



**HAL**  
open science

# Optimisation de techniques de protection intégrée contre *Cydia pomonella* L. le carpocapse du pommier

Anaïs Kiehl

► **To cite this version:**

Anaïs Kiehl. Optimisation de techniques de protection intégrée contre *Cydia pomonella* L. le carpocapse du pommier. Sciences du Vivant [q-bio]. 2024. dumas-04772644

**HAL Id: dumas-04772644**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04772644v1>**

Submitted on 8 Nov 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.

<p>Année universitaire : 2023 - 2024</p> <p>Spécialité : Horticulture</p> <p>Spécialisation (et option éventuelle) : Protection des Plantes et Environnement en Horticulture</p>	<p><b>Mémoire de fin d'études</b></p> <p>■ d'ingénieur de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)</p> <p>□ de master de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)</p> <p>□ de l'Institut Agro Montpellier (étudiant arrivé en M2)</p> <p>□ d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)</p>
--	---

## Optimisation de techniques de protection intégrée contre *Cydia pomonella* L. le carpocapse du pommier

Par : Anaïs KIEHL



[1]

*Soutenu à Angers le 11/09/2024 à 15h30*

*Devant le jury composé de :*

Président : Vanessa SOUFFLET-FRESLON

Jury extérieur : Benjamin YGUEL

Maître de stage : Hélène JOIE

Enseignant référent : Bruno JALOUX

*Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle de l'Institut Agro Rennes-Angers*

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation «Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France» disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>





## Remerciements

Je tiens à remercier en priorité ma maîtresse de stage, Hélène, pour m'avoir permis de réaliser un stage aussi enrichissant et stimulant, et pour m'avoir guidée dans ma réflexion et la réalisation de mon travail tout en me laissant une autonomie et une prise de décision très valorisantes. Ce stage fut un réel plaisir du début à la fin, et pour cela un grand merci !

Bien sûr, ma reconnaissance va également à l'ensemble de l'équipe de SudExpé sans qui mes expérimentations auraient pris, disons, le triple du temps ? J'ai de plus acquis énormément de compétences, notamment sur le terrain, qui me seront utiles dans ma future vie professionnelle. Petit clin d'œil à notre tentative d'élevage de carpacapse lorsque les espoirs d'en piéger suffisamment pour les expériences étaient au plus bas : il faut croire que nous ne sommes pas si mauvais éleveurs !

Je tiens par ailleurs à souligner l'excellente ambiance qui règne au sein de l'entreprise et qui m'a permis de passer six mois épanouissants, malgré la fournaise du Sud. Heureusement qu'il y avait les JO pour se réfugier au frais entre deux analyses statistiques...

Je remercie également mon professeur Bruno pour s'être rendu disponible pour mes questions, et pour nous avoir proposé avec l'équipe enseignante une super PPEH dont les connaissances m'ont été bien utiles ! Pour le reste du discours, rendez-vous à la Remise Des Diplômes monsieur.

J'ai également une attention particulière pour l'ensemble des stagiaires, qui ont été mes colocataires et qui sont devenus mes amis avec lesquels j'ai ri, beaucoup ri : ces six mois étaient bien plus qu'un stage ! Mais nous devons impérativement nous améliorer sur la qualité de nos blagues... A cette maison des stagiaires, dans laquelle nous avons gravé nos plus beaux souvenirs.

Bien sûr, je pense aussi avec amour à mes proches qui m'ont encouragée et félicitée tout au long de mon parcours ; nous savons tous combien il est important de se sentir soutenu par sa famille, surtout dans les moments cruciaux.

Enfin je tiens à remercier l'inventeur du Scotch, sans qui l'intégralité de mon projet n'aurait pas pu exister ! Je tairai l'arrachement de cheveux qui a souvent accompagné mes tentatives de fixation, mais je peux désormais vous conseiller sans faillir sur le top 3 des meilleurs scotchs.

Pour finir, je tiens à vous remercier vous, lecteurs, qui lisez ce paragraphe, en espérant que vous n'avez pas levé les yeux au ciel tout du long : pas de panique, mon travail sérieux arrive et durera une centaine de pages ; nous pouvons bien nous permettre une petite touche d'humour auparavant :)

Pardon, j'oubliais : à ce petit chaton noir abandonné dans les vergers, que nous avons secouru, puis choyé, et enfin éduqué. A toi Pepsi, qui vis désormais dans une famille aimante, et qui m'as définitivement ouvert les yeux sur ma vocation profonde : protéger la flore mais aussi la faune. Ingénieure au service de la biodiversité ? Ça sonne plutôt bien...

Sur ce, bonne lecture et au plaisir de nous retrouver pour la soutenance !



# Table des Matières

Remerciements	
Table des Matières	
Liste des Tableaux	
Liste des Figures	
Liste des Annexes	
Glossaire	
INTRODUCTION .....	- 1 -
ETAT DE L'ART .....	- 3 -
I. Un ravageur problématique du pommier : <i>Cydia pomonella</i> L., le carpocapse des pommes et des poires .....	- 3 -
A. Biologie et cycle de développement .....	- 3 -
B. Symptômes et dégâts du carpocapse sur pommier .....	- 4 -
C. L'impact du réchauffement climatique sur les générations .....	- 4 -
II. Les méthodes de lutte actuelles contre le carpocapse .....	- 5 -
A. Les principales méthodes employées .....	- 5 -
B. Le virus de la granulose, un produit de biocontrôle homologué en agriculture biologique pouvant être combiné .....	- 6 -
C. Le problème de l'apparition de résistances au virus de la granulose .....	- 7 -
III. L'émergence d'une technique de lutte innovante : l'augmentorium .....	- 8 -
A. Une méthode en développement à but prophylactique ... ..	- 8 -
B. ... Et permettant la lutte biologique par conservation et acclimatation : intégration du parasitoïde <i>Mastrus ridens</i> .....	- 8 -
C. L'avenir de la technique dans le climat futur .....	- 9 -
PARTIE I : AMELIORATION DE L'UTILISATION DU VIRUS DE LA GRANULOSE : ESSAI FACTORIEL .....	- 10 -
I. Objectif et hypothèses .....	- 10 -
II. Matériel et méthodes .....	- 10 -
A. Gestion de l'essai .....	- 10 -
B. Dispositif expérimental et modalités .....	- 11 -
C. Observations réalisées et variables d'étude .....	- 11 -
D. Analyses statistiques .....	- 12 -
III. Résultats .....	- 13 -
IV. Discussion .....	- 14 -
PARTIE II : OPTIMISATION DE STRATEGIES DE PROTECTION INTEGREE : ESSAI SYSTEME .....	- 16 -



I.	Objectif et hypothèses .....	- 16 -
II.	Matériel et méthodes .....	- 17 -
	A. Gestion de l'essai.....	- 17 -
	B. Dispositif expérimental et itinéraire technique .....	- 18 -
	C. Observations réalisées et variables d'étude.....	- 19 -
	D. Analyses statistiques .....	- 19 -
III.	Résultats.....	- 19 -
IV.	Discussion.....	- 21 -
<b>PARTIE III : DEVELOPPEMENT DE LA TECHNIQUE DE L'AUGMENTORIUM : ESSAI PROTOTYPE .....</b>		<b>- 24 -</b>
I.	Objectif et hypothèses .....	- 24 -
II.	Matériel et méthodes .....	- 25 -
	A. Expérience sur le type de maille.....	- 25 -
	B. Expérience sur le type de contenant .....	- 27 -
III.	Résultats.....	- 30 -
	A. Expérience sur le type de maille.....	- 30 -
	B. Expérience sur le type de contenant .....	- 30 -
IV.	Discussion .....	- 31 -
<b>CONCLUSION.....</b>		<b>- 34 -</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>		<b>- 36 -</b>
<b>SITOGRAFIE.....</b>		<b>- 42 -</b>
<b>ANNEXES</b>		





## Liste des Tableaux

**Tableau 1 :** Description des différentes modalités de l'essai factoriel et du positionnement des traitements dont le seuil est déclenché à l'aide du modèle INRAE (Boivin, Sauphanor 2007) (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 15/05/2024) .....- 10 -

**Tableau 2 :** Règles de décision théoriques déterminant le choix des interventions phytosanitaires en fonction des contrôles de présence de larves effectués en cours de saison et adaptées selon l'historique de pression sur les parcelles d'essai (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 19/07/2024).....- 18 -

**Tableau 3 :** Itinéraire technique suivi pour les trois stratégies étudiées concernant la lutte contre le carpocapse (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 12/08/2024).....- 18 -

**Tableau 4 :** Calcul de l'IFT, l'IFT Biocontrôle et l'IFT Total (cumulant les deux précédents) pour les trois stratégies testées dans le cadre de l'essai système (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 20/08/2024).....- 19 -

**Tableau 5 :** Caractéristiques des quatre mailles testées au cours de l'essai maille dans le cadre de l'amélioration du prototype de l'augmentorium (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 20/05/2024).....- 24 -



## Liste des Figures

- Figure 1** : Production nationale de pommes les six dernières années en France (Marcus 2023) .- 1 -
- Figure 2** : Production de pommes par région française [10].....- 1 -
- Figure 3** : Pourcentage des doses homologuées de fongicides au sein des vergers occitans français (Cassagne 2023) .....- 1 -
- Figure 4** : Carpocapse adulte (à gauche), larve de carpocapse (au milieu) et chrysalide protégeant la larve (à droite) (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 12/06/2024).....- 3 -
- Figure 5** : Détail du cycle d'une génération du carpocapse [15] .....- 3 -
- Figure 6** : Représentation des trois générations de carpocapse sur l'année dans l'Hérault (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 15/05/2024, d'après (Ingrmeau, GAB 22 2020)) à partir des relevés biologiques de la station en 2023 basés sur le modèle INRAE (Boivin, Sauphanor 2007) Annexe 1 .....- 4 -
- Figure 7** : Stades phénologiques du pommier (Fleckinger 1964).....- 4 -
- Figure 8** : Dégâts de carpocapse sur pomme (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 10/06/2024).....- 4 -
- Figure 9** : Bande-piège cartonnée positionnée autour d'un tronc de pommier (à gauche) et piège à phéromones sexuelles Delta installé dans le verger et contenant un carpocapse prisonnier (à droite, cercle rouge) (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 19/06/2024).....- 5 -
- Figure 10** : Filets Alt'Carpo installés en mono-rang (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 19/06/2024).....- 5 -
- Figure 11** : Diffuseur à phéromones sexuelles installé autour d'un tronc pour la confusion sexuelle (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 19/06/2024) .....- 5 -
- Figure 12** : Corps d'inclusion de *Cydia pomonella* Granulovirus (CpGV), vu au microscope électronique [24] .....- 6 -
- Figure 13** : Larve de carpocapse tuée par le CpGV (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 09/07/2024).....- 6 -
- Figure 14** : Composition des produits commerciaux à base de virus de la granulose (CpGV) disponibles et en cours d'homologation (INRAE 2023) .....- 7 -
- Figure 15** : Exemples de prototypes d'augmentorium en forme de tente (Deguine et al. 2011) ....- 8 -
- Figure 16** : Test de plusieurs contenants pour un nouveau prototype d'augmentorium (Siegwart 2024) .....- 8 -
- Figure 17** : *Mastrus ridens*, parasitoïde exotique et spécifique du carpocapse [29].....- 9 -



<b>Figure 18</b> : Cycle de vie du carpocapse en relation avec le cycle de <i>Mastrus ridens</i> [29] .....	- 9 -
<b>Figure 19</b> : Représentation simplifiée du concept de parcelle brute, parcelle nette, bordure et zone tampon (Haudemard, Martouret 1987).....	- 11 -
<b>Figure 20</b> : Plan d'expérimentation de l'essai factoriel (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 15/07/2024).....	- 11 -
<b>Figure 21</b> : Dégâts de carpocapse de classe 2 (au-dessus) et de classe 3 (en-dessous) (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 01/07/2024).....	- 12 -
<b>Figure 22</b> : Représentation au cours de l'essai factoriel des conditions météorologiques, des prédictions actualisées du modèle INRAE (Boivin, Sauphanor 2007) ainsi que des captures au sein des pièges Delta de la parcelle d'essai (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 16/07/2024)-	13 -
-	
<b>Figure 23</b> : Proportion moyenne ajustée des fruits attaqués par le carpocapse en fonction de la date de comptage dans le cadre de l'essai factoriel (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 28/06/2024).....	- 13 -
<b>Figure 24</b> : Proportion moyenne ajustée des fruits présentant des piqûres actives en fonction de la date de comptage dans le cadre de l'essai factoriel (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 28/06/2024).....	- 14 -
<b>Figure 25</b> : Représentation des conditions météorologiques, des prédictions actualisées du modèle INRAE (Boivin, Sauphanor 2007) ainsi que des captures au sein des pièges Delta contenant la capsule COMBO des deux parcelles d'essai sur site, dans le cadre de l'essai système (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 19/07/2024).....	- 19 -
<b>Figure 26</b> : Représentation des courbes de captures lissées donnant la période de vol du carpocapse au cours des deux premières générations, réalisées à partir des captures d'adultes au sein des pièges Delta contenant la capsule COMBO des deux parcelles d'essai sur site, dans le cadre de l'essai système (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 19/07/2024) .....	- 19 -
<b>Figure 27</b> : Représentation de la proportion de fruits attaqués (cumul de la proportion de fruits présentant des piqûres sèches – classe 2 - et de la proportion de fruits présentant des piqûres actives – classe 3) au sein des trois parcelles d'essai au cours des deux premières générations dans le cadre de l'essai système (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 19/07/2024) .....	- 20 -
<b>Figure 28</b> : Représentation de l'évolution du pourcentage de présence de piqûres actives au sein des trois parcelles d'essai au cours du temps, en lien avec les règles de décision énoncées précédemment dans le cadre de l'essai système (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 19/07/2024) .....	- 20 -
<b>Figure 29</b> : Photographie d' <i>Anagyrus fusciventris</i> à partir de laquelle sa largeur est calculée .-	25 -
<b>Figure 30</b> : Mise en place du dispositif expérimental concernant l'étude du type de maille dans la chambre de culture (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 22/07/2024) .....	- 26 -



<b>Figure 31</b> : Schémas représentant une répétition du dispositif dans le cadre de l'expérience de la fuite du carpocapse (à gauche) et du passage du parasitoïde (à droite) à travers les mailles testées (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 25/07/2024) .....	- 26 -
<b>Figure 32</b> : Schémas représentant l'ensemble du dispositif utilisé dans le cadre de l'expérience sur les types de maille, en prenant comme exemple la fuite du carpocapse (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 25/07/2024) .....	- 26 -
<b>Figure 33</b> : Dispositif expérimental de l'expérience sur le type de contenant dans le cadre de l'amélioration du prototype de l'augmentorium (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 01/07/2024).....	- 27 -
<b>Figure 34</b> : Schéma représentant le dispositif expérimental mis en place pour l'étude de la dégradation des fruits piqués au sein des augmentoria dans le cadre de l'expérience sur les types de contenant (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 25/05/2024) .....	- 27 -
<b>Figure 35</b> : Schéma représentant le dispositif expérimental mis en place pour l'étude de la survie des individus diapausants de la troisième génération de 2023 au sein des augmentoria, dans le cadre de l'expérience sur les types de contenant (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 25/05/2024)-	27 -
<b>Figure 36</b> : Schéma représentant le dispositif expérimental mis en place pour l'étude de la survie des individus de la seconde génération de 2024 au sein des augmentoria, dans le cadre de l'expérience sur les types de contenant (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 25/05/2024).....	- 28 -
<b>Figure 37</b> : Classes de dégradation des dégâts sur fruits piqués selon le degré de pourriture grise présent (classe 1 à 4 de gauche à droite au-dessus) [18], et pépins touchés par les larves de carpocapse en comparaison à une pomme saine (en-dessous) (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 02/08/2024) .....	- 28 -
<b>Figure 38</b> : Représentation graphique des données brutes relatives au passage en zone B des carpocapses adultes (graphique de gauche) et des adultes <i>Anagyrus fusciventris</i> (graphique de droite) à travers les quatre mailles testées dans le cadre de l'expérience sur le type de maille (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 29/07/2024) .....	- 30 -
<b>Figure 39</b> : Proportion moyenne ajustée des différents stades de dégradation des fruits piqués en fonction des modalités et de la date de comptage dans le cadre de l'expérience sur les types de contenant – la modalité Seau est hachurée en jaune (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 29/07/2024).....	- 30 -
<b>Figure 40</b> : Courbes moyennes de températures obtenues à partir des températures relevées toutes les 30 minutes au sein des deux augmentoria durant l'essai concernant la survie des individus de la seconde génération de 2024, dans le cadre de l'expérience sur les types de contenants (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 12/08/2024).....	- 31 -
<b>Figure 41</b> : Proportion moyenne ajustée des pertes d'individus au cours des différentes phases du cycle dans le cadre de l'expérience sur la survie des individus diapausants de la troisième génération de 2023 placés dans les augmentoria (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 29/07/2024)-	31 -





*Figure 42 : Proportion moyenne ajustée des pertes d'individus au cours des différentes phases du cycle dans le cadre de l'expérience sur la survie des individus de la seconde génération de 2024 placés dans les augmentoria (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 12/08/2024) .....- 31 -*



## Liste des Annexes

**Annexe 1 :** Courbes du pourcentage des éclosions des œufs de carpocapse simulées pour la station de Marsillargues de SudExpé de 2020 à 2024, d'après le modèle INRAE (Boivin, Sauphanor 2007)

**Annexe 2 :** Méthode d'interprétation des dégâts stoppés, cicatrisés et actifs du carpocapse de Baggiolini et Grob (1968) (*données de la station*, SudExpé site de Marsillargues, 15/07/24)

**Annexe 3 :** Script R réalisé pour analyser statistiquement l'effet des différents traitements et de la date sur la variable Y1 dans le cadre de l'essai factoriel (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 28/06/2024)

**Annexe 4 :** Script R réalisé pour analyser statistiquement l'effet des différents traitements et de la date sur la variable Y3 dans le cadre de l'essai factoriel – le script utilisé est similaire à celui de l'Annexe 3 et n'est donc représenté qu'à partir de la construction du modèle où il diffère légèrement (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 28/06/2024)

**Annexe 5 :** Relevés climatologiques de l'année 2024 exposant l'écart aux normales des températures (1), des précipitations (2) ainsi que la pression et le vent (3) de la station météo Montpellier – Fréjorgues située à 17 km du site [36]

**Annexe 6 :** Détail des calculs des taux de pertes dus au transfert, à la diapause, à la nymphose et à l'émergence dans le cadre de l'expérience sur la survie des individus au sein des différents contenants

**Annexe 7 :** Script R réalisé pour analyser statistiquement l'effet des différents contenants et de la date sur la dégradation des fruits piqués dans le cadre de l'essai prototype – le script utilisé est similaire à celui de l'Annexe 3 et n'est donc représenté qu'à partir de la construction du modèle où il diffère (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 15/08/2024)

**Annexe 8 :** Script R réalisé pour analyser statistiquement l'effet des différents contenants sur le taux de pertes au cours des différentes phases du cycle des individus diapausants de la troisième génération de 2023 dans le cadre de l'essai prototype – le script utilisé est similaire à celui de l'Annexe 3 et n'est donc représenté qu'à partir de la construction du modèle où il diffère (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 03/07/2024)

**Annexe 9 :** Script R réalisé pour analyser statistiquement l'effet des différents contenants sur le taux de pertes au cours des différentes phases du cycle des individus de la seconde génération de 2024 dans le cadre de l'essai prototype – le script utilisé est similaire à celui de l'Annexe 3 (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 12/08/2024)

**Annexe 10 :** Représentation graphique des différents stades d'individus retrouvés dans les deux contenants et regroupés au sein des ensembles A et B pour le SYSTEME 1, B et C pour le SYSTEME 2 et C et D pour le SYSTEME 3 de façon à mettre en lumière le nombre d'individus disparus au sein de chaque système (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 10/07/2024)

**Annexe 11 :** Représentation graphique des différents stades d'individus retrouvés dans les deux contenants et regroupés au sein des ensembles B et C pour le SYSTEME 2 (premier graphique) et C et D pour le SYSTEME 3 (deuxième graphique) de façon à mettre en lumière le nombre d'individus disparus au sein de chaque système (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 14/08/2024)



# Glossaire

*Les définitions suivantes sont classées par ordre d'apparition dans le texte.*

Indicateur de Fréquence de Traitement (IFT) : indice qui permet de quantifier l'utilisation des produits phytosanitaires au niveau d'une exploitation. Pour un traitement, l'IFT est le ratio entre la dose employée et la dose de référence du produit utilisé (CA Tarn-et-Garonne, CA Lot-et-Garonne 2024; Cretin, Espinosa 2021).

Méthodes de biocontrôle : méthodes alternatives aux produits phytosanitaires s'appuyant sur les mécanismes naturels et les interactions entre les espèces. Il existe quatre familles de solutions de biocontrôle : les agents de biocontrôle de type macroorganismes (nématodes, acariens, insectes auxiliaires), et les produits phytopharmaceutiques dits de biocontrôle comprenant les microorganismes (virus, bactéries, champignons), les médiateurs chimiques (phéromones), et les substances naturelles (d'origine minérale, animale ou végétale) [2].

Lutte par prophylaxie : ensemble de pratiques qui visent à prévenir l'apparition ou le développement de maladies, de ravageurs et d'adventices grâce à des leviers d'ordre physique, chimique, (micro)biologique et/ou génétique pouvant être combinés entre eux. Ils peuvent agir directement à l'encontre des bioagresseurs ou chercher à mieux utiliser l'agrobiodiversité bénéfique (auxiliaires des cultures) pour perturber leur cycle biologique [3].

Lutte biologique par conservation : mode de protection des cultures contre les ravageurs, qui consiste à gérer ces derniers en protégeant et favorisant les auxiliaires naturellement présents dans le milieu, par le maintien ou le développement de leurs habitats « ressources ». Ce mode de lutte s'insère dans une démarche de protection intégrée, en tant que déclinaison agroécologique par excellence du biocontrôle, portant sur des modifications de l'environnement et/ou des pratiques (Rousseaux, Seychal, Sarthou 2018).

Parasitoïde : organisme qui se développe sur ou à l'intérieur d'un autre organisme, son hôte, ce qui mène à la mort de ce dernier. La majorité de ces insectes sont des Hyménoptères ou des Diptères (Doutt 1959).

Nymphose : chez les Holométaboles, stade de développement entre les stades larvaires et le stade imagal (adulte), durant lequel les Lépidoptères (ordre appartenant aux Holométaboles) se métamorphosent et forment particulièrement une chrysalide emmaillotée. La sécrétion avant la nymphe d'un cocon soyeux est possible (Abeloos 1956).

Diapause : ralentissement très net de l'activité biologique d'un insecte qui interrompt le développement à un stade précis du cycle. Ce phénomène est une réponse physiologique à l'existence d'une saison défavorable au développement (l'hiver), généralement associée à des températures trop basses et une absence totale de ressources alimentaires (pommes récoltées ou en décomposition) (Maalouly Matar 2013; Boivin, Sauphanor 2007).

Emergence : processus par lequel un papillon adulte, l'imago, sort de sa chrysalide (ou nymphe) après avoir terminé sa métamorphose. Elle se nomme aussi phase imagale (Abeloos 1956).



Lutte chimique : méthode qui consiste à utiliser des produits phytopharmaceutiques de nature chimique pour combattre les organismes nuisibles [4].

Agriculture biologique : mode de production agricole excluant l'emploi de substances de synthèse telles que les pesticides, les médicaments ou les engrais de synthèse, et d'organismes génétiquement modifiés (Malagnoux 2014) [5].

Adjuvant : préparation dépourvue d'activité phytopharmaceutique que l'on ajoute aux traitements phytosanitaires afin de renforcer leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques. La mise en marché des adjuvants est réglementée et ils doivent obtenir une homologation délivrée par le Ministère en charge de l'Agriculture [6].

Lutte biologique par acclimatation : « invasion biologique planifiée » qui consiste en l'introduction d'un auxiliaire exotique, spécifique et efficace, afin qu'il s'établisse sur un territoire et qu'il contrôle durablement les populations du ravageur ciblé [7].

Parcelle élémentaire : dans un essai agronomique, portion de terrain de formes et de dimensions définies sur laquelle on applique un traitement ou un ensemble de traitements correspondant chacun à un niveau d'un certain facteur. La parcelle élémentaire est l'unité expérimentale la plus petite. Elle correspond à un seul niveau de chacun des facteurs étudiés [8].

Essai factoriel : approche expérimentale permettant de comparer plusieurs modalités d'une technique (ou de quelques techniques combinées), les autres techniques du système étant gérées toutes choses égales par ailleurs, afin de comprendre l'effet de cette technique appelée « facteur » sur une ou plusieurs variables. Pour cela, l'essai est réalisé en parcelle de « petite surface » (Havard et al. 2017).

Essai système : dispositif expérimental réalisé en « grande parcelle » afin d'évaluer la capacité d'un système de culture ou d'un itinéraire technique à atteindre les objectifs qui lui sont assignés (Havard et al. 2017).

Production Fruitière Intégrée (PFI) : production économique de fruits de haute qualité donnant la priorité à des méthodes écologiquement plus sûres, minimisant l'utilisation et les effets indésirables des produits agrochimiques et visant à l'amélioration de la protection de l'environnement et de la santé humaine. Ce concept est apparu suite aux préoccupations grandissantes des consommateurs face à la sécurité alimentaire et aux problèmes environnementaux, et est un compromis entre l'utilisation de méthodes issues de l'agriculture biologique et l'agriculture conventionnelle (Malagnoux 2014) [9].

*NB : les définitions dans le texte sont référencées avec \**



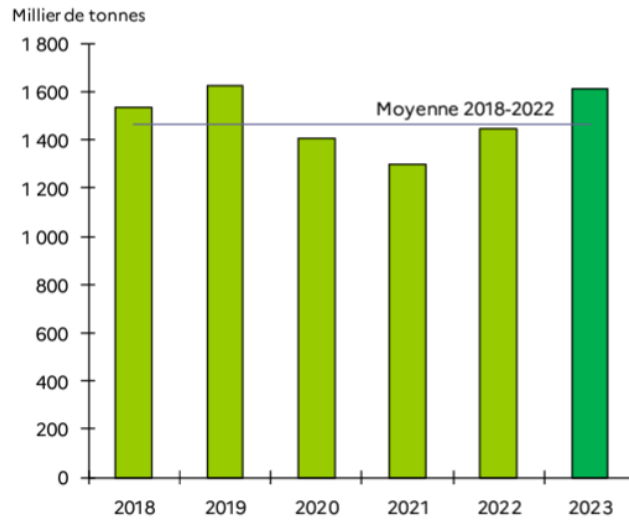


Figure 1 : Production nationale de pommes les six dernières années en France (Marcus 2023)

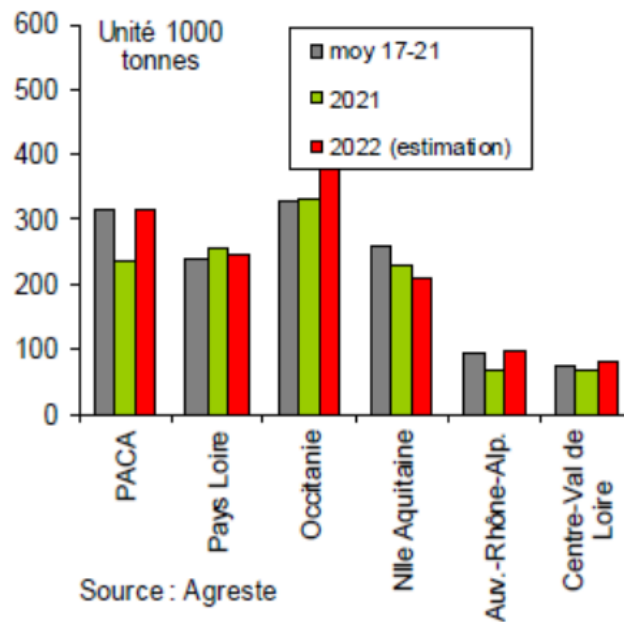


Figure 2 : Production de pommes par région française [10]

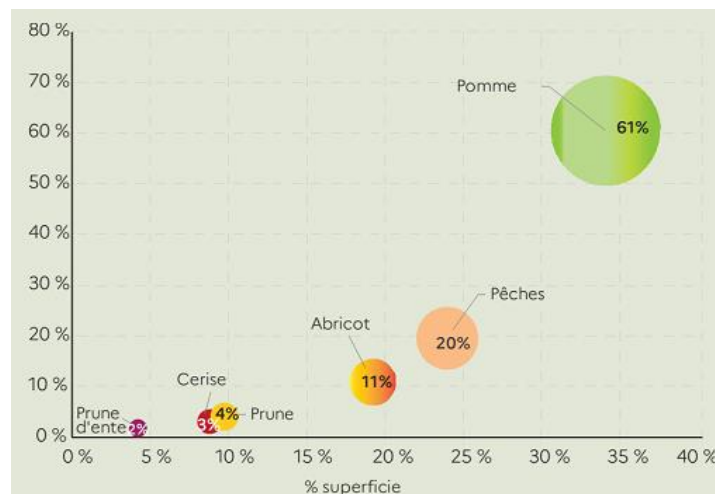


Figure 3 : Pourcentage des doses homologuées de fongicides au sein des vergers occitans français (Cassagne 2023)

---

# INTRODUCTION

---

La pomme compte parmi les fruits les plus produits, commercialisés et consommés de France (FranceAgriMer 2024a). D'origine asiatique, la pomme est arrivée en Europe à l'ère de la Préhistoire, et se déploie désormais sous plusieurs milliers de variétés différentes telles que Granny Smith, Gala, ou encore Pink Lady® [11].

Malgré une fluctuation ces dernières années due aux variations climatiques et à l'inflation engendrée notamment par le contexte de guerre (FranceAgriMer 2024b) [12], la production française reste en hausse avec un chiffre annuel de 1 614 000 tonnes en 2023 (Marcus 2023) *Figure 1*. Cette production est principalement portée par quatre bassins métropolitains majeurs, en particulier l'Occitanie où elle représente à elle seule 22% des superficies nationales de cette culture, ce qui fait d'elle un marché primordial pour le pays (Cassagne 2023) *Figure 2*. Cependant, elle est dépendante de l'utilisation de produits phytosanitaires : en effet, la pomme est une filière particulièrement traitée avec un IFT\* national total de 29,5 sur l'ensemble de la production en 2018 (Cretin, Espinosa 2021). La région Occitanie n'échappe pas à cette tendance : 61% des doses homologuées fongicides de l'arboriculture fruitière y sont employées en pommiers (Cassagne 2023) *Figure 3*.

Ces chiffres s'expliquent lorsque nous recensons le nombre de bioagresseurs sur pommier et les conséquences de leur invasion, en particulier le Lépidoptère *Cydia pomonella* L., le carpocapse du pommier. Responsable de nombreux dégâts entraînant une perte de récolte allant jusqu'à 90% dans les vergers non traités, ce ravageur majeur fait l'objet de nombreuses applications de produits phytosanitaires (Maalouly Matar 2013). En France, il est estimé que *Cydia pomonella* L. est à l'origine de 30 à 40% des traitements insecticides sur les fruits à pépins (Cretin, Espinosa 2021) [13].

Cependant, il a été démontré que les pesticides sont toxiques pour la santé et la biodiversité (Inserm 2021; FRAPNA 2013; Tasei 1996). Ainsi, face aux dangers que cet emploi représente, l'objectif actuel est de restreindre l'utilisation des produits phytosanitaires dans ce secteur. A ce titre, le gouvernement a mis en place certains plans d'action, comme l'interdiction législative des produits phytosanitaires contenant des néonicotinoïdes en 2018 (Travert 2018), ou encore le plan ECOPHYTO II + qui a pour but de réduire de 50% l'utilisation de ces produits d'ici 2025. Ce dernier prévoit également « d'accélérer le retrait des substances les plus dangereuses pour la santé et l'environnement, de renforcer la recherche sur les impacts des pesticides et d'accompagner la recherche d'alternatives » (CA Tarn-et-Garonne, CA Lot-et-Garonne 2024; Ministère de la Transition écologique et solidaire 2018).

Or, suite aux pertes d'usages en arboriculture d'insecticides ovo-larvicides [14], la stratégie contre le carpocapse du pommier se heurte à des difficultés croissantes. Il est donc nécessaire de trouver des techniques de protection alternatives permettant la maîtrise de la population pendant toute la période de risque. Ce point est d'autant plus important qu'en raison du réchauffement climatique, le carpocapse réalise désormais trois générations dans le Sud-Est de la France, entraînant ainsi plus de dégâts (Maalouly Matar 2013) [15]. Actuellement, de nombreuses alternatives à la lutte chimique existent (pièges, filets, ...), mais elles sont généralement partiellement efficaces (Béranger, Lejeune, Sellam 2022; Maalouly Matar 2013) [13].



