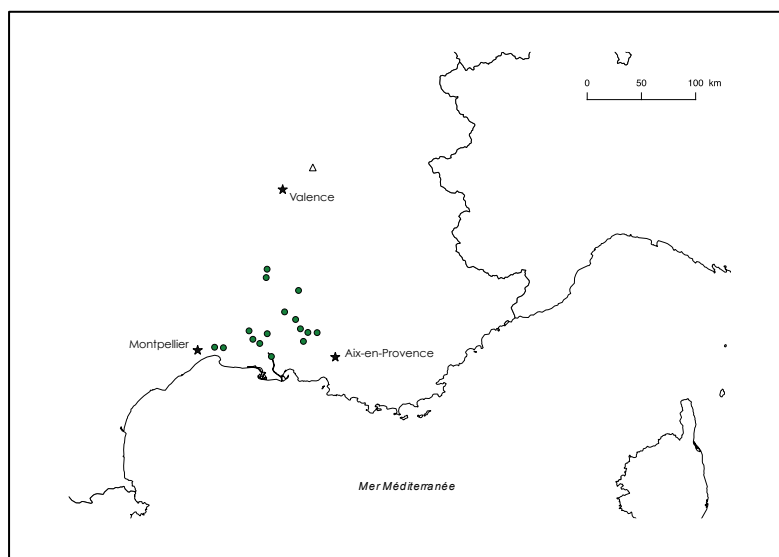
Figure 1. Carte de distribution des sites d'introduction de *Mastrus ridens* en France (campagne 2019).

- : vergers de pommes de table ; Δ : vergers de noyers ; ◇ : vergers cidricoles

Figure 1. Geographical distribution of the *Mastrus ridens* releases done in 2019 in France.

- : apple orchards; Δ : walnuts orchards; ◇ : cider orchards





Echantillonnages pré-lâcher

Plus de 1 000 larves de carpocapse ont été récoltées dans les bandes pièges placées en début d'été et retirées le jour des lâchers de parasitoïdes. Les sites retenus pour la campagne 2019 présentent des niveaux d'infestation de carpocapse variables mais globalement faibles. Le nombre de larves de carpocapse par bande piège est ainsi compris entre 0,1 et 21 avec une moyenne de 2,8 larves par bande (Tableau 1).

Bien que toutes les données ne soient pas encore totalement acquises, une dizaine de parasitoïdes seulement a été récoltée sur les parcelles. Les identifications morphologiques et moléculaires sont en cours.

Echantillonnages post-lâcher

Un test de recapture a été effectué sur un site de lâcher en octobre 2019 (PACA61), en ne retirant que la moitié des bandes pièges (15) le jour des lâchers de *M. ridens*, et en retirant les 15 bandes restantes 10 jours après les lâchers. Deux *M. ridens* femelles ont émergé de ces 15 bandes pièges.

Tableau 1. Caractéristiques des sites d'introduction de *M. ridens* (campagne 2019). Mr : *Mastrus ridens* ; BP : bandes pièges ; Cp : *Cydia pomonella*.

Tableau 1. Information about *M. ridens* release sites used in 2019. Mr: *Mastrus ridens*; BP: corrugated cardboard; Cp: *Cydia pomonella*

