



HAL
open science

Projet MIRAGE : Mise au point d'un système de vision et d'analyse de l'activité des arthropodes prédateurs en vue de quantifier leur rôle dans la régulation naturelle des insectes ravageurs des cultures

Jean-Michel Ricard, Gilles Sentenac, Anne Guerin, Paul Masquin, Alain Ferre, Alicia Fougere, Véronique Tosser, Jonathan Marks-Perreau, Thierry Corbiere, Gwenael Duclos, et al.

► **To cite this version:**

Jean-Michel Ricard, Gilles Sentenac, Anne Guerin, Paul Masquin, Alain Ferre, et al.. *Projet MIRAGE : Mise au point d'un système de vision et d'analyse de l'activité des arthropodes prédateurs en vue de quantifier leur rôle dans la régulation naturelle des insectes ravageurs des cultures*. *Innovations Agronomiques*, 2024, 94, pp.401-414. 10.17180/ciag-2024-vol94-art27 . hal-04616143

HAL Id: hal-04616143

<https://hal.inrae.fr/hal-04616143>

Submitted on 18 Jun 2024

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



Projet MIRAGE : Mise au point d'un système de vision et d'analyse de l'activité des arthropodes prédateurs en vue de quantifier leur rôle dans la régulation naturelle des insectes ravageurs des cultures.

Jean-Michel RICARD¹, Gilles SENTENAC², Anne GUERIN³, Paul MASQUIN³, Alain FERRE⁴, Alicia FOUGERE⁴, Véronique TOSSER⁵, Jonathan MARKS-PERREAU⁵, Thierry CORBIERE⁶, Gwenael DUCLOS⁷, Pierre ALLAIN⁷, Antoine GARDARIN⁸, Laëtitia GIRERD⁹.

¹ Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes (CTIFL), Centre de Balandran, 30127 Bellegarde, France

² Institut Français de la Vigne (IFV), Pôle Bourgogne-Beaujolais-Jura-Savoie, 6 rue du 16ème Chasseurs, 21200 Beaune, France

³ Institut Français des Productions Cidricoles (IFPC), 123 rue Saint-Lazare, 75008 Paris, France

⁴ ASTREDHOR – Arexhor, agence régionale pour l'expérimentation horticole Pays de la Loire, 1 rue des Magnolias, 49130 Angers, France

⁵ ARVALIS Institut du Végétal, 3 Rue Joseph et Marie Hackin, 75116 Paris, France

⁶ ADVANSEE, 2 rue Alfred Kastler 44307 NANTES Cedex 3, France

⁷ WIPSEA, 1 rue du Bois Flotté, 22770 Lancieux, France

⁸ UMR Agronomie, INRAE, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 91123 Palaiseau, France

⁹ EPLEFPA de Carpentras, Établissements Publics Locaux d'Enseignement et de Formation Professionnelles Agricoles, 310 chemin de l'hermitage, 84200 Carpentras, France

Correspondance : jean-michel.ricard@ctifl.fr

Résumé La régulation naturelle des ravageurs est un levier peu utilisé dans tous les types de cultures notamment en raison de difficultés méthodologiques pour quantifier la prédation et les ennemis naturels impliqués. Le projet Mirage (projet CASDAR Recherche Technologique 2019-2023) vise à lever ce verrou en combinant une caméra macro et une analyse automatique des images. Un prototype de caméra, appelé Beecam MVT-HD®, a été conçu pour produire des vidéos et des photos « macro » d'arthropodes lors d'observations rapprochées jusqu'à quelques cm. Le volume d'enregistrement est considérablement réduit grâce à l'utilisation de la "détection de mouvement dans le champ d'observation" en temps réel qui permet de déceler, de façon très sensible, des mouvements submillimétriques. Pour traiter les images, un réseau neuronal, intégré dans le logiciel Harmony, a été développé pour la classification automatique de 20 groupes d'ennemis naturels. Les performances de ces outils ont été testées sur cartes de proies sentinelles dans plusieurs cultures. Les résultats offrent des perspectives intéressantes pour identifier de nouvelles relations trophiques et mieux les quantifier.

Mots-clés : prédateurs, régulation naturelle des ravageurs, proies sentinelles, camera piège, enregistrement vidéo, classification automatique, réseau de neurones

Abstract: Setting a design for vision and analysis of arthropod activities in order to quantify their role in natural regulations of insects damaging crops

The natural regulation of pests is a lever that is little used in all types of crops, mainly because of the methodological difficulties involved in quantifying predation and the natural enemies involved. The Mirage project (Casdar technological research project 2019-2023) aims to overcome this problem by combining a macro camera with automatic image analysis. A prototype camera, called Beecam MVT-HD®, was designed to take 'macro' videos and photos of arthropods during close-up observations down to a few



centimeters. The recording volume is considerably reduced thanks to the use of real-time "motion detection in the field of observation", which enables sub-millimeter movements to be detected very sensitively. To process the images, a neural network, integrated into the Harmony software, was developed for the automatic classification of 20 groups of natural enemies. The performance of these tools was tested on sentinel prey cards in several crops. The results show interesting ways to identify new trophic relationships and to quantify them more effectively.

Keywords: predators, natural predation of crop pests, sentinel preys, camera trap, video recording, automatic classification, neural network

1. Introduction

La régulation naturelle est un service écosystémique sous-exploité pour réduire l'utilisation des pesticides dans toutes les productions végétales. Le manque d'indicateurs ou d'outils de diagnostic pour estimer le potentiel de régulation naturelle est l'une des raisons qui freinent l'adoption de ce levier. De plus, l'évaluation de la régulation des ravageurs est entravée par des difficultés méthodologiques pour quantifier les événements de prédation associés à la régulation (Jay *et al.*, 2017). Les prédateurs et leur comportement restent en partie méconnus et l'intensité de la consommation des ravageurs est mal caractérisée dans tous les types de cultures (grandes cultures, arboriculture, vigne, etc.). La plupart des organismes impliqués sont des arthropodes de petite taille, à l'activité discrète, aussi bien diurne que nocturne. De plus, une meilleure compréhension des processus de régulation nécessite le déploiement de mesures sur de nombreux réplicas, à différentes échelles.