Aujourd'hui, les recherches se resserrent sur la confusion sexuelle, [méthode de biocontrôle\\*](#) dont l'installation est généralisée dans le Sud, et sur les substances actives telles que le virus de la granulose, spécifique pour la larve néonate (de premier stade) qui l'ingère (Maalouly Matar 2013; CA Tarn-et-Garonne, CA Lot-et-Garonne 2024) [13]. Cependant, l'utilisation accrue de ces matières actives n'est plus suffisante et conduit à l'apparition de populations résistantes, en particulier en région Occitanie ou PACA (Sauphanor et al. 2006; Boivin, Sauphanor 2007), et à une perte d'efficacité du virus. Le changement climatique en est également la cause : en effet, des études montrent une moindre sensibilité du carpocapse aux substances actives lorsqu'ils sont soumis à des températures plus élevées (Knight, Witzgall 2013; Perrin 2022). Pour contrer ces faiblesses, il convient alors de tester de nouvelles souches et de nouvelles techniques d'application du virus de la granulose.

Par ailleurs, la mise en place de solutions innovantes agroécologiques favorisant la biodiversité naturelle est de plus en plus expérimentée ; c'est ainsi que la technique de l'augmentorium a été développée sur la famille des Tephritidae dans les années 2000 (Deguine et al. 2011). Enceinte fermée à l'exception d'une maille sur le dessus, l'objectif de cette structure est double puisqu'elle permet une [lutte par prophylaxie\\*](#) où les fruits véreux prélevés sur la parcelle sont stockés, et une [lutte biologique par conservation\\*](#) en favorisant le développement des [parasitoïdes\\*](#) provenant de ces fruits ainsi que leur fuite par la maille. Actuellement, très peu de travaux ont été réalisés pour adapter cette méthode aux Lépidoptères (Deguine et al. 2020) [16].

Cependant, ces techniques actuelles ne sont pas suffisantes pour maîtriser efficacement les populations sans produits phytosanitaires. Il est donc difficile pour les agriculteurs d'accepter ces solutions partiellement efficaces même si leur prise de conscience écologique se développe au point d'être enclins à tester ces innovations (Jang, Klungness, Mcquate 2007). Une optimisation de ces stratégies de protection s'avère alors nécessaire pour lutter contre le carpocapse.

### **De ce fait, la combinaison et l'intégration de différentes techniques de biocontrôle peuvent-elles permettre de maîtriser efficacement les populations de carpocapse sur pommier ?**

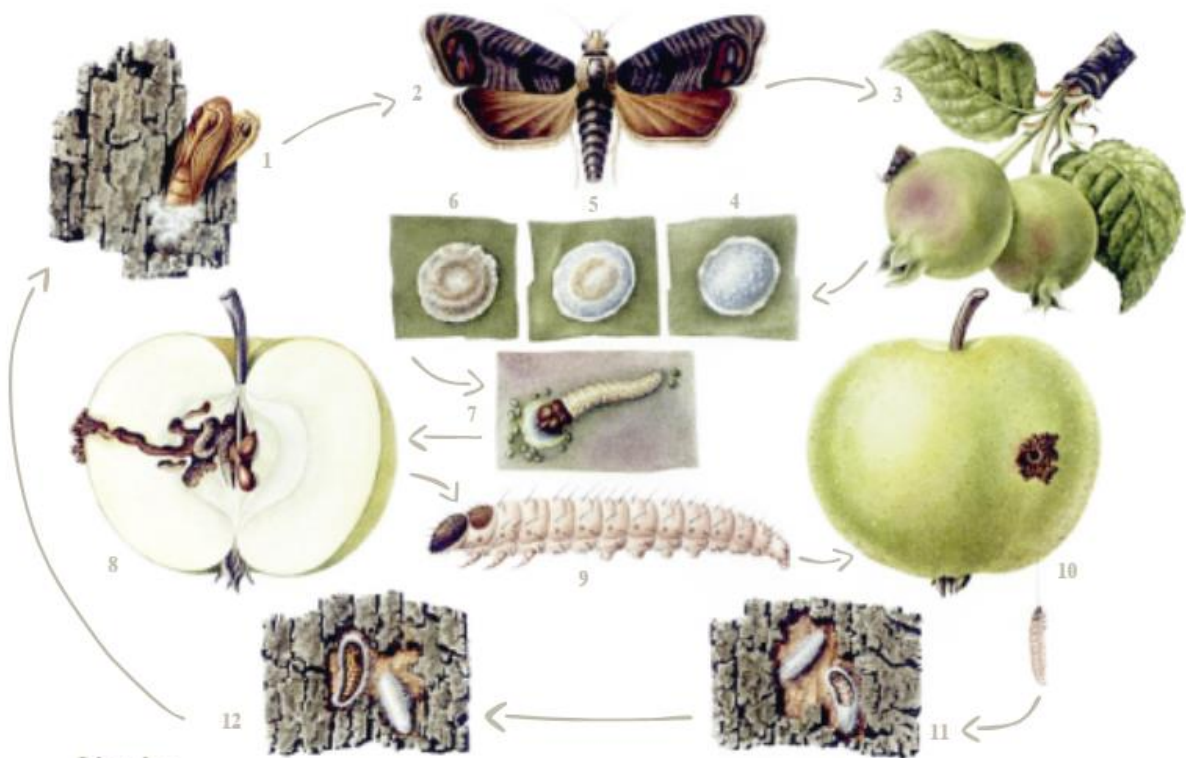
Pour répondre à cette question, notre sujet s'inscrit dans le plan d'urgence phytosanitaire fruits et légumes financé par le Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire ainsi que les professionnels de ces deux filières, à travers l'action du projet SPICY (Stratégie de Protection Intégrée contre *Cydia pomonella* L.). Les expérimentations sont réalisées à SudExpé site de Marsillargues (34) qui est une station d'expérimentation en recherche appliquée sur fruits et légumes en Occitanie, et dont le pôle Fruits à Pépins et Bio travaille sur la recherche de solutions alternatives aux produits phytosanitaires pour les fruits à pépins.

Les objectifs de notre projet sont ainsi d'améliorer l'efficacité du virus de la granulose en travaillant sur son application, mais également d'élaborer et de tester différentes stratégies de protection, et enfin de perfectionner le prototype de l'augmentorium pour l'ajuster aux Lépidoptères. Nous essayerons alors de répondre à trois questions :

- Comment optimiser l'application du virus de la granulose afin de réduire l'emploi des produits phytosanitaires ?
- Quelle est la stratégie la plus pertinente et efficace à proposer aux agriculteurs contre le carpocapse et qui raisonne l'utilisation des produits phytosanitaires ?
- Comment adapter la technique de l'augmentorium à la lutte contre le carpocapse ?



Figure 4 : Carpocapse adulte (à gauche), larve de carpocapse (au milieu) et chrysalide protégeant la larve (à droite)  
(Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 12/06/2024)



**Légende :**

- |   |  |
|---|--|
| 1 - Incubation du papillon              | 7 - Jeune larve en phase de pénétration du fruit |
| 2 - Papillon                            | 8 - Larve mangeant le fruit de l'intérieur       |
| 3 - Ponte d'œufs sur fruits et feuilles | 9 - Larve adulte                                 |
| 4 - Œuf                                 | 10 - Larve se laissant tomber le long du fil     |
| 5 - Embryon                             | 11 - Pupa dans cocon                             |
| 6 - Œuf vide                            | 12 - Cocon                                       |

Figure 5 : Détail du cycle d'une génération du carpocapse [15]

---

# ETAT DE L'ART

---

## I. Un ravageur problématique du pommier : *Cydia pomonella* L., le carpocapse des pommes et des poires

### A. Biologie et cycle de développement

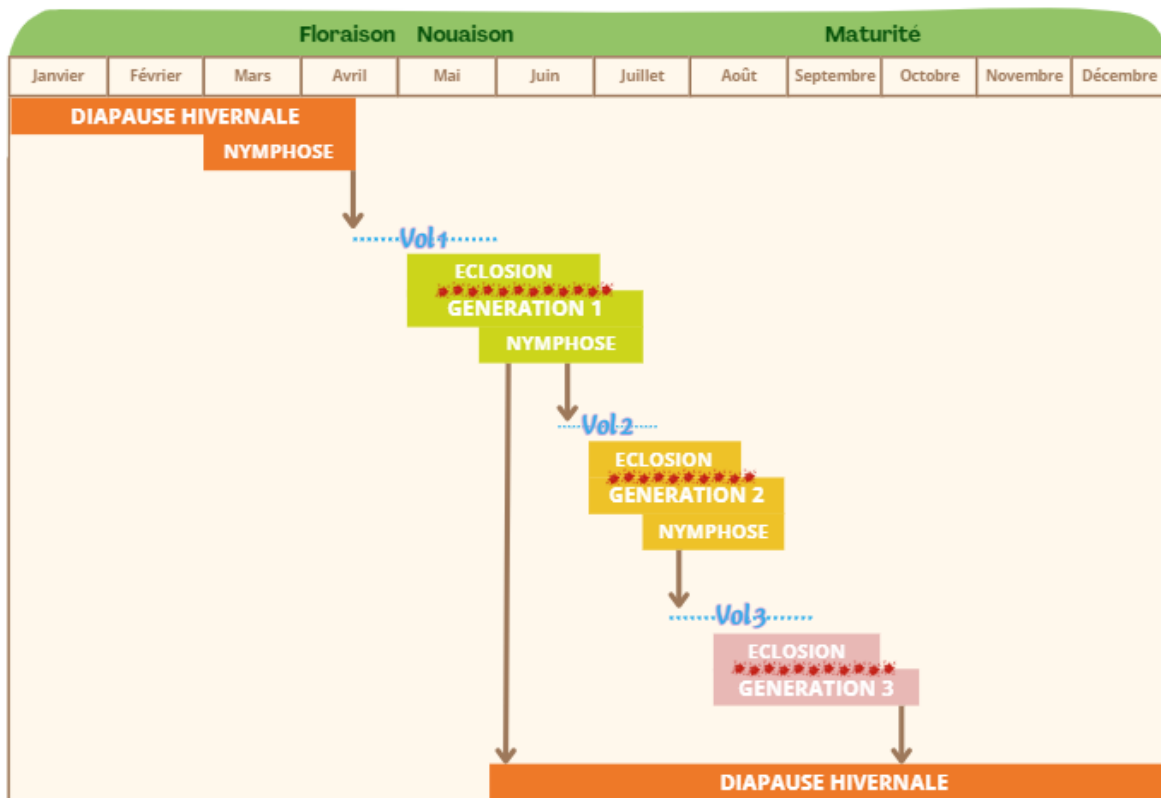
Le carpocapse du pommier, *Cydia pomonella* L., est un insecte Lépidoptère gris aux habitudes crépusculaires et nocturnes de la famille des Tortricidae, et dont les adultes mesurent entre 15 et 22 mm (Etalon 2010). Ravageur majeur des pommiers, il est pour autant capable de se développer sur d'autres plantes hôtes telles que les poiriers, les pêchers, ou les noyers. Comme le pommier domestique *Malus domestica* Borkh (Rosaceae), il est originaire d'Asie centrale (Maalouly Matar 2013; Trillot et al. 2002) *Figure 4*.

Pouvant voler jusqu'à 50 m de son verger d'origine, le carpocapse se reproduit de manière sexuée. Son cycle de vie est composé de générations annuelles estivales variant entre une à trois en fonction du climat, de l'année et de la plante-hôte. Dans le Sud-Est de la France, la phénologie du carpocapse se caractérise par une première génération, une deuxième génération partielle et quelques individus d'une troisième génération (Maalouly Matar 2013).

Les adultes de première génération apparaissent de façon échelonnée de mi-avril à juin. Les pontes se font à la surface des pommes ou sur les feuilles environnantes, environ quelques jours après l'accouplement lorsque la température dépasse 15°C, et l'incubation des œufs est également thermodépendante. Après éclosion, la larve néonate connaît d'abord une phase baladeuse où elle se déplace pendant deux à cinq jours en mordillant l'épiderme des fruits *Figure 5*. Ce stade est le plus exposé aux prédateurs et aux interventions humaines. Elle pénètre ensuite dans le fruit et se dirige vers le cœur en creusant une galerie et en consommant la pomme jusqu'aux pépins (Etalon 2010) [17]. Trois à quatre semaines plus tard, après y avoir réalisé quatre mues et mesurant désormais 20 mm, elle quitte le fruit en tant que larve mature de cinquième stade et tisse un cocon dans les anfractuosités du tronc ou dans le sol, dans lequel elle se nymphose\* ou entre en diapause\* (Maalouly Matar 2013) *Figure 5*. La diapause est ainsi induite principalement chez les larves au milieu de l'été par la décroissance de la durée du jour et la maturation des fruits, deux signes avant-coureurs témoignant de l'approche d'une saison défavorable (Boivin, Sauphanor 2007).

Les adultes émergent des cocons environ deux semaines plus tard pour les individus non diapausants. Les papillons de la première génération estivale donnent naissance à la deuxième génération estivale, et les individus non diapausants produisent à leur tour la troisième génération partielle en répétant le cycle de développement. Tous les individus de la troisième génération rentrent en diapause et n'émergeront qu'au printemps suivant après s'être nymphosés (Maalouly Matar 2013; Pajač et al. 2012).

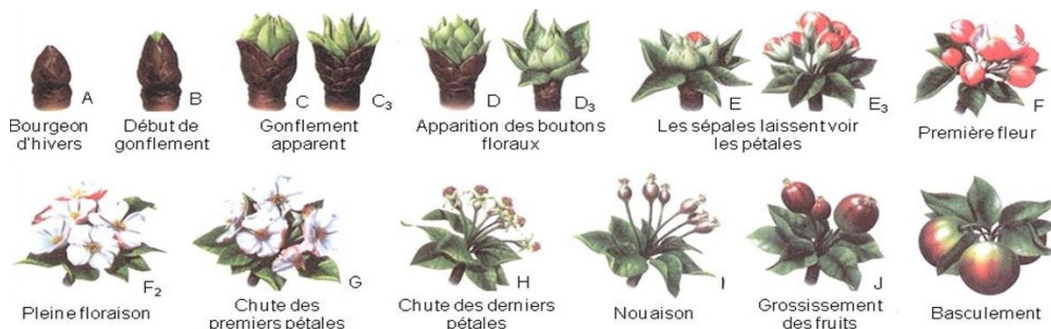
Chaque génération occasionne des dégâts. Des modèles phénologiques existent pour simuler les différents stades de développement du carpocapse, jugés pertinents pour le pilotage de la



**Légende :**

- GENERATION 1** Stade de développement du carpocapse    **Vol1** Vol du carpocapse
- Floraison** Stade phénologique du pommier    **\*\*\*\*\*** Période cible de lutte contre le carpocapse

*Figure 6 : Représentation des trois générations de carpocapse sur l'année dans l'Hérault (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 15/05/2024, d'après (Ingrmeau, GAB 22 2020)) à partir des relevés biologiques de la station en 2023 basés sur le modèle INRAE (Boivin, Sauphanor 2007) Annexe I*



*Figure 7 : Stades phénologiques du pommier (Fleckinger 1964)*



*Figure 8 : Dégâts de carpocapse sur pomme (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 10/06/2024)*

protection qui est ainsi anticipée, comme le modèle INRAE de Boivin et Sauphanor (Boivin, Sauphanor 2007) *Figure 6, Annexe 1*.

## B. Symptômes et dégâts du carpocapse sur pommier

Le pommier est vulnérable durant toute la période d'activité du carpocapse, principalement pendant les stades phénologiques nouaison et grossissement des fruits d'après la classification de Fleckinger. Cette dernière est utilisée pour connaître l'avancement de la végétation et pour positionner les interventions contre les bioagresseurs (Trillot et al. 2002; Fleckinger 1964) *Figure 7*.

C'est ainsi qu'après le stade baladeur, la larve pénètre la pomme au contact de deux fruits, d'un fruit et d'une feuille ou dans la cavité de l'œil (côté de la pomme opposé au pédoncule), créant ainsi une piqûre correspondant à une zone rongée brun-rouge due aux morsures superficielles de l'épiderme. La larve creuse ensuite une galerie en spirale jusqu'au centre du fruit où elle consomme les pépins. Elle rejette alors ses excréments dans la galerie, qui finissent par émerger à l'extérieur au niveau du point de pénétration sous forme de petites masses brunâtres souvent envahies par la moniliose ou la pourriture grise provoquée par *Botrytis cinerea* [18]. Si le dégât est superficiel, ces attaques bien remarquables sur les fruits verts se cicatrisent et forment des taches liégeuses (Ingrmeau, GAB 22 2020) [17] *Figure 8*.

L'absence de pépins accélère la maturation des fruits qui tombent alors précocement, entraînant une perte de récolte. Lorsque l'attaque intervient après la floraison, ces derniers peuvent également avorter. Dans tous les cas, les fruits endommagés même superficiellement sont déclassés et souvent retirés du marché, car ils n'ont aucune conservation à cause de la moniliose ou de la pourriture grise (Saint-Ges 2014). C'est pourquoi le seuil de tolérance au verger est de 1 à 2% de fruits attaqués par le carpocapse (Maalouly Matar 2013; Etalon 2010).

## C. L'impact du réchauffement climatique sur les générations

Le réchauffement climatique représente un enjeu de préoccupation majeur de notre siècle. En plus des impacts directs sur la production agricole, il pourrait être favorable à l'augmentation des populations de ravageurs des cultures (Perrin 2022).

C'est le cas pour le carpocapse : pour suivre la dispersion des pommiers à travers le monde, ce dernier a ajusté son cycle de vie aux conditions climatiques et trophiques en adaptant son temps de diapause. Ainsi, la présence actuelle de trois générations peut être corrélée au rallongement des conditions climatiques favorables à l'émergence\* des adultes (Maalouly Matar 2013). En effet, *Cydia pomonella* L. voit son temps de développement diminuer avec l'élévation des températures notamment printanières, ce qui accélérerait la fin de la diapause et donc l'émergence\* des premiers individus. Ainsi, d'après les modèles phénologiques, quatre générations pourraient apparaître dans le Sud-Est de la France si, au cours du développement du carpocapse, la température moyenne ne dépasse pas la valeur optimale de 32°C (Perrin 2022). La période à risque est alors étendue, et par conséquent la probabilité d'augmenter la quantité de dégâts, ce qui diminue les rendements.

De ce fait, face à l'enjeu majeur que représente cette problématique, il est nécessaire de développer des méthodes pertinentes et efficaces pour lutter contre le carpocapse.





*Figure 9 : Bande-piège cartonnée positionnée autour d'un tronc de pommier (à gauche) et piège à phéromones sexuelles Delta installé dans le verger et contenant un carpocapse prisonnier (à droite, cercle rouge) (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 19/06/2024)*



*Figure 10 : Filets Alt'Carpo installés en mono-rang (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 19/06/2024)*



*Figure 11 : Diffuseur à phéromones sexuelles installé autour d'un tronc pour la confusion sexuelle (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 19/06/2024)*

## II. Les méthodes de lutte actuelles contre le carpocapse

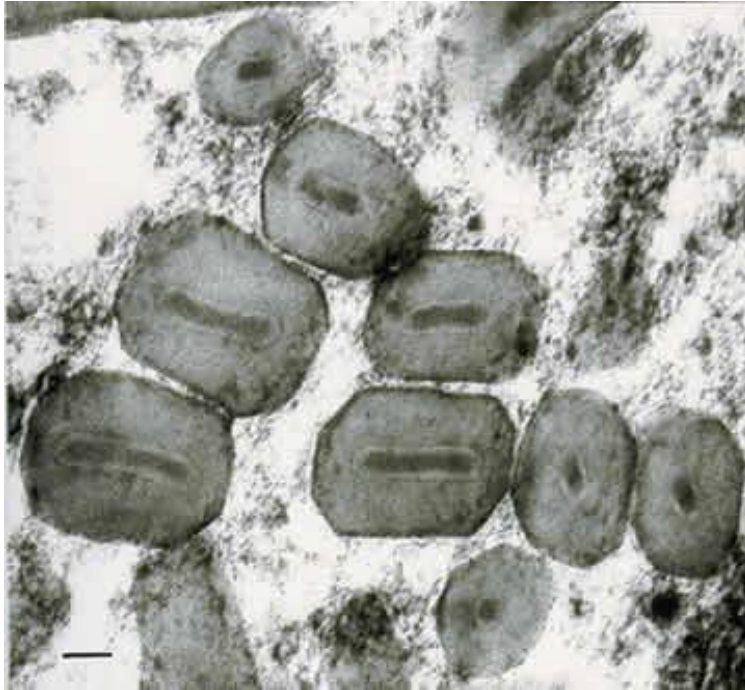
### A. Les principales méthodes employées

Pour lutter contre le carpocapse au cours des différentes générations, la première étape consiste en l'évaluation des populations au verger, associée à l'utilisation de modèles biologiques permettant le suivi du vol (Boivin, Sauphanor 2007). Des contrôles visuels sur un échantillonnage de fruits peuvent alors être réalisés, ainsi que la pose de bandes-pièges cartonnées autour des troncs d'arbre afin de recueillir les larves diapausantes et matures, et enfin la mise en place de pièges à phéromones sexuelles attractifs pour les mâles et composés d'un analogue synthétique de la phéromone sexuelle femelle, la codlémone (Maalouly Matar 2013; Agogué et al. 2024) *Figure 9*.

Une fois cette évaluation faite, une des premières méthodes utilisées est la lutte chimique\* avec l'emploi majoritaire de trois insecticides de synthèse comportant les substances actives suivantes : l'Emamectine (composé du produit Affirm®), le Chlorantraniliprole (composé du produit CORAGEN® sous dérogation) et le Spinosad (composé du produit Success™ 4, homologué en agriculture biologique\*) [19]. Réputés pour leur efficacité contre les Lépidoptères, ces insecticides, ciblés sur les stades sensibles du carpocapse avant qu'il ne pénètre dans le fruit (œufs et larves néonates), ont ainsi des activités ovo-larvicide et larvicide [19][20][21]. Cependant, à cause de leur toxicité pour les organismes et l'environnement (en particulier les mammifères, les organismes aquatiques ou les insectes non ciblés (ANSES 2010; Yano et al. 2001) [22]), il convient de limiter l'usage de ces derniers par des régulations strictes (Siegwart 2022). Leur positionnement est alors raisonné par la connaissance précise de la période d'occurrence des stades du carpocapse, déterminée à l'aide des modèles biologiques associés à l'observation des individus en vergers (Boivin, Sauphanor 2007). De plus, l'élévation des températures diminue l'efficacité du Spinosad et de l'Emamectine. Par conséquent, au vu du contexte climatique actuel, il convient de tenir compte de ces changements et d'adapter la lutte contre *Cydia pomonella* L. dans le futur (Perrin 2022).

En parallèle, des méthodes alternatives aux insecticides sont proposées : l'éclaircissage manuel et la destruction des fruits véreux pour limiter la population du ravageur, ainsi que le piégeage massif par les bandes-pièges cartonnées peuvent constituer une lutte prophylactique\* intéressante (Etalon 2010), ou encore la mise en place de filets de protection Alt'Carpo comme lutte physique (CA Tarn-et-Garonne, CA Lot-et-Garonne 2024) *Figure 10*. Ces derniers, par leur rôle de barrière physique, perturbent fortement le vol du carpocapse et limitent ainsi sa reproduction et son oviposition (Maalouly Matar 2013).

Par ailleurs, la confusion sexuelle, méthode de biocontrôle\*, est employée couramment dans les vergers. Reposant sur la diffusion régulière de codlémone, cette technique désoriente les mâles et perturbe ainsi la reproduction du carpocapse (Maalouly Matar 2013) *Figure 11*. Même si sa fiabilité est avérée notamment en grandes parcelles et permet de réduire fortement le nombre d'interventions insecticides, cette technique doit être complétée par une stratégie de lutte (CA Tarn-et-Garonne, CA Lot-et-Garonne 2024; Agogué et al. 2024). De plus, son efficacité avec le temps diminue, ce qui oblige désormais les agriculteurs à utiliser des pièges équipés de capsules COMBO contenant des kairomones en plus de la phéromone sexuelle dans les vergers confusés [23]. En effet, composée d'ester de poire, la kairomone semble être un nouvel attractif similaire à la codlémone et dont l'effet paraît additif avec cette dernière. Par sa nouveauté, on espère conserver l'efficacité dans les vergers en confusion (Sauphanor et al. 2005). Excepté ceci, le rôle principal de ces capsules plus attractives



*Figure 12 : Corps d'inclusion de Cydia pomonella Granulovirus (CpGV), vu au microscope électronique [24]*



*Figure 13 : Larve de carposid tuée par le CpGV (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 09/07/2024)*

est d'évaluer l'activité des adultes en permettant le suivi du vol malgré la présence de confusion [23]. De surcroît, une nouvelle technique a été développée consistant à pulvériser une solution liquide à base de phéromones sous forme de microcapsules. Facilement applicable, cette solution garantit une diffusion régulière et de longue durée et est adaptée aux parcelles de toutes tailles. En cours de développement, ce produit n'est pas encore homologué contre le carpocapse [25].

Une autre [méthode de biocontrôle](#)\* consiste à utiliser des nématodes entomopathogènes, vers microscopiques qui pénètrent dans la larve du carpocapse et libèrent des bactéries symbiotiques permettant, par la décomposition des tissus cellulaires, la multiplication des nématodes qui tuent l'hôte en quelques jours. Des études montrent une réduction notable des larves de carpocapse dans les vergers traités avec des nématodes entomopathogènes (Sforza, Kreiter 2008). Mais, ces parasites étant fragiles et utilisables seulement en conditions très humides et douces (Agogué et al. 2024), une solution innovante proposée par le projet Cap'Cydia est de les encapsuler en association avec des ingrédients attractifs et stabilisateurs afin d'augmenter leur résistance et leur stabilité dans les conditions environnementales [26].

Ces techniques ne constituent une stratégie pertinente que si elles sont combinées, permettant alors de limiter l'utilisation des insecticides. A ce titre, une autre [méthode de biocontrôle](#)\*, homologuée en [agriculture biologique](#)\*, est de plus en plus répandue dans la gestion du carpocapse : la lutte biologique à base de virus de la granulose, souvent associée à des produits alternatifs ou des [adjuvants](#)\* (CA Tarn-et-Garonne, CA Lot-et-Garonne 2024).

## B. Le virus de la granulose, un produit de biocontrôle homologué en agriculture biologique pouvant être combiné

Face à la demande grandissante en solutions de provenance naturelle pour remplacer les insecticides de synthèse, la mise sur le marché français d'un nouveau produit de biocontrôle plus respectueux de l'environnement, le *Cydia pomonella Granulovirus* (CpGV, commercialisé en 1991 et homologué) constitue une méthode en [agriculture biologique](#)\* intéressante contre le carpocapse (Siegwart 2022) [Figure 12](#). Réalisé à partir d'un virus d'origine naturelle (CA Tarn-et-Garonne, CA Lot-et-Garonne 2024), le virus de la granulose est spécifique aux Lépidoptères et agit par ingestion sur les larves néonates [Figure 13](#). Il existe plusieurs produits faits à base de différentes souches du virus, comme Carpovirusine® EVO 2 (isolat CpGV-R5) [19], ou Madex Pro® (isolat CpGV-V15) dont l'originalité réside dans sa dose, divisée par dix en comparaison à Carpovirusine® EVO 2 grâce à une plus forte concentration en virus (Andermatt France 2018) [19].

Cependant, ces produits ne sont pas assez puissants pour être utilisés seuls car les larves néonates ne sont vulnérables que sur une courte période. De plus, en raison de sa faible rémanence due à la sensibilité du virus à la lumière UV, des pertes d'efficacité sont observées lors de fortes chaleurs, en particulier dans le Sud (Knight, Witzgall 2013). Ce produit doit donc être combiné à d'autres méthodes de lutte telles que la confusion sexuelle, mais il peut également être associé à des produits alternatifs ou même des [adjuvants](#)\*. En effet, l'association de deux produits appelée mélange a pour optique d'obtenir un effet synergique entre les deux, là où l'adjuvantation permet d'augmenter l'efficacité ainsi que la durée d'action du traitement en lui-même (Andermatt France 2018). A ce titre, trois produits phytosanitaires utilisables en [agriculture biologique](#)\* peuvent être combinés au virus de la granulose : l'[adjuvant](#)\* CITROLE-A, et les produits Calsun® et Blossom Protect™.

CITROLE-A est une huile minérale paraffinique qui améliore la pénétration du virus de la granulose par sa grande capacité de diffusion et qui agit par asphyxie en recouvrant d'une pellicule le corps des

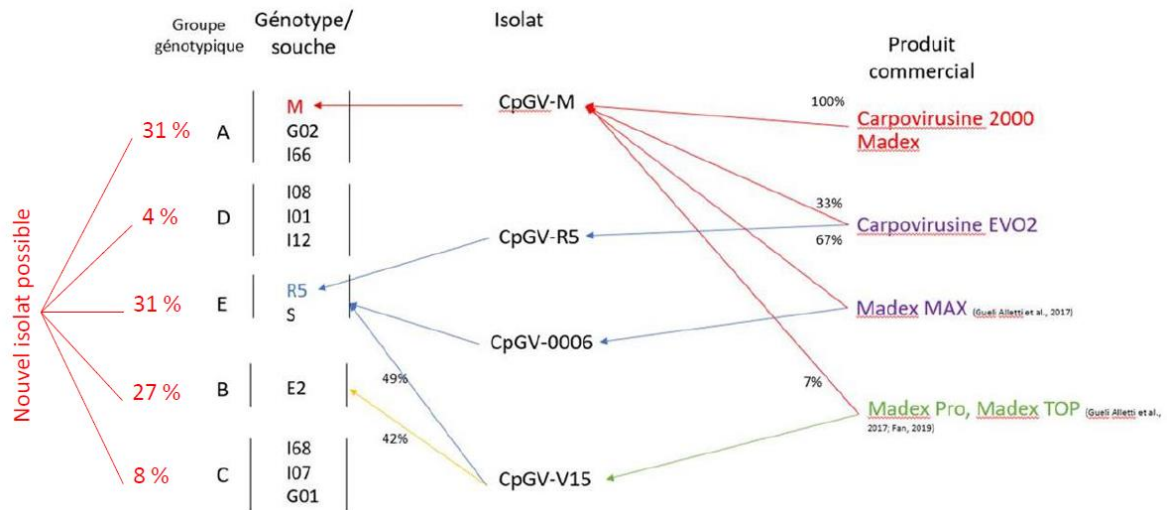


Figure 14 : Composition des produits commerciaux à base de virus de la granulose (CpGV) disponibles et en cours d'homologation (INRAE 2023)

insectes. Très peu toxique pour l'organisme et l'environnement, elle n'est pas thermodépendante [19][27].

Calsun<sup>®</sup> est quant à lui une innovation à base de carbonate de calcium micronisé jouant le rôle d'une barrière physique : en créant un film protecteur homogène sur le végétal, cette substance à faible risque favorise l'assimilation du calcium tout en le protégeant des coups de soleil. Cela préserve également indirectement des dégâts des ravageurs : en effet, cette pellicule modifie la reconnaissance de la plante hôte et son attractivité, et perturbe notamment le déplacement du carpocapse à la surface et par conséquent sa ponte (Natural Plant Protection, UPL 2024) [28].

Enfin, Blossom Protect<sup>™</sup> est un produit à base d'une levure antagoniste, *Aureobasidium pullulans*, utilisé à l'origine comme lutte biologique contre le feu bactérien (Zeng et al. 2023). Il a été démontré que ces levures mutualistes, partie essentielle du régime alimentaire des larves du carpocapse, stimulent l'alimentation de ces dernières à l'aide de métabolites volatiles et ciblent l'ingestion du virus. Ainsi, cette adjuvantation augmente la mortalité des larves néonates (Knight, Witzgall 2013).

De ce fait, ces combinaisons du virus de la granulose constituent une solution encourageante.