Ref	Type	Surface (ha)	Département	Site le plus proche (distance en km)	Date lâchers	Nombre Mr femelles introduites	Echantillonnage pré-lâcher				Recapture Mr
							Date BP	Nombre BP	Nombre Cp	Nombre Cp / BP	
LR1	Vergers pomme	0,24	34	LR4 (8 km)	10/09/19	200	17/07/19	17	353	20,8	-
LR3	Vergers pomme	1,8	30	PACA62 (8 km)	02/10/19	200	juil-19	16	46	2,9	-
LR4	Vergers pomme	2,25	34	LR1 (8 km)	10/09/19	200	22/07/19	15	1	0,1	-
NOR1	Vergers cidricole	0,6	61	NOR3 (16 km)	27/08/19	199	juil-19	30	38	1,3	-
NOR3	Vergers cidricole	5,4	61	NOR1 (16 km)	27/08/19	196	juil-19	23	50	2,2	-
NOR5	Vergers cidricole	2,4	14	NOR3 (44 km)	27/08/19	189	juil-19	19	24	1,3	-
PACA1	Vergers pomme	2,5	13	PACA4 (16 km)	26/09/19	200	20/08/19	12	4	0,3	-
PACA12bis	Vergers pomme	0,26	13	PACA4 (12 km)	26/09/19	198	01/08/19	31	186	6,0	-
PACA2	Vergers pomme	1,1	13	PACA4 (7 km)	04/09/19	200	30/07/19	18	4	0,2	-
PACA34	Vergers pomme	1,89	13	PACA35 (8 km)	02/10/19	200	30/07/19	6	44	7,3	-
PACA35	Vergers pomme	0,24	13	PACA34 (8 km)	18/09/19	200	31/07/19	29	15	0,5	-
PACA4	Vergers pomme	1,2	13	PACA2 (7 km)	04/09/19	200	30/07/19	20	19	1,0	-
PACA42	Vergers pomme	0,24	13	PACA34 (9 km)	04/09/19	200	02/08/19	20	19	1,0	-
PACA43	Vergers pomme	1,6	13	PACA34 (9 km)	02/10/19	200	31/07/19	31	98	3,2	-
PACA51	Vergers pomme	0,3	84	PACA61 (24 km)	12/09/19	200	06/08/19	15	2	0,1	-
PACA61	Vergers pomme	0,2	84	PACA65 (13 km)	01/10/19	200	10/07/19	30	-	-	oui
PACA62	Vergers pomme	3,1	84	LR3 (8 km)	12/09/19	200	14/08/19	11	39	3,5	-
PACA65	Vergers pomme	1,7	84	PACA35 (9km)	18/09/19	200	30/07/19	31	132	4,3	-
PACA9	Vergers pomme	1,2	30	PACA2 (8 km)	26/09/19	200	07/08/19	74	4	0,1	-
PDL5	Vergers pomme	0,5	44	PDL8 (78 km)	28/08/19	200	-	-	-	-	-
PDL8	Vergers pomme	0,25	49	PDL9 (21 km)	28/08/19	200	juil-19	26	12	0,5	-
PDL9	Vergers pomme	1,3	49	PDL8 (21 km)	28/08/19	199	juil-19	20	11	0,6	-
RA1	Vergers noyer	1,8	38	PACA62 (103 km)	25/09/19	200	-	-	-	-	-

Discussion

Près de 7 000 *Mastrus ridens* (mâles et femelles) ont été introduits en France entre le 27 Août et le 2 Octobre 2019. Une faible mortalité a été constatée pendant le transport, et la quasi-totalité des sites a reçu le nombre prévu de parasitoïdes (200 femelles et 100 mâles). Ces lâchers ont été possibles grâce à la production de plus de 15 000 individus au laboratoire. Les données disponibles dans la littérature ont été précieuses pour optimiser les élevages (Bezemer et Mills, 2001 ; Bezemer *et al*, 2005 ; Devotto *et al*, 2010 ; Hougardy *et al*, 2005 ; Sandanayaka *et al*, 2011). L'utilisation du stockage au froid s'est avéré particulièrement utile pour obtenir des émergences groupées et nombreuses (Sandanayaka *et al*, 2015). Les lâchers sur les 6 sites du Nord-Ouest ayant été réalisés dans la même semaine, cela a nécessité une production synchronisée puis le transport sur le terrain de plus de 2 000 *M. ridens*.