Des proies sentinelles, exposées sur des « cartes de prédation », sont utilisées pour développer des indicateurs de la prédation (Lövei *et al.*, 2017). Cependant, il demeure une difficulté d'interprétation des informations recueillies, notamment en l'absence de possibilité d'identifier les organismes responsables de la disparition des proies (Jeanneret *et al.*, 2017 ; Gardarin *et al.*, 2017). Cela peut être un frein à leur utilisation, ou bien conduire à mesurer une disparition de proies peu représentative de la prédation des ravageurs. Un outil d'enregistrement de l'activité de fréquentation des cartes permettrait de mieux évaluer le service de régulation en faisant plus facilement le lien entre la disparition des proies et les organismes qui en sont responsables. Cela permettrait des études visant une meilleure compréhension des facteurs importants pour favoriser ce service.

Le projet MIRAGE avait donc pour objectifs de développer une caméra et un logiciel d'analyse d'images pour enregistrer et caractériser l'activité des ennemis naturels afin de mettre en évidence de nouvelles relations trophiques et de quantifier la prédation. Le logiciel est destiné à identifier les taxa (ou familles) d'auxiliaires. Pour cela, la technique du « deep learning » a été utilisée pour développer un réseau de neurones (LeCun *et al.* 2015) pour la classification des auxiliaires des cultures (Chen *et al.* 2017). Les performances de ce système (caméra et logiciel) ont été testées sur différents couples proie/prédateur dans le cadre d'expériences sur la régulation naturelle des invertébrés ravageurs. Les ravageurs ciblés sont les principaux groupes d'insectes (pucerons, tordeuses, cicadelles, cochenilles, etc.), le plus souvent sous forme de proies sentinelles attachées à des supports, et à différents stades (œufs, chrysalides, chenilles, adultes). Le projet prévoyait également d'évaluer son potentiel dans la gestion de la santé des cultures, l'éducation et la caractérisation de la biodiversité fonctionnelle.

2. Développement d'une caméra pour étudier la prédation

2.1 Matériels et méthodes

Un prototype de caméra, appelé Beecam MVT-HD®, a été conçu durant le projet par la société Advansee sur la base d'un modèle préexistant. Ce prototype comporte deux capteurs permettant d'enregistrer des vidéos utilisant la "détection de mouvement dans l'image" en temps réel et des photos "haute définition"



(8MPix). Les deux capteurs sont synchronisés entre eux. Ils sont conçus pour des prises de vue "macro" (champ de vision d'environ 10 x 10 cm). Le logiciel, qui permet de réaliser toutes les fonctions requises, est embarqué dans la caméra et s'organise autour d'un noyau LINUX optimisé. L'alimentation est assurée sur le terrain par une ou plusieurs batteries 12 V au plomb montées en parallèle.

Ce premier prototype a été testé en 2020 et 2021 par les partenaires des Instituts techniques (IFV, IFPC, Astredhor, Arvalis, CTIFL), en réalisant des tests de sensibilité et l'identification des paramètres impliqués dans le déclenchement. Des tests en laboratoire et sur le terrain ont été réalisés sur des insectes de différentes tailles (carabes, fourmis, acariens, ...) et sur des proies sentinelles (chenilles d'Eudemis, pucerons, larves et œufs de carpocapse de la pomme, pupes de drosophiles...) de jour comme de nuit. Ceci a permis de modifier le système de contrôle interne à plusieurs reprises. Ainsi, un deuxième prototype a été disponible en 2022 pour l'expérimentation.

Dans nos expérimentations, la caméra est placée le plus souvent à une distance focale à l'objet comprise entre 5 et 10 cm. La dimension du masque, c'est à dire de la zone d'observation responsable du déclenchement au mouvement, est équivalente à la surface d'une mini cage d'élevage ou d'une carte de prédation de proies sentinelles, surface allant de 2 à 28 cm². Au préalable, la mise au point des deux objectifs doit être effectuée au laboratoire à la distance focale souhaitée. Cela simplifie grandement la mise en place du prototype sur le terrain, mais si besoin, la mise au point du capteur vidéo peut être ajustée grâce à l'interface de programmation de la caméra, ce capteur disposant d'une motorisation.

2.2 Résultats

La caméra définitive, après prototypage caméra, est composé d'un boîtier électronique étanche avec logiciel intégré et d'une tête avec deux capteurs (figure 1). Le capteur vidéo comprend une lentille de mise au point motorisée. Le capteur photo haute définition est doté d'une optique interchangeable à mise au point manuelle. La détection de mouvement se fait sur une zone de masque définie par l'utilisateur dans l'image. Des seuils (nombre de pixels en mouvement, seuil de binarisation) permettent de déclencher l'enregistrement de vidéos et de photographies. Des tests en laboratoire montrent qu'à une distance de 8 cm de la cible, la caméra peut détecter un insecte de 2 mm. Pour obtenir de meilleures performances, il est possible de rapprocher la caméra à environ 5 cm pour détecter un acarien de la famille des *Anystidae* et de réduire la surface du masque à environ 1 cm² tout en augmentant le contraste entre le support et l'objet. Les tests de sensibilité ont montré qu'il est possible d'augmenter les valeurs de sensibilité des pixels ou de sensibilité au mouvement pour modifier le nombre d'enregistrements et de faux déclenchements.