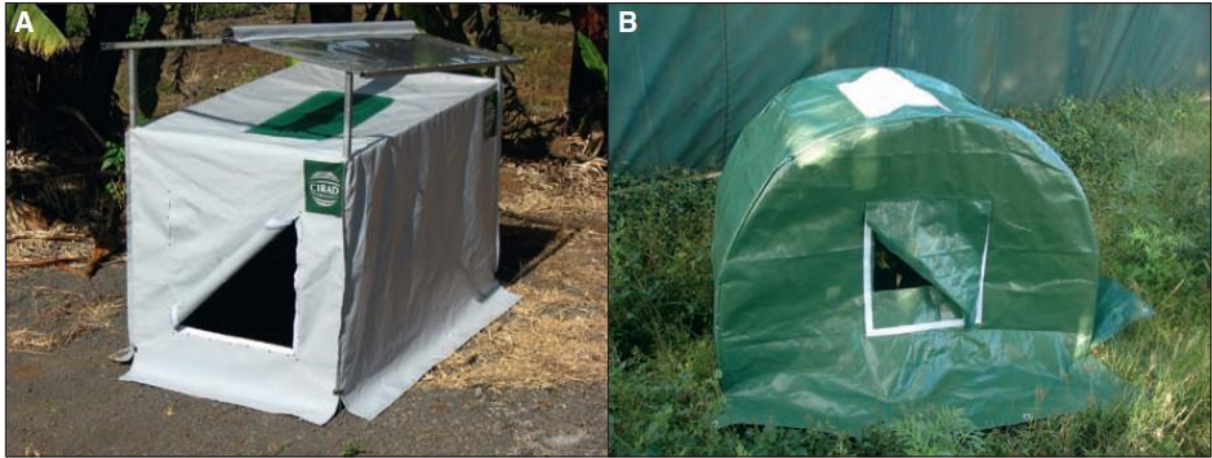
### C. Le problème de l'apparition de résistances au virus de la granulose

L'utilisation massive des produits phytosanitaires a cependant mené à l'apparition de résistances croisées à la majorité des insecticides chimiques employés dès 1990, y compris le virus de la granulose en 2004 et en 2020 (résistance aux trois isolats commercialisés CpCG-M, CpGV-V15 et CpGV-R5), mettant en échec les stratégies de protection contre le carpocapse notamment dans le Sud-Est (Siegwart et al. 2020; Siegwart 2022; Sauphanor et al. 2006).

De plus, cette résistance altère la physiologie du carpocapse qui voit sa fécondité diminuer et son développement larvaire s'allonger, ce qui retarde ses dates d'apparition au cours des générations. L'individu résistant a par ailleurs tendance à entrer en diapause, amenant à l'abondance d'individus sensibles en troisième génération (Boivin, Sauphanor 2007; Sauphanor et al. 2006; Siegwart 2022). Ainsi, il est important de prendre en compte ces modifications phénologiques afin de mettre en place une stratégie efficace de gestion des résistances.

La tactique actuelle consiste à favoriser la diversité génétique des isolats puis alterner les produits, comme Carpovirusine<sup>®</sup> EVO 2 et Madex<sup>®</sup> Pro afin d'éviter le développement de résistances spécifiques qui finissent par se généraliser. En effet, à partir des sources de variabilité naturelle présentes, le fait de rechercher de nouvelles souches pour diversifier le patrimoine génétique permet de sélectionner des isolats efficaces sur les individus résistants, et de proposer ainsi de nouvelles solutions (Siegwart et al. 2020; Siegwart 2022). Cette réflexion illustre l'hypothèse de biologie évolutive de Leigh van Valen dite « la reine rouge » : « l'évolution permanente d'une espèce est nécessaire pour maintenir son aptitude face aux évolutions des espèces avec lesquelles elle coévolue » (van Valen 1977). Ainsi, si un système de coévolution systématique n'est pas établi, la recherche devra constamment développer de nouveaux produits. Partant de ce principe, une nouvelle souche prometteuse de virus de la granulose a été sélectionnée pour pallier cette résistance et est en cours d'homologation (Andermatt France 2018; INRAE 2023) *Figure 14*.

Face aux enjeux liés à l'utilisation excessive du virus de la granulose et dans un souci d'étendre la gamme d'outils alternatifs exploitables, une technique innovante pouvant être combinée aux autres solutions est en cours de développement pour poursuivre l'évolution de la lutte contre le carpocapse : l'augmentorium.



*Figure 15 : Exemples de prototypes d'augmentorium en forme de tente (Deguine et al. 2011)*



*Figure 16 : Test de plusieurs contenants pour un nouveau prototype d'augmentorium (Siegwart 2024)*

### III. L'émergence d'une technique de lutte innovante : l'augmentorium

#### A. Une méthode en développement à but prophylactique ...

L'augmentorium est une technique qui a tout d'abord été développée à Hawaii et à la Réunion sur la famille des Tephritidae. S'inscrivant dans un processus de protection agroécologique des cultures, la structure est conçue initialement en forme de tente, mais sa configuration est plus généralement une enceinte grillagée de capacité suffisante pour permettre le développement des différents stades du ravageur qu'elle emprisonne (Desurmont et al. 2023; Herz et al. 2020) *Figure 15*. Elle a ainsi pour but de recueillir les fruits infestés tout en empêchant les ravageurs de s'enfuir par la présence d'un filet, dont l'ouverture des mailles est suffisamment petite pour les séquestrer lors de leur émergence\*. De ce fait, cet outil permet une lutte par prophylaxie\* (Herz et al. 2020; Jang, Klungness, Mcquate 2007; Deguine et al. 2011).

Son objectif est d'être facilement constructible et peu onéreux afin d'inciter les agriculteurs à le mettre en place (Herz et al. 2020; Deguine et al. 2011). C'est ainsi qu'à Hawaii l'augmentorium a connu un réel succès auprès des producteurs qui, au cours d'essais de démonstration, l'ont utilisé pour l'assainissement et l'élimination des fruits piqués, ce qui est particulièrement intéressant lorsque la mécanisation du processus est prohibitive (Jang, Klungness, Mcquate 2007). Il a même été question d'envisager l'utilisation de ce dernier pour la production de compost, par l'ajout de matière organique à une grande quantité de fruits piqués (Deguine et al. 2011). Cependant, même si leur intérêt pour cette technique est grandissant grâce à son efficacité, sa simplicité et son moindre coût, l'augmentorium reste actuellement peu utilisé dans le monde et peu de travaux y sont consacrés (Deguine et al. 2011).

Toutefois, quelques études commencent à être menées pour adapter ce prototype aux Lépidoptères : à l'INRAE, le projet ALTO a expérimenté un modèle d'augmentorium dans un verger sans produits phytosanitaires, dans lequel des bandes-pièges cartonnées ont été insérées pour réaliser un piégeage de masse et ce sans aucun ajout de fruits piqués (INRAE Gotheron 2020). Le projet SuzoCarpo, également mené par l'INRAE, teste pour sa part différents contenants (Siegwart 2024) *Figure 16*. Dans tous les cas, le premier objectif de cette méthode dans la lutte contre le carpocapse est d'empêcher « la ré-infestation de l'agroécosystème par une nouvelle génération d'adultes qui émergent dans l'augmentorium » (Siegwart 2024).

#### B. ... Et permettant la lutte biologique par conservation et acclimatation : intégration du parasitoïde *Mastrus ridens*

Face à la volonté de diminuer l'emploi des insecticides de synthèse, le recours aux ennemis naturels du carpocapse comme agents de lutte biologique est de plus en plus étudié. A ce titre, en plus de son rôle majeur dans la prophylaxie, l'augmentorium permet aussi de réaliser une lutte biologique par conservation\* en favorisant l'enrichissement naturel des populations de parasitoïdes\* (Deguine et al. 2011). En effet, la structure doit être conçue de telle sorte qu'elle permette la survie et la multiplication des ennemis naturels spécifiques du ravageur emprisonné, mais également la fuite de ces derniers à travers une maille adaptée, renforçant ainsi le contrôle biologique des populations de ravageurs sur l'environnement (Desurmont et al. 2023; Herz et al. 2020). Il convient donc de





Figure 17 : *Mastrus ridens*, parasitoïde exotique et spécifique du carpocapse [29]

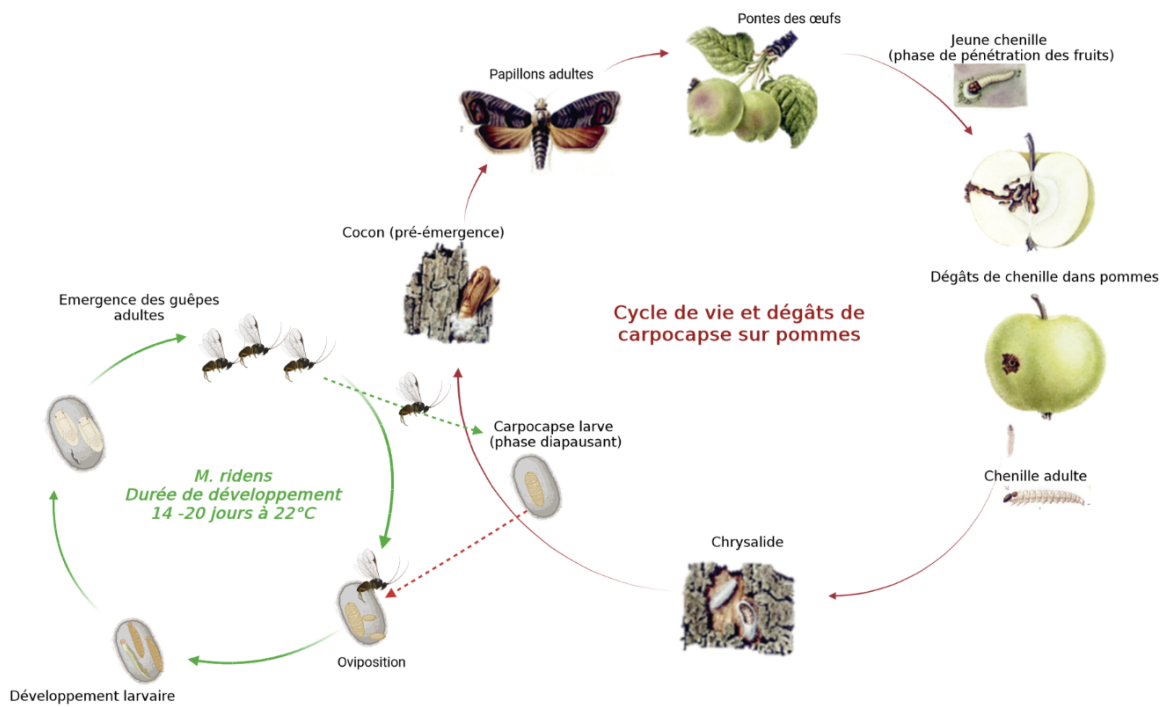


Figure 18 : Cycle de vie du carpocapse en relation avec le cycle de *Mastrus ridens* [29]

sélectionner une dimension de maillage permettant la restriction de l'hôte mais le passage de l'ennemi naturel (Jang, Klungness, Mcquate 2007).

Dans le Sud-Est de la France, la stratégie de lutte contre *Cydia pomonella* L. implique l'exploitation de ses ennemis naturels pour une gestion intégrée du ravageur. Des études ont révélé que les [parasitoïdes](#)\* pouvaient être flexibles au niveau de leur spécificité. Ainsi il convient d'explorer les interactions entre les [parasitoïdes](#)\* et d'autres hôtes, et l'impact des plantes-hôtes sur la reconnaissance des hôtes (Maalouly Matar 2013). Il est malgré tout nécessaire de choisir attentivement les espèces de [parasitoïdes](#)\* à introduire en priorisant ceux avec un fort taux de parasitisme (Mills 2005). Dans cette optique, des travaux en laboratoire sont en cours pour déterminer la taille de la maille adéquate permettant de garder prisonniers les carpocapses tout en laissant s'échapper les [parasitoïdes](#)\* (Desurmont et al. 2023; Herz et al. 2020), mais cette technique n'est encore que très peu développée sur les Lépidoptères.

A ce titre, le projet Bioccyd-Mastrus de 2019 de l'INRAE s'est intéressé à un [parasitoïde](#)\* exotique du carpocapse originaire d'Asie centrale dans le but de favoriser son installation pérenne et donc le contrôle durable du ravageur : *Mastrus ridens* [Figure 17](#). Choisi pour sa spécificité au carpocapse (dont le taux de parasitisme est largement supérieur à celui des espèces locales françaises), l'introduction de cet Hyménoptère de la famille des Ichneumonidae a permis de mettre en place une [lutte biologique par acclimatation](#)\* car, une fois établi, *Mastrus ridens* peut se disperser naturellement et contrôler le carpocapse sur le territoire. Pour ce faire, l'adulte femelle pond plusieurs œufs sur la larve hôte après l'avoir localisée grâce aux phéromones d'agrégation émises par cette dernière lors du tissage de son cocon. Ainsi, ce [parasitoïde](#)\* s'attaque uniquement au stade pré-nymphal diapausant de *Cydia pomonella* L., ce qui permettrait de réduire drastiquement la population hivernale du carpocapse [7].

Du fait de sa nature exotique, les lâchers de *Mastrus ridens* ne se réalisent pour l'instant que dans le cadre expérimental, sous la tutelle de l'INRAE qui possède actuellement les autorisations de lâcher [7] [Figure 18](#). L'institut débute également les expérimentations sur le choix des mailles ainsi que le comportement du [parasitoïde](#)\* pour améliorer le prototype de l'augmentorium dans le cadre de la lutte contre le carpocapse (Siegwart 2024).

## C. [L'avenir de la technique dans le climat futur](#)

Les auxiliaires naturels sont également impactés par le réchauffement climatique, d'une part à travers un effet croisé de la température et de l'utilisation d'insecticides pouvant provoquer leur déclin : c'est ainsi que la hausse des températures a accru la toxicité du Spinosad et de l'Emamectine sur *Mastrus ridens*. D'autre part, le succès de ces ennemis naturels dépend non seulement de leur optimum thermique jouant un rôle dans leur fitness, mais également de leur synchronisation avec leur hôte cible. De la même façon que le carpocapse, *Mastrus ridens* voit son temps de développement diminuer (avec un optimum compris entre 25°C et 28°C, inférieur à celui de *Cydia pomonella* L.), ce qui le désynchronise légèrement du carpocapse, mais sans pour autant que la hausse des températures ait un impact sur sa fertilité ou son potentiel de parasitisme (Perrin 2022).

Ainsi, dans le cadre de la lutte biologique contre le carpocapse, la performance du [parasitoïde](#)\* devrait rester satisfaisante dans le climat futur (Perrin 2022), même au sein de l'augmentorium où la température devrait être plus élevée à cause de son design retenant la chaleur [30]. Associée au concept de l'augmentorium, cette méthode de lutte semble plutôt prometteuse, mais il est nécessaire de l'optimiser.

**Tableau 1 : Description des différentes modalités de l'essai factoriel et du positionnement des traitements dont le seuil est déclenché à l'aide du modèle INRAE (Boivin, Sauphanor 2007) (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 15/05/2024)**

Modalité	T1 25/04/24	T2 03/05/24	T3 10/05/24	T4 17/05/24	T5 24/05/24	T6 29/05/24	T7 07/06/24	T8 14/06/24	T9 21/06/24
M0 : Témoin non traité	X	X	X	X	X	X	X	X	X
M1 : Carpovirusine® EVO 2	X	1 L/ha	1 L/ha	1 L/ha	1 L/ha	1 L/ha	1 L/ha	1 L/ha	1 L/ha
M2 : Madex® Pro	X	0,1 L/ha	0,1 L/ha	0,1 L/ha	0,1 L/ha	0,1 L/ha	0,1 L/ha	0,1 L/ha	0,1 L/ha
M3 : Madex nouvelle souche	X	0,1 L/ha	0,1 L/ha	0,1 L/ha	0,1 L/ha	0,1 L/ha	0,1 L/ha	0,1 L/ha	0,1 L/ha
M4 : Carpovirusine® EVO 2 + CITROLE-A	X	1 L/ha + 2,2 L/ha	1 L/ha + 2,2 L/ha	1 L/ha + 2,2 L/ha	1 L/ha + 2,2 L/ha	1 L/ha + 2,2 L/ha	1 L/ha + 2,2 L/ha	1 L/ha + 2,2 L/ha	1 L/ha + 2,2 L/ha
M5 : Carpovirusine® EVO 2 + Blossom Protect™	X	1 L/ha + 1,5 kg/ha	1 L/ha + 1,5 kg/ha	1 L/ha + 1,5 kg/ha	1 L/ha + 1,5 kg/ha	1 L/ha + 1,5 kg/ha	1 L/ha + 1,5 kg/ha	1 L/ha + 1,5 kg/ha	1 L/ha + 1,5 kg/ha
M6 : Carpovirusine® EVO 2 + Calsun®	Calsun® seul 20 L/ha	1 L/ha + 20 L/ha	1 L/ha + 20 L/ha	1 L/ha + 20 L/ha	1 L/ha + 20 L/ha	Carpovirus ine® EVO 2 seule 1 L/ha	Carpovirus ine® EVO 2 seule 1 L/ha	Carpovirus ine® EVO 2 seule 1 L/ha	Carpovirus ine® EVO 2 seule 1 L/ha

---

# PARTIE I : AMELIORATION DE L'UTILISATION DU VIRUS DE LA GRANULOSE : ESSAI FACTORIEL

---

Comment optimiser l'application du virus de la granulose afin de réduire l'emploi des produits phytosanitaires ?

## I. Objectif et hypothèses

Suite aux pertes d'efficacité du virus de la granulose recensées dans le grand bassin Sud (Knight, Witzgall 2013), l'objectif de cet essai factoriel\* est de tester à l'échelle de la parcelle élémentaire\* plusieurs façons de renforcer son efficacité afin de maîtriser la première génération du carpocapse, étape décisive à partir de laquelle découlera les individus des générations suivantes. Ainsi, par des associations et des adjuvantations du produit ou simplement par le test de différentes souches, l'ambition est de maintenir la pression sous le seuil de tolérance de 1 à 2% de fruits attaqués commercialement acceptable (Maalouly Matar 2013), sans avoir recours aux insecticides de synthèse.

Nous décidons alors de tester plusieurs solutions : tout d'abord, l'efficacité de deux produits aux souches distinctes utilisés dans les mêmes conditions, à savoir Carpovirusine® EVO 2 et Madex® Pro, ainsi que la nouvelle souche de Madex d'Andermatt dont la composition a été étudiée par l'INRAE (Andermatt France 2018; INRAE 2023) [19] *Figure 14*. Nous expérimentons également l'adjuvantation de Carpovirusine® EVO 2 avec CITROLE-A, et son association avec Blossom Protect™ et Calsun® (Zeng et al. 2023) [19][28], supposées améliorer l'efficacité et la durée d'action du traitement *Tableau 1*. L'objectif de ces différentes modalités est de comparer l'efficacité de deux produits et de la nouvelle souche seuls, puis de déterminer un potentiel effet additif de l'association et/ou de l'adjuvantation du virus.

Nous nous attendons alors à ce que la nouvelle souche soit plus performante que les souches composant Carovirusine® EVO 2 et Madex® Pro sujettes à des résistances, et à observer une augmentation d'efficacité du virus de la granulose par l'ajout des différentes solutions de biocontrôle.

## II. Matériel et méthodes

### A. Gestion de l'essai

La parcelle d'essai, plantée en 2004 est située sur le site de SudExpé. Elle est choisie car elle est conduite en agriculture biologique\* avec une densité de 0,42 ha. L'essai est mené sur la variété Story® (surgreffée sur le porte-greffe M9 EMLA en 2015) sensible au carpocapse du fait de son appétence et de la durée de son cycle (Bio de PACA, GRAB et GRCETA de Basse Durance 2017).

La parcelle est protégée par confusion sexuelle Ginko® à 500 diffuseurs/ha mise en place le 3 avril 2024 (Agogué et al. 2024). En parallèle, le vol du carpocapse est surveillé aux abords de la

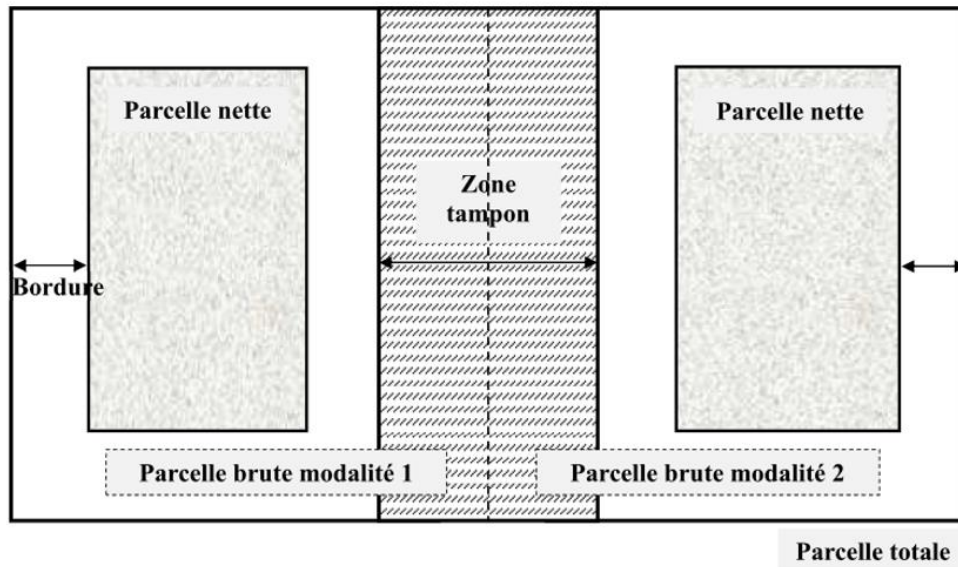


Figure 19 : Représentation simplifiée du concept de parcelle brute, parcelle nette, bordure et zone tampon (Haudemard, Martouret 1987)

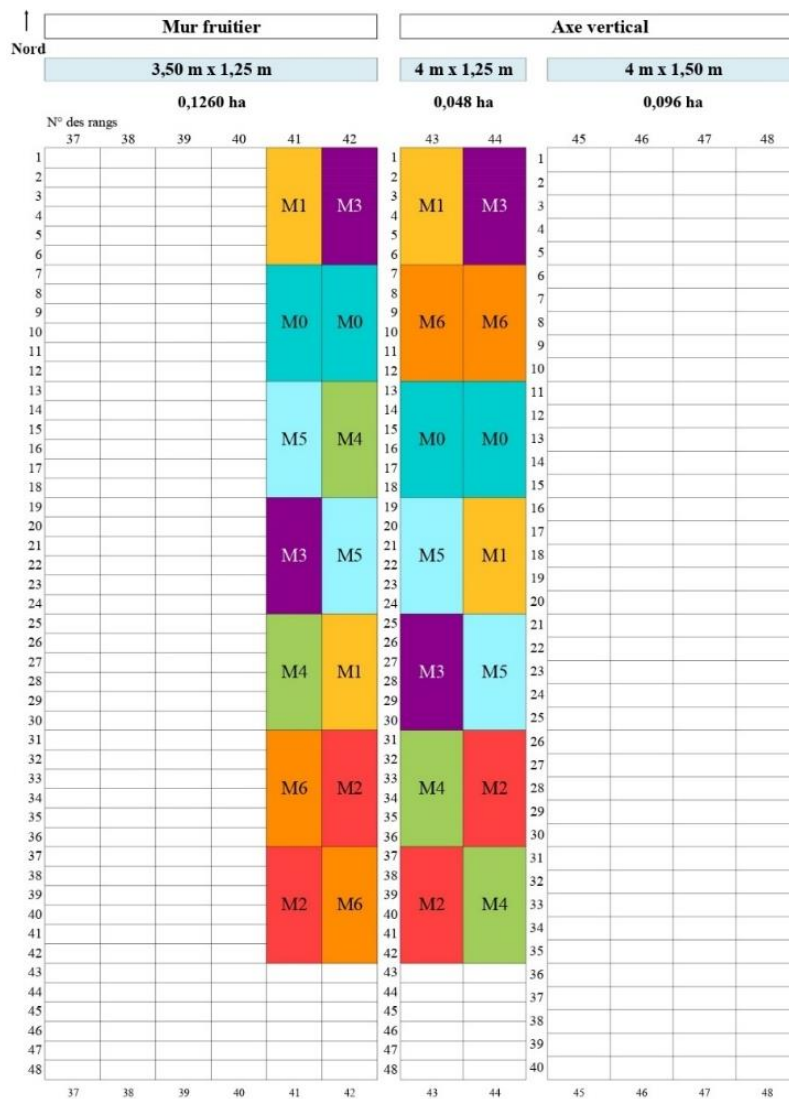


Figure 20 : Plan d'expérimentation de l'essai factoriel (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 15/07/2024)

parcelle grâce à deux systèmes de piégeage mis en place le 25 mars 2024 et relevés chaque semaine : un piège Delta avec une capsule contenant la codlémone, faisant office de contrôle négatif prouvant l'efficacité de la confusion, et un piège Delta équipé d'une capsule COMBO. Ce dernier, faisant office de contrôle positif permettant de piéger le premier individu essentiel pour lancer le modèle INRAE (Boivin, Sauphanor 2007), assure par la suite la surveillance du vol du ravageur [23].

Les différents traitements testés sont réalisés avec un appareil pneumatique à dos motorisé STIHL® à 500 L/ha, et le premier est positionné durant le vol du carpocapse, puis le second à 1% des éclosions des œufs prévues par le modèle INRAE (Boivin, Sauphanor 2007). Pour suivre l'évolution des pratiques de préconisation des firmes (Andermatt France 2023), il est décidé qu'en 2024 les traitements suivants soient réalisés tous les sept jours et non plus les dix jours. Le temps entre chaque traitement peut en outre être adapté si les conditions climatiques ne sont pas favorables. De plus, si la pression est trop forte, le produit Success™ 4 est utilisé. Enfin, la fin de l'essai est marquée par la fin de la première génération d'après le modèle INRAE (Boivin, Sauphanor 2007).

Enfin, les conditions météorologiques sont relevées durant l'essai sur la station météo à proximité de la parcelle.

## B. Dispositif expérimental et modalités

En 2024, sept modalités sont mises en place selon un cahier des traitements spécifiques et testées : le témoin non traité, Carovirusine® EVO 2, Madex® Pro, la nouvelle souche d'Andermatt, Carovirusine® EVO 2 adjuvanté à CITROLE-A, Carovirusine® EVO 2 associé à Blossom Protect™ et Carovirusine® EVO 2 associé à Calsun®. Une première application de Calsun® seul permet alors d'empêcher la ponte (Andermatt France 2018; INRAE 2023; Zeng et al. 2023) [19][28] *Tableau 1*. Le dispositif expérimental est adapté de la méthode CEB-018 « méthode d'essai d'efficacité pratique des préparations destinées à lutter contre le carpocapse des pommes et des poires, *Cydia pomonella* L. » (Haudemard, Martouret 1987). L'essai factoriel\* est découpé aléatoirement selon un dispositif dit bloc de Fisher à quatre blocs correspondant à quatre rangs, chacun composé de sept parcelles élémentaires brutes de six arbres représentant chacune une modalité (Havard et al. 2017) *Figure 19*.

Si tous les arbres de la parcelle reçoivent le même traitement, seuls les quatre arbres centraux constituant la parcelle nette sont comptabilisés pour les notations. En effet, la méthode CEB-018 préconise des parcelles nettes de trois arbres au minimum sans arbre de garde, mais nous ajoutons un arbre central pour affiner la notation et réduire l'hétérogénéité potentielle, et deux arbres de bordure afin de limiter les effets potentiels de la dérive des traitements entre deux parcelles brutes *Figure 20*.

## C. Observations réalisées et variables d'étude

### 1. Observations réalisées

Au sein de cet essai, des comptages de 50 fruits par arbre sont réalisés sur chaque arbre central (soient 200 fruits par parcelle nette), pris sur le tiers supérieur de l'arbre en priorité puis à hauteur d'homme pour compléter. Lorsque les fruits comptés sont piqués par le carpocapse, ils sont systématiquement tranchés afin de vérifier la présence de la larve, puis éliminés du dispositif (Haudemard, Martouret 1987). Les 50 fruits comptabilisés sont alors séparés en trois classes, adaptées des catégories définies par l'échelle de Baggiolini et Grob *Annexe 2*, et simplifiées :

- Classe 1 : les fruits sont sains et ne présentent aucune morsure ou dégât liés au carpocapse
- Classe 2 : les fruits présentent une piqûre souvent superficielle et aucune larve vivante n'est



*Figure 21 : Dégâts de carpocapse de classe 2 (au-dessus) et de classe 3 (en-dessous) (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 01/07/2024)*

retrouvée ; la piqûre est alors dite sèche

- Classe 3 : les fruits présentent une piqûre profonde et une larve vivante est retrouvée à l'intérieure ; la piqûre est alors dite active *Figure 21*

Pour travailler sur l'intégralité de la première génération, quatre dates de comptage sont réalisées : la première à 10% des éclosions, la deuxième à 50% des éclosions, la quatrième à 90% des éclosions, et la dernière à 99% des éclosions d'après le modèle INRAE (Boivin, Sauphanor 2007).

En parallèle, les adultes emprisonnés dans le piège Delta avec une capsule contenant la codlémone et dans celui équipé d'une capsule COMBO, présents aux abords de la parcelle, sont comptés et ôtés deux fois par semaine.

## 2. Variables d'étude

A la suite des comptages réalisés, nous obtenons les variables suivantes :

- X1, le nombre de fruits sains (classe 1)
- X2, le nombre de fruits présentant des piqûres sèches (classe 2)
- X3, le nombre de fruits présentant des piqûres actives (classe 3)

Ces variables permettent de calculer plusieurs proportions, pour chaque bloc de chaque modalité et pour chaque date de comptage :

- Y1, la proportion de fruits attaqués :  $Y1 = \frac{X2+X3}{X1+X2+X3}$
- Y2, la proportion de fruits présentant des piqûres sèches :  $Y2 = \frac{X2}{X1+X2+X3}$
- Y3, la proportion de fruits présentant des piqûres actives :  $Y3 = \frac{X3}{X1+X2+X3}$

Enfin, le nombre d'adultes capturés dans le piège Delta contenant la capsule COMBO est mis en relation avec les données météorologiques, le positionnement des traitements et comptages et le modèle INRAE des éclosions et de la présence des adultes (Boivin, Sauphanor 2007).

## D. Analyses statistiques

L'analyse statistique des résultats est réalisée sur le logiciel RStudio avec la version 4.4.2 de R. Après l'exploration des données, les variables Y1 à Y3 (étant toutes des proportions) sont respectivement analysées à l'aide d'un modèle linéaire généralisé mixte adapté à l'étude d'une proportion qui est une réponse quantitative continue et bornée entre 0 et 1. Pour chacune des variables réponses, les facteurs 'Date' et 'Modalite' ainsi que l'interaction entre les deux sont pris en compte en tant que facteurs fixes afin d'étudier leur impact sur les proportions de fruits attaqués (Y1), de fruits appartenant à la classe 2 (Y2) et la classe 3 (Y3). Le facteur 'Bloc' est par ailleurs défini comme un facteur aléatoire afin de prendre en compte l'impact potentiel de la configuration du plan d'expérimentation sur les variables réponses. Ce modèle comprend donc des séries appariées et utilise la fonction *glmmTMB*. L'effet des variables explicatives est alors testé par un test de Wald à l'aide de la fonction *Anova* (Hervé 2021) *Annexe 3, Annexe 4*.