Le dispositif retenu pour cette première année est conforme aux attentes du projet. Les 23 sites retenus sont tous conduits en agriculture biologique et tous les sites sont constitués de vergers de pommiers, excepté un verger de noyer. Situés dans différents bassins de production du Nord-Ouest et du Sud-Est de la France, ces sites couvrent des contextes pédoclimatiques différents et contrastés, ce qui nous permettra d'étudier l'effet de certains facteurs abiotiques sur l'établissement et l'efficacité de *M. ridens*. En effet, et bien que ce parasitoïde se soit établi avec succès dans tous les pays où il a été introduit, peu de données ont été acquises sur le terrain (Charles *et al*, 2019 ; Mills, 2007 ; Tortosa *et al*, 2014). Les premiers résultats des suivis montrent une faible diversité de parasitoïdes indigènes sur l'ensemble du dispositif, ce qui concorde avec les données disponibles (Maalouly *et al*, 2015). La poursuite de ces suivis sera importante, notamment pour caractériser les éventuelles interactions entre le parasitoïde introduit et les communautés indigènes (Muru *et al*, 2020). En 2019, *M. ridens* a été retrouvé sur le seul site où des recaptures ont été mises en place. Toutefois, ces recaptures ne préfigurent pas de la bonne acclimatation du parasitoïde puisqu'elles ont été mises en place seulement pendant 10 jours après les premiers lâchers. Les prochaines campagnes nous informeront sur la capacité de *M. ridens* à survivre à l'hiver et à accroître ses effectifs. L'utilisation de larves sentinelles nous permettra également de vérifier les périodes d'activité du parasitoïde sur le terrain. En Nouvelle-Zélande, les femelles *M. ridens* ne pondent pas lorsque les températures sont inférieures à 15°C (Charles *et al*, 2019). On peut donc s'attendre à ce que le parasitoïde soit actif une grande partie de l'année en France. Enfin, et compte tenu des capacités de dispersion de *M. ridens* de plusieurs kilomètres par an (Tortosa *et al*, 2014), il nous semble nécessaire d'optimiser les recaptures du parasitoïde. Pour cela, des expérimentations viseront à étudier dans quelle mesure des composés volatils (phéromone sexuelle de *M. ridens* ou phéromone d'aggrégation de *C. pomonella*) pourraient être utilisés pour estimer les populations de ce parasitoïde (Leguillon, non publié).

Conclusion

Cette première campagne d'introduction de *M. ridens* en France s'est déroulée comme prévue, avec plus de 20 sites de lâcher mis en place dans 4 bassins de production. A l'instar de ce qui a été fait lors d'opérations antérieures – tentatives d'introductions de *Psytalia lounsburyi* contre la mouche de l'olive (Malaus *et al*, 2010) ou introductions réussies de *T. sinensis* contre le cynips du châtaignier (Borowiec *et al*, 2018) –, un des challenges de ce projet sera de mettre en place, dans les meilleurs délais, un réseau de sites de lâchers pertinent et cohérent. Pour cela, nous estimons qu'il en faudra probablement plus de 50, c'est-à-dire assurer une vingtaine de lâcher chaque année *a minima* pendant les 3 prochaines années. A partir de 2020, les lâchers de *M. ridens* seront effectués selon deux niveaux de diversité génétique (faible diversité *versus* diversité élevée), ce qui intensifiera la logistique de l'opération. Au delà, l'enjeu sera évidemment de bien évaluer l'efficacité de *M. ridens*, et pour cela d'être en capacité de mettre en place des suivis post-introductions adéquates. Les premières

recaptures de *M. ridens* en PACA sont de bon augure, il est toutefois nécessaire d'intensifier les campagnes de recapture. En 2020, des suivis seront effectués sur 7 sites du dispositif, et la méthode employée sera plus complète (bandes pièges et larves sentinelles). Ces efforts seront intensifiés au fil du temps pour aboutir à un suivi sur la totalité des sites du dispositif. Enfin, et sans préjuger du succès de cette opération, il semble pertinent de commencer à réfléchir à l'intégration de cette méthode de lutte dans les itinéraires de production. La toxicité de certains produits phytosanitaires à l'égard de *M. ridens* sera donc évaluée.