Figure 1 : La caméra est composée d'une tête avec des capteurs, d'un boîtier électronique indépendant et d'une batterie d'alimentation. Installation au sol en verger pour observation de carte de prédation. crédit photo : JM.Ricard, Ctifl

3. Logiciel de classification automatique des auxiliaires

3.1 Matériels et méthodes

L'objectif était de mettre au point un logiciel de classification automatique facilitant le traitement des photographies et des vidéos obtenues avec la caméra par la recherche d'objets ciblés sur les images. Un réseau neuronal a été entraîné, par la société WIPSEA, avec un ensemble de photographies annotées, c'est-à-dire des photographies sur lesquelles un expert a indiqué, à travers l'interface graphique du logiciel, la localisation de l'animal sur la photographie, ainsi que le rang taxinomique principal correspondant à la famille. Un grand nombre de photographies, aussi différentes que possible les unes des autres, est nécessaire pour un processus d'apprentissage réussi. Dans ce travail, nous avons estimé qu'un minimum de 300 objets par classe était nécessaire et que 70 % des objets seraient alloués à l'apprentissage, ce qui signifie que 30 % des objets seraient alloués à la validation des performances du réseau neuronal. Le premier réseau basé sur YOLOv3 (Redmon *et al.* 2018) a été entraîné sur 8 familles d'insectes et d'araignées (2 427 individus). Puis un 2^e réseau basé sur YOLOv4 (Bochkovski *et al.* 2020) a été entraîné pour classifier 18 familles et 2 super familles (7 638 individus). Enfin, un 3^e réseau basé sur YOLOv4 a été entraîné pour classifier 68 groupes d'arthropodes (adultes, larves, œufs, mues) et mollusque (9 225 individus dans le jeu d'entraînement et 2 299 individus dans le jeu de validation, répartition 80 %/20 %).

Pour mesurer les résultats de la classification automatique, deux indicateurs sont couramment utilisés : le rappel et la précision. Dans notre cas, le rappel représente le taux d'animaux trouvés et correctement classés par rapport aux animaux de cette famille présents sur les photographies en utilisant un lot de photographies préalablement annotées et servant de test. La précision correspond au taux d'animaux correctement classés sur le nombre d'animaux proposés par le logiciel. Elle renseigne sur le taux de fausses détections proposées par le logiciel. De bons résultats sont obtenus lorsque le rappel et la précision sont aussi proches que possible de 100%. Chaque détection/classification se voit attribuer un score de confiance qui reflète la probabilité d'appartenance de l'objet à la classe sélectionnée. Un seuil peut être appliqué sur ces scores pour ne retenir que les objets avec un score supérieur à ce seuil. Les valeurs de rappel et de précision sont généralement données pour un seuil fixé à la valeur qui maximise la valeur d'un indicateur dénommé F1 qui correspond au taux $2 \times \text{Rappel} \times \text{Précision} / (\text{Rappel} + \text{Précision})$. La notion de "précision moyenne" (average precision) correspond à l'aire sous la courbe Rappel vs Précision et permet de connaître les performances du réseau de neurones indépendamment du seuil sélectionné.

Actuellement, ce dernier réseau neuronal est intégré dans un petit boîtier équipé d'une carte NVIDIA Jetson, dénommé WIPBOX, pour faciliter le traitement des photos et des vidéos. Néanmoins, de par le manque de généralisation de l'ensemble de validation par rapport à celui d'entraînement, ainsi que par l'objectif du détecteur orienté à ce stade vers une préanalyse avant revue experte, les seuils utilisés par le détecteur de la WIPBOX ont été calibrés avec un score F1.5, privilégiant légèrement le rappel au détriment de la précision.

3.2 Résultats

En ce qui concerne la classification automatique des images, le second réseau basé sur YOLOv4, entraîné avec le logiciel appelé HARMONY, a montré (Tableau 1) :

- 41 catégories (en vert) avec une bonne capacité de détection et de classification (précision moyenne >75%)



- 4 catégories (en orange) avec une capacité de détection et de classification moyenne (précision moyenne comprise entre 50% et 75%).
- 3 catégories (en rouge) avec une capacité de détection et de classification trop faible (précision moyenne inférieure à 50%)

Type de classe (dans un niveau de précision taxonomique croissant)	Precision	Rappel	Precision moyenne
Arthropoda	0.94	0.85	0.89
Arachnida	0.97	0.93	0.95
Acari	0.98	0.97	0.96
Phytoseiidae	0.97	0.92	0.93
Prostigmata	0.96	0.98	0.96
Anystina	0.96	0.98	0.98
Anystidae	0.94	0.94	0.90
Trombidiidae	1.00	1.00	1.00
Araneae	0.95	0.95	0.95
Araneomorphae	0.96	0.95	0.95
Entelegynae	0.96	0.95	0.95
Araneidae	0.96	0.95	0.98
Lycosoidea	0.87	0.95	0.93
Lycosidae	0.95	0.95	0.94
Philodromidae	1.00	0.96	0.98
Salticidae	0.96	0.94	0.93
Zodariidae	0.67	0.43	0.40
Opiliones	0.94	0.97	0.94
Phalangiidae	0.94	0.97	0.96
Hexapoda	0.89	0.83	0.86
Neoptera	0.89	0.84	0.86
Aeolothripidae	1.00	0.86	0.86
Endopterygota	0.91	0.87	0.89
Apocrita	0.84	0.78	0.78
Aculeata	0.79	0.69	0.66
Vespoidea	0.79	0.69	0.65
Formicidae	0.79	0.68	0.66
Chalcidoidea	0.96	0.94	0.95
Ichneumonoidea	0.97	0.90	0.96
Coleoptera	0.97	0.94	0.96
Carabidae	0.97	0.96	0.98
Polyphaga	0.97	0.93	0.96
Cucujiformia	0.97	0.96	0.97
Coccinellidae_[Adulte]	0.99	0.96	0.97
Staphylinidae	0.93	0.88	0.92
Diptera	0.88	0.89	0.91
Eremoneura	0.93	0.89	0.92
Syrphidae_[Adulte]	0.95	0.88	0.92
Forficulidae	1.00	0.86	0.91
Hemeroptera	0.96	0.83	0.85
Chrysopidae_[Adulte]	0.95	0.79	0.85
Hemiptera	0.78	0.62	0.65
Aphidomorpha	0.67	0.40	0.41
Aphidomorpha_[Adulte]	0.64	0.38	0.39
Heteroptera	0.99	0.91	0.91
Cimicomprha	0.99	0.92	0.95
Anthocoridae_[Adulte]	1.00	0.75	0.75
Miridae_[Adulte]	0.98	0.91	0.95

Tableau 1 : Performances de détection sur un ensemble d'images de validation. Chaque ligne correspond à une espèce ou un taxon. Ces valeurs permettent d'estimer les performances intrinsèques du détecteur. La précision et le rappel sont ici exprimés sur la base d'une calibration neutre en utilisant le score F1. La précision et le rappel peuvent par la suite être mesurés en pratique sur un autre ensemble de test indépendant, avec une calibration potentiellement différente (ex: F1.5).