Les postulats de chaque test statistique utilisés pour mettre en place ce modèle sont vérifiés en amont, et la qualité d'ajustement du modèle est calculée à l'aide de l'indice d'Akaike *AIC*, du critère d'information bayésien *BIC* et du coefficient de détermination *R*. De plus, la valeur seuil utilisée pour tous les tests est de 0,05 correspondant à un niveau de confiance de 95%, avec comme hypothèses nulles celles



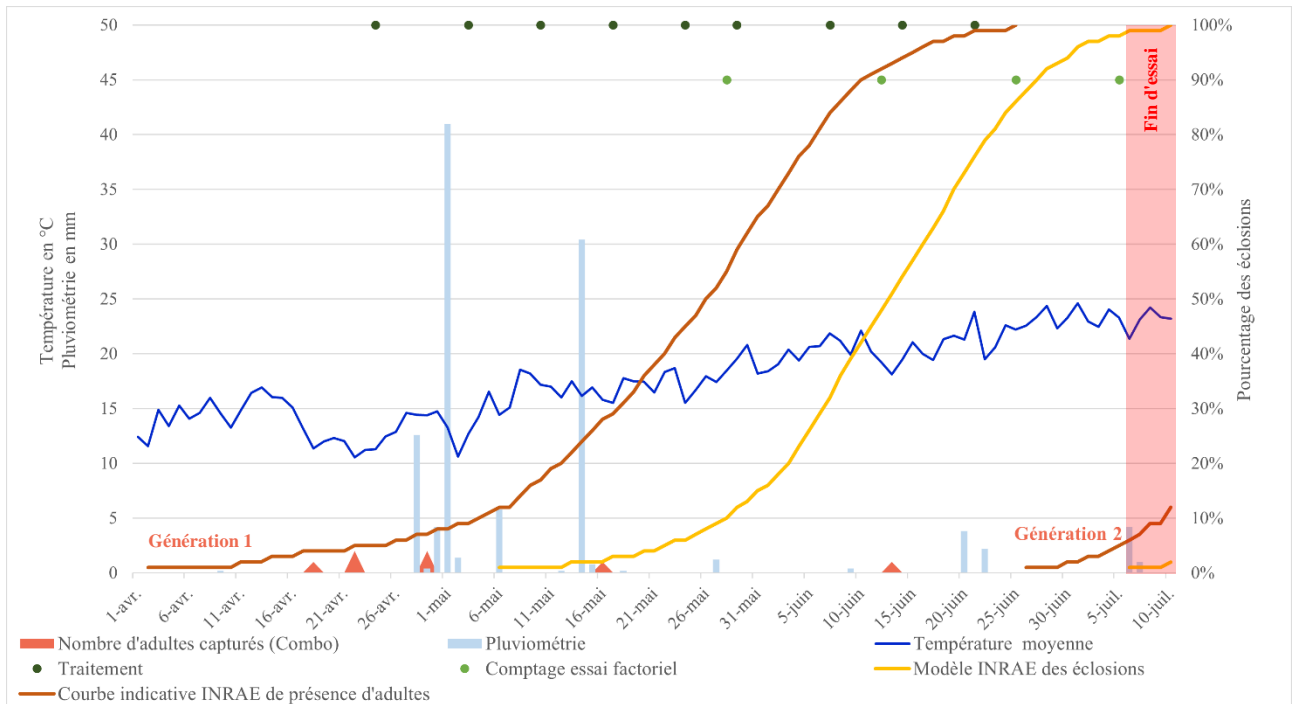


Figure 22 : Représentation au cours de l'essai factoriel des conditions météorologiques, des prédictions actualisées du modèle INRAE (Boivin, Sauphanor 2007) ainsi que des captures au sein des pièges Delta de la parcelle d'essai (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 16/07/2024)

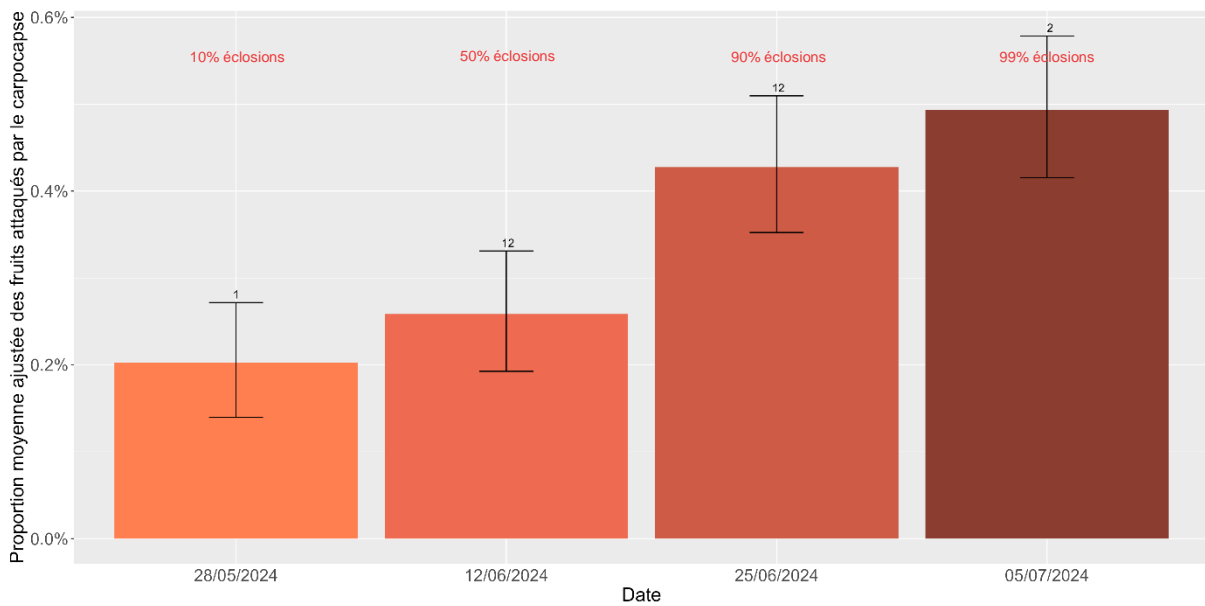


Figure 23 : Proportion moyenne ajustée des fruits attaqués par le carpocapse en fonction de la date de comptage dans le cadre de l'essai factoriel (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 28/06/2024)

d'égalité des données (hypothèses rejetées si la *p-value* associée est inférieure à la valeur de référence) (Hervé 2021) *Annexe 3, Annexe 4*.

Lorsque le résultat du test est significatif pour un ou plusieurs facteurs (*p-value* < 0,05), un test de comparaison multiple est effectué entre tous les facteurs significatifs à l'aide de la fonction *emmeans* (*Estimated Marginal Means*) utilisant la méthode de Bonferroni, qui ajuste les proportions moyennes obtenues statistiquement. Les résultats, légèrement modifiés par la fonction en comparaison aux données brutes, sont présentés graphiquement grâce à la fonction *ggplot2* par des groupes de chiffres ; les variables réponses étant différentes significativement lorsqu'elles appartiennent à des groupes de chiffres différents (Hervé 2021) *Annexe 3, Annexe 4*.

### III. Résultats

Durant l'essai factoriel\* et notamment au cours des premiers traitements, la température moyenne la plus basse est observée le 22 avril avec pour valeur 10,55°C, tandis que la température moyenne la plus élevée est relevée le 1<sup>er</sup> juillet, atteignant 24,6°C. De plus, la pluviométrie enregistrée est conséquente sur le début du mois de mai avec un maximum de 41 mm le 1<sup>er</sup> mai *Figure 22*.

D'autre part, le nombre d'adultes capturés dans la parcelle d'essai reste faible avec un maximum de deux captures par semaine au sein du piège équipé de la capsule COMBO, ce qui maintient la parcelle en dessous du seuil d'alerte de quatre à six captures par piège par semaine [23]. Par ailleurs, aucun adulte n'est capturé dans le piège contenant uniquement de la codlémone. Pour autant, si nous nous référons aux deux premières courbes du modèle INRAE simulant la première génération (Boivin, Sauphanor 2007), les captures ne suivent graphiquement pas véritablement la tendance de la courbe indicative de présence d'adultes proposée par le modèle *Figure 22*.

Concernant les résultats des dégâts sur fruits, le modèle généralisé mixte utilisé pour Y1 (proportion moyenne de fruits attaqués) présente un effet significatif du facteur 'Date' à un intervalle de confiance de 95% (*p-value* = 0,006) *Annexe 3*. Le test de comparaison multiple confirme ce résultat en présentant une différence significative entre les proportions de fruits attaqués obtenues à 10% des éclosions et celles à 99% d'après le modèle INRAE (Boivin, Sauphanor 2007). Le test expose de plus une tendance générale à une augmentation de cette proportion au cours du temps allant de 0,2% le 28 mai (10% des éclosions) à presque 0,5% le 05 juillet (99% des éclosions). Pour autant, cette proportion reste très faible sur toute la durée de la génération (avec un maximum de 0,5%) sans jamais dépasser le seuil de tolérance au verger de 1 à 2% de fruits attaqués (Maalouly Matar 2013) *Figure 23*.

Le modèle généralisé mixte utilisé pour Y2 ne présente aucun effet significatif, mais celui utilisé pour Y3 concernant la proportion de fruits présentant des piqûres actives expose un effet significatif des facteurs 'Date' et 'Modalite' séparément à un intervalle de confiance de 95% (*p-value* = 4,108<sup>-5</sup> et 0,0055 respectivement) *Annexe 4*. Le test de comparaison multiple entre ces deux facteurs confirme ce résultat en présentant une différence significative pour la modalité Témoin non traité du 25 juin (90% des éclosions) avec une proportion moyenne de 0,9%, significativement plus élevée que celles des autres modalités du groupe statistique homogène 1. En outre, la proportion moyenne du Témoin non traité du 05 juillet, correspondant à 99% des éclosions d'après le modèle INRAE et valant 0,54%, a tendance à être également plus élevée que celles du groupe 1. Il en va de même pour les proportions moyennes de la modalité Madex nouvelle souche pour le 25 juin et le 05 juillet, respectivement de 0,39% et de 0,35%. Concernant les autres modalités, cette proportion ne dépasse jamais 0,15% tout au long de la génération et n'expose que très peu de différences entre les quatre dates.

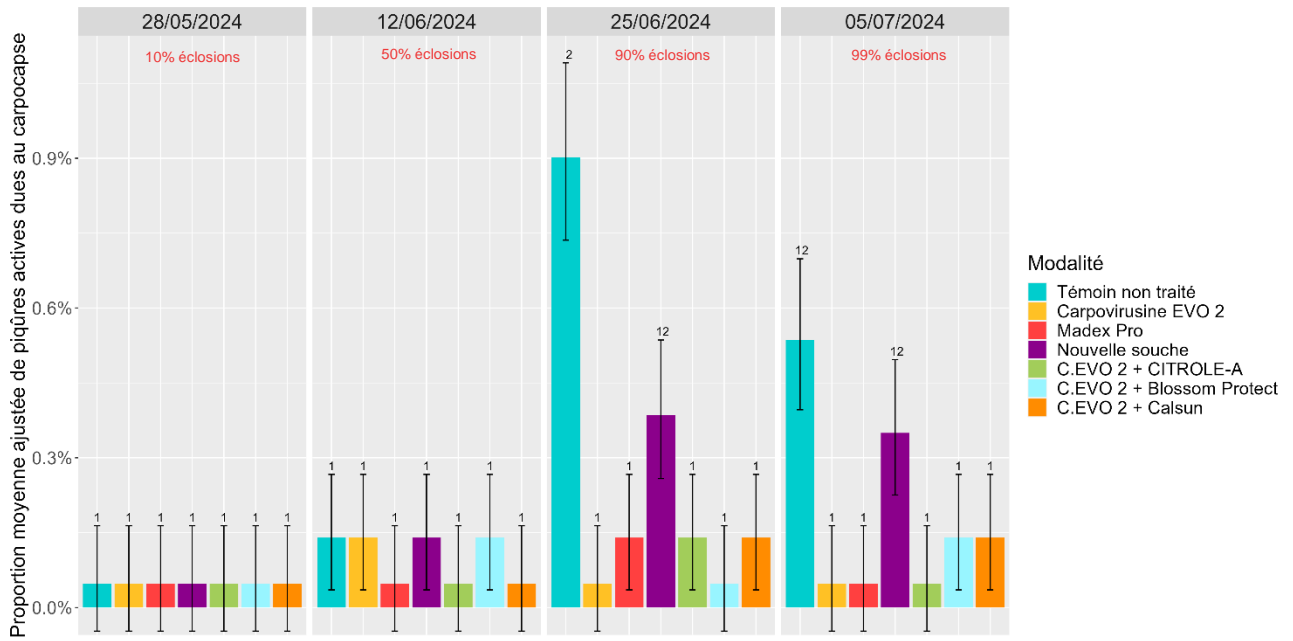


Figure 24 : Proportion moyenne ajustée des fruits présentant des piqûres actives en fonction de la date de comptage dans le cadre de l'essai factoriel (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 28/06/2024)

Plus généralement, cette proportion n'excède jamais 0,15% à 10% et 50% des éclosions d'après le modèle INRAE (Boivin, Sauphanor 2007) *Figure 24*.

## IV. Discussion

L'absence de capture d'individus au sein du piège standard démontre l'efficacité de la confusion sexuelle mise en place sur le site. La date des premières captures le 18 avril est similaire à celle de 2023 qui était le 17 avril (*données de la station*). Cependant, le nombre d'adultes capturés dans le piège contenant la capsule COMBO témoigne d'une faible pression du carpocapse dans la parcelle en comparaison avec 2023 où la pression était à l'inverse excessive : nous relevons 3,6% de fruits de classe 3 en fin de première génération (*données de la station*). Par ailleurs, le fait que les captures soient éloignées des indications du modèle INRAE peut s'expliquer par les conditions météorologiques particulièrement pluvieuses du printemps 2024 en comparaison avec les années précédentes (Boivin, Sauphanor 2007) *Figure 22, Annexe 5*. Ces conditions sont probablement affectées par le réchauffement climatique qui impacte fortement la région Occitanie et notamment l'Hérault (une augmentation de + 1,85°C est relevée depuis 1959) (CA Occitanie 2023a). En effet, des études scientifiques montrent que l'élévation de la température moyenne de surface entraîne une intensification des précipitations extrêmes. De plus, la combinaison de ces facteurs météorologiques influence la dynamique des insectes, ce qui pourrait expliquer la variation de vol de *Cydia pomonella* L. et de son cycle de vie adulte (Guo et al. 2021; Maalouly Matar 2013; Perrin 2022).

Nous pouvons également émettre l'hypothèse que le travail du sol tue une partie des larves diapausantes : le désherbage chimique étant interdit sur une parcelle conduite en agriculture biologique\* (Commission Européenne 2008; Malagnoux 2014), un désherbage mécanique est donc effectué. Or, des études prouvent que le travail du sol impacte la survie des larves diapausantes (Blomefield, Giliomee 2012). Il serait à ce titre intéressant de déterminer le taux de pertes hivernales.

Outre ces possibilités, nous pouvons là remettre en question l'efficacité des pièges Delta pour dépeindre la réalité de la population d'adultes au sein de la parcelle, notamment au regard de la courbe indicative de présence d'adultes (Boivin, Sauphanor 2007) *Figure 22*. Pour autant, l'élévation du taux de fruits attaqués par le carpocapse au cours du temps est révélatrice de l'augmentation naturelle de la pression du ravageur *Figure 23*. L'absence de captures peut donc s'expliquer par les fortes rafales de vent recensées dans le département au printemps, qui perturberaient le vol du carpocapse et l'empêcheraient d'atteindre le piège avec succès *Annexe 5*. De plus, ce dernier n'étant pas positionné exactement au cœur de l'essai, il peut ne pas dépendre avec justesse la réalité de sa population. Pour autant, l'avantage de cette légère délocalisation est l'absence d'une perturbation extérieure au sein de l'essai, qui serait provoquée par la présence des phéromones et kairomones.

Par ailleurs, la proportion de dégâts reste très limitée, ce qui prouve une nouvelle fois la faiblesse de l'infestation cette année au sein de cette parcelle. A ce titre, le fait que le seuil de tolérance de 1 à 2% de fruits attaqués ne soit pas dépassé est satisfaisant d'un point de vue commercial (Maalouly Matar 2013). Si nous nous attardons sur les résultats concernant la proportion moyenne de fruits présentant des piqûres actives, l'ensemble des traitements - excepté la modalité Madex nouvelle souche - semble être efficace en comparaison au Témoin non traité pour maintenir une proportion moyenne ne dépassant pas 0,15% à chaque date de comptage *Figure 24*. Le fait de retrouver une très faible proportion de piqûres actives lors de l'application d'un traitement biocontrôle est encourageant pour témoigner de l'efficacité de ces nouvelles techniques, d'autant plus que les modalités Carpovirusine® EVO 2 et Madex Pro® présentent un effet similaire intéressant dans la mesure où ces deux souches sont actuellement utilisées en alternance. En revanche, la nouvelle souche, que nous



espérons plus efficace, ne présente pas d'effet concluant contrairement aux résultats prometteurs de l'année dernière où le pourcentage de piqûres actives était de 3,9% pour cette modalité contre 8,8% pour la modalité Madex<sup>®</sup> Pro (données de la station). Nous n'avons pas encore suffisamment de recul sur cette souche pour conjecturer la cause de cet échec, c'est pourquoi il convient de la tester à nouveau en 2025 avant de tirer des conclusions hâtives sur la pertinence de sa potentielle homologation [Figure 24](#). De plus, les traitements contenant des adjuvantations ou des associations de Carpovirusine<sup>®</sup> EVO 2 ne sont pas significativement plus efficaces que l'utilisation de Carpovirusine<sup>®</sup> EVO 2 ou Madex Pro<sup>®</sup> seuls, contrairement à ce que nous attendions au regard des résultats en 2023. L'adjuvantation du virus avait alors présenté un taux de piqûres actives de 6,8%, plus faible que celui recensé pour la modalité Madex<sup>®</sup> Pro (données de la station) [Figure 24](#).

De façon générale, il est difficile d'émettre des hypothèses quant à ces multiples observations où très peu de tendances ressortent hormis dans le témoin. En effet, le manque de pression au sein de la parcelle biaise peut-être l'exploitation des résultats : nous ne pouvons déterminer si l'absence de dégâts au sein des modalités est due à l'efficacité des traitements ou à un faible niveau de pression du ravageur. A ce titre, la variation de résultats entre 2024 et 2023 réside peut-être uniquement dans la différence notable de pression entre les deux années.

De plus, la mise en place de cet essai, comprenant des traitements préventifs, est réalisée légèrement en amont du début de la première génération de *Cydia pomonella* L. et, même si elle est basée sur le modèle INRAE (Boivin, Sauphanor 2007), elle s'appuie en particulier sur l'historique de pression de l'année précédente. En outre, les firmes changent depuis peu leurs préconisations concernant l'utilisation des produits de biocontrôle, en tenant compte de leur rémanence et de leur efficacité, et encouragent les agriculteurs à augmenter la fréquence des traitements dans certaines conditions (Andermatt France 2023). Cela explique alors notre décision en 2024 de resserrer les traitements et de positionner Calsun<sup>®</sup> le plus tôt possible pour empêcher la ponte [Tableau 1, Figure 22](#). L'ensemble de ces décisions a pu contribuer à diminuer la pression du carpocapse sur la parcelle, nous empêchant de conclure de manière pertinente sur l'effet des traitements.

Par ailleurs, nous pouvons critiquer la puissance statistique de l'essai : il est en effet préférable d'avoir un nombre plus important de répétitions au sein des modalités. Il est donc pertinent de réitérer l'expérimentation l'année prochaine en ajoutant une répétition supplémentaire pour chaque modalité afin d'espérer déterminer une tendance concernant l'efficacité des différents traitements, et ce dans un nouveau contexte de pression du ravageur. Cependant, la mise en place des arbres de bordure est à valoriser car elle permet de limiter les effets de la dérive des traitements. Elle contribue ainsi à gérer les potentielles hétérogénéités du milieu et des facteurs non étudiés pour garantir une expérience « toutes choses égales par ailleurs » (Havard et al. 2017). Pour réduire ces hétérogénéités, il est également possible d'ajouter un arbre de comptage dans chaque parcelle nette [Figure 19](#). D'autre part, nous pourrions tester l'adjuvantation et les associations sur Madex Pro<sup>®</sup> également pour comparer avec les résultats obtenus sur Carpovirusine<sup>®</sup> EVO 2 en conditions similaires. Une autre possibilité serait de mettre en place l'expérimentation sur une autre variété au cycle de développement différent afin de déterminer si la divergence de niveau de maturité au cours de la première génération du carpocapse impacte les résultats de l'étude. Nous pourrions par exemple choisir la variété Gala, qui a un développement précoce (Bio de PACA, GRAB et GRCETA de Basse Durance 2017).

Ainsi, après l'expérimentation de ces diverses techniques à petite échelle, l'objectif est désormais d'en intégrer certaines au sein d'une stratégie de protection complexe, élaborée dans le but de répondre à une problématique à grande échelle afin de passer du niveau technique au niveau décisionnel, pouvant être exploité par les agriculteurs.



---

# PARTIE II : OPTIMISATION DE STRATEGIES DE PROTECTION INTEGREE : ESSAI SYSTEME

---

Quelle est la stratégie la plus pertinente et efficace à proposer aux agriculteurs contre le carpocapse et qui raisonne l'utilisation des produits phytosanitaires ?

## I. Objectif et hypothèses

Suite au premier travail réalisé en [parcelle élémentaire](#)<sup>\*</sup>, l'ambition est désormais de mettre en place une stratégie de protection biocontrôle complexe afin de maîtriser la pression du carpocapse, sur toute la durée du cycle et sur l'ensemble d'une parcelle de production. Cette stratégie, comprenant l'intégration de certaines des techniques expérimentées dans la première partie, est une combinaison de plusieurs [méthodes de biocontrôle](#)<sup>\*</sup>. Cette dernière est réfléchie de façon à répondre à un objectif de protection précis : piloter une stratégie suffisamment efficace pour maîtriser le carpocapse sans avoir recours aux insecticides de synthèse, dont la plupart seront prochainement retirés du marché ou le sont déjà ([Index Acta 2023](#)). Ainsi, après avoir testé l'efficacité de chaque technique séparément, le but est d'évaluer et d'optimiser la performance générale d'une stratégie qui intègre un ensemble de techniques de protection biocontrôle, tout en suivant un schéma décisionnel particulier afin de répondre à l'objectif de protection. Cette stratégie pourrait présenter des faiblesses notamment au vu de la pression du carpocapse dans le Sud ([Maalouly Matar 2013](#)) et de l'avancée scientifique concernant les [méthodes de biocontrôle](#)<sup>\*</sup>, mais identifier ces verrous nous permet de nous préparer au retrait des substances actives de synthèse et d'élaborer une approche proactive à long terme.

Pour cela, un [essai système](#)<sup>\*</sup> est mis en place en grande parcelle sur l'ensemble du cycle de *Cydia pomonella* L., mais notre étude se concentre sur la première et la seconde génération. Les leviers intégrés à cette stratégie sont le positionnement et l'application des produits de biocontrôle, le renforcement de la confusion sexuelle classique par l'utilisation de la confusion sexuelle en liquide, la mise en place de bandes-pièges cartonnées ainsi que l'éclaircissage manuel des fruits véreux comme mesures prophylactiques, et enfin l'emploi de nématodes ([Agogué et al. 2024; COMPO EXPERT 2022](#)). Ainsi, dans l'optique actuelle de restreindre l'utilisation des produits phytosanitaires, cette stratégie allégée est celle vers laquelle la réglementation nous dirige et que nous souhaiterions par conséquent proposer aux agriculteurs à long terme ([Index Acta 2023](#)).

C'est pourquoi, afin de comparer les résultats de cet essai sur les deux premières générations et de tester plusieurs stratégies de lutte plus réalistes, deux autres [essais systèmes](#)<sup>\*</sup> sont également mis en place et expérimentent deux stratégies. La première est une stratégie de référence correspondant à celle suivie actuellement par les agriculteurs dans les vergers conduits en [Protection Fruitière Intégrée \(PFI\)](#)<sup>\*</sup>. Cette stratégie autorise l'utilisation de tous les insecticides de synthèse homologués, qui sont alors combinés à des [méthodes de biocontrôle](#)<sup>\*</sup> intégrant l'application des produits de biocontrôle, l'utilisation de la confusion sexuelle classique, l'éclaircissage manuel et enfin l'emploi de nématodes ([Agogué et al. 2024; COMPO EXPERT 2022](#)).

Enfin, l'objectif de la dernière stratégie proposée se positionne chronologiquement entre les deux





stratégies décrites précédemment : l'emploi des mêmes insecticides de synthèse est autorisé mais modéré en comparaison à la stratégie de référence, et l'ensemble des méthodes de lutte utilisées dans la stratégie de protection biocontrôle est mis en place. Cette stratégie, renforcée par rapport à celle de référence mais plus réaliste que celle de protection biocontrôle qui est actuellement peu envisageable, a pour but d'exposer un schéma décisionnel que nous désirons viable à court terme pour les agriculteurs.

Ainsi, face à ces trois stratégies dont les objectifs correspondent à des temporalités différentes, nous espérons que la stratégie Biocontrôle présente une efficacité proche de celle de la stratégie Référence, et que la stratégie Renforcée (supposée être viable actuellement) expose une efficacité supérieure à celle de la stratégie Référence.

## II. Matériel et méthodes

### A. Gestion de l'essai

Les parcelles d'essai supportant les stratégies Référence et Biocontrôle sont situées sur le site de SudExpé, respectivement plantées en 1994 (avec du surgreffage entre 2005 et 2013) et en 2004. La parcelle accueillant la stratégie Référence, de densité 2,26 ha et conduite en PFI<sup>\*</sup>, est constituée de plusieurs variétés : les variétés Pink Lady<sup>®</sup> Mutant Cripps Pink et Granny Smith Challenger<sup>®</sup> Dalivair C.O.V. surgreffées sur le porte-greffe M9 Pajam<sup>®</sup>2 Cepiland C.O.V., et les variétés Sundower<sup>™</sup> Joya<sup>®</sup> Cripps Red et Golden Reinders<sup>®</sup> Mutant Golden surgreffées sur le porte-greffe M9 EMLA de vigueur équivalente (FranceAgriMer 2013) [31]. La majorité de ces variétés sont tardives, caractère choisi afin de pouvoir analyser l'exposition de la pomme au carpocapse sur l'ensemble de son cycle, et car des études montrent qu'il favorise la vulnérabilité de ces variétés aux attaques du ravageur (Bio de PACA, GRAB et GRCETA de Basse Durance 2017; Codarin et al. 2018; Akroute et al. 2023).

Concernant la stratégie Biocontrôle, la parcelle, de densité 1,05 ha et conduite en biocontrôle, est composée uniquement de la variété Sundower<sup>™</sup> Joya<sup>®</sup> Cripps Red surgreffée sur le porte-greffe M9 Pajam<sup>®</sup>1 Lancep C.O.V. (FranceAgriMer 2013) [31].

Enfin, la stratégie Renforcée est menée chez un producteur situé à 20 km de la station dans le Gard, sur la commune de Aubord (30620). La parcelle, de densité 0,83 ha et conduite en PFI<sup>\*</sup>, est constituée des variétés Cherry Gala<sup>®</sup> Mutant Gala et Pink Lady<sup>®</sup> Mutant Cripps Pink, surgreffées en 2017 sur le porte-greffe M9 Pajam<sup>®</sup>2 Cepiland C.O.V. (FranceAgriMer 2013) [31].

La confusion sexuelle Ginko<sup>®</sup> est mise en place sur les trois parcelles d'essai, et lorsque cette confusion est renforcée, un atomiseur est utilisé pour pulvériser la confusion sexuelle en liquide Cydia Pro Ball<sup>®</sup> (COMPO EXPERT 2022). En parallèle, le vol du carpocapse est à nouveau surveillé au sein des deux parcelles sur site à l'aide de pièges DELTA (équipés ou non d'une capsule COMBO). Concernant la prophylaxie, l'éclaircissage manuel débute le 21 juin jusqu'au 09 juillet pour la stratégie Biocontrôle et jusqu'au 17 juillet pour la stratégie Référence ; cet étalement étant dû à la taille des parcelles et à la diversité des variétés et par conséquent des maturités. 200 bandes-pièges sont également positionnées équitablement au sein des deux parcelles sur site le 17 juin et sont relevées et changées 15 jours plus tard, pour être à nouveau relevées 15 jours plus tard et ainsi de suite. Enfin, les conditions météorologiques sont relevées durant l'essai sur la station météo à proximité de la parcelle.

Les essais étant réalisés en grandes parcelles, les traitements sont appliqués au pulvérisateur

**Tableau 2 : Règles de décision théoriques déterminant le choix des interventions phytosanitaires en fonction des contrôles de présence de larves effectués en cours de saison et adaptées selon l'historique de pression sur les parcelles d'essai (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 19/07/2024)**

Pourcentage de présence de larves	Stratégies Référence et Renforcée	Stratégie Biocontrôle
0 - 0,5 %	Virus de la granulose	Virus de la granulose
0,5 - 1 %	Insecticide de synthèse en 1ère ou 3ème génération Virus de la granulose en 2nd génération	Virus de la granulose
1 - 2 %	Insecticide de synthèse	Virus de la granulose
> 2 % Seuil de tolérance dépassé	Insecticide de synthèse	Insecticide de synthèse, arrêt de l'essai selon la gravité

**Tableau 3 : Itinéraire technique suivi pour les trois stratégies étudiées concernant la lutte contre le carpocapse (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 12/08/2024)**

Date	Stratégie Référence	Stratégie Biocontrôle	Stratégie Renforcée	Génération du carpocapse	
25/03			Ginko® 500 diff/ha	1	
03/04	Ginko® 500 diff/ha	Ginko® 500 diff/ha		1	
12/04		Cydia Pro Ball® 1 L/ha		1	
19/04			Cydia Pro Ball® 1 L/ha	1	
07/05			Cydia Pro Ball® 1 L/ha	1	
13/05		Cydia Pro Ball® 1 L/ha		1	
16/05	CORAGEN® 0,18 L/ha	Carpovirusine® EVO 2 1 L/ha + CITROLE-A 0,57 L/ha		1	
23/05			CORAGEN® 0,18 L/ha	1	
30/05	Carpovirusine® EVO 2 1 L/ha	Carpovirusine® EVO 2 1 L/ha + CITROLE-A 0,5 L/ha		1	
07/06			Carpovirusine® EVO 2 1 L/ha + DJEEN® 0,5 L/ha	1	
11/06	Carpovirusine® EVO 2 1 L/ha	Carpovirusine® EVO 2 1 L/ha + CITROLE-A 0,5 L/ha		1	
21/06			Carpovirusine® EVO 2 1 L/ha + DJEEN® 0,5 L/ha	1	
26/06	Success™ 4 0,2 L/ha	Carpovirusine® EVO 2 1 L/ha + CITROLE-A 0,5 L/ha		1	
11/07	Delegate™ 0,25 L/ha	Madex® Pro 0,1 L/ha + CITROLE-A 2 L/ha	Carpovirusine® EVO 2 1 L/ha + CITROLE-A 2 L/ha	1	2
24/07			Madex® Pro 0,1 L/ha + CITROLE-A 2 L/ha		2
31/07	Madex® Pro 0,1 L/ha	Madex® Pro 0,1 L/ha + CITROLE-A 2 L/ha			2
08/08	Madex® Pro 0,1 L/ha	Madex® Pro 0,1 L/ha + CITROLE-A 2 L/ha			2

**Légende :**

Confusion sexuelle
  Produit de biocontrôle, adjuvanté ou non
  Insecticide de synthèse

tracté, positionnés selon le modèle INRAE (Boivin, Sauphanor 2007). De plus, le pilotage de chaque stratégie est modulé par des contrôles de présence de larves en cours de saison, qui permettent selon certaines règles de décision de choisir quel type d'intervention. Au niveau régional, les seuils d'intervention élaborés pour la PFI\*, applicables pour les stratégies Référence et Renforcée, sont les suivants (Morin, Cormier, Chouinard 2024; Agogué et al. 2024) :

- Si l'historique de pression et la pression actuelle de la parcelle sont faibles et que nous recensons entre 0 et 0,5% de présence de larves, soit il n'y a aucune intervention, soit elle est effectuée avec du virus de la granulose. Si nous recensons entre 0,5 et 1% de présence de larves, du virus de la granulose est administré. Cependant, si plus de 1% de présence de larves est recensé, un insecticide de synthèse est appliqué.
- Enfin, si l'historique de pression et la pression actuelle de la parcelle sont forts, dès la présence de larve une intervention est effectuée avec du virus de la granulose ou un insecticide de synthèse de plus grande efficacité tel que CORAGEN® [19].

D'après les historiques de pression particulièrement élevés sur les parcelles d'essai (données de la station), nous choisissons d'intervenir systématiquement en première génération avec l'optimum de traitement pour la stratégie Référence, et avec le virus de la granulose pour la stratégie Biocontrôle. Nous modulons ensuite pour les autres générations en fonction de la présence des larves [Tableau 2](#), et arrêtons l'essai à la fin de la seconde génération d'après le modèle INRAE (Boivin, Sauphanor 2007). Il est important de souligner que ces règles de décision sont suivies dans la mesure du possible au vu du nombre annuel autorisé d'applications des différents traitements, et adaptées en cours de saison si besoin (Agogué et al. 2024).

## B. Dispositif expérimental et itinéraire technique

Le dispositif expérimental est adapté de la méthode CEB-MG09 « Principes généraux d'étude de l'efficacité au champ de spécialités à bases de phéromones destinés à lutter contre les Lépidoptères ravageurs des cultures pérennes par confusion sexuelle des mâles ». C'est un essai de valeur pratique, réalisé en grande parcelle, avec une parcelle de référence et deux suivant deux stratégies à tester et dont le pilotage diffère légèrement à chaque fois (Chichignoud 1994).