Remerciements

Ce projet bénéficie du soutien financier de FranceAgriMer (projet « BIOCCYD-MASTRUS », 2019-2022). Pour les évaluations au laboratoire de *Mastrus ridens*, les introductions sur le terrain de 2018 et les mobilités internationales au Chili, au Kazakhstan et en Nouvelle-Zélande, l'INRAE a bénéficié du soutien financier de l'ONEMA (projet PSPE2 « BIOCCYD », 2015-2017), du département Santé des Plantes et Environnement de l'INRAE (projet « Mastrus », 2018-2020) et de l'Union Européenne (projet Marie Curie « BIOMODICS », 2013-2017 ; projet ERA-net c-IPM « API-Tree », 2017-2020). Nous adressons nos sincères remerciements à John Charles, Mano Sandanayaka (Plant and Food Research, Nouvelle-Zélande), Tania Zaviedo, Alda Romero (Université Catholique de Santiago, Chili), Aimeken Nygymetova, Peter Egorov (Agroshield, Kazakhstan) pour leur aide précieuse dans l'acquisition des différentes populations de *M. ridens*.

Bibliographie

- Beye M., Hasselmann M., Fondrik M.K., Page R.E., Omholt S.W., 2003 – The gene *csd* is the primary signal for sexual development in the honeybee and encodes an SR-type protein. *Cell*, 114, 419-429.
- Bianchi F., Booij C.J.H., Tscharntke T., 2006 – Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proceedings of the Royal Society B*, 273, 1715-1727.
- Bezemer T.M., Mills N.J., 2001 – Host density response of *Mastrus ridibundus*, a parasitoid of the codling moth, *Cydia pomonella*. *Biological Control*, 22, 169-175.
- Bezemer T.M., Harvey J.A., Mills N.J., 2005 – Influence of adult nutrition on the relationship between body size and reproductive parameters in a parasitoid wasp. *Ecological Entomology*, 30, 571-580.
- Borowiec N., Sforza R., 2020 – Chapitre 3 : Lutte biologique par acclimatation. In : Fauvergue X., Rusch A., Barret M., Bardin M., Jacquín-Joly E., Malausa T., Lannou C. *Biocontrôle : éléments pour une protection agroécologique des cultures*. Quae éditions, pp 49-61.
- Borowiec N., Thaon M., Brancaccio L., Cailleret B., Ris N., Vercken E., 2018 – Early population dynamics in classical biological control: establishment of the exotic parasitoid *Torymus sinensis* and control of its target pest, the chestnut gall wasp *Dryocosmus kuriphilus*, in France. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 166, 367-379.
- Butault J.-P., Delame N., Jacquet F., Zardet G., 2011 – L'utilisation des pesticides en France : état des lieux et perspectives de réduction. *NESE*, 35, 7-26.
- Charles J.G., Dugdale J.S., 2011 – Non-target species selection for host-range testing of *Mastrus ridens*. *New Zealand Entomologist*, 34, 45-51.
- Charles J.G., Sandanayaka W.R.M., Walker J.T.S., Shaw P.W., Chhagan A., Cole L.M., Colhoun K., Davis V.A., Wallis D.R., 2019 – Establishment and seasonal activity in New Zealand of *Mastrus ridens*, a gregarious ectoparasitoid of codling moth *Cydia pomonella*. *BioControl*, 64, 291-301.
- Devotto L., Del Valle C., Ceballos R., Gerding M., 2010 – Biology of *Mastrus ridibundus* (Gravenhorst), a potential biological control agent for area-wide management of *Cydia pomonella* (Linnaeus) (Lepidoptera, Tortricidae). *Journal of Applied Entomology*, 134, 243-250.
- Fauvergue X., Vercken E., Malausa T., Hufbauer R.A., 2012. The biology of small, introduced populations, with special reference to biological control. *Evolutionary Applications*, 5, 424-443.
- Frankham R., 1998 – Inbreeding and extinction: Island populations. *Conservation Biology*, 12, 665-675.

Guennelon G., Audemard H., Fremond J.-C., El Idrissi Ammari M.A., 1981 – Progrès réalisés dans l'élevage permanent du carpocapse (*Laspeyresia pomonella* L.) sur milieu artificiel. Agronomie, 1, 59-64.

Horstmann K., 2009 – Revisionen von Schlupfwespen-Arten XIII (Hymenoptera, Ichneumonidae). Mitteilungen der Münchner Entomologischen Gesellschaft, 99, 37-44.