4. Étude de la prédation à l'aide de cartes proies sentinelles et de la caméra Beecam MVT-HD®

4.1 Matériels et méthodes

Pour évaluer la capacité de la caméra à détecter des événements de prédation *in situ*, son utilisation a été couplée à des cartes de proies sentinelles avec des ravageurs des cultures.

En vigne, elles comportaient des larves de *Scaphoideus titanus*, des imagos d'*Empoasca vitis*, des œufs, des chenilles ou des chrysalides de *Lobesia botrana*. Les cartes ont été disposées au sol ou sur un cep de vigne (région Bourgogne), en période diurne ou nocturne. Les cartes ont été confectionnées à partir de panneaux adhésifs à colle sèche Bug-Scan dry jaune (Biobest®) découpés au format 5 x 8 cm. Le film protecteur est enlevé sur une surface de 25 cm² de façon à disposer de deux bandes latérales de 1,5 cm de large pour manipuler aisément la carte de prédation. Les proies sentinelles sont disposées sur la surface engluée et lorsque ces dernières sont des chenilles de *L. botrana*, une goutte d'ichtyocolle est déposée sur les derniers segments abdominaux afin de limiter autant que faire se peut les fuites. Après un délai de 24 heures, du sable de granulométrie inférieure au millimètre, est saupoudré sur la surface engluée afin de rendre possible le déplacement ambulateur des prédateurs. Sur les bandes latérales, deux perforations ont été réalisées pour permettre une fixation sur le cep de vigne au moyen d'un lien semi-rigide (ligapal®).

En arboriculture (pommier à cidre en Normandie, verger diversifié avec pomme de table en Occitanie), elles comportaient alternativement des œufs et des larves de dernier stade de carpocapse de la pomme (*Cydia pomonella*), des larves d'anthonomes et des pucerons (*Dysaphis plantaginea*). Les expositions de larves L1 (collées vivantes mais qui finissent par mourir au bout de quelques heures) et de larves L4-L5 aussi bien de jour que de nuit ont été effectuées. Les cartes étaient réalisées en cartons beige (5 x 5 cm) sur lesquels étaient collés ou épinglées les proies. Les stades de développement des larves (entre la larve et le stade adulte) sont caractérisés de L1 à L5 en fonction de leurs phénotypes.

Plusieurs types de dispositifs ont été déployés.

4.1.1 Dispositif expérimental « relations trophiques »

Un couple « carte de prédation – prototype Beecam MVT-HD® » a été mis en action à maintes reprises avec des durées de programmation variant de 1 à 15 heures, afin d'enregistrer les éventuels actes de prédation dont feraient l'objet les proies sentinelles. Lors d'une exposition, une ou plusieurs espèces, un ou plusieurs stades ont pu constituer les proies sentinelles. Les cartes ont été disposées au sol ou sur un cep de vigne, un tronc d'arbre fruitier ou sa frondaison, en période diurne ou nocturne (figure 1, 2 et 3). En période nocturne les cartes de prédation ont été éclairées au moyen d'une lampe frontale.

En vigne, l'exposition a été effectuée du mois de mars au mois d'août 2022 au cours de 33 séances de veille programmées. Cela a représenté l'équivalent de 245 heures de surveillance qui ont permis l'enregistrement de 5 604 vidéos et 20 546 photos. En arboriculture, il a été réalisé plusieurs périodes d'exposition et d'observation par caméra, représentant huit sessions avec quatre caméras en octobre 2022 pour une durée totale de 184 h de surveillance. Une base de données rapportant les types d'interactions enregistrées (passage, contact, prédation) en fonction des conditions d'exposition (type de proies, habitat, durée d'exposition, jour/nuit, etc.) a été initiée.

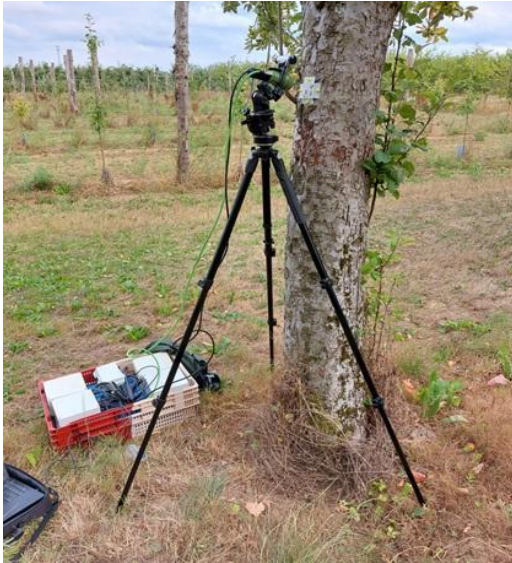


Figure 2 : Photographie du dispositif d'installation sur tronc d'une carte de prédation de larves de carpocapses filmée par la caméra Beecam MVT-HD® (crédit photo P.Masquin, IFPC)



Figure 3 : Photographie du dispositif d'installation sur cep de vigne d'une carte de prédation de larves de *L.botrana* filmée par la caméra Beecam MVT-HD® (crédit photo : G.Sentenac, IFV)

4.1.2 Dispositif expérimental « Bande fleurie »

Ce dispositif a été mis en place en vigne dans l'objectif de tester l'effet de la distance à une bande fleurie sur la prédation de proies sentinelles surveillées par caméra. Un Mélange SEDAMIX® auxiliaires 100 % fleurs sauvages avec un ajout de sarrasin, produit par Nungesser Semences, a été semé le 4 octobre 2019 sur une surface de 600 m² (75 m x 8 m) au moyen d'un semoir à main, à la dose de 5 g/m². La bande fleurie est contiguë à une parcelle de vigne de 2.4 ha sur son côté Nord-Ouest. Cette parcelle est complantée de gamay greffé sur SO4 (Sélection Oppenheim 4, porte-greffe) à une densité de 9 259 ceps/ha (écartement : 1.35 m, espacement : 0.80 m). Les ceps sont âgés de 32 ans et taillés en cordon de Royat. Ils ont fait l'objet d'un suivi de cartes de prédation disposées à 1.35 m, 75 m et 150 m de la bande fleurie, respectivement modalité 1, 2 et 3.