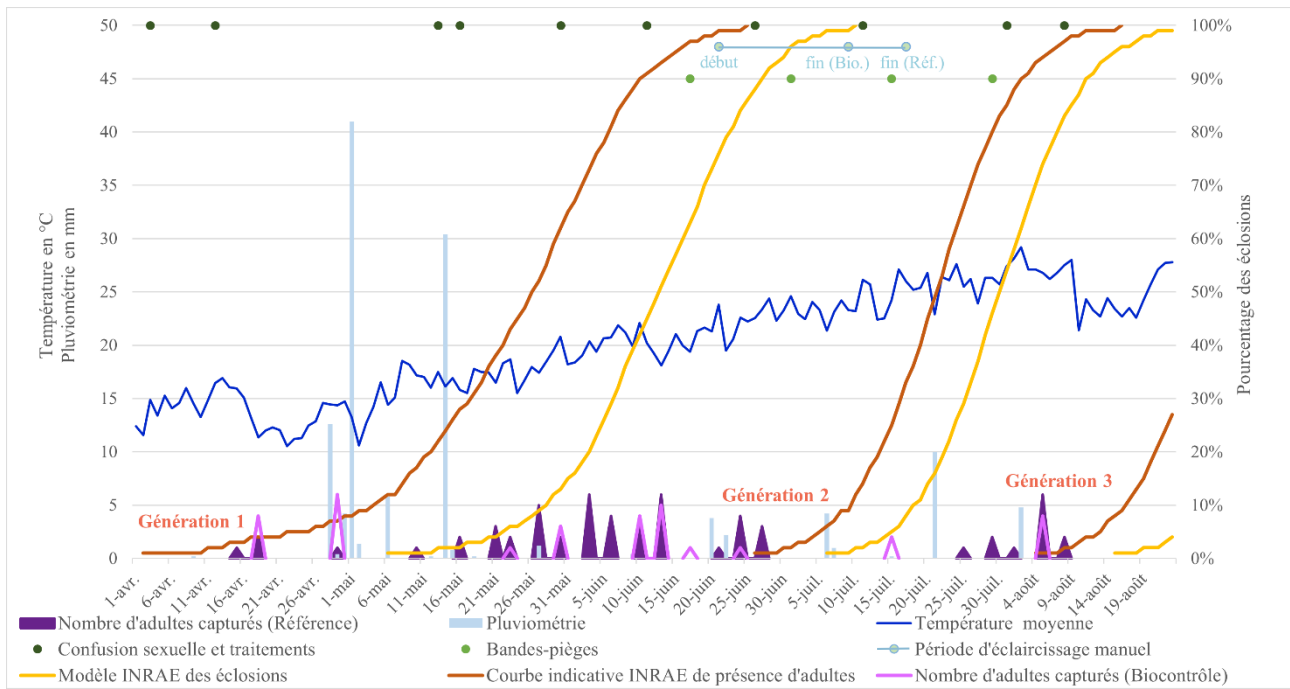
La stratégie Référence intervenant sur un essai conduit en PFI\* met alors en place les insecticides de synthèse homologués Success™ 4 et Delegate™ dont la substance active, le Spinetoram, est un dérivé synthétique du Spinosad [19]. Ces insecticides sont alors combinés aux produits de biocontrôle Carpovirusine® EVO 2 et Madex Pro® adjuvantés à CITROLE-A, mais également à l'utilisation de la confusion sexuelle Ginko® (Andermatt France 2018) [19][27]. De plus, la pose de bandes pièges associée à un éclaircissage manuel des fruits véreux est réalisée sur la parcelle. Enfin, l'utilisation de nématodes est préconisée depuis plusieurs années, mais le traitement étant difficile à faire en raison des conditions climatiques à respecter et de son prix, cette méthode se développe lentement (Agogué et al. 2024) [32]. Elle fait néanmoins partie des préconisations du bassin Sud-Est et est intégrée à la stratégie Référence, mais est appliquée uniquement à l'automne (Agogué et al. 2024).

En comparaison, la stratégie Biocontrôle remplace tous les insecticides de synthèse par les mêmes [méthodes de biocontrôle\\*](#), et renforce la confusion sexuelle Ginko® par la confusion sexuelle liquide Cydia Pro Ball® (Andermatt France 2018; COMPO EXPERT 2022) [19][27].

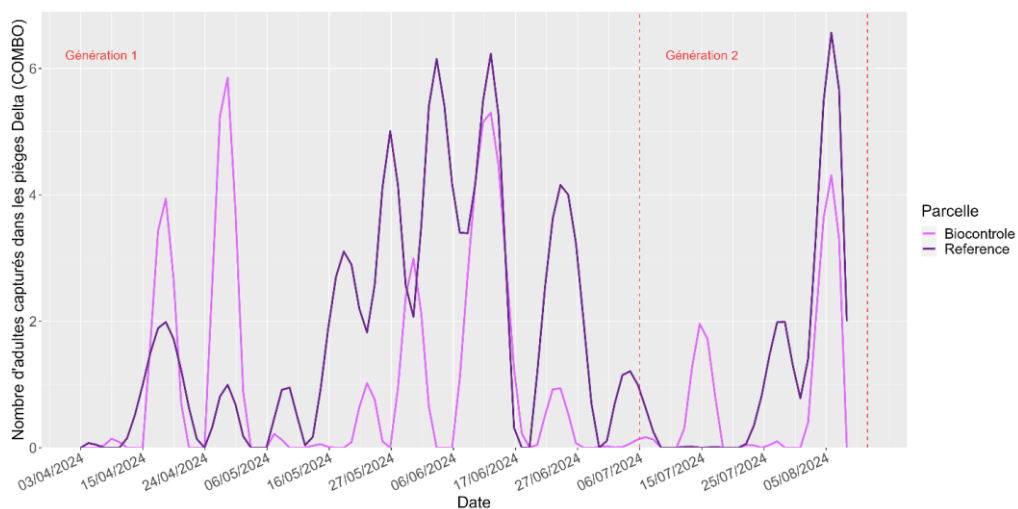
Enfin, la stratégie Renforcée correspond à l'itinéraire technique habituel du producteur auquel nous ajoutons la confusion sexuelle en liquide Cydia Pro Ball® ainsi que l'adjuvantation de ses applications de Carpovirusine® EVO 2 et Madex Pro® avec du CITROLE-A®. Un autre [adjuvant\\*](#), le DJEEN®, est également testé (Andermatt France 2018; COMPO EXPERT 2022) [19][27] [Tableau 3](#).

**Tableau 4 :** Calcul de l'IFT, l'IFT Biocontrôle et l'IFT Total (cumulant les deux précédents) pour les trois stratégies testées dans le cadre de l'essai système (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 20/08/2024)

	Stratégie Référence	Stratégie Biocontrôle	Stratégie Renforcée
<b>IFT</b>	2,83	0	1,03
<b>IFT Biocontrôle</b>	3,99	6,92	4
<b>IFT Total</b>	<b>6,82</b>	<b>6,92</b>	<b>5,03</b>



**Figure 25 :** Représentation des conditions météorologiques, des prédictions actualisées du modèle INRAE (Boivin, Sauphanor 2007) ainsi que des captures au sein des pièges Delta contenant la capsule COMBO des deux parcelles d'essai sur site, dans le cadre de l'essai système (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 19/07/2024)



**Figure 26 :** Représentation des courbes de captures lissées donnant la période de vol du carpocapse au cours des deux premières générations, réalisées à partir des captures d'adultes au sein des pièges Delta contenant la capsule COMBO des deux parcelles d'essai sur site, dans le cadre de l'essai système (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 19/07/2024)

## C. Observations réalisées et variables d'étude

### 1. Observations réalisées

Afin d'expérimenter l'efficacité des différentes stratégies sur l'intégralité du cycle du carpocapse, des comptages de fruits sont réalisés à 50%, 90% et 99% de la première génération, puis à 50% et 90% de la seconde génération selon le modèle INRAE (Boivin, Sauphanor 2007). Sur une cinquantaine d'arbre répartis dans la parcelle de façon à former un maillage, 20 fruits par arbre sont prélevés et répartis dans les trois classes de dégâts de carpocapse de la même façon que dans la première partie voir *PARTIE I-II-C-1. Observations réalisées Figure 21*.

En parallèle, les adultes emprisonnés dans les pièges Delta présents sur les parcelles accueillant les stratégies Référence et Biocontrôle sont comptés et ôtés deux fois par semaine.

### 2. Variables d'étude

A la suite des comptages réalisés, nous obtenons pour chaque parcelle d'essai les mêmes proportions Y1 (fruits attaqués), Y2 (fruits présentant des piqûres sèches appartenant à la classe 2) et Y3 (fruits présentant des piqûres actives appartenant à la classe 3) voir *PARTIE I-II-C-2. Variables d'étude*. De plus, le nombre d'adultes capturés dans le piège Delta contenant la capsule COMBO est à nouveau mis en relation avec les données météorologiques, le positionnement des traitements et comptages et le modèle INRAE des éclosions et de la présence des adultes (Boivin, Sauphanor 2007). Enfin, l'*IFT\**, l'*IFT\** Biocontrôle et le cumul des deux (*IFT\** Total) sont calculés pour chaque stratégie [33] *Tableau 4*.

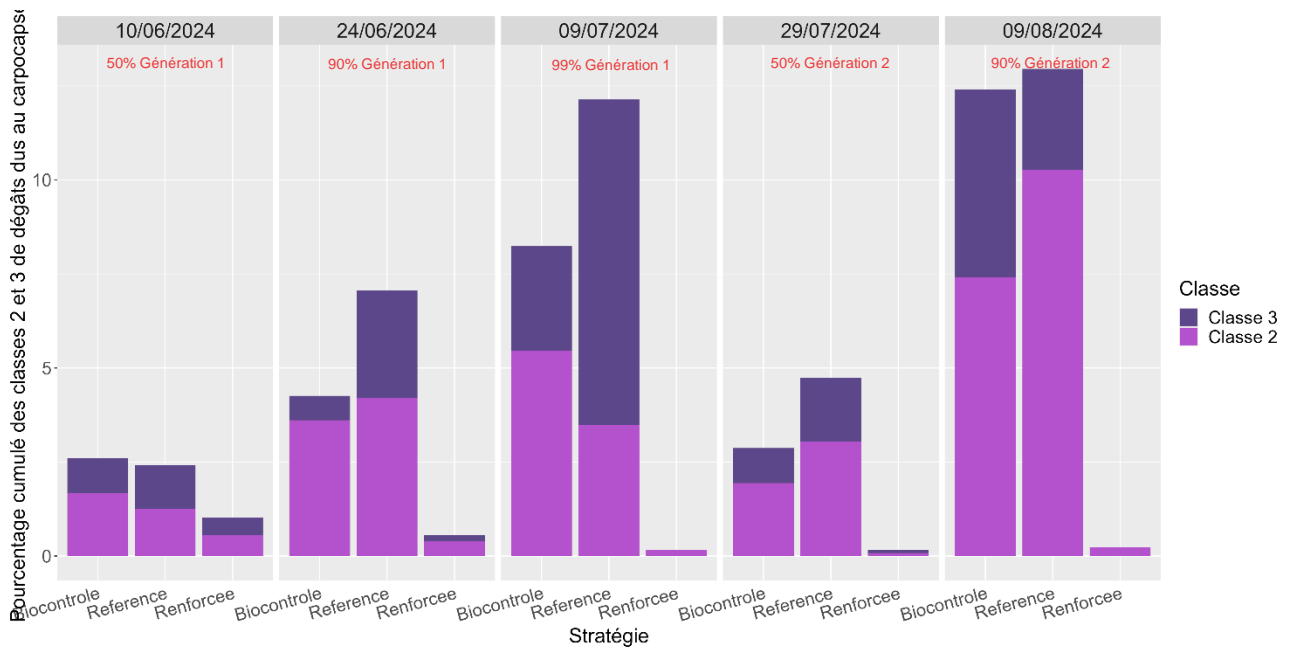
## D. Analyses statistiques

Les stratégies étant testées une seule fois, aucune répétition n'est effectuée pour chacun des trois essais. Nous ne réalisons donc pas d'analyses statistiques, mais nous interprétons graphiquement les résultats réalisés pour la plupart sur RStudio (version 4.4.2 de R) avec la fonction *ggplot2*.

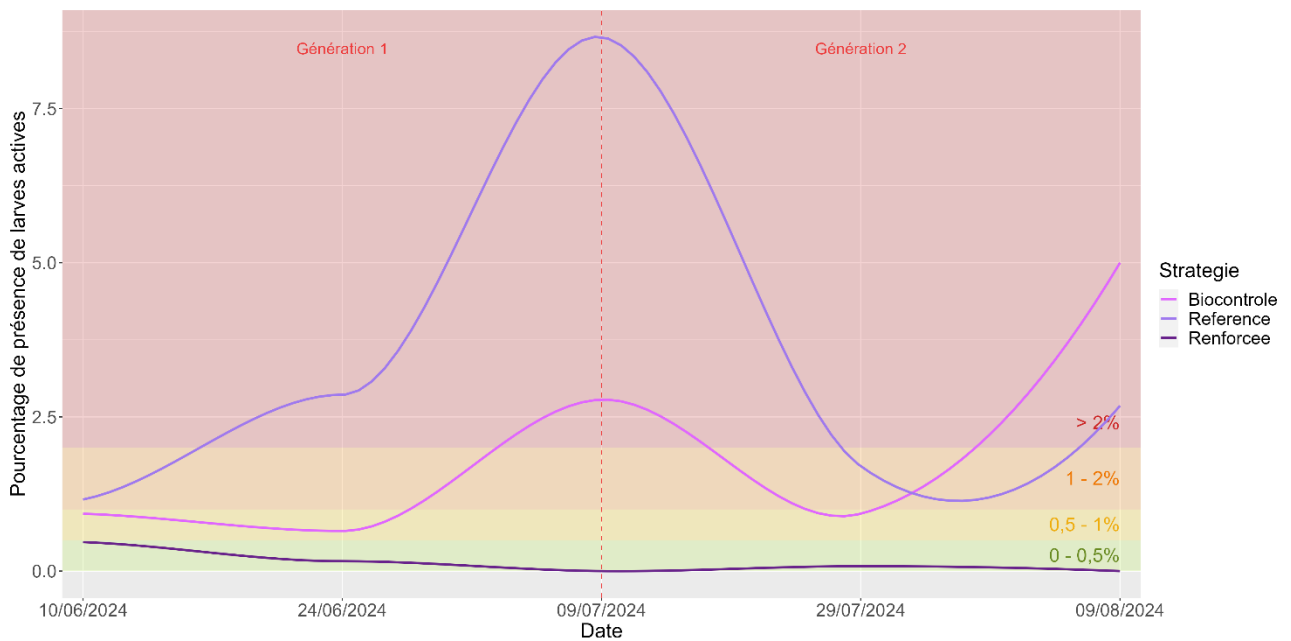
## III. Résultats

Dans le cadre du même contexte climatique pour la première génération, une température moyenne maximale de 29,2°C est atteinte le 2 août et très peu de précipitations sont recensées au cours de la seconde génération. Par ailleurs, le nombre d'adultes capturés au sein des pièges équipés d'une capsule COMBO présents dans les deux parcelles semble augmenter à mesure que la fin de la première génération approche d'après le modèle INRAE (Boivin, Sauphanor 2007). Les captures semblent de plus avoir tendance à suivre graphiquement la première courbe indicative de présence d'adultes proposée par le modèle *Figure 25*. Une forte présence d'adultes est, de fait, relevée au sein des deux parcelles, ce qui entraîne le dépassement du seuil d'alerte de quatre à six captures par semaine en vergers confusés, en particulier au sein de la parcelle accueillant la stratégie Référence [23]. Par ailleurs, nous remarquons un deuxième pic d'individus plus faible en début de première génération, bien visible pour la parcelle suivant la stratégie Biocontrôle *Figure 26*. Enfin, aucun adulte n'est capturé dans les pièges contenant uniquement de la codlémone.

Concernant la deuxième génération correspondant aux troisième et quatrième courbes du modèle,



**Figure 27 :** Représentation de la proportion de fruits attaqués (cumul de la proportion de fruits présentant des piqûres sèches – classe 2 - et de la proportion de fruits présentant des piqûres actives – classe 3) au sein des trois parcelles d'essai au cours des deux premières générations dans le cadre de l'essai système (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 19/07/2024)



**Figure 28 :** Représentation de l'évolution du pourcentage de présence de piqûres actives au sein des trois parcelles d'essai au cours du temps, en lien avec les règles de décision énoncées précédemment **Tableau 2** dans le cadre de l'essai système (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 19/07/2024)

même si le nombre d'adultes capturés est moins important qu'au cours de la première génération, notamment pour la stratégie Biocontrôle, il semble augmenter à mesure que nous progressons au sein de la seconde génération d'après le modèle INRAE. De plus, le seuil d'alerte est dépassé dès que 50% des éclosions prédites par le modèle sont atteints (Boivin, Sauphanor 2007) [23] *Figure 25, Figure 26.*

Les résultats des dégâts sur fruits de la première génération présentent une proportion de fruits attaqués (Y1) qui semble fortement augmenter au cours du temps pour les stratégies Biocontrôle et Référence, et diminuer pour la stratégie Renforcée. En effet, pour la stratégie Biocontrôle, la variable Y1 passe de 2,6% le 10 juin à 8,24% le 09 juillet en fin de première génération ; pour la stratégie Référence, elle passe de 2,41% à 12,14% ; tandis que pour la stratégie Renforcée, cette proportion passe de 1,02% à 0,16%. Si nous observons séparément les variables Y2 (proportion de fruits présentant des piqûres sèches) et Y3 (proportion de fruits présentant des piqûres actives), nous constatons une forte présence de piqûres actives dont la proportion explose pour la stratégie Référence, atteignant jusqu'à 8,66% le 09 juillet à 99% des éclosions. La stratégie Biocontrôle suit la même tendance explosive mais principalement au niveau de la proportion Y2, pour atteindre un pourcentage de 5,46% de fruits présentant des piqûres sèches à 99% des éclosions de la première génération. Au contraire, nous remarquons que la stratégie Renforcée présente très peu de fruits avec des piqûres actives, jusqu'à une valeur nulle en fin de première génération *Figure 27.*

En revanche, la proportion Y1 a tendance à diminuer en début de seconde génération, en particulier pour les stratégies Biocontrôle et Référence où elle passe respectivement à 2,87% et 4,74% à 50% des éclosions le 29 juillet. Si nous observons séparément les variables Y2 (proportion de fruits présentant des piqûres sèches) et Y3 (proportion de fruits présentant des piqûres actives) à cette date, il apparaît que c'est principalement la proportion Y3 qui diminue au cours de la seconde génération pour ne valoir plus que 0,93% pour la stratégie Biocontrôle et 1,7% pour la stratégie Référence. Cependant, la proportion Y1 explose à nouveau en fin de seconde génération jusqu'à dépasser 12% pour les deux stratégies, et présente cette fois-ci une majorité de fruits avec des piqûres sèches : 7,41% de dégâts sont recensés pour la stratégie Biocontrôle, et 10,27% pour la stratégie Référence. De façon générale, le seuil de tolérance au verger concernant le taux de fruits attaqués est dépassé au cours des deux générations pour ces stratégies. En contrepartie, la stratégie Renforcée présente une proportion Y1 stable durant toute la seconde génération *Figure 27.*

De plus, si nous associons uniquement la variable Y3 aux règles de décision établies précédemment, il apparaît que le pourcentage de présence de piqûres actives au sein de la parcelle chez le producteur reste en dessous du seuil de 0,5% de présence de larves durant toute la première génération (les trois premières dates). Pour la stratégie Biocontrôle, ce pourcentage est dès le début compris entre 0,5 et 1% et augmente jusqu'à dépasser le seuil de 2% en fin de première génération. Concernant la stratégie Référence, cette proportion débute entre 1 et 2% et explose dès le 24 juin le seuil de 2% *Figure 28.*

Au cours de la seconde génération à 50% des éclosions (quatrième date), nous remarquons que la parcelle accueillant la stratégie Renforcée reste toujours en dessous du seuil de 0,5% de présence de larves. De plus, la diminution de la proportion Y3 évoquée précédemment permet de faire passer la stratégie Référence sous le seuil de 2% et la stratégie Biocontrôle sous le seuil de 1% à 50% des éclosions, avant de ramener ces deux résultats au-dessus du seuil de 2% *Figure 28.*

Enfin, l'*IFT*\* relatif aux insecticides de synthèse est de 2,83 pour la stratégie Référence, et de 1,03 pour la stratégie Renforcée. Au total, l'*IFT*\* est de 5,03 pour la stratégie Renforcée contre 6,82 et 6,92 pour les stratégies Référence et Biocontrôle respectivement *Tableau 4.*





## IV. Discussion

L'absence de capture d'individus au sein des pièges standards démontre l'efficacité de la confusion sexuelle mise en place sur le site. La date des premières captures relevées le 16 avril est similaire à celle de 2023 qui était le 17 avril ([données de la station](#)). Cependant, contrairement à la [l'essai factoriel\\*](#), le nombre d'adultes capturés dans les pièges contenant la capsule COMBO, entraînant un dépassement alarmant du seuil d'alerte au cours de la première génération [23], témoigne d'une forte pression du carpocapse au sein des deux parcelles sur site, en particulier pour la stratégie Référence [Figure 25, Figure 26](#). Ces relevés nous laissent penser que l'absence de pression décrite au sein de [l'essai factoriel\\*](#) est sûrement due à la gestion des traitements et de l'expérimentation plutôt qu'à une absence de pression à cet endroit précis [voir PARTIE I-III. Résultats](#). Par ailleurs, nous notons deux pics d'individus durant la première génération pour les deux parcelles, ainsi qu'un étalement de cette génération en comparaison aux années précédentes [Figure 25, Figure 26](#). Les prédictions du modèle INRAE ([Boivin, Sauphanor 2007](#)) confirment cela et situent les générations de 2024 dans les années tardives [Annexe 1](#).

Ces observations sont à mettre en lumière avec les données climatiques singulières du printemps : comme nous l'avons expliqué [voir PARTIE I-IV. Discussion](#), la combinaison de plusieurs facteurs météorologiques influence la dynamique des insectes notamment leur période de croissance, ce qui peut entraîner un allongement des générations ([Guo et al. 2021; Maalouly Matar 2013; Perrin 2022](#)). Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte le changement climatique dans le développement des stratégies de gestion intégrée du carpocapse, car les modifications climatiques peuvent changer de manière significative leur comportement et leur dynamique de population.

De plus, les proportions importantes de fruits attaqués, calculées au sein des stratégies Référence et Biocontrôle, sont une nouvelle preuve témoignant de la forte pression du carpocapse sur le site. Si nous analysons en particulier les résultats au sein de la parcelle accueillant la stratégie Référence, la proportion de fruits présentant des piqûres actives explose à la fin des deux générations, au point de dépasser de manière alarmante le seuil de 2% de présence de larves [Figure 27, Figure 28](#). Ces observations sont à mettre en lumière avec l'historique de pression des parcelles élevé en 2023 : la parcelle accueillant la stratégie Biocontrôle présentait 0,3% de fruits possédant des piqûres actives en fin de seconde génération, puis 1,4% en fin de troisième génération, contre respectivement 10% et 6,1% pour la parcelle accueillant la stratégie Référence ([données de la station](#)).

Même si les dégâts au sein de la stratégie Biocontrôle restent conséquents avec un seuil de 2% de présence de larves également dépassé en fin de chaque génération, ils sont moins élevés dans cette parcelle [Figure 27, Figure 28](#). Le taux de fruits attaqués est en effet plus faible au cours des deux générations avec une majorité de fruits possédant des piqûres sèches à la fin des deux générations [Figure 27](#). Ce type de piqûre est moins problématique d'un point de vue économique que la présence de piqûres actives car les fruits peuvent être commercialisés d'une autre façon (transformation en compote par exemple) ([Saint-Ges 2014](#)). De plus, les larves présentes dans les piqûres actives correspondent aux individus ayant échappé aux traitements et constitueront la prochaine génération ; il est donc essentiel de les contrôler. Ainsi, la stratégie Biocontrôle semble plus efficace que la stratégie Référence pour juguler la pression du carpocapse.

Ces résultats peuvent paraître étonnants : en effet, la stratégie Référence étant la référence agronomique utilisée habituellement en [PFI\\*](#), nous nous attendions à obtenir des résultats acceptables concernant la quantité de dégâts due au carpocapse. En outre, l'hétérogénéité variétale présente au



sein de la parcelle pouvait laisser penser que la stratégie Référence serait moins sensible aux ravages du carpocapse de par sa diversité, ce qui n'est pas non plus le cas. Pourtant, des études démontrent que la sensibilité du carpocapse peut varier selon la variété de pomme et la précocité des fruits (Akroute et al. 2023). Par ailleurs, le seuil de tolérance au verger concernant le taux de fruits attaqués par le carpocapse est nettement dépassé sur l'ensemble des générations pour les stratégies Biocontrôle et Référence, ce qui implique que ces stratégies ne sont pas viables économiquement parlant à l'heure actuelle (Maalouly Matar 2013). De ce fait, les résultats de l'expériences ne sont pas satisfaisants car les objectifs de pilotage ne sont pas atteints, et sont à nuancer (Havard et al. 2017).

Face à ces résultats, nous pouvons émettre plusieurs hypothèses, comme la différence de pression historique entre les deux parcelles (malgré leur proximité géographique) qui n'aurait pas suffisamment été prise en compte dans l'élaboration des stratégies, et qui aurait entraîné une abondance de larves diapausantes dans la parcelle Référence à la fin de l'année 2023. En effet, la présence extrêmement tardive de larves dans les fruits lors du comptage avant récolte le 13 novembre 2023 (4,1% de piqûres actives comptabilisés, données de la station) a favorisé l'accroissement de la population de larves diapausantes car ces dernières n'ont pas été atteintes par le traitement avec les nématodes [32], pourtant bien positionné le 4 novembre 2023 (données de la station). Il est donc essentiel de prendre en compte cette hypothèse dans la mise en place des traitements tardifs automnaux, décisifs pour endiguer les futures générations de l'année suivante. De façon générale, l'historique d'une parcelle est un point clef à prendre en compte dans l'élaboration d'une stratégie.

Nous pouvons également supputer un éclaircissage prophylactique plus sévère au sein de la parcelle Biocontrôle en comparaison à la stratégie Référence et qui aurait éradiqué une plus grande partie de la population de carpocapse. Cette réflexion est basée sur l'anticipation du pilote d'une potentielle efficacité moindre des traitements biocontrôle.

Nous pouvons par ailleurs imaginer une perte hypothétique d'efficacité des insecticides de synthèse due à des conditions climatiques non optimales au moment de la pose ; la température moyenne journalière étant parfois supérieure à 25°C *Figure 25*. Or, des études scientifiques démontrent que le climat et des températures supérieures à 25°C impactent l'efficacité des substances actives composant les insecticides de synthèse utilisés dans la stratégie Référence (Perrin 2022). Ces facteurs doivent donc être pris en compte pour adapter le positionnement des traitements. Il est trop ambitieux de supputer ici l'émergence d'une résistance aux insecticides, mais c'est un point qu'il est essentiel de garder à l'esprit lors de la mise en place des stratégies (Siegwart 2022).

Enfin, il existe un biais évident de l'observateur lors du comptage des fruits : en cas de forte pression du ravageur, l'expérimentateur peut être influencé par l'abondance des fruits piqués et ne pas faire preuve d'impartialité totale dans l'échantillonnage aléatoire des fruits.

Quoi qu'il en soit, ces résultats témoignent d'une mauvaise gestion de la pression du ravageur sur la station au cours des deux générations. Les règles de décision établies, concernant la nature du traitement à positionner selon la pression, ne sont pas toujours suivies *Tableau 2*. Cela s'explique car le nombre de traitements étant limité sur l'année, le positionnement des insecticides les plus efficaces est crucial, et nous ne pouvons parfois pas suivre ces règles par interdiction d'appliquer plus d'insecticides de synthèse (Agogué et al. 2024). C'est ainsi que nous assistons en deuxième génération à une incapacité à utiliser certains insecticides de synthèse, et à la limite des traitements biocontrôle qui n'arrivent pas à endiguer la pression en fin de seconde génération *Tableau 3, Figure 27*. Ce dernier point peut s'expliquer par leur faible rémanence, cumulée à un stade baladeur plus rapide et qui nécessite une synchronisation précise des traitements avec le cycle de vie du ravageur pour une efficacité optimale (Knight, Witzgall 2013; CA Tarn-et-Garonne, CA Lot-et-Garonne 2024).



Ces résultats démontrent ainsi l'importance de l'adaptation continue d'une stratégie et du positionnement des traitements afin de gérer la pression d'un ravageur.

Cependant, nous pouvons noter que l'échec au cours de la première génération est sérieusement pris en considération : nous remarquons alors le positionnement des insecticides de synthèse le 26 juin et le 11 juillet suite au fort accroissement des dégâts, ainsi que l'augmentation de la dose d'adjuvant en début de seconde génération [Tableau 3](#). Cela entraîne la diminution de la proportion cumulée des dégâts en début de seconde génération, au point de redescendre en-dessous du seuil de 2% de présence de larves pour la stratégie Référence, et du seuil de 1% pour la stratégie Biocontrôle [Figure 27](#), [Figure 28](#). Nous supposons par ailleurs l'action essentielle de l'éclaircissage prophylactique dans cette diminution de dégâts entre les deux générations, réduisant par la même occasion la future population de larves diapausantes issues des fruits piqués. Cependant, il convient de nuancer cette pratique : il serait pertinent d'étudier la rentabilité économique en fin de saison de cette prophylaxie qui nécessite beaucoup de temps et de main-d'œuvre, en particulier lorsque nous observons une telle recrudescence des dégâts quelques temps après la fin de l'éclaircissage [Figure 27](#).

Enfin, la stratégie suivie chez le producteur présente des résultats satisfaisants : en effet, la proportion de fruits attaqués, faible dès le départ, diminue au cours du temps jusqu'à devenir presque nulle en fin de première génération, et se stabilise par la suite. Le pourcentage de piqûres actives reste alors tout au long du cycle en-dessous du seuil de 0,5% de présence de larves [Figure 27](#), [Figure 28](#). Ces résultats exposent dans un premier temps une hétérogénéité notable entre les deux sites, probablement causée par un historique de pression différent ([données de la station](#)) qu'il est important de prendre en compte. Dans un second temps, ces conclusions démontrent l'efficacité de la stratégie Renforcée qui semble envisageable à court terme pour les agriculteurs économiquement parlant. Nous pouvons émettre l'hypothèse d'un meilleur positionnement des traitements, ou tout simplement d'une augmentation d'efficacité de la stratégie favorisée par l'utilisation d'un nouvel adjuvant, DJEEN<sup>®</sup>, en alternance avec CITROLE-A [19]. Cela peut en effet permettre de préserver l'efficacité des produits. De plus, la diminution de l'[IFT](#)<sup>\*</sup>, en comparaison à la stratégie Référence, nous confirme la possibilité de réaliser une stratégie de gestion allégée en insecticides de synthèse [Tableau 4](#).

Dans l'ensemble, les résultats nous suggèrent de réitérer l'expérimentation des trois [essais système](#)<sup>\*</sup>, en mettant idéalement en place un dispositif multisite où les mêmes stratégies sont suivies chez différents producteurs et sont donc comparables en tout point. A ce titre, il serait préférable de travailler sur des parcelles composées d'une unique variété tardive afin de comparer les résultats « toutes choses égales par ailleurs » et de s'affranchir de la variabilité de sensibilité du carpocapse provoquée par la diversité variétale ([Havard et al. 2017](#); [Akroute et al. 2023](#)). Cela permettrait de réaliser une analyse statistique améliorant la robustesse de l'essai qui n'est pour l'instant qu'une démonstration de concept. Enfin, il est difficile de conclure sur l'efficacité propre de la confusion sexuelle liquide utilisée dans les stratégies Biocontrôle et Renforcée, mais c'est un levier intéressant à étudier. Il serait donc pertinent de mettre en place un essai ciblé permettant de comparer l'effet de cette confusion avec celui de la confusion classique, au sein d'une même stratégie de gestion contre le carpocapse du pommier afin d'examiner les résultats « toutes choses égales par ailleurs » ([COMPO EXPERT 2022](#); [Havard et al. 2017](#)).

Ainsi, afin d'optimiser les stratégies de protection notamment celle de biocontrôle, l'objectif est de continuer à intégrer des [méthodes de biocontrôle](#)<sup>\*</sup> au sein de l'[essai système](#)<sup>\*</sup> afin d'obtenir un effet combinatoire synergique. A ce titre, la technique innovante de l'augmentorium, actuellement à l'état de prototype sur les Lépidoptères, est un levier en cours de développement dans l'espoir de pouvoir être un jour intégré à la stratégie en grande parcelle.

*Tableau 5 : Caractéristiques des quatre mailles testées au cours de l'essai maille dans le cadre de l'amélioration du prototype de l'augmentorium (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 20/05/2024)*

Type de maille	Dimensions de la maille
Filet anti-oiseaux (Témoin)	18 mm * 18 mm
Filet Alt'Carpo	5,5 mm * 2,2 mm
Filet Alt'Eurythoma	2,21 mm * 1,71 mm
Filet Alt'Droso	1,4 mm * 0,83 mm

---

# PARTIE III : DEVELOPPEMENT DE LA TECHNIQUE DE L'AUGMENTORIUM : ESSAI PROTOTYPE

---

Comment adapter la technique de l'augmentorium à la lutte contre le carpocapse ?

## I. Objectif et hypothèses

Afin d'améliorer l'efficacité des stratégies de protection globale combinant diverses méthodes, l'innovation de l'augmentorium est étudiée comme nouveau levier de biocontrôle. Cette technique, dont les recherches débutent pour l'adapter aux Lépidoptères comme dans le cadre des projets ALTO ou SuzoCarpo menés par l'INRAE (INRAE Gotheron 2020; Siegwart 2024), n'est pour l'instant qu'à l'état de prototype (Havard et al. 2017).