Hougardy E., Bezemer T.M., Mills N.J., 2005 – Effects of host deprivation and egg expenditure on the reproductive capacity of *Mastrus ridibundus*, an introduced parasitoid for the biological control of codling moth in California. Biological Control, 33, 96-106.

Institut National de l'Information Géographique et Forestière, 2019. www.geoportail.fr

Kuhlmann U., Mills N., 1999 – Exploring the biodiversity of Central Asia to assess specialized parasitoids for biological control of apple pests in Europe and North America. IOBC/wprs Bulletin, 22, 1-6.

Maalouly M., Franck P., Lavigne C., 2005 – Temporal dynamics of parasitoid assemblages parasitizing the codling moth. Biological Control, 82, 31-39.

Malausa J.-C., Auguste-Maros A., Cheyppé-Buchmann S., Groussier-Bout G., Ris N., Thaon M., Warot S., Fauvergue X., 2010 – Introductions of the African parasitoid *Psytalia lounsburyi* in South of France for classical biological control of *Bactrocera oleae*. IOBC/wprs Bulletin, 59, 163-170.

Mills N., 2005 – Selecting effective parasitoids for biological control introductions: codling moth as a case study. Biological Control, 34, 274-282.

Mills N., 2007 – Classical biological control of codling moth: the California experience. Proceedings of the 2nd International Symposium on Biological Control of Arthropods, 12-16 September, Davos Switzerland.

Muru D., Borowiec N., Thaon M., Ris N., Viciruc M.I., Warot S., Vercken E., 2020 – The open bar is closed : restructuration of a native parasitoid community following successful control of an invasive pest. PCI Zoology, doi: 10.1101/2019.12.20.884908.

Muru D., Auguste A., Fauvergue X., Malausa T., Ris N., Thaon M., Vercken E., Borowiec N., 2018 – Un parasitoïde exotique pour lutter contre le carpocapse. Phytoma, 710, 37-41.

Prognofruit, 2018 - European Apple and Pear Crop Forecast. August 2018. Warsaw, Poland.

Retamal R., Zaviedo T., Malausa T., Le Goff I., Toleubayev K., 2016 – Genetic analyses and occurrence of diploid males in field and laboratory populations of *Mastrus ridens* (Hymenoptera, Ichneumonidae), a parasitoid of the codling moth. Biological Control, 101, 69-77.

Rusch A., Valantin-Morison M., Sarthou J.-P., Roger-Estrade J., 2010 – Biological control of insect pests in agroecosystems: effects of crop management, farming systems, and seminatural habitats at the landscape scale: a review. Advances in Agronomy, 109, 219-259.

Sandanayaka W.R.M., Chhagan A., Page-Weir N.E.M., Charles J.G., 2011 – Colony optimisation of *Mastrus ridens* (Hymenoptera, Ichneumonidae), a potential biological control agent of codling moth in New Zealand. NZ Plant Protection, 64, 227-234.

Sandanayaka W.R.M., Davis V.A., Charles J.G., 2015 – Influence of cold storage on survival and fitness of *Mastrus ridens*, an ectoparasitoid of codling moth. NZ Plant Protection, 68, 197-203.

Thaon M., Audant P., Ris N., Borowiec N., 2017 – Entomopolis : de la production de masse d'insectes auxiliaires au maintien de macro-organismes réglementés. Cahiers Techniques de l'INRA, numéro spécial « Innovations entomologiques : du laboratoire au champ ! », 59-68.

Tortosa O.E., Carmona A., Martinez E., Manzano P., Giardina M., 2014 – Liberación y establecimiento de *Mastrus ridens* (Hymenoptera, Ichneumonidae) para el control de *Cydia pomonella* (Lepidoptera, Tortricidae) en Mendoza, Argentina. Revista de la Sociedad Entomologica Argentina, 73, 109-118.

Borowiec N., Muru D., Malausa T., Ris N., 2016 – Dossier de demande d'introduction dans l'environnement de l'hyménoptère parasitoïde *Mastrus ridens*. INRAE, 34 pp.

Zayed A., Packer L., 2005 – Complementary sex determination substantially increases extinction proneness of haplodiploid populations. PNAS, 102, 10742-6.