Une première exposition de cartes de prédation, 14 par modalité, a été effectuée en période diurne le 13 juillet 2022 pendant 7 heures. Une seconde exposition, 18 cartes par modalité, en période dite nocturne le 21 et 22 juillet 2022 pendant 13 heures réparties comme suit : 4 heures de jour crépusculaire et 9 heures de nuit. Lors de chacune des expositions, une caméra Beecam MVT-HD® est mise en veille sur une carte de la modalité 1 et une autre sur la modalité 2.

Les analyses ont été effectuées avec le logiciel R version 4.2.0 (R Core Team 2022). Pour tester l'incidence de la distance à la bande fleurie sur la prédation de proies sentinelles (L5 de *Lobesia botrana*), nous avons ajusté pour chaque exposition (diurne et nocturne) un modèle linéaire généralisé mixte avec une distribution binomiale des erreurs et une fonction de liaison logit, en prenant la variable « carte de prédation » en effet aléatoire et à l'aide du module lme4 (Bates *et al.* 2015). La qualité d'ajustement du modèle a été contrôlée avec le module DHARMA (Hartig 2022). Nous avons ensuite utilisé le module emmeans pour tester si les taux de prédation étaient significativement différents entre chacune des modalités de la variable « distance à la bande fleurie ». Toutes les p-values ont été ajustées avec le test post hoc de Tukey pour réduire le risque d'erreurs de type I. Nous avons aussi ajusté un modèle similaire à toutes les données pour comparer le taux de prédation diurne au taux de prédation nocturne.

Au terme de la période d'exposition, la ou les cartes de prédation sont relevées et observées une à une à l'œil nu afin de noter le nombre de sentinelles encore présentes en état et sans blessure. Le complémentaire par rapport au nombre de proies sentinelles initialement exposées correspond au nombre de proies sentinelles prédatées en totalité ou partiellement (consommation partielle par des



insectes broyeur ou digestion externe). Cette notation est validée par une observation effectuée par la suite au laboratoire sous loupe binoculaire. Les prédateurs qui auront opéré sur les cartes de prédation ont été identifiés, à la famille le plus souvent, grâce au visionnage des photos HD et des vidéos.

4.2 Résultats

4.2.1 Mise en évidence de relations trophiques

Lors des expositions de proies surveillées par caméra, plusieurs catégories de prédateurs ont été observées en action de consommation. Une activité est par ailleurs notable au niveau des cartes : contact avec les proies ou simple passage.

En verger, des mésanges, fourmis, forficules, carabes et opilions consomment des larves de carpocapse de stade L1 et de stade L4-L5 au niveau du sol (tableau 2). Fourmis et forficules consomment également des pupes de *Drosophila suzukii*. Des tests nocturnes avec éclairage ont permis de mettre en évidence à plusieurs reprises que de nombreux auxiliaires tels que les forficules, carabes et opilions consommaient aussi des pucerons (figure 4a et 4b). En verger de pommier à cidre, au niveau de cartes de prédation d'anthonomes (morts, au sol) ont été filmés des carabes et des araignées, surtout la nuit. Des cartes de prédation d'œufs de carpocapse (frondaison, jour et nuit) ont montré la consommation des opilions, des araignées, des forficules et des chrysopes, particulièrement la nuit (figure 4c). Enfin, différentes cartes de prédation de larves de carpocapse L5 (mortes ou vivantes, dans la frondaison ou sur le tronc, de jour comme de nuit) ont montré la consommation par des arthropodes diurnes (guêpes) et nocturnes (opilions, forficules, araignées) ainsi que par des oiseaux (mésanges, grimpeurs) (figure 4d et 4e).

En vigne, des guêpes *Vespa vulgaris*, des *Formicidae* et la mésange charbonnière, *Parus major*, ont consommées des chrysalides d'eudémis (*Lobesia botrana*) et des larves de stade L5 (figure 4f). Le stade nymphal de ce ravageur a aussi été consommé par des araignées de la famille des *Salticidae* (figure 4h). En revanche nous n'avons pas constaté de prédation des œufs d'eudémis au cours des 5 séances de veilles programmées en juillet et août. Enfin des *Formicidae* et une larve de *Chrysopidae* ont été filmées consommant respectivement des larves L3 et L5 de cicadelle *Scaphoideus titanus* ainsi qu'un adulte d'*Empoasca vitis*. (figure 4g).

Tableau 2: Nombre de types d'interaction lors d'une exposition diurne totale de 184 heures cumulées (8 sessions de 4 cartes équipées de 4 Becam MVT-HD) de larves de carpocapse (L4-L5) en octobre 2022.