C'est pourquoi l'objectif premier de cet essai est de s'inspirer des travaux réalisés sur les Tephritidae (Desurmont et al. 2023; Herz et al. 2020) pour développer le prototype et notamment sa structure afin de l'approprier à la lutte contre le carpocapse. Ce dernier doit rester prisonnier à l'intérieur, évitant ainsi « la ré-infestation de l'agroécosystème par une nouvelle génération d'adultes qui émergent dans l'augmentorium » (Siegwart 2024). Le second objectif est d'adapter la structure aux parasitoïdes\* du carpocapse qui doivent être capables d'y entrer pour parasiter le ravageur et d'en sortir afin de faciliter par la suite leur installation pérenne dans le milieu, et favoriser ainsi la lutte biologique par conservation\* (Deguine et al. 2011). Enfin, l'augmentorium doit être conçu de telle sorte qu'il n'impacte pas la survie du carpocapse piégé. En effet, si les conditions intérieures tuent tous les individus introduits, les auxiliaires naturels mourront également et l'augmentorium conservera son aspect prophylactique mais n'interviendra plus dans la lutte biologique. Pour ce faire, le parasitoïde\* exotique *Mastrus ridens* est sélectionné comme objet d'étude pour sa grande spécificité au carpocapse et car c'est le plus large parasitoïde\* du ravageur ; la largeur et l'épaisseur du corps des adultes étant les critères morphologiques les plus importants. En effet, si la maille est suffisamment grande pour laisser passer *Mastrus ridens*, alors l'ensemble des parasitoïdes\* de *Cydia pomonella* L. devrait passer par déduction d'un point de vue morphologique [7].

De ce fait et au regard des objectifs, nous travaillons sur deux leviers afin de construire l'augmentorium le plus optimal. Le premier correspond à la sélection du type de maille permettant de maintenir prisonnier le carpocapse adulte tout en laissant passer *Mastrus ridens*. Le second concerne la sélection du type de contenant permettant de garder en vie *Cydia pomonella* L. afin qu'il assure le bon déroulement de son cycle jusqu'à la diapause\* où *Mastrus ridens* le parasite [7].

Dans un premier temps, nous décidons de tester trois types de maille : Alt'Carpo, Alt'Eurytoma et Alt'Droso, en partenariat avec l'INRAE d'Avignon et l'INRAE Gotheron car ce sont des mailles susceptibles d'être utilisées par les agriculteurs au vu de la pression des différents ravageurs associés à ces filets dans la région (Siegwart 2024; INRAE Gotheron 2020) *Tableau 5*.





*Figure 29 : Photographie d'Anagyrus fusciventris à partir de laquelle sa largeur est calculée [34]*

Concernant le protocole sur le contenant, nous testons un seau et une caisse de récolte car ces objets sont considérés comme facilement accessibles et peu onéreux pour les agriculteurs et répondent ainsi à un des objectifs de l'augmentorium (Herz et al. 2020; Deguine et al. 2011). Nous choisissons d'utiliser des seaux noirs, simulant une poubelle, car des études récentes montrent la pertinence de l'opacité pour favoriser la sortie du parasitoïde\* hors de l'augmentorium (Siegwart 2024). Nous décidons ensuite de nous inspirer du projet INRAE ALTO et d'étudier une modalité où nous insérons des bandes-pièges contenant un nombre de larves sauvages déterminé, afin de contrôler le nombre d'individus dans les dispositifs et d'analyser la survie des individus (INRAE Gotheron 2020). L'état sauvage des larves est alors important pour se rapprocher le plus possible des conditions réelles.

Nous testons en parallèle une modalité où des fruits piqués sont insérés afin de surveiller la dégradation de ces fruits, relative à l'étendue de la pourriture grise. En effet, en décomposant la matière organique du fruit, le champignon pourrait rentrer en compétition avec le carpocapse pour les ressources alimentaires, et impacter indirectement la survie de ce dernier [18]. De ce fait, la qualité des fruits doit être conservée suffisamment longtemps dans les augmentoria pour garantir le bon déroulement du cycle du carpocapse jusqu'à sa diapause\* une fois ce dernier sorti du fruit. De plus, les agriculteurs sont susceptibles de mettre des bandes-pièges comme des fruits piqués dans les augmentoria selon la saison. Dans cette modalité, nous ne pouvons contrôler le nombre d'individus insérés et ne pouvons par conséquent qu'émettre des tendances sur la survie des individus malgré tout piégés.

Nous nous attendons alors à sélectionner différentes composantes de l'augmentorium afin de pouvoir évaluer le prototype et son adaptation au carpocapse et à son parasitoïde\* *Mastrus ridens*. Pour le protocole maille, nous espérons obtenir une réussite avec le filet Alt'Carpo, supposé être spécifique au carpocapse. Quant au protocole contenant, nous supputons une augmentation de chaleur au sein du seau ainsi qu'une atmosphère plus humide du fait de l'espace confiné, qui pourraient impacter le degré de dégradation des fruits et la survie des individus.

## II. Matériel et méthodes

### A. Expérience sur le type de maille

#### 1. Gestion de l'essai

Deux expériences sont réalisées dans cette partie : la fuite du carpocapse adulte hors du dispositif à travers la maille étudiée, et le passage du parasitoïde\* à travers cette maille. Concernant l'étude de la fuite du ravageur adulte, des bandes-pièges sont relevées pour recueillir des chrysalides dans le but de faire émerger des adultes. Quant à l'expérience sur le parasitoïde\*, n'ayant au dernier moment pas pu nous procurer *Mastrus ridens* auprès de l'INRAE, nous décidons de travailler avec le parasitoïde\* *Anagyrus fusciventris*. En effet, l'expérience étant un test de passage d'un insecte basé sur la largeur de son corps sans objectif d'étude comportementale, il nous suffit de choisir un parasitoïde\* de même largeur que *Mastrus ridens*. *Anagyrus fusciventris* est choisi car son épaisseur (1,23 mm), calculée à partir de sa longueur connue et des proportions d'une image, est légèrement supérieure à celle de *Mastrus ridens* (1,13mm) (Horstmann 2009) *Figure 29*.

L'expérience concernant la fuite du carpocapse se déroule du 24 juillet au 29 juillet lorsque le passage des individus à travers la maille est observé. Le passage du parasitoïde\* est quant à lui observé le 1<sup>er</sup> août, après avoir commandé des individus adultes *Anagyrus fusciventris* à Koppert [35].



Figure 30 : Mise en place du dispositif expérimental concernant l'étude du type de maille dans la chambre de culture (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 22/07/2024)

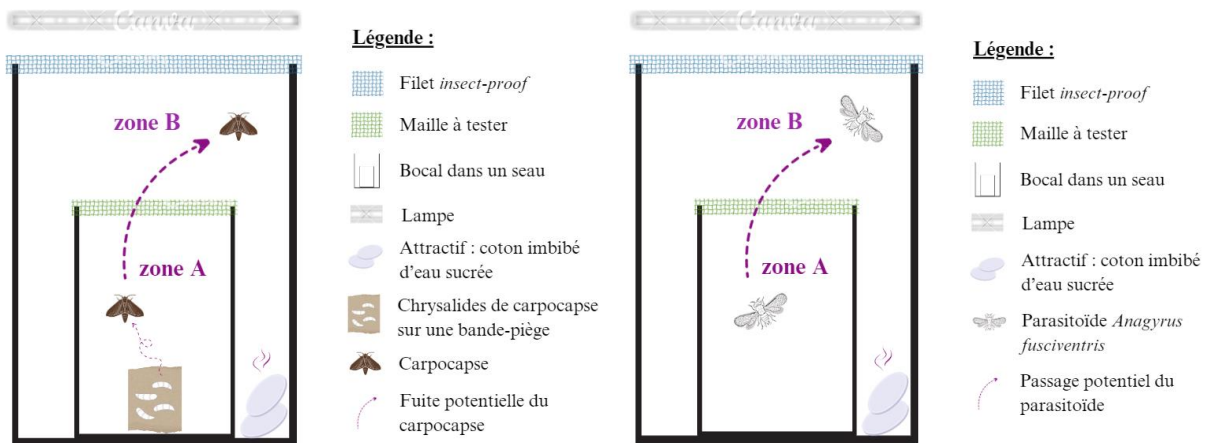


Figure 31 : Schémas représentant une répétition du dispositif dans le cadre de l'expérience de la fuite du carpocapse (à gauche) et du passage du parasitoïde (à droite) à travers les mailles testées (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 25/07/2024)

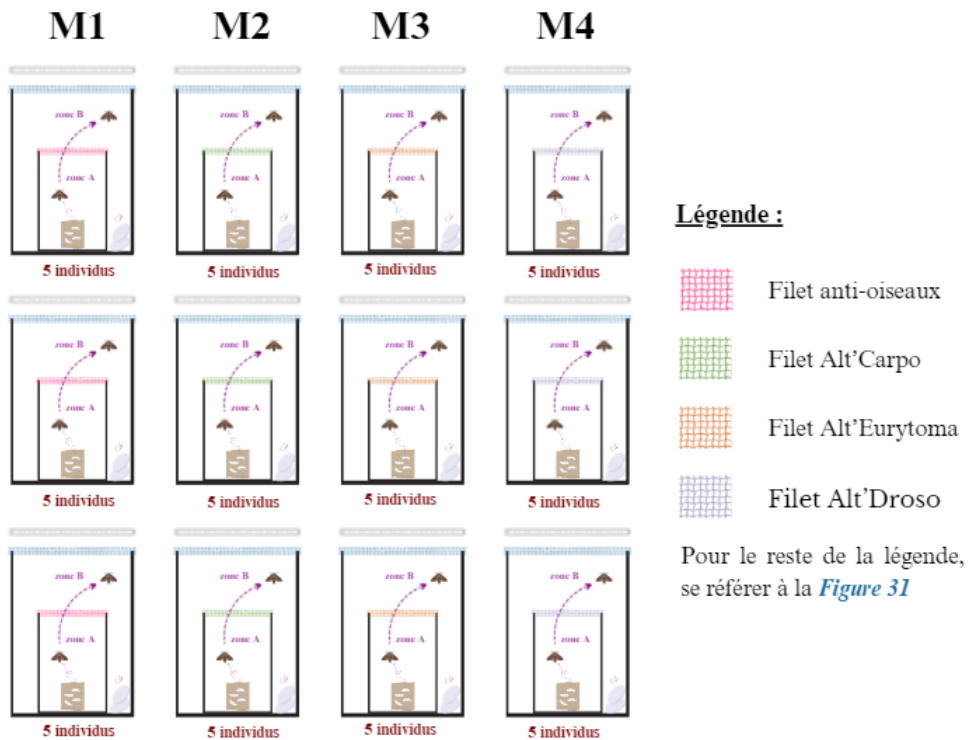


Figure 32 : Schémas représentant l'ensemble du dispositif utilisé dans le cadre de l'expérience sur les types de maille, en prenant comme exemple la fuite du carpocapse (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 25/07/2024)

## 2. Dispositif expérimental et modalités

Les expériences se déroulent en laboratoire, ce qui permet un suivi facile et une maîtrise des conditions environnantes. Le dispositif est installé dans une chambre de culture. Partant du postulat que la lumière influence le cycle de *Cydia pomonella* L. qui est un insecte nocturne (Etalon 2010), il est éclairé par une lampe programmée pour être allumée de 6h à 21h afin de recréer sensiblement le cycle journalier du mois de juillet. La température est d'abord relevée pendant une semaine au sein du dispositif et de la chambre de culture par l'enregistreur Elitech RC-5 Data Logger, avant l'insertion des insectes, afin de vérifier que la température n'augmente pas à l'intérieur suite à l'ajout de la lampe. Le résultat étant négatif, l'expérience avec les individus peut commencer [Figure 30](#).

Quatre mailles différentes sont donc testées dans cette expérience : le filet anti-oiseaux faisant office de témoin supposé laisser passer l'ensemble des individus, le filet Alt'Carpo, le filet Alt'Eurytoma et le filet Alt'Droso [Tableau 5](#). Afin d'évaluer leur performance au regard des objectifs énoncés précédemment, un bocal à confiture recouvert de la maille à tester (formant la zone A) est placé dans un seau de contenance 5L (formant la zone B), lui-même recouvert d'un filet *insect-proof* afin qu'aucun individu ne s'échappe du dispositif. Cet agencement est répété quatre fois pour chaque type de maille.

Dans le cadre de l'expérience concernant la fuite du carpocapse adulte, cinq chrysalides sont insérées au sein d'une bande-piège placée dans la zone A de chaque répétition. Concernant l'étude du passage du [parasitoïde\\*](#) à travers la maille, cinq individus adultes sont déposés dans la zone A de chaque répétition. Pour toutes les expériences, un attractif alimentaire sous forme de coton imbibé d'eau sucré est placé à chaque fois dans la zone B (Jaloux 2006) [Figure 31](#), [Figure 32](#).

## 3. Observations réalisées et variables d'étude

Pour les diverses expériences, la présence d'individus dans chaque zone est observée et la variable d'étude, notée 'Presence\_zoneb', correspond au nombre d'adultes présents dans la zone B.

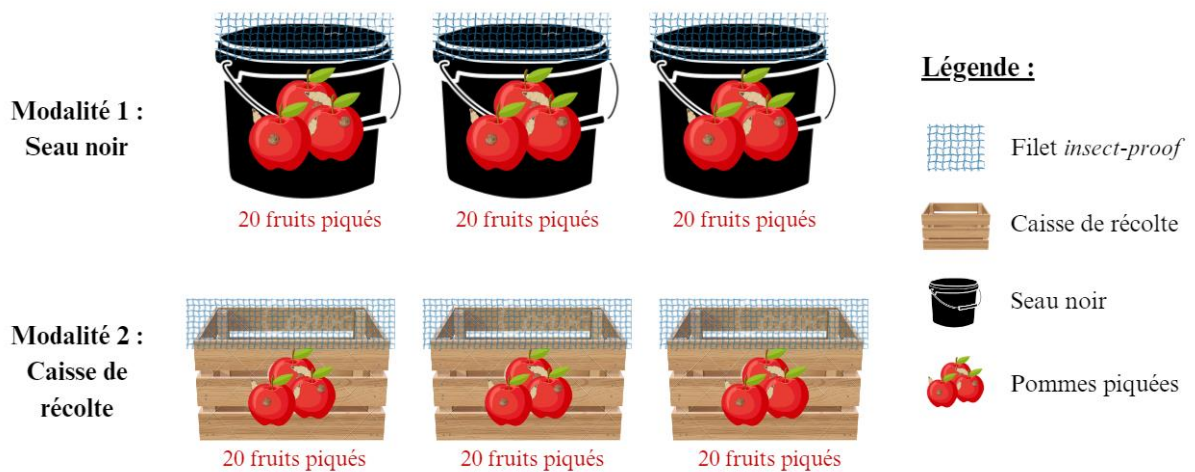
## 4. Analyses statistiques

L'analyse statistique des résultats est réalisée sur le logiciel RStudio avec la version 4.4.2 de R. Après l'exploration des données, la variable 'Presence\_zoneb' (qui est une réponse binaire) est analysée à l'aide d'un modèle linéaire généralisé mixte suivant une distribution binomiale qui ajuste la présence (catégorie d'intérêt) notée 1 ou l'absence notée 0 en fonction des facteurs. Le facteur 'Modalite' est pris en compte en tant que facteur fixe afin d'étudier son impact sur la présence des individus en zone B, et les facteurs 'Repetition' et 'Individu' sont définis comme facteurs aléatoires afin de modéliser l'hétérogénéité due à ces deux facteurs. Ce modèle comprend donc des séries appariées et utilise la fonction *glmer*. L'effet de la variable explicative est alors vérifié par un test de Wald à l'aide de la fonction *Anova* (Hervé 2021).

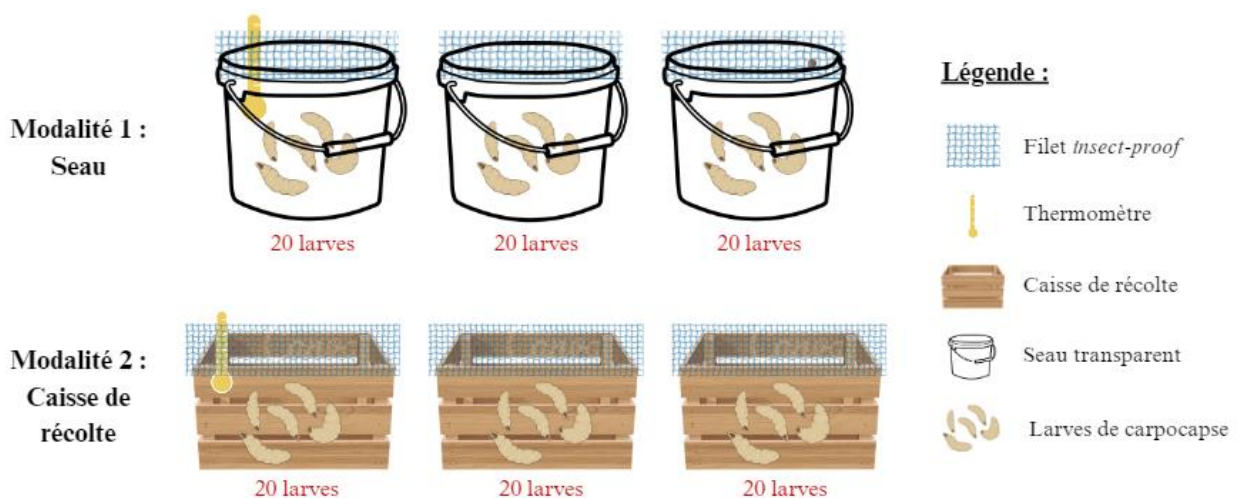
Au vu de l'obtention des résultats énoncés dans la partie suivante [voir PARTIE III-III - A. Résultats](#), le modèle, même après ajustement et simplification par la suppression des facteurs aléatoires, ne supporte pas la faible variation dans les niveaux des facteurs et présente des problèmes de convergence et d'ajustement. L'analyse s'arrête ici, mais les données brutes sont représentées graphiquement à l'aide de la fonction *ggplot2*.



**Figure 33 :** Dispositif expérimental de l'expérience sur le type de contenant dans le cadre de l'amélioration du prototype de l'augmentorium (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 01/07/2024)



**Figure 34 :** Schéma représentant le dispositif expérimental mis en place pour l'étude de la dégradation des fruits piqués au sein des augmentoria, dans le cadre de l'expérience sur les types de contenant (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 25/05/2024)



**Figure 35 :** Schéma représentant le dispositif expérimental mis en place pour l'étude de la survie des individus diapausants de la troisième génération de 2023 au sein des augmentoria, dans le cadre de l'expérience sur les types de contenant (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 25/05/2024)

## B. Expérience sur le type de contenant

### 1. Gestion de l'essai

Deux expériences sont réalisées dans cette partie : l'étude au sein des contenants de la dégradation des fruits piqués au cours de la seconde génération (de maturité avancée), et celle de la survie des individus à partir du recensement des stades biologiques des individus retrouvés. Nous travaillons alors sur les larves diapausantes de la troisième génération de 2023 principalement concernées par le parasitisme par *Mastrus ridens* [7], et sur les larves de la seconde génération de 2024 afin de se positionner chronologiquement en même temps que l'étude des fruits piqués (Trillot et al. 2002; Fleckinger 1964).

L'étude nécessitant des larves de cinquième stade à introduire dans les augmentoria dans le but d'observer le déroulement du cycle de la diapause\* jusqu'à l'émergence\*, des bandes-pièges sont relevées. Par ailleurs, les fruits piqués (issus d'une même variété) sont prélevés le 1<sup>er</sup> juillet en début de seconde génération, puis le 26 juillet afin d'observer leur dégradation sur l'ensemble de cette génération et ce à des maturités différentes.

L'essai concernant la dégradation des fruits piqués est alors mis en place le 1<sup>er</sup> juillet et les augmentoria sont ouverts le 26 juillet une première fois pour relever la dégradation des premiers fruits, puis à nouveau le 09 août pour observer la dégradation des fruits de maturité avancée. Concernant la survie des larves insérées dans les augmentoria, l'essai est mis en place du 23 juillet au 09 août pour relever l'état et le stade biologique des individus retrouvés. Quant aux larves diapausantes de 2023, l'essai est mis en place le 1<sup>er</sup> octobre 2023 et se termine le 30 mai 2024.

### 2. Dispositif expérimental et modalités

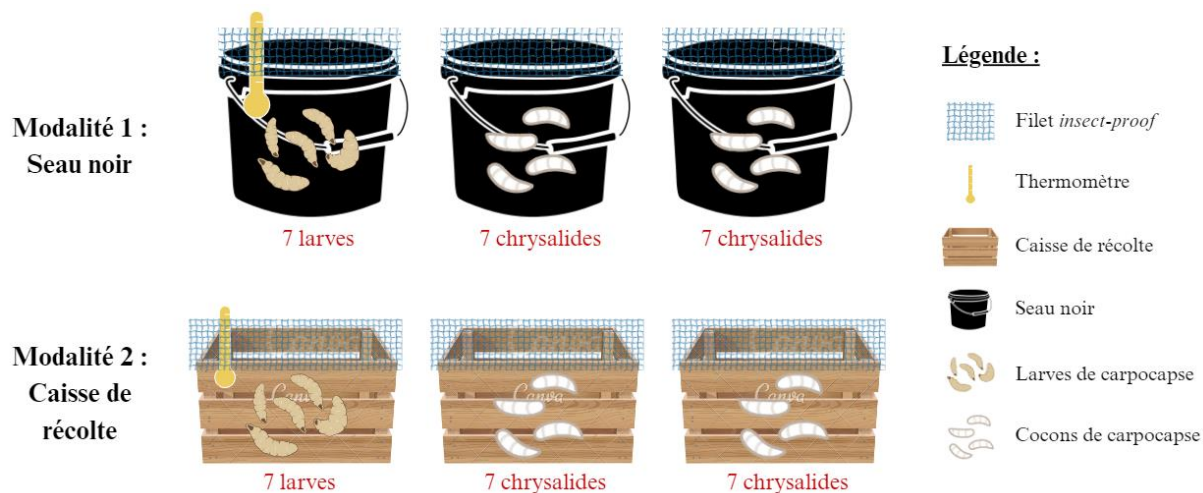
Pour la conception des augmentoria, deux matériaux sont testés :

- Un seau en plastique noir de contenance 10 L, avec une seule ouverture sur la face supérieure
- Une caisse de récolte (50 \* 30 \* 26,5 cm), composée de nombreuses petites ouvertures sur les faces latérales ainsi qu'une grande sur la face supérieure

Les seaux et caisses, formant les deux modalités à trois répétitions, sont recouverts d'un filet *insect-proof* (maille faisant 0,80 mm \* 0,80 mm) afin qu'aucun insecte ne s'échappe. Enfin, dans le but de s'approcher le plus possible des conditions environnementales d'un verger tout en restant au stade du prototype, le dispositif, maintenu clos pendant toute la durée de l'expérimentation, est positionné sous un arbre isolé afin de reproduire l'environnement du verger [Figure 33](#).

Pour les deux dates évoquées, 120 fruits piqués par le carpocapse sont à chaque fois répartis équitablement au sein des modalités à raison de 20 fruits par répétition. Afin de maximiser la probabilité de présence de larves dans les fruits, les fruits introduits ne présentent qu'un seul orifice d'entrée avec de la sciure [Figure 34](#).

Concernant les larves diapausantes de 2023, 300 larves sont extraites des bandes-pièges disposées et installées délicatement dans de nouvelles bandes-pièges pour permettre aux larves de tisser un nouveau cocon au sein du même dispositif expérimental. Ces bandes-pièges sont alors réparties équitablement dans les deux modalités à raison de 50 larves par répétition. De plus, deux enregistreurs de données de température Elitech RC-5 Data Logger sont respectivement placés dans un seau et dans une caisse [Figure 35](#).



**Figure 36 :** Schéma représentant le dispositif expérimental mis en place pour l'étude de la survie des individus de la seconde génération de 2024 au sein des augmentoria dans le cadre de l'expérience sur les types de contenant (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 25/05/2024)



**Figure 37 :** Classes de dégradation des dégâts sur fruits piqués selon le degré de pourriture grise présent (classe 1 à 4 de gauche à droite au-dessus) [18], et pépins touchés par les larves de carpocapse en comparaison à une pomme saine (en-dessous) (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 02/08/2024)

Concernant l'expérience de 2024, la récolte des bandes-pièges ayant été peu concluante, sept larves sont respectivement déposées dans la première répétition de chaque modalité, et sept chrysalides sont respectivement déposées dans les autres répétitions. Enfin, deux enregistreurs de données de température Elitech RC-5 Data Logger sont respectivement placés dans un seau et dans une caisse [Figure 36](#).

### 3. Observations réalisées et variables d'étude

#### a. Observations réalisées

A la fin de l'expérience sur les fruits piqués, ces derniers sont coupés et leur dégradation, correspondant à l'étendue de la pourriture grise due à *Botrytis cinerea* [18], est classée en différents groupes :

- Classe 1 : les fruits ne sont pas dégradés (absence de pourriture)
- Classe 2 : les fruits sont légèrement dégradés (moins de 1/3 de la pomme est pourri)
- Classe 3 : les fruits sont modérément dégradés (entre 1/3 et 2/3 sont pourris)
- Classe 4 : les fruits sont fortement dégradés (plus de 2/3 sont pourris)

Pour chaque classe, les fruits sont répartis à nouveau en deux catégories : ceux aux pépins touchés par le carpocapse ou non [Figure 37](#).

Pour les expériences concernant les larves, l'état et le stade biologique des individus est comptabilisé selon le nombre de cocons, de larves, de chrysalides et d'adultes restants, notés vivants ou morts à chaque fois. Enfin, le nombre d'auxiliaires présents est recensé afin de déterminer si un type de contenant favorise leur présence.

#### b. Variables d'étude

A la suite des comptages réalisés, nous obtenons les variables suivantes concernant les fruits piqués :

- ND : pourcentage de fruits non dégradés
- LD : pourcentage de fruits légèrement dégradés
- MD : pourcentage de fruits moyennement dégradés
- FD : pourcentage de fruits fortement dégradés
- NDP : pourcentage de fruits non dégradés avec les pépins touchés
- LDP : pourcentage de fruits légèrement dégradés avec les pépins touchés
- MDP : pourcentage de fruits moyennement dégradés avec les pépins touchés
- FDP : pourcentage de fruits fortement dégradés avec les pépins touchés

Cela nous permet de créer une variable réponse Pourc\_degradation rassemblant ces variables.

Concernant les individus, nous obtenons les variables suivantes :

- LI : nombre de larves introduites
- C : nombre de cocons retrouvés
- LV : nombre de larves vivantes retrouvées
- LM : nombre de larves mortes retrouvées
- CV : nombre de chrysalides non écloses vivantes retrouvées
- CM : nombre de chrysalides non écloses mortes retrouvées
- CE : nombre de chrysalides écloses retrouvées
- AV : nombre d'adultes vivants retrouvés
- AM : nombre d'adultes morts retrouvés





Ces dernières variables permettent alors de calculer différents taux (dont le détail des calculs et les postulats ayant permis de les poser sont présentés en [Annexe 6](#)) afin de déterminer, dans une optique de lutte biologique avec *Mastrus ridens*, si le carpocapse arrive à finir son cycle de développement dans l'augmentorium testé, et si non quelle étape est impactée :

- Taux de pertes durant le transfert, correspondant à la phase de déplacement des individus des bandes-pièges prélevées sur le terrain à leur dépôt dans les augmentoria :  $\tau(\text{transfert}) = \frac{LI-C}{LI}$ . Cette variable appelée Transfert représente le taux de larves n'ayant pas réussi à s'installer dans les bandes-pièges au sein des augmentoria pour y faire leur cocon, ainsi que les individus ayant disparu pendant cette phase.
- Taux de pertes durant la [nymphose](#)<sup>\*</sup>, correspondant à la phase située entre l'installation des bandes-pièges dans l'augmentorium, et le moment où les larves créent leur chrysalide :  $\tau(\text{diapause}) = \frac{C-LV+LM-CV-CM-CE}{2C}$ . Cette variable appelée Diapause représente les larves mortes au cours de leur diapause, c'est-à-dire avant d'avoir réussi à faire leur chrysalide, ainsi que les individus ayant disparu pendant cette phase.
- Taux de pertes durant la [diapause](#)<sup>\*</sup>, correspondant à la phase entre la création des chrysalides et le moment où ces dernières éclosent :  $\tau(\text{nymphose}) = \frac{C-LV-LM-CV+CM-CE}{2C}$ . Cette variable appelée Nymphose représente les individus morts au cours de leur nymphose, c'est-à-dire les nymphes ayant fait leur chrysalide mais n'ayant pas pu éclore par mort naturelle ou prédation, ainsi que les individus ayant disparu pendant cette phase.
- Taux de pertes durant l'[émergence](#)<sup>\*</sup>, correspondant à la phase suivant l'éclosion des chrysalides :  $\tau(\text{émergence}) = \frac{CE-AV}{CE}$ . Cette variable appelée Emergence représente les adultes morts ou ayant disparu après avoir éclos [Annexe 6](#).

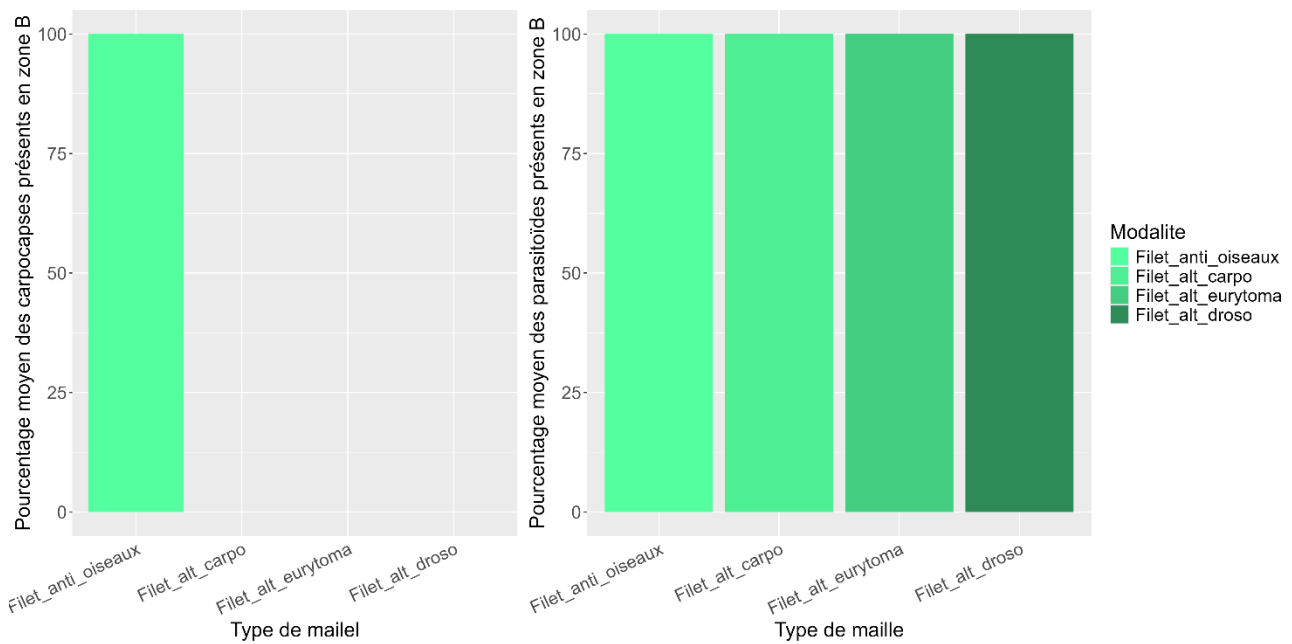
Cela nous permet de créer une variable réponse Pourc\_pertes rassemblant ces variables.

Enfin, le nombre moyen d'auxiliaires ainsi que l'état général du contenant et la température moyenne issue des enregistrements de température sont relevés et comparés entre les deux modalités.