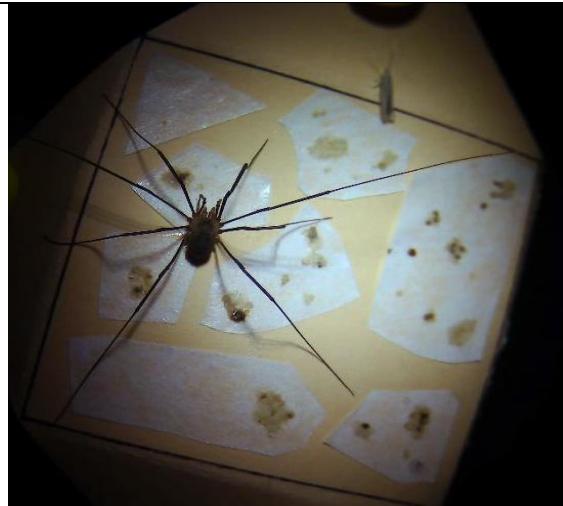
Individus Observés	Contact	Passage	Prédation
Araignée	2	4	3
Campagnol		1	
Cloporte	1		1
Colonie de fourmis			5
Escargot		1	
Forficule			1
Fourmi	4	7	1
Indéterminé	1	4	
Mésange charbonnière			5
Mouche	2	3	
Puceron	2	3	
Total générale	12	23	16



a : Carabe (*Calathus fuscipes*) consommant une larve de carpocapse (de nuit) crédit photo : JM.Ricard, Ctifl



b : Forficule consommant les quatre pucerons d'une carte de prédation (de nuit) crédit photo : JM.Ricard, Ctifl



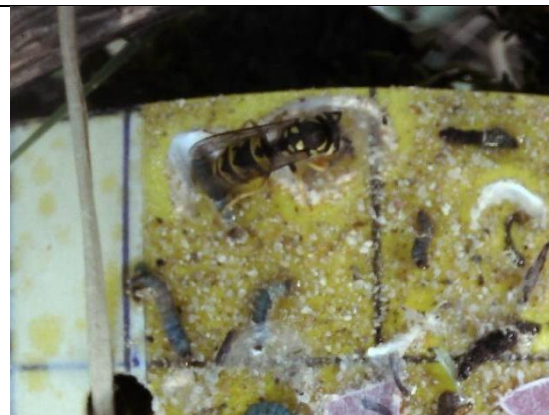
c : Opilion consommant des œufs de carpocapse. crédit photo : de P.Masquin IFPC



d : Forficule consommant des œufs de carpocapse. crédit photo : de P.Masquin IFPC



e : Les chenilles de carpocapses sont prédatées par plusieurs espèces d'oiseaux, comme le grimpeur. crédit photo P.Masquin, IFPC



f : *Vespa vulgaris* consommant une chenille de *L. botrana* crédit photo : G.Sentenac, IFV

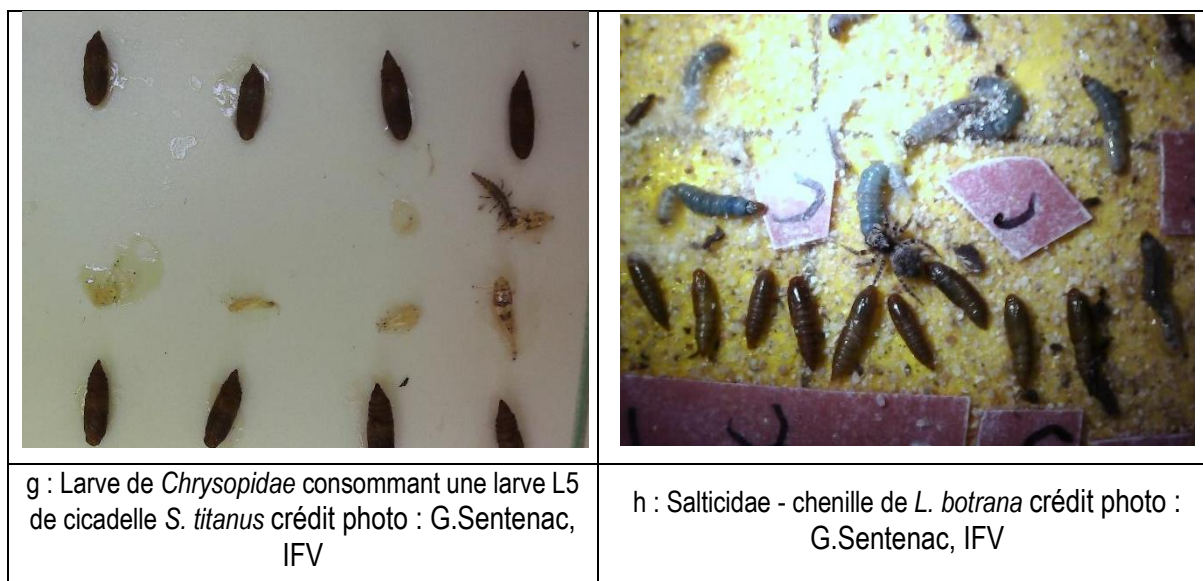


Figure 4 : Photographies de la caméra Beecam MVT-HD dans les différents dispositifs d'observation des relations trophiques proie – prédateurs.

4.2.2 Incidence d'une bande fleurie sur la prédation des proies sentinelles

Au cours de l'exposition diurne, les proies sentinelles sont consommées, d'après les images enregistrées, par des hyménoptères de la famille des *Vespidae* (*Vespula vulgaris*) et des *Formicidae*, par des araignées appartenant à la famille des *Philodromidae* et des *Salticidae*. Le taux de prédation des chenilles L5 de *L. botrana* à proximité de la bande fleurie, c'est-à-dire à 1,35 m, est statistiquement plus élevé qu'à 75 m ($p = 0,0498$) et il est aussi plus élevé qu'à 150 m bien que non significatif ($p = 0,0891$) de cette dernière. En revanche, il n'y a pas de différence significative entre les taux de prédation à 75 et 150 m de l'aménagement agroécologique ($p = 0,949$).

En période crépusculaire et nocturne, la prédation qui présente un niveau plus élevé qu'en période diurne, est due essentiellement à l'activité de plusieurs espèces de *Formicidae*. Elles ne sont toutefois pas les seules à opérer puisqu'une larve de chrysope a été observée en train de s'alimenter hors dispositif de veille des caméras. Les fréquences de prédation notées dans chaque modalité ne semblent pas liées à la distance à la bande fleurie.