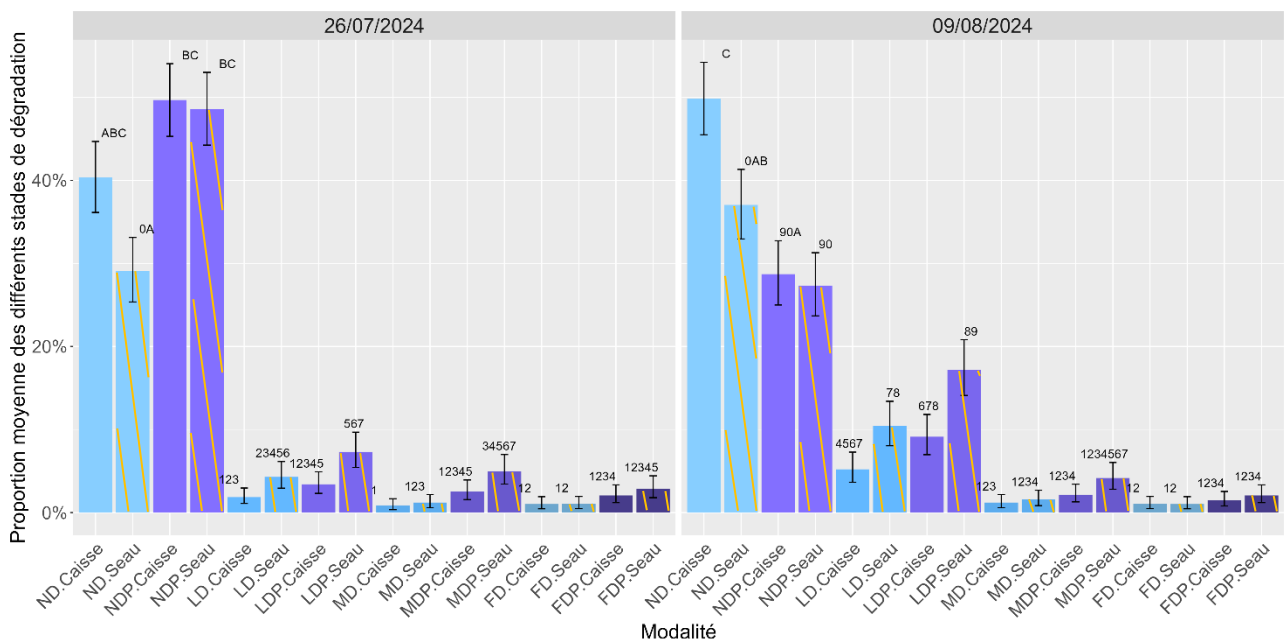
#### 4. [Analyses statistiques](#)

L'analyse statistique des résultats est réalisée sur le logiciel RStudio avec la version 4.4.2 de R. Après l'exploration des données, la variable Pourc\_degradation (étant une proportion) est analysée à l'aide d'un modèle linéaire généralisé mixte adapté à l'étude d'une proportion qui est une réponse quantitative continue et bornée entre 0 et 1. Pour chacune des variables réponses, les facteurs 'Modalite', 'Stade\_degradation' et 'Date' ainsi que l'interaction entre eux sont pris en compte en tant que facteurs fixes afin d'étudier leur impact sur les différentes proportions. Ce modèle ne comprend donc pas de séries appariées et utilise la fonction *betareg*. L'effet des variables explicatives est alors testé par un test de Wald à l'aide de la fonction *Anova* [Annexe 7](#).

De la même façon, la variable 'Pourc\_pertes' de 2023 et de 2024 sont analysées et les facteurs 'Modalite' et 'Phase\_cycle' ainsi que leur interaction sont pris en compte en tant que facteurs fixes. La suite des analyses statistiques, allant de la vérification des postulats jusqu'au test de comparaison multiple, est réalisée de la même façon que dans la première partie et les résultats sont représentés de la même manière ([Hervé 2021](#)) [Annexe 8](#), [Annexe 9](#).



**Figure 38 :** Représentation graphique des données brutes relatives au passage en zone B des carpocapses adultes (graphique de gauche) et des adultes *Anagyrus fusciventris* (graphique de droite) à travers les quatre mailles testées dans le cadre de l'expérience sur le type de maille (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 29/07/2024)



**Figure 39 :** Proportion moyenne ajustée des différents stades de dégradation des fruits piqués en fonction des modalités et de la date de comptage dans le cadre de l'expérience sur les types de contenant – la modalité Seau est hachurée en jaune (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 29/07/2024)

### III. Résultats

#### A. Expérience sur le type de maille

Dans le cadre de l'étude relatant de la fuite du carpocapse, nous observons que l'intégralité des adultes passe à travers le filet anti-oiseaux mais est bloquée par les trois autres mailles étudiées (Alt'Carpo, Alt'Eurytoma, Alt'Droso). D'autre part, il apparaît que l'ensemble de individus *Anagyrus fusciventris* passe à travers les quatre mailles testées *Figure 38*.

#### B. Expérience sur le type de contenant

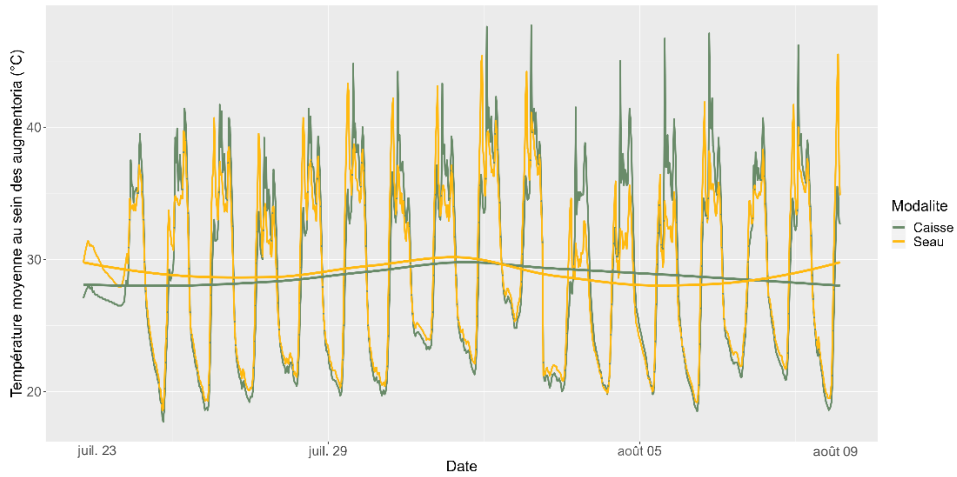
##### 1. Dégradation des fruits piqués

Le modèle généralisé mixte utilisé pour étudier la dégradation des fruits piqués présente un effet significatif du facteur 'Stade\_degradation' à un intervalle de confiance de 95% ( $p\text{-value} < 2,2.e^{-16}$ ), ainsi que des interactions 'Modalite:Stade\_degradation' ( $p\text{-value} = 0,013$ ) et 'Date:Stade\_Degradation' ( $p\text{-value} < 2,57.e^{-6}$ ) au même intervalle de confiance *Annexe 7*. Le test de comparaison multiple confirme ces résultats en exposant une proportion significativement majoritaire de fruits sains au sein des deux contenants pour les deux dates (se référer aux quatre premières barres des deux graphiques, relatives aux variables ND et NDP, en comparaison aux autres barres). Nous notons par exemple pour la modalité Caisse le 26 juillet une proportion de presque 50% pour la variable NDP contre des proportions inférieures à 5% pour les variables LDP, MDP et FDP. Ce résultat est visible plus généralement en observant les proportions concernant les dégradations au minimum modérées, toutes inférieures à 5% pour les deux dates (se référer aux barres neuf à 16 des deux graphiques) *Figure 39*.

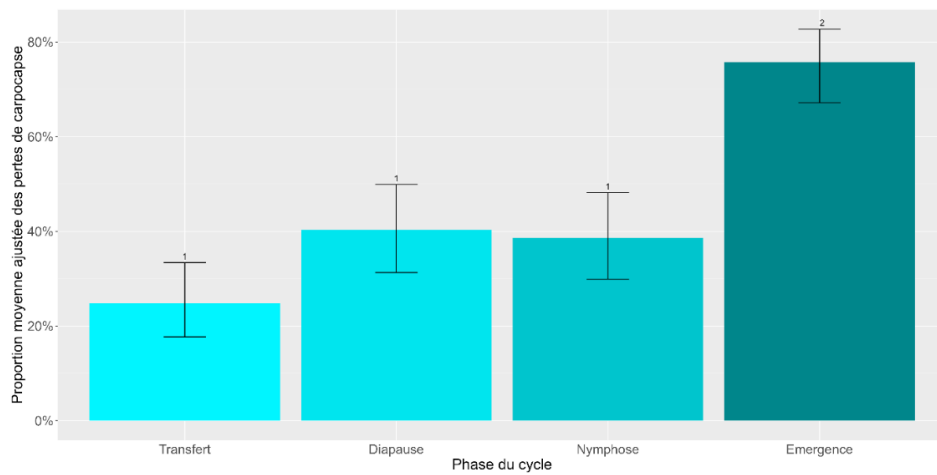
De plus, nous relevons dans les deux contenants une tendance à l'augmentation des dégâts sur fruit au cours du temps, visible par l'augmentation de la proportion de dégradations légères des fruits le 09 août en comparaison au 26 juillet (se référer aux barres cinq à huit des deux graphiques, relatives aux variables LD et LDP). Nous pouvons par exemple exposer l'augmentation significative de la proportion relative à la modalité LDP.Seau entre le 26 juillet et le 09 août *Figure 39*.

Par ailleurs, en confrontant les résultats entre les modalités Seau et Caisse (comparer deux barres de la même couleur dont une est hachurée, par exemple LD.Caisse avec LD.Seau), une tendance à relever des proportions plus importantes de fruits dégradés au sein des seaux que dans les caisses se dessine, peu importe la classe de dégradation. Ce résultat est confirmé par une plus faible proportion de fruits non dégradés au sein des seaux pour les deux dates. En nous attardant sur les résultats concernant les pépins touchés, il s'avère que la modalité Seau a tendance à exposer une majorité de fruits dont les pépins sont touchés par le carpocapse en comparaison à la modalité Caisse au cours des deux dates *Figure 39*.

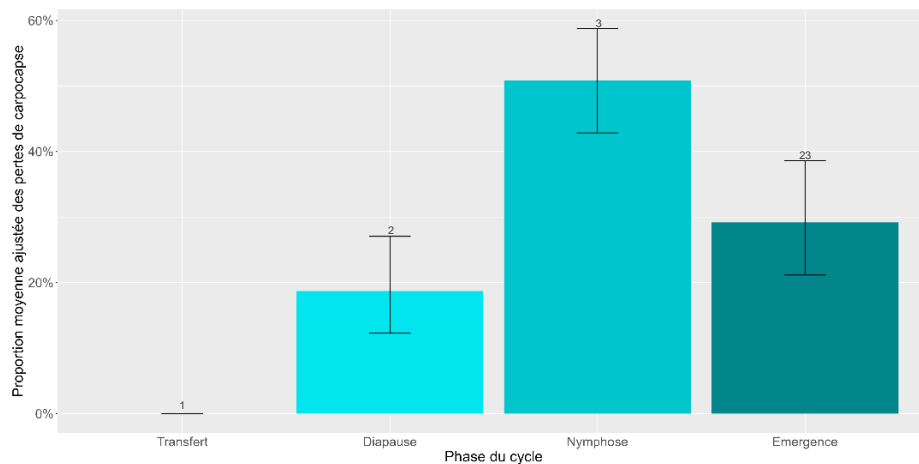
De plus, si nous analysons la proportion de fruits dont les pépins sont touchés au sein de chaque contenant et pour chaque classe de dégradation (comparer, pour chaque modalité Caisse ou Seau et pour chaque classe de dégradation, la barre en bleu clair et celle en bleu foncé, par exemple ND.Caisse et NDP.Caisse), nous remarquons que la proportion de fruits dont les pépins sont touchés a généralement tendance à être plus importante que celle où les fruits conservent leurs pépins intacts, et ce pour les deux dates *Figure 39*.



**Figure 40 :** Courbes moyennes de températures obtenues à partir des températures relevées toutes les 30 minutes au sein des deux augmentoria durant l'essai concernant la survie des individus de la seconde génération de 2024, dans le cadre de l'expérience sur les types de contenants (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 12/08/2024)



**Figure 41 :** Proportion moyenne ajustée des pertes d'individus au cours des différentes phases du cycle dans le cadre de l'expérience sur la survie des individus diapausants de la troisième génération de 2023 placés dans les augmentoria (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 29/07/2024)



**Figure 42 :** Proportion moyenne ajustée des pertes d'individus au cours des différentes phases du cycle dans le cadre de l'expérience sur la survie des individus de la seconde génération de 2024 placés dans les augmentoria (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 12/08/2024)

Enfin, concernant l'état général des contenants, de l'eau stagnante s'accumule dans les seaux et des larves mortes y sont retrouvées, tandis qu'un nombre important de fourmis et de forficules est relevé dans les caisses au moment de l'ouverture des augmentoria.

## 2. Survie des individus

Les courbes moyennes de température obtenues suite aux relevés de température présentent une température moyenne élevée au sein des deux augmentoria, avoisinant 30°C. En comparaison à la caisse de récolte, la température moyenne au sein du seau semble en général légèrement supérieure, et semble augmenter à la fin de l'expérience aux alentours du 9 août *Figure 40*.

Concernant les résultats de 2023, le modèle généralisé mixte utilisé pour les taux de pertes des individus diapausants de la troisième génération au cours des quatre phases du cycle présente un effet significatif du facteur 'Phase\_cycle' à un intervalle de confiance de 95% ( $p$ -value = 0,0019) *Annexe 8*. Le test de comparaison multiple confirme ce résultat en présentant un taux de pertes significativement plus élevé durant la phase Emergence (75% de pertes) qu'au cours des phases Transfert (25% de pertes), Diapause (40% de pertes), et Nymphose (39% de pertes) *Figure 41*.

Concernant les résultats de 2024, le modèle généralisé mixte utilisé pour les taux de pertes des individus de la seconde génération au cours des quatre phases du cycle présente un effet significatif du facteur 'Phase\_cycle' à un intervalle de confiance de 95% ( $p$ -value = 0,014) *Annexe 9*. Le test de comparaison multiple confirme ce résultat en présentant un taux de pertes significativement plus élevé durant la phase Nymphose (51% de pertes) que celui de la phase Diapause (19% de pertes), lui-même significativement plus élevé qu'au cours de la phase Transfert (0% de pertes). Le taux de pertes au cours de la phase Emergence, valant 29%, a par ailleurs tendance à être compris entre ceux des phases Diapause et Nymphose *Figure 42*.

Ces disparitions d'individus sont flagrantes lorsque nous observons le nombre d'individus appartenant aux différents stades. Il suffit de mettre en parallèle le nombre de cocons retrouvés avec le nombre de larves introduites ayant permis de calculer la variable Transfert, l'ensemble des larves et des chrysalides retrouvés avec le nombre de cocons ayant permis d'obtenir les variables Diapause et Nymphose, et l'ensemble des adultes retrouvés ayant permis de déterminer la variable Emergence *Annexe 6, Annexe 10, Annexe 11*.

Par ailleurs, de l'eau stagnante s'accumule dans les seaux et des larves mortes y sont retrouvées, tandis qu'un nombre important de fourmis et de forficules est relevé dans les caisses au moment de l'ouverture des augmentoria.

## IV. Discussion

Les résultats obtenus nous permettent d'affirmer la capacité des trois mailles testées à piéger le carpocapse tout en laissant s'échapper le parasitoïde\* *Figure 38*. Le fait que la maille Alt'Droso laisse s'échapper les parasitoïdes\* du carpocapse est en particulier très intéressant car des études montrent que le carpocapse est capable, en raison de sa taille, de passer à travers la maille At'Carpo, là où la maille Alt'Droso le piège assurément (Capowiez 2015). Des études comportementales seraient alors importantes pour déterminer leur volonté de traverser la maille. Par ailleurs, cela nous laisse espérer que l'augmentorium pourrait être utilisé comme méthode de lutte contre la drosophile également.

Cependant, il est important de rappeler que n'ayant pas pu nous procurer *Mastrus ridens*, cette



expérience est réalisée avec *Anagyrus fusciventris*, dont la taille est calculée manuellement. Ce calcul présente probablement des imprécisions, nous obligeant à nuancer nos résultats. Ces derniers ne sont alors qu'une preuve théorique du passage de *Mastrus ridens*, qui doit être maintenant validé avec le bon [parasitoïde](#)\*. Il conviendrait par conséquent de mettre à nouveau l'expérimentation en place avec *Mastrus ridens* afin de vérifier son passage pour entrer et sortir du dispositif, mais surtout d'étudier son comportement, comme son attractivité pour le carpocapse, qui serait alors une part essentielle à la réussite de l'expérience. Des études sont par exemple en cours à l'INRAE pour analyser la différence comportementale entre les mâles et les femelles *Mastrus ridens* (Siegwart 2024).

Par ailleurs, la température moyenne relevée dans les augmentoria, légèrement inférieure à 30°C sur toute la durée de l'expérience, témoigne de la création d'une atmosphère chaude au sein des contenants. Connaissant l'optimum de développement de *Cydia pomonella* L. (32,3°C) et de *Mastrus ridens* (entre 25 et 28°C) (Perrin 2022), elle semble alors favorable au développement du carpocapse et de son [parasitoïde](#)\*. Ce premier point est encourageant pour témoigner de la pertinence des deux prototypes. De plus, même si cette moyenne est parfois légèrement supérieure dans le seau, aucun de deux contenants ne paraît favoriser une trop forte concentration de chaleur, qui serait à l'inverse néfaste pour le développement des insectes [Figure 40](#). Ainsi, la température est un point essentiel dont il faut tenir compte dans le choix du prototype si nous souhaitons prioriser la [lutte biologique par conservation](#)\* et [acclimatation](#)\* avec l'installation pérenne de *Mastrus ridens* dans le milieu [7]. Pour cela, il est nécessaire de favoriser le développement et la survie du [parasitoïde](#)\* dans l'augmentorium, ce qui dépend de la survie des larves diapausantes et donc des conditions thermiques du milieu.

Dans un premier temps, l'expérience concernant la dégradation des fruits piqués expose une majorité de fruits non dégradés au sein des deux contenants. La légère augmentation des dégâts relevée le 09 août est probablement due à une concentration de chaleur au sein des contenants ou à l'augmentation de la température extérieure en août, mais également à l'avancement de la maturité des fruits alors plus sensibles à la pourriture grise [18] [Annexe 5](#). En outre, la présence accrue de fruits dégradés dans le seau peut s'expliquer par une atmosphère confinée et humide se développant à cause du manque d'ouverture, ce qui entraîne une accumulation d'eau de pluie favorable au développement du champignon [18] [Figure 39](#). Ces résultats laissent penser que la survie du carpocapse ne serait pas spécialement impactée par cette dégradation dans la caisse, mais pourrait l'être dans le seau.

Pour autant, les pépins des fruits semblent plus touchés par le carpocapse dans les seaux, ce qui donne l'impression que le développement du carpocapse est favorisé dans ce contenant [Figure 39](#) : en effet, la consommation des pépins est une preuve du bon développement du carpocapse (Etalon 2010) [17]. Il faut cependant garder à l'esprit que ne pouvant pas ouvrir les pommes en amont, nous ne sommes pas en mesure d'affirmer que des larves de carpocapse sont bien présentes dans tous les fruits au cours de l'expérience. Nous ne pouvons pas non plus certifier que la dégradation des pépins observée est bien engendrée par ces dernières et non en amont de l'expérimentation, d'autant plus que très peu d'individus sont retrouvés dans les dispositifs. L'objectif premier pour contrer ce biais serait de trouver un moyen de nous assurer de la présence de ces larves à l'intérieur des fruits, par exemple en parasitant manuellement une pomme à l'origine saine. En outre, la présence importante d'eau stagnante dans les seaux entraîne la mort des larves sortant des fruits et tuerait probablement les [parasitoïdes](#)\* également, ce qui nous permet de remettre en question la favorabilité du seau pour les attentes du prototype. Il conviendrait d'améliorer le prototype en créant une évacuation d'eau afin d'éviter cette stagnation.

D'autre part, le contenant caisse présente le défaut principal de favoriser, par ses nombreuses ouvertures, l'entrée de différents insectes dont la taille est inférieure aux mailles ou avec un comportement d'exploration très marqué, comme les fourmis (Clément 2023). Ces dernières dévorent





alors les larves et tueraient par conséquent les parasitoïdes\* si ces dernières étaient parasitées. La caisse ne semble donc pas favorable à la lutte biologique par conservation\* car les parasitoïdes\* seraient alors trop vulnérables au sein des larves de carpocapse. Il convient de sélectionner un prototype réduisant la prédation des larves ou favorisant au moins la sortie des auxiliaires.

Par ailleurs, les expériences concernant la survie des individus dans les dispositifs en 2023 et 2024 illustrent le fait que la diapause\* n'est pas la phase qui entraîne la plus grande mortalité *Figure 41, Figure 42*. Ce résultat est intéressant dans la mesure où c'est au cours de cette phase critique que *Mastrus ridens* parasite le carpocapse. En effet, les femelles parasitoïdes\* sont attirées par les phéromones d'agrégation émises par les larves lors du tissage du cocon, et sont ensuite capables de pondre plusieurs œufs sur la même larve, et leur développement peut durer jusqu'à 20 jours [7]. Il est donc important que l'augmentorium n'impacte pas de trop cette phase de développement. En revanche, le fait que l'émergence\* et la nymphose\* soient respectivement les phases entraînant la plus forte mortalité au cours de l'expérience en 2023 et en 2024 nous incite à penser que le carpocapse finit par mourir dans le contenant sans avoir pu s'échapper : l'effet prophylactique espéré de l'augmentorium fonctionne (Herz et al. 2020; Jang, Klungness, Mcquate 2007; Deguine et al. 2011).

Il est cependant dommage de n'avoir pu obtenir un effet significatif du facteur 'Modalité' pour les deux expériences, qui aurait permis d'exposer des différences entre les deux modalités *Figure 41, Figure 42*. Par ailleurs, la puissance statistique des résultats de l'expérience en 2024 est discutable dans la mesure où nous n'avons pas réussi à capturer beaucoup de larves, et avons par conséquent dû utiliser des chrysalides, le tout en effectifs très réduits (seulement sept individus par augmentorium). Ce problème s'explique par le caractère aléatoire des captures au sein des bandes-pièges, et par la difficulté de piéger des larves à cette période puisque le carpocapse a tendance à entrer plus rapidement en nymphose à la période estivale et à former sa chrysalide (Maalouly Matar 2013). Il serait intéressant de poursuivre cette étude pour tenter d'obtenir un contraste entre la caisse et le seau.

Au regard de ces expériences, l'objectif à long terme serait de s'assurer de la présence d'une larve dans chaque fruit piqué introduit (par un parasitage manuel par exemple) afin de pouvoir réaliser l'étude statistique de la survie de ces individus en lien direct avec les fruits piqués (que les producteurs prélèveraient de l'éclaircissage), au même titre que l'expérience testant les bandes-pièges.

En outre, l'amélioration du prototype reste bien entendu à approfondir, selon les conditions et les utilisateurs. Il est à ce titre pertinent d'envisager de nouvelles modalités (Deguine et al. 2011; Siegwart 2024). Des études récentes exposent la nécessité d'une seule ouverture pour favoriser la sortie du parasitoïde\* et l'importance de la positionner sur le côté pour permettre aux auxiliaires rampants emprisonnés par mégarde de sortir (Siegwart 2024). Il serait intéressant d'explorer des pistes similaires pour faciliter la sortie de *Mastrus ridens* une fois son comportement étudié.

De surcroît, même si des études montrent que les adultes *Mastrus ridens* sont présents toute l'année [7], un autre objectif serait de synchroniser les sorties du parasitoïde\* hors de l'augmentorium avec les générations de *Cydia pomonella* L. en milieu tempéré. *Mastrus ridens* étant effectivement un insecte originaire d'un autre milieu environnemental, il est donc important de s'assurer qu'il s'adapte aux conditions tempérées afin d'être en mesure de parasiter efficacement le carpocapse. Cette idée souligne à nouveau l'importance du facteur température dans la réussite du prototype, d'autant plus que les femelles parasitoïdes\* sont actives au-delà de 15°C. Pour cela, des lâchers de *Mastrus ridens* en vergers peuvent être effectués à différentes saisons, et leur présence/absence sur et autour des lieux de lâchers, suivie. A ce titre, les projets BIOCCYD-Mastrus et maintenant SuzoCarpo travaillent sur l'introduction du parasitoïde\* en effectuant des lâchers expérimentaux ainsi qu'un suivi post-introduction (Siegwart 2024) [7].



---

## CONCLUSION

---

La combinaison et l'intégration de différentes techniques de biocontrôle peuvent-elles permettre de maîtriser efficacement les populations de carpocapse sur pommier ?

La gestion du carpocapse du pommier est un enjeu majeur et l'heure est à la réduction des insecticides (Ministère de la Transition écologique et solidaire 2018). Cependant, les techniques de protection intégrée actuelles doivent être optimisées afin d'inciter les agriculteurs à les utiliser.

Il est difficile de répondre par l'affirmatif à la problématique au vu des conclusions obtenues. Tout d'abord, le succès de l'[essai factoriel](#)\* est limité par la faible pression du carpocapse en son sein, qui biaise sûrement les résultats. Ainsi, aucune tendance ne peut être tirée des tests concernant l'adjuvantation ou l'association de Carpovirusine® EVO 2, et la nouvelle souche ne démontre pas son efficacité. Le renouvellement de ces tests en 2025, dans un nouveau contexte de pression, est alors fondamental pour mettre en lumière une efficacité potentielle réelle. D'autres perspectives peuvent également être envisagées, comme l'adjuvantation et l'association de Madex® Pro, utilisé en alternance avec Carpovirusine® EVO 2 dans les stratégies de gestion biocontrôle.

L'objectif des [essais systèmes](#)\* est alors de tester l'efficacité d'une stratégie intégrant ces techniques de biocontrôle, mais les résultats démontrent l'échec de cette stratégie qui présente des proportions de dégâts alarmantes. Par ailleurs, l'effondrement de la stratégie Référence nous questionne sur la fiabilité de cette dernière, censée être la référence en [PFI](#)\*. L'adaptation continue des stratégies est alors primordiale afin de limiter les dégâts. La stratégie Renforcée chez le producteur montre cependant des résultats encourageants, confirmant que des objectifs intermédiaires de réduction des insecticides de synthèse peuvent être envisageables. Cet essai expose de plus une hétérogénéité entre les sites, et l'importance de la prise en compte de l'historique de pression dans l'élaboration d'une stratégie. Il serait alors intéressant de réitérer les essais en 2025 en s'affranchissant le plus possibles des variabilités extérieures, comme la différence de variétés au sein des trois parcelles, et de mettre en place un dispositif multisite où les stratégies testées sont à chaque fois identiques en tout point. Un approfondissement de l'expérimentation sur la confusion sexuelle en liquide semble par ailleurs pertinent.

En revanche, les conclusions de l'essai prototype sont encourageantes. La preuve théorique de l'efficacité des différentes mailles pour piéger uniquement le carpocapse est une première étape dans l'adaptation de l'augmentorium. Elle nous permet de plus d'espérer des résultats concluants pour un futur essai avec *Mastrus ridens*, essentiel à la validation du prototype et dont le test a cruellement manqué pour illustrer la robustesse des résultats. L'étude de son comportement sera par ailleurs un point primordial pour sélectionner un dispositif. En outre, l'expérimentation sur les contenants penche en faveur du seau qui semble favoriser le développement du carpocapse. Ces résultats sont cependant à nuancer. L'enjeu premier de cette expérience est en effet de trouver le moyen de s'assurer de la présence d'une larve au sein de chaque fruit piqué afin d'étudier leur dégradation en lien avec la survie des individus, et n'est pas encore atteint alors qu'il est nécessaire pour confirmer les résultats. Nous pouvons imaginer recommencer l'expérimentation en créant manuellement l'infestation des pommes. Une fois ces expériences réitérées, des perspectives de modulation des augmentoria et notamment de leurs ouvertures pourront être envisagées (Siegwart 2024).



Pour l'instant, les essais concernant l'adaptation des augmentoria au carpocapse sont rares, et il convient de poursuivre les recherches à l'étape du prototype avant d'envisager une utilisation de l'augmentorium en conditions réelles, où l'objectif sera alors de l'intégrer à une stratégie de gestion.

En résumé, ce travail souligne l'importance de développer de nouveaux leviers de biocontrôle pour l'optimisation continue de la lutte intégrée contre *Cydia pomonella* L., un enjeu crucial pour les producteurs. L'expérimentation et l'innovation sont donc essentielles dans la recherche de solutions, et les démarches collaboratives sont bénéfiques pour progresser rapidement et de manière concertée. D'autres pistes, comme l'encapsulation des nématodes entomopathogènes, méritent également d'être explorées [26].



---

## BIBLIOGRAPHIE

---

ABELOOS, Marcel, 1956. *Les métamorphoses* [en ligne]. FeniXX. [Consulté le 6 août 2024]. Armand Colin. ISBN 978-2-7062-0387-9. Disponible à l'adresse : [https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=ybp7DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT2&dq=d%C3%A9finition+de+nymphe+holometabole&ots=uCi\\_SNdXwC&sig=0hZ\\_je7BHFtvRwNhS8apyuNnt3s&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=ybp7DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT2&dq=d%C3%A9finition+de+nymphe+holometabole&ots=uCi_SNdXwC&sig=0hZ_je7BHFtvRwNhS8apyuNnt3s&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

AGOGUÉ, Christine, AGUILAR HUANA, Reinaldo, ALISON, Bertrand, ALLIX, Margaux, BALAJAS, Julien, BLANC, Philippe, BERGER, Marie-Noëlle et AL., 2024. *Sud Arbo - Guide de la protection raisonnée et biologique en Languedoc-Roussillon* [en ligne]. Occitanie Chambre d'Agriculture. [Consulté le 19 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://occitanie.chambre-agriculture.fr/publications/toutes-les-publications/la-publication-en-detail/actualites/sud-arbor-2024-guide-de-la-protection-raisonnee-et-biologique-en-languedoc-roussillon/>

AKROUTE, Dina, DOUAÏK, Ahmed, HABBADI, Khaoula, ELBAKKALI, Ahmed, BENBOUAZZA, Abdellatif, BENKIRANE, Rachid et EL IRAQUI EL HOUSSAINI, Salma, 2023. Influence of Some Fruit Traits on Codling Moth (*Cydia pomonella* L.) Preference among Apple Varieties in Two Contrasted Climatic Conditions. *Horticulturae*. 11 juillet 2023. Vol. 9, n° 788, pp. 16.

ANDERMATT FRANCE, 2018. *MADEX® PRO - Bio-insecticide*. Fiche technique. Bidart.

ANDERMATT FRANCE, 2023. *Products 2023 : Organic gardening for a healthy environment* [en ligne]. [Consulté le 7 août 2024]. Disponible à l'adresse : [https://www.andermtt.com/wp-content/uploads/2022/10/andermtt\\_group\\_hg\\_catalogue\\_2023.pdf](https://www.andermtt.com/wp-content/uploads/2022/10/andermtt_group_hg_catalogue_2023.pdf)

ANSES, 2010. 2008-0661 : *AFFIRM - Avis d'autorisation de Mise sur le Marché* [en ligne]. Maison-Alfort. [Consulté le 11 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.anses.fr/fr/system/files/phyto/evaluations/DPR2008ha0661.pdf>

BÉRANGER, Mélanie, LEJEUNE, Violaine et SELLAM, Marianne, 2022. Cultures fruitières - Pommier. In : *Guide pratique de défense des cultures*. 6. Paris : Acta éditions. pp. 913.

BIO DE PACA et GRAB ET GRCETA DE BASSE DURANCE, 2017. *Aide au choix variétal pour la production de pommes bio en région Provence-Alpes-Côte d'Azur* [en ligne]. [Consulté le 15 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : [https://www.bio-provence.org/IMG/pdf/aide\\_au\\_choix\\_varietal\\_-\\_pommes\\_bio\\_en\\_paca.pdf](https://www.bio-provence.org/IMG/pdf/aide_au_choix_varietal_-_pommes_bio_en_paca.pdf)

BLOMEFIELD, T.L. et GILIOME, J.H., 2012. Availability and Location of Cocooning Sites for Diapausing Codling Moth Larvae (*Cydia pomonella* (L.)) (Lepidoptera: Tortricidae) on Mature and Young Apple Trees. *African Entomology*. mars 2012. Vol. 20, n° 1, pp. 182-186. DOI 10.4001/003.020.0123.

BOIVIN, Thomas et SAUPHANOR, Benoît, 2007. Phénologie et optimisation de la protection contre le carpocapse des pommes. . janvier 2007. pp. 10.

CA OCCITANIE, 2023a. Comment intégrer l'adaptation au changement climatique dans l'accompagnement des agriculteurs? *Journée IRD* [en ligne]. 2023. [Consulté le 10 mai 2024].