5. Autres actions destinées à estimer le potentiel opérationnel de l'outil

Des actions ont été conduites pour évaluer le potentiel de transfert opérationnel de l'outil vers l'enseignement et les agriculteurs. Ainsi une action pédagogique a été développée avec une classe de BTSA ACSE (Brevet de Technicien Supérieur Agricole Analyse, Conduite et Stratégie de l'Entreprise agricole) par deux partenaires du projet (Campus agricole de Carpentras, CTIFL) et deux enseignants Thierry Saunier (biologie/écologie) et Henri-Benoît Folio (technique de culture). L'objectif était de déployer la caméra pour observer la régulation de pucerons sur chou-rave en serre maraîchère. Trois séances de travaux pratiques ont été réalisées en 2022, ce qui laisse peu de temps pour maîtriser l'outil. En est ressorti la nécessité de créer un guide pratique de prise en main afin de s'approprier rapidement les codes d'utilisation. Conçu dans la foulée, il mêle mode d'emploi et retours d'expériences des autres partenaires techniques et peut servir dorénavant de documentation de base d'appui à un module pédagogique.

Par ailleurs, la caméra a été mise en place chez des producteurs cidricoles à plusieurs reprises dans le cadre d'expérimentations du projet DEPHY Expé SYDRA2 (2019-2024) « mesure de prédation des œufs de carpocapse avec des cartes de prédation ». Cela a permis de présenter aux producteurs le dispositif et le projet MIRAGE.



6. Discussion

La caméra Beecam MVT-HD® permet la capture de vidéos et la prise de photographies synchronisées entre elles. Il est possible de filmer et photographier des arthropodes de petite taille, de l'ordre du mm ce qui est adapté à la détection et l'analyse de la prédation exercée par la plupart des auxiliaires des cultures. La sensibilité de la caméra est très élevée ce qui peut générer de nombreuses prises de vues intempestives liées aux variations de conditions météorologiques (lumière, vent etc.). Ce phénomène est atténué en utilisant une zone de masque de petite taille pour une surveillance au plus près des proies et par des réglages de sensibilité qui permettent de trouver le compromis entre une sensibilité très élevée qui génère un tri important des images et des vidéos non informatives, et une sensibilité faible qui induit de la perte d'information. Pour aider à ces choix, et plus généralement à la mise en œuvre de la caméra, un guide a été rédigé pour accompagner tout nouvel utilisateur dans les réglages de la caméra.

L'association de photos et de vidéos durant une même session d'observation apporte une complémentarité intéressante dans la qualification des interactions entre des proies et leur prédateurs potentiels. En effet, les photographies permettent un tri rapide des instants clés de disparition de proies ce qui permet ensuite de rechercher dans l'horodatage des vidéos les séquences à visionner pour une analyse de l'activité des individus. Il est ainsi possible de définir si un individu est simplement de passage, s'il entre en contact avec la proie ou s'il s'y intéresse davantage en la consommant, que ce soit entièrement ou en partie seulement. La vidéo permet également de mesurer le temps de consommation. Par exemple, nous avons pu mesurer qu'un seul et même forficule était capable de consommer de nuit quatre pucerons collés sur une carte de prédation en une heure de temps environ.

Concernant la détection automatique dans les images, les résultats obtenus sur le jeu de validation sont encourageants mais, contrairement à un jeu de test, le jeu de validation contient des photos potentiellement très ressemblantes à celles utilisées pour l'apprentissage. Il reste encore à créer une base de test avec des photos et des vidéos issues de la caméra, représentant une diversité de cas d'usages de celle-ci, sur laquelle il faudra appliquer le détecteur calibré. Les résultats opérationnels sur de nouvelles données indépendantes sont donc fortement susceptibles d'être moins bons.

Afin d'améliorer la robustesse des apprentissages futurs, il serait nécessaire d'alimenter la base de données avec des prises de vues sur différents types de cartes de prédation, ou tout autre arrière-plan utile aux expériences, et si possible dans des conditions variables (luminosité extérieure : météo grise et image homogène, ou beau temps avec ombres et contrastes).

L'analyse des captations est facilitée en utilisant le logiciel de classification automatique HARMONY. Ce logiciel de classification automatique des principales familles d'ennemis naturels peut fonctionner sur n'importe quelle photo quel que soit le capteur utilisé. Ses performances font l'objet d'une amélioration continue grâce à un processus de correction et d'annotation des erreurs de classification. Ce type de logiciel ouvre des perspectives pour mettre en œuvre des inventaires de biodiversité assistés par photographies (pièges photographiques ou autres capteurs séquencés combinés à différentes méthodes attractives).

Concernant l'étude des relations trophiques, les résultats, plutôt qualitatifs, permettent avant tout de démontrer l'intérêt de l'outil caméra pour identifier les prédateurs et leur activité. Dans cet objectif, opérer avec des proies sentinelles exposées sur des cartes permet d'optimiser l'utilisation de la caméra. En effet, en conditions naturelles, des proies grégaires comme les pucerons sont difficiles à surveiller car ceux-ci se déplacent constamment dans leur foyer ce qui génère des déclenchements permanents de photos et vidéo. A l'opposé, les ravageurs isolés (œufs et adulte non grégaires) sont très difficiles à repérer dans les cultures ce qui limite fortement les postes d'observation de leur prédation. Il est donc quasiment obligatoire de travailler sur des proies fixes et en cela les cartes d'exposition de proies sont une aide considérable.



Nos résultats mettent en avant la diversité des organismes généralistes, tels que les araignées, carabes, forficules et opilions, pouvant consommer différentes espèces de proies sentinelles (pucerons, diptères, lépidoptères, cicadelles) de différents stades (œuf, larve, chrysalide). Ces taxons ont par ailleurs été décrits comme prédateurs de proies sentinelles de puceron et de bruche (Gardarin et al, 2023). D'autres comme les fourmis et les guêpes ont une activité de consommation qui peut être soulignée car moins documentée en agriculture (Anjos et al., 2022). Il est plus juste de parler de consommation plutôt que de prédation, car les proies étant immobilisées il n'y a pas eu de capture. Un autre biais possible provient du fait qu'en conditions réelles, certaines proies telles que les chenilles de *Lobesia botrana* sont à l'abri dans les glomérules (première génération) ou dans les pénétrations (2^{ème} et 3^{ème} génération) et ainsi ne sont peut-être pas prédatées par les guêpes et les fourmis. De plus, il ressort également que la consommation a lieu très fréquemment la nuit. La caméra n'étant pas équipée en capteur infra-rouge, il se pourrait que le dispositif d'éclairage utilisé biaise ces résultats. Toutefois, une expérimentation d'exposition de proies sentinelles de larves de carpocapse sans éclairage, et avec des notations visuelles échelonnées matin et soir sur 70 h de temps, nous a montré que la disparition des proies se faisait quasi-exclusivement la nuit, ce qui permet de penser que l'éclairage ne semble pas perturber le résultat obtenu (Lupo, 2022).

Le prototype de caméra est un outil précieux pour étudier les effets des infrastructures agroécologiques sur la régulation naturelle, il permet d'authentifier les actes de prédation et de valider que les proies sentinelles manquantes ne sont pas la conséquence d'une fuite. L'identification des prédateurs à la suite du visionnage des photos et des vidéos par un expert ou par le réseau neuronal permet une meilleure interprétation de la présence ou de l'absence d'effet de l'aménagement sur la régulation.

Des évolutions concernant le temps de mise en œuvre ainsi que l'autonomie de la Beecam MVT-HD® seraient néanmoins souhaitables pour envisager un plus large déploiement.

7. Conclusion

L'utilisation de la caméra de haute résolution, couplée aux proies sentinelles, est utile pour identifier les organismes impliqués dans la régulation des ravageurs, et donc ceux qu'il serait souhaitable favoriser dans le cadre de la lutte biologique. Les outils et méthodes développés dans le projet MIRAGE représentent une étape essentielle dans le déploiement à large échelle de dispositifs d'observation *in situ* des communautés de prédateurs. Ils vont faciliter l'acquisition de données nombreuses sur le fonctionnement des réseaux trophiques dans une diversité de situations, et ainsi d'identifier les facteurs favorisant les régulations biologiques.

Ethique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Contributions des auteurs

Ctifl Balandran

Ricard JM : pilote de projet, suivis expérimentaux, analyse des données, écriture article

Michaud M: suivis expérimentaux, analyse des données



IFV - Institut Français de la Vigne
 Sentenac Gilles : suivis expérimentaux, analyse des données
 IFPC - Institut Français des Productions Cidricoles
 Masquin Paul, Guerin Anne : suivis expérimentaux, analyse des données
 ASTREDHOR – Arexhor
 Ferre Alain, Fougère Alicia : suivis expérimentaux, analyse des données
 ARVALIS Institut du Végétal
 Tossier Véronique, Marks-Perreau Jonathan : suivis expérimentaux, analyse des données
 ADVANSEE
 Corbière Thierry CORBIÈRE : conception caméra Becam MVT-HD®
 WIPSEA
 Duclos Gwenaél, Alain Pierre : analyse d'images, logiciel Harmony
 UMR Agronomie, INRAE, AgroParisTech
 Gardarin Antoine : expertise
 EPLEFPA de Carpentras, Établissements Publics Locaux d'Enseignement et de Formation
 Professionnelles Agricoles
 Girerd Laëtitia : animation équipe enseignants, suivis expérimentaux, rédaction « guide utilisateur »

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir pas de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Déclaration de soutien financier

Projet financé par le ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire via le fond CASDAR (Compte d'affectation Spéciale Développement Agricole et Rural)

Références bibliographiques

- Anjos D.V., Tena A., Viana-Junior A.B., Carvalho R.L., Torezan-Silingardi H., Del-Claro K., Perfecto I., 2022. The effects of ants on pest control: A meta-analysis. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 289(1981), 20221316. <https://doi.org/10.1098/rspb.2022.1316>
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1–48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Bochkovskiy A., Wang C.Y., Liao H.Y., 2020. Yolov4: Optimal speed and accuracy of object detection. *arXiv preprint arXiv:2004.10934*.
- Chen *et al.* 2017. Pest identification via deep residual learning in complex background. *Computers and Electronics in Agriculture* 141 (2017) 351–356.
- Gardarin A., Capowiez Y., Teulé J.-M., Wetzell G., Hedde M., 2023. Assessing ground predation by invertebrates in crops: Camera observations clarify the relevance of aphid cards and coleopteran sentinel prey. *Basic and Applied Ecology*, Volume 71, September 2023, Pages 111-118
- Gardarin A., Capowiez Y., Hedde M., Barzman M., 2017. GARGAMEL "Gestion Agroécologique des Ravageurs de Grandes cultures à l'aide de MELanges floraux. Séminaire SMAcH –10 novembre 2017.
- Hartig F, Hartig MF. Package 'DHARMa'. R Package. Available online: <https://CRAN.R-project.org/package=DHARMa> (accessed on 5 September 2022). 2022 Jul.
- Jay M., Ricard J.M., 2017. La fréquentation d'aménagements agro-écologiques révélée par piégeages photographiques. *Info-Ctifl n°330*, avril 2017, p22-34.



Jeanneret P., Holland J., Moonen C., van der Werf W., Kiss K., Giffard B., Paracchini M.-L., Pointereau P., Helsen H., Veromann E., Entling M., 2017. Résultats du projet EU FP7 QuESSA Quantification of Ecological Services for Sustainable Agriculture. Séminaire Ecologisation des Systèmes de Production Agricoles pour Renforcer le Contrôle Biologique des Bioagresseurs, INRA Paris 27 & 28 Novembre 2017.

LeCun Y., Bengio Y., Hinton G., 2015. Deep learning. *Nature* 521, 436–444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>.

Lövei G.L., Ferrante M., 2017. A review of the sentinel prey method as a way of quantifying invertebrate predation under field conditions. *Insect Science*, 24 : 528-542.

Lupo R., 2022. Estimation de la prédation naturelle de *Prays oleae* en verger d'olivier biologique. Rapport de stage de première année de Master. Master Agrosience Environnement Territoire Paysage et Forêt, Institut AgroDijon.

Redmon, J., & Farhadi, A., 2018. Yolov3: An incremental improvement. *arXiv preprint arXiv:1804.02767*.



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations Agronomiques* et son DOI, la date de publication.