Disponible à l'adresse : [https://occitanie.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user\\_upload/Occitanie/076\\_Inst-Occitanie/Documents/1\\_Journee\\_IRD\\_2023\\_Arbo\\_COMPLET\\_-\\_DIFF.pdf](https://occitanie.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Occitanie/076_Inst-Occitanie/Documents/1_Journee_IRD_2023_Arbo_COMPLET_-_DIFF.pdf)

CA TARN-ET-GARONNE et CA LOT-ET-GARONNE, 2024. *Guide Arbo 2024 - PFIAB - Version numérique* [en ligne]. Montauban. [Consulté le 22 mai 2024]. 114. Disponible à l'adresse : [https://agri82.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user\\_upload/National/FAL\\_commun/publications/Occitanie/Productions\\_techniques/guide\\_arbo\\_ca82\\_2024.pdf](https://agri82.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Occitanie/Productions_techniques/guide_arbo_ca82_2024.pdf)

CAPOWIEZ, Yvan, 2015. Evaluation agronomique et environnementale des filets Alt'Carpo en arboriculture fruitière. [en ligne]. Provence. août 2015. [Consulté le 20 août 2024]. Disponible à l'adresse : [https://cetab.bio/wp-content/uploads/2015/08/eval\\_agro\\_altcarpo\\_ycapowiez.pdf](https://cetab.bio/wp-content/uploads/2015/08/eval_agro_altcarpo_ycapowiez.pdf)

CASSAGNE, Jean-Pierre, 2023. 2 : *Résultats des enquêtes pratiques culturales - Usage des fongicides dans les bassins de production de pommes d'Occitanie* [en ligne]. Agreste Occitanie. [Consulté le 22 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://draaf.occitanie.agriculture.gouv.fr/usage-des-fongicides-dans-les-bassins-de-production-de-pommes-d-occitanie-a8082.html>

CHICHIGNOUD, C., 1994. *Méthode CEB-MG09 : Principes généraux d'étude de l'efficacité au champ de spécialités à base de phéromones destinées à lutter contre les lépidoptères ravageurs des cultures pérennes par confusion sexuelle des mâles* [en ligne]. Fiche technique. [Consulté le 19 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.vegephyl.fr/produit/ceb-mg09/>

CLÉMENT, Léo, 2023. *Navigation visuelle chez les fourmis : approche comportementale et de modélisation* [en ligne]. Toulouse : Toulouse. [Consulté le 20 août 2024]. Disponible à l'adresse : <http://thesesups.ups-tlse.fr/5836/1/2023TOU30170.pdf>

CODARIN, Sandrine, VAYSSE, Pierre, MATHIEU, Vincent, MATHIEU-HURTIGER, Vincent, COUREAU, Claude et WESTERCAMP, Pascale, 2018. 34 : *Le point sur les nouvelles variétés de pommes* [en ligne]. CTIFL. [Consulté le 8 août 2024]. Disponible à l'adresse : [https://kp.eufrin.eu/fileadmin/user\\_upload/documents/1055-0fe3cef84f19d5f23d3ed59201bdd633.pdf](https://kp.eufrin.eu/fileadmin/user_upload/documents/1055-0fe3cef84f19d5f23d3ed59201bdd633.pdf)

COMMISSION EUROPÉENNE, 2008. *Règlement (CE) n o 889/2008 de la Commission du 5 septembre 2008 portant modalités d'application du règlement (CE) n o 834/2007 du Conseil relatif à la production biologique et à l'étiquetage des produits biologiques en ce qui concerne la production biologique, l'étiquetage et les contrôles* [en ligne]. 5 septembre 2008. 889/2008. [Consulté le 20 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008R0889>

COMPO EXPERT, 2022. *Cydia Pro Ball® : Confusion sexuelle pour lutter contre Cydia pomonella sur noyers* [en ligne]. Nanterre. [Consulté le 15 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : [https://www.compo-expert.com/sites/default/files/2023-01/Cydia%20Pro%20Ball\\_fiche%20tehnique\\_Arbo.pdf](https://www.compo-expert.com/sites/default/files/2023-01/Cydia%20Pro%20Ball_fiche%20tehnique_Arbo.pdf)

CRETIN, Laurette et ESPINOSA, Marc, 2021. 8 : *Enquête Pratiques phytosanitaires en arboriculture en 2018 - IFT et nombre de traitements* [en ligne]. Enquête. Agreste. [Consulté le 22 mai 2024]. Chiffres et données. Disponible à l'adresse : [https://www.agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Chd2108/cd2021-8\\_IFT-phytofruits\\_2018.pdf](https://www.agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Chd2108/cd2021-8_IFT-phytofruits_2018.pdf)



DEGUINE, Jean-Philippe, ATIAMA-NURBEL, Toulassi, DOURAGUIA, Elisabeth et ROUSSE, Pascal, 2011. L'augmentorium, un outil de protection agroécologique des cultures - Conception et évaluation en milieu paysan de l'Île de La Réunion. *Cah Agric.* juillet 2011. Vol. 20, n° 4, pp. 5.

DEGUINE, Jean-Philippe, AUGUSSEAU, Xavier, INSA, G., JOLET, M., LE ROUX, K., MARQUIER, M., ROUSSE, Pascal, ROUX, E., SOUPAPOULLÉ, Y. et SUZANNE, W., 2020. Gestion agroécologique des mouches des légumes à La Réunion. *Innovations agronomiques.* 2020. pp. 17.

DESURMONT, G. A., TANNIÈRES, M., ROCHE, M., BLANCHET, A. et MANOUKIS, N. C., 2023. Identifying an optimal screen mesh to enable augmentorium-based enhanced biological control of the olive fruit fly *Bactrocera oleae* (Diptera: Tephritidae) and the mediterranean fruit fly *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae). *Journal of Insect Science* [en ligne]. 11 mai 2023. Vol. 22, n° 3. [Consulté le 4 juin 2024]. DOI <https://doi.org/10.1093/jisesa/ieac027>. Disponible à l'adresse : <https://academic.oup.com/jinsectscience/article/22/3/11/6594368#:~:text=Results%20showed%20that%20one%20screen,adults%20and%2094%25%20of%20P>.

DOUTT, R.L., 1959. The Biology of Parasitic Hymenoptera. In : *Annual Review of Entomology.* pp. 161-182. 4(1).

ETALON, Daniel, 2010. 1 : *Le carpocapse* [en ligne]. Fiche technique. Interreg Vergers franco-suisse. [Consulté le 24 mai 2024]. Disponible à l'adresse : [https://www.vergers-vivants.fr/wp/wp-content/uploads/2021/07/FT1-Carpo\\_web.pdf](https://www.vergers-vivants.fr/wp/wp-content/uploads/2021/07/FT1-Carpo_web.pdf)

FLECKINGER, J., 1964. Phénologie et arboriculture fruitière. In : *Le bon jardinier.* Paris : Grisvard, P. et Chaudun, V. pp. 10.

FRANCEAGRIMER, 2013. *Pomme - Programme de rénovation du verger* [en ligne]. Répertoire des variétés répondant aux critères de la décision AIDES/SAN/ D 2013-09 du 26 février 2013. Montreuil. [Consulté le 18 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.franceagrimer.fr/content/download/23158/document/POMME.pdf>

FRANCEAGRIMER, 2024a. *Fiche filière fruits frais 2024* [en ligne]. Montreuil. [Consulté le 22 mai 2024]. Disponible à l'adresse : [https://www.franceagrimer.fr/fam/content/download/72755/document/20240112\\_FICHE\\_FILIERE\\_FRUITS\\_2024.pdf?version=6](https://www.franceagrimer.fr/fam/content/download/72755/document/20240112_FICHE_FILIERE_FRUITS_2024.pdf?version=6)

FRANCEAGRIMER, 2024b. *Note de conjoncture mensuelle - Filière fruits et légumes* [en ligne]. [Consulté le 22 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.franceagrimer.fr/fam/content/download/72907/document/NCO-NOT-FL-2024-01.pdf?version=1>

FRAPNA, 2013. 4 : *Les impacts des pesticides sur la biodiversité liée aux milieux agricoles* [en ligne]. Rhône-Alpes. [Consulté le 11 juillet 2024]. Classeur veille écologique FRAPNA - Fiche Agriculture - Alternatives aux pesticides. Disponible à l'adresse : <https://www.fne-aura.org/uploads/2018/11/f4-les-impacts-des-pesticides-sur-la-biodiversite.pdf>

GUO, Siwei, GE, Xuezheng, ZOU, Ya, ZHOU, Yuting, WANG, Tao et ZONG, Shixiang, 2021. Projecting the global potential distribution of *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae) under historical and RCP4.5 climate scenarios. *Journal of Insect Science.* 1 mars 2021. Vol. 21, n° 2, pp. 15. DOI 10.1093/jisesa/ieab024.



HAUDEMARD, H. et MARTOURET, D., 1987. *Méthode CEB-018 : Méthode d'essai d'efficacité pratique des produits destinés à combattre le carpocapse des pommes et poires, Cydia pomonella L.* [en ligne]. Fiche technique. [Consulté le 15 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.vegephyl.fr/produit/ceb-018/>

HAVARD, Morgane, ALAPHILIPPE, Aude, DEYTIEUX, Violaine, ESTROGUES, Vianney, LABEYRIE, Baptiste, LAFOND, Daniel, MEYNARD, Jean-Marc, PETIT, Marie Sophie, PLÉNET, Daniel et PICAULT, Sébastien, 2017. Guide de l'expérimentateur système : concevoir, conduire et valoriser une expérimentation système pour les cultures assolées et pérennes. . 2017. pp. 173.

HERVÉ, Maxime, 2021. Aide-mémoire de statistique appliquée à la biologie. . 13 décembre 2021. pp. 218.

HERZ, Annette, KLEESPIES, Regina G., STEPHAN, Dietrich, EHRICH, Carina et PFITZNER, Helen, 2020. *Biologischer Pflanzenschutz als Ökosystemleistung im integrierten und ökologischen Kernobstanbau in Deutschland* [en ligne]. Julius Kühn-Institut : Institut für Biologischen Pflanzenschutz. [Consulté le 4 juin 2024]. Demoapfel. Disponible à l'adresse : <https://orgprints.org/id/eprint/39244/1/AB%20gesamt.pdf>

HORSTMANN, Klaus, 2009. Revisionen von Schlupfwespen-Arten XIII. *Mitt. Münch. Ent. Ges.* 1 novembre 2009. Vol. 99, pp. 9.

INGRMEAU, Claire et GAB 22, 2020. 44 : *Le carpocapse du pommier : « ver de la pomme »* [en ligne]. Les fiches technique du réseau GAB/FRAB. [Consulté le 24 mai 2024]. Disponible à l'adresse : [https://www.agrobio-bretagne.org/voy\\_content/uploads/2021/12/Web\\_44-CARPOCAPSE.pdf](https://www.agrobio-bretagne.org/voy_content/uploads/2021/12/Web_44-CARPOCAPSE.pdf)

INRAE, 2023. Carpocapse - Virus de la granulose. . GRCETA de Basse Durance. 2023.

INRAE GOTHERON, 2020. ALTO, repenser le verger en agroécologie pour produire sans pesticides. [en ligne]. Poster. 2020. [Consulté le 4 juin 2024]. Disponible à l'adresse : [https://ecophytopic.fr/sites/default/files/2020-12/Livret%20ALTO%20Gotheron\\_2020%20web%20%5BFrançais%5D\\_0.pdf](https://ecophytopic.fr/sites/default/files/2020-12/Livret%20ALTO%20Gotheron_2020%20web%20%5BFrançais%5D_0.pdf)

INSERM, 2021. *Pesticides et effets sur la santé – nouvelles données* [en ligne]. Expertise collective Inserm - résumé. Pôle Expertise Collective Inserm - Paris. [Consulté le 11 juillet 2024]. Inserm, La science pour la santé. Disponible à l'adresse : <https://www.inserm.fr/expertise-collective/pesticides-et-sante-nouvelles-donnees-2021/>

JALOUX, Bruno, 2006. La discrimination interspécifique par *Eupelmus vuilleti* (Hymenoptera : Eupelmidae) des hôtes parasites par *Dinarmus basalis* (Hymenoptera : Pteromalidae). . 20 octobre 2006. pp. 214.

JANG, Eric, KLUNGNESS, Lester et MCQUATE, Grant, 2007. Extension of the use of augmentoria for sanitation in a cropping system susceptible to the alien terphritid fruit flies (Diptera: Terphritidae) in Hawaii. . juin 2007. Vol. 11, pp. 10.

KNIGHT, Alan L. et WITZGALL, Peter, 2013. Combining mutualistic yeast and pathogenic virus - a novel method for codling moth control. *J Chem Ecol.* 2 juillet 2013. pp. 8. DOI 10.1007/s10886-013-0322-z.



MAALOULY MATAR, Mariline Maalouly, 2013. *Déterminants du parasitisme larvaire du carpocapse du pommier au Sud Est de la France* [en ligne]. Avignon : Université d'Avignon. [Consulté le 22 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01124267>

MALAGNOUX, Laure, 2014. *Evaluation des impacts environnementaux liés aux pratiques phytosanitaires en vergers de pommiers: approches écotoxicologique et écologique utilisant un auxiliaire des cultures, le forficule* [en ligne]. Avignon : Avignon. [Consulté le 20 août 2024]. Disponible à l'adresse : [https://theses.hal.science/tel-01085977/file/These\\_Malagnoux2014\\_def.pdf](https://theses.hal.science/tel-01085977/file/These_Malagnoux2014_def.pdf)

MARCUS, Vincent, 2023. 110 : *Infos rapides - Pomme - n°03/05* [en ligne]. Paris : Agreste. [Consulté le 22 mai 2024]. Disponible à l'adresse : [https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/IraFru23110/2023\\_110inforapPomme.pdf](https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/IraFru23110/2023_110inforapPomme.pdf)

MILLS, Nick, 2005. Selecting effective parasitoids for biological control introductions: Codling moth as a case study. *Biological Control*. septembre 2005. Vol. 34, n° 3, pp. 9.

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE, 2018. *Plan Ecophyto II +* [en ligne]. Paris. [Consulté le 22 mai 2024]. Disponible à l'adresse : [https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/plan\\_ecophyto2\\_.pdf](https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/plan_ecophyto2_.pdf)

NATURAL PLANT PROTECTION et UPL, 2024. *Calsun - La protection contre les ravageurs et le stress hydrique*. Fiche technique. Puteaux.

PAJAČ, Ivana, BARIC, Božena, MIKAC, Katarina et PEJIC, Ivan, 2012. New insights into the biology and ecology of *Cydia pomonella* from apple orchards in Croatia. *Bulletin of Insectology*. 2012. N° 65, pp. 9.

PERRIN, Marie, 2022. *Gestion du carpocapse des pommes : impact du changement climatique sur la lutte contre *Cydia pomonella* dans les vergers de Provence* [en ligne]. Avignon : Université d'Avignon. [Consulté le 22 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://theses.hal.science/tel-04047870>

ROUSSEAUX, Alissia, SEYCHAL, Lorie et SARTHOU, Jean-Pierre, 2018. Lutte biologique par conservation. *Dictionnaire d'Agroécologie*. 2018. pp. 3.

SAINT-GES, Veronique, 2014. *Biocontrôle: cas du carpocapse de la pomme* [en ligne]. Rapport technique. INRA - Asirpa. [Consulté le 8 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://hal.science/hal-01601525>

SAUPHANOR, Benoît, BERLING, Marie, TOUBON, Jean-François, REYES, Maritza, DELNATTE, Julien et ALLEMOZ, Philippe, 2006. Carpacapse des pommes : cas de résistances au virus de la granulose en vergers biologiques. *Phytoma la défense des végétaux*. février 2006. N° 590, pp. 4.

SAUPHANOR, Benoît, TOUBLON, J. F., TRONEL, C., HUCBOURG, B., BESLAY, D. et FRANCK, P., 2005. Et si l'ester de poire piégeait le carpocapse ? *Phytoma - La défense des végétaux*. mai 2005. N° 581, pp. 2.

SFORZA, R. S. et KREITER, Serge, 2008. La lutte biologique à la 8e CIRA. *Phytoma - La défense des végétaux*. octobre 2008. Vol. 619, pp. 7.





SIEGWART, Myriam, 2022. *Combinaisons, caractéristiques et origines de mécanismes de résistance aux (bio)insecticides chez des insectes ravageurs des cultures* [en ligne]. Avignon : Université d'Avignon. [Consulté le 19 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <https://theses.hal.science/tel-03651781>

SIEGWART, Myriam, 2024. Projet SuzoCarpo. *Rapport intermédiaire de projet*. 24 mai 2024.

SIEGWART, Myriam, MAUGIN, Sandrine, BESSE, Samantha, LOPEZ-FERBER, Miguel, HINSBERGER, Aurélie et GAUFFRE, Bertrand, 2020. Le carpocapse résiste au virus de la granulose. *Phytoma - La défense des végétaux*. novembre 2020. N° 738, pp. 7.

TASEI, 1996. Impact des pesticides sur les abeilles et les autres pollinisateurs. *Courrier de l'environnement de l'INRA*. décembre 1996. Vol. 29, n° 9, pp. 10.

TRAVERT, Stéphane, 2018. *Entrée en vigueur de l'interdiction des néonicotinoïdes le 1er septembre* [en ligne]. 31 août 2018. [Consulté le 11 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://agriculture.gouv.fr/entree-en-vigueur-de-linterdiction-des-neonicotinoïdes-le-1er-septembre#:~:text=En%20raison%20de%20leur%20toxicit%C3%A9,%20thiam%C3%A9thoxame%20thiaclopride%20et%20ac%C3%A9tamipride>.

TRILLOT, M., MASSERON, A., MATHIEU, V., BERGOUGNOUX, F., HUTIN, C. et LESPINASSE, Y., 2002. *Le pommier, Monographie*. Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes. Paris.

VAN VALEN, Leigh, 1977. The red queen. *The American Naturalist*. 1977. Vol. 110, n° 980, pp. 809-810.

YANO, B.L., BOND, D.M., NOVILLA, M.N., MCFADDEN, L.G. et REASOR, M.J., 2001. Spinosad insecticide : subchronic and chronic toxicity and lack of carcinogenicity in fischer 344 rats. *Toxicological sciences*. 6 novembre 2001. Vol. 65, pp. 11.

ZENG, Quan, JOHNSON, Kenneth B., MUKHTAR, Salma, NASON, Sara, HUNTLEY, Regan, MILLET, Felicia, YANG, Ching-Hong, HASSANI, M. Amine, ZUVERZA-MENA, Nubia et SUNDIN, George W., 2023. *Aureobasidium pullulans* from the fire blight biocontrol product, Blossom Protect, induces host resistance in apple flowers. *Phytopathology*. juillet 2023. Vol. 113, n° 7, pp. 10. DOI 10.1094/PHYTO-12-22-0452-R.



---

## SITOGRAPHIE

---

- [1] AGROLINE, 2020. Carpocapse du pommier. *Agroline* [en ligne]. 2020. [Consulté le 24 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.agroline.ch/fr/bioprotect/guide/carpocapse-des-pommes>
- [2] XICLUNA, Pascal, 2024. Qu'est-ce que le biocontrôle ? *Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire* [en ligne]. 2 mai 2024. [Consulté le 18 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <https://agriculture.gouv.fr/quest-ce-que-le-biocontrole>
- [3] MOSSLER, Camille, CALVIGNAC, Lucas, LECUREUR, Laure, DAYONNET, Alix, CAZEMAJOU, Jeanne, VIDAL, Arielle, LAMOTHE, Laurence, SAVIETTO, Davi et SARTHOU, Jean-Pierre, 2021. Prophylaxie : Définition. *DicoAE - Dictionnaire d'agroécologie* [en ligne]. 2021. [Consulté le 11 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.17180/4a8n-4468>
- [4] CIRAD, 2011. Lutte chimique. *Biodiversité et Agriculture Océan Indien* [en ligne]. 2 septembre 2011. [Consulté le 18 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <http://www.agriculture-biodiversite-oi.org/Mediatheque/Glossaire/Lutte-chimique>
- [5] JANIN, Lionel, 2021. Agriculture biologique. *Insee* [en ligne]. 27 janvier 2021. [Consulté le 18 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c2218>
- [6] GAYRARD, M., PALVADEAU, L. et DELVAL, Ph., 2023a. Utiliser des adjuvants lors des traitements phytosanitaires. *Ecophytopic* [en ligne]. 30 décembre 2023. [Consulté le 12 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://ecophytopic.fr/leviers/proteger/utiliser-des-adjuvants-lors-des-traitements-phytosanitaires>
- [7] LEMARQUAND, A., 2023. Projet Mastrus ridens. *INRAE UE HORTI* [en ligne]. 11 septembre 2023. [Consulté le 4 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <https://horti.angers-nantes.hub.inrae.fr/dispositifs-d-experimentations/mastrus-ridens>
- [8] DAGET-GODRON, 1974. Définition de Parcelle. *Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales* [en ligne]. 1974. [Consulté le 15 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.cnrtl.fr/lexicographie/parcelle>
- [9] OILB, 1997. Production Fruitière Intégrée. *Triple Performance* [en ligne]. 1997. [Consulté le 17 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : [//wiki.tripleperformance.fr/wiki/Production\\_Fruiti%C3%A8re\\_Int%C3%A9gr%C3%A9e](https://wiki.tripleperformance.fr/wiki/Production_Fruiti%C3%A8re_Int%C3%A9gr%C3%A9e)
- [10] WINDSOR, Sébastien, 2022. La production de pommes en France. *Chambres d'agriculture France* [en ligne]. 17 octobre 2022. [Consulté le 22 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://chambres-agriculture.fr/actualites/toutes-les-actualites/detail-de-lactualite/actualites/la-production-de-pommes-en-france/>
- [11] REMONGIN, Xavier, 2021. La pomme, le fruit préféré des Français. *Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire* [en ligne]. 21 octobre 2021. [Consulté le 22 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://agriculture.gouv.fr/la-pomme-le-fruit-prefere-des-francais>



- [12] STATISTA RESEARCH DEPARTMENT, 2024. Volume de production de pommes en France de 2000 à 2022. *Statista* [en ligne]. 29 février 2024. [Consulté le 22 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://fr.statista.com/statistiques/965769/pommes-volume-de-production-france/>
- [13] GABELLE, A., 2021. Protection contre le carpocapse des pommes et des poires. *Ecophytopic* [en ligne]. 2021. [Consulté le 22 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://ecophytopic.fr/pic/concevoir-son-systeme/protection-contre-le-carpocapse-des-pommes-et-des-poires>
- [14] INDEX ACTA, 2023. Actualités réglementaires. *Ecophytopic* [en ligne]. 4 décembre 2023. [Consulté le 22 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://ecophytopic.fr/reglementation/concevoir-son-systeme/actualites-reglementaires#accordeon-47703>
- [15] OSSARD, Audrey, 2019. Carpocapse, très redouté. *Bayer-agri.fr* [en ligne]. 9 décembre 2019. [Consulté le 22 mai 2024]. Disponible à l'adresse : [https://www.bayer-agri.fr/cultures/carpocapse-tres-redoute\\_610/](https://www.bayer-agri.fr/cultures/carpocapse-tres-redoute_610/)
- [16] GAYRARD, M., PALVADEAU, L. et DELVAL, Ph., 2023b. Utiliser un augmentorium contre les ravageurs. *Ecophytopic* [en ligne]. 30 décembre 2023. [Consulté le 22 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://ecophytopic.fr/leviers/proteger/utiliser-un-augmentorium-contre-les-ravageurs>
- [17] ROUILLE, Joël, 2024. Le carpocapse des pommes et poires. *Fredon Corse* [en ligne]. 2024. [Consulté le 24 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://fredon.fr/corse/techniques/ravageurs/le-carpocapse-des-pommes-et-poires>
- [18] INRAE, 2024. Botrytis cinerea Pers., (1794). *Ephytia* [en ligne]. 2024. [Consulté le 28 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://ephytia.inra.fr/fr/C/21622/Pomme-Botrytis-cinerea-Botrytis-de-l-oeil>
- [19] VALLET, Benoît, 2024. E-Phy. *ANSES* [en ligne]. 2024. [Consulté le 18 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <https://ephy.anses.fr/>
- [20] MAPAQ, MELCCFP et INSPQ, 2024. SAgE pesticides. *SAgE pesticides* [en ligne]. 2024. [Consulté le 18 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.sagepesticides.qc.ca/>
- [21] AZAM, Anne, 2024. Affirm. *Syngenta France* [en ligne]. 6 juin 2024. [Consulté le 18 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.syngenta.fr/produits/protection-des-cultures/insecticides/affirm>
- [22] KEVEY, Donna, 2022. Organic insecticides more damaging to non-target insects than synthetic counterparts. *The University of Melbourne* [en ligne]. 24 février 2022. [Consulté le 11 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.unimelb.edu.au/newsroom/news/2022/february/organic-insecticides-more-damaging-to-non-target-insects-than-synthetic-counterparts>
- [23] MORIN, Yvon, CORMIER, Daniel et CHOUINARD, Gérald, 2024. Fiche 76 Le carpocapse de la pomme - Guide de PFI. *Réseau pommier - Production fruitière intégrée* [en ligne]. 20 mars 2024. [Consulté le 19 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : [confusion](#)
- [24] JEHLE, Johannes A., 2024. Cydia pomonella Granulovirus (CpGV). *Apfelwickler* [en ligne]. 2024. [Consulté le 19 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <http://www.apfelwickler.de/granulovirus.php>



- [25] AZAM, Anne, 2022. La confusion sexuelle par pulvérisation avec EXPLOYO™ Vit. *Syngenta France* [en ligne]. 29 juin 2022. [Consulté le 19 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.syngenta.fr/cultures/biocontrole/vigne/article/exployo-vit-confusion-sexuelle-pulverisation>
- [26] DAMERVAL, Thierry, 2019. Formulations innovantes par encapsulation de nématodes entomopathogènes pour un usage contre le carpocapse du pommier, *Cydia pomonella*. *Agence Nationale de la Recherche* [en ligne]. 2019. [Consulté le 17 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://anr.fr/Projet-ANR-23-ECOM-0007>
- [27] KOPPERT, 2021. *CITROLE A* [en ligne]. Fiche mode d'emploi. Koppert biological systems. [Consulté le 19 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.aladin.farm/produits/38299PHY>
- [28] GRANDIDIER, François, 2024. Carpovirusine et Calsun, au service d'une production durable de la noix. *TEMA agriculture et terroirs* [en ligne]. 7 mars 2024. [Consulté le 19 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.tema-agriculture-terroirs.fr/mediafel/techniques-culturelles/carpovirusine-et-calsun-au-service-dune-production-durable-de-la-noix-894325.php>
- [29] TRIPLE PERFORMANCE et MSC BOOST, 2021. Utilisation du parasitoïde *Mastrus Ridens* pour lutter contre le carpocapse. *Triple Performance* [en ligne]. 2021. [Consulté le 4 juin 2024]. Disponible à l'adresse : [//wiki.tripleperformance.fr/wiki/Utilisation\\_du\\_parasito%C3%AFde\\_Mastrus\\_Ridens\\_pour\\_lutter\\_contre\\_le\\_carpocapse](https://wiki.tripleperformance.fr/wiki/Utilisation_du_parasito%C3%AFde_Mastrus_Ridens_pour_lutter_contre_le_carpocapse)
- [30] USDA, 2022. Augmentorium: A Promising Tool for Controlling the Olive Fruit Fly. *USDA Agricultural Research Service* [en ligne]. 11 janvier 2022. [Consulté le 11 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.ars.usda.gov/office-of-international-research-engagement-and-cooperation/overseas-biological-control-obcl-highlights/augmentorium-a-promising-pest-management-tool-for-controlling-the-olive-fruit-fly/>
- [31] LIGONNIÈRE, Thierry, 2022. Dalival, leader dans le monde de la pépinière de pommiers et poiriers. *DALIVAL* [en ligne]. 2022. [Consulté le 18 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.dalival.com/>
- [32] KOPPERT, 2024a. Capirel - Lutte contre les nuisibles dans les cultures extérieures - Nématodes bénéfiques (*Steinernema feltiae*). *Koppert* [en ligne]. 2024. [Consulté le 17 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.koppert.fr/capirel/>
- [33] MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA SOUVERAINETÉ ALIMENTAIRE, 2024. IFT de traitement. *Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire* [en ligne]. 2024. [Consulté le 20 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://alim.agriculture.gouv.fr/ift/traitement-ift/2024>
- [34] MAE, Saryu, 2022. *Anagyrus fusciventris* (Girault, 1915) observé en Nouvelle-Zélande. *Observations de niveau recherche d'iNaturalist* [en ligne]. 24 janvier 2022. [Consulté le 28 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.gbif.org/occurrence/4103190390>
- [35] KOPPERT, 2024b. *Anagyrus fusciventris*. *Koppert* [en ligne]. 2024. [Consulté le 28 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.koppert.fr/anagyrus-fusciventris/>



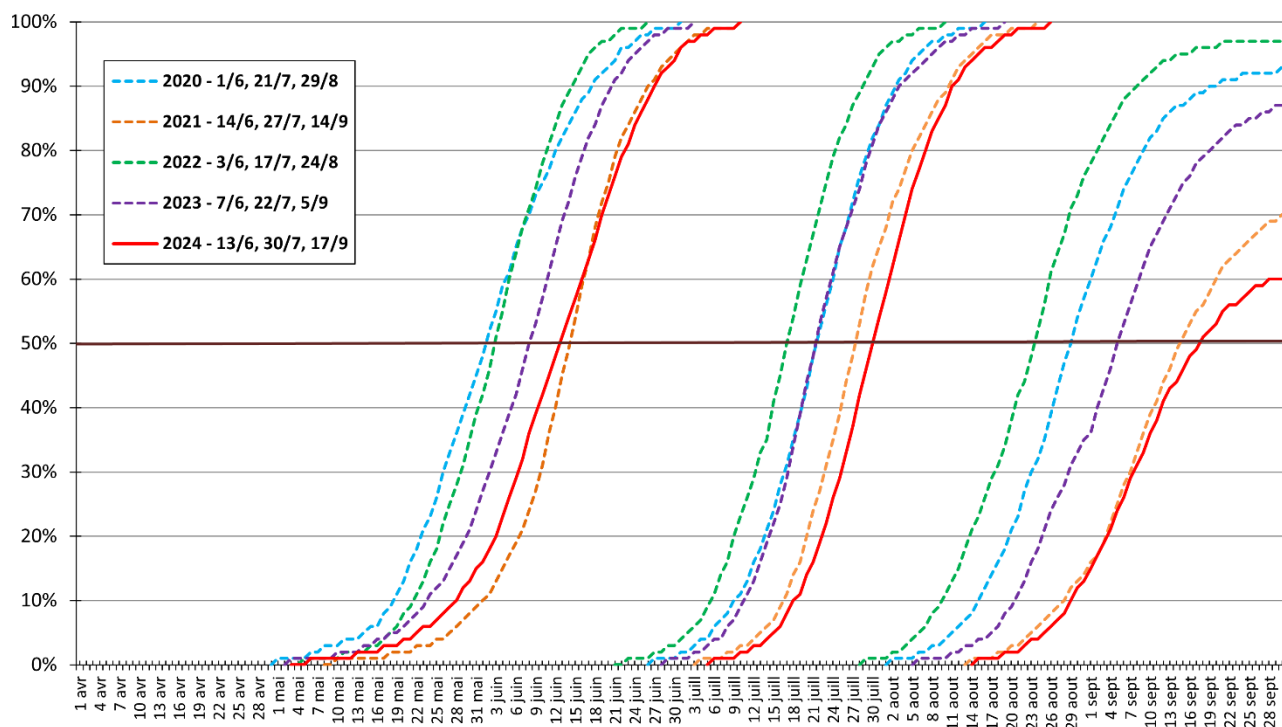


[36] INFO CLIMAT, 2024. Climatologie de l'année 2024 à Montpellier - Fréjorgues. *Info Climat* [en ligne]. 2024. [Consulté le 7 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.infoclimat.fr/climatologie/annee/2024/montpellier-frejorgues/valeurs/07643.html>



# ANNEXES

*Annexe 1 : Courbes du pourcentage des éclosions des œufs de carpacapse simulées pour la station de Marsillargues de SudExpé de 2020 à 2024, d'après le modèle INRAE (Boivin, Sauphanor 2007)*





Annexe 2 : Méthode d'interprétation des dégâts stoppés, cicatrisés et actifs du carpocapse de Baggiolini et Grob (1968)  
 (données de la station, SudExpé site de Marsillargues, 15/07/24)

DÉGÂTS STOPPÉS			DÉGÂTS CICATRISÉS		
type	vue externe	coupe	type	vue externe	coupe
1s			1c		
2s			2c		
3s			3c		

TYPE DE DEGÂT	DÉGÂTS A CTIFS		
	type	vue externe	coupe
<b>1</b> morsure externe	1a		
<b>2</b> galerie à spirale sous l'épiderme	2a		
<b>3</b> spirale détruite et pénétration vers l'intérieur	3a		
<b>3</b> (exceptions)	3a		
<b>4</b> cavité interne ou endocarpe attaqué	4a		
<b>5</b> dégât terminé (larve sortie)	5a		



*Annexe 3 : Script R réalisé pour analyser statistiquement l'effet des différents traitements et de la date sur la variable Y1 dans le cadre de l'essai factoriel - les résultats concernant la variable Y2 n'étant pas significatifs, le script n'est pas représenté (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 28/06/2024)*

```
## IMPORTATION DES PACKAGES
{r packages, include=TRUE}
rm(list=ls()) # Nettoyer l'espace de travail
library(betareg)
library(MuMIn)
library(glmTMB)
library(RVAideMemoire)
library(glm)
library(lme4)
library(ggplot2)
library(car)
library(emmeans)
library(multcomp)
library(RColorBrewer)
library(scales)
library(corrplot)
library(plot3D)
library(MASS)
library(DHARMA)
library(rcompanion)
library(lattice)
library(stringr)
...

## IMPORTATION DES DONNEES
{r import, include=TRUE}
data_action1fruits_attaques<-read.csv("C:/Users/anaki/Documents/Cours/INH/Stages/Stage M2 PPEH/Mémoire/Documents mémoire/R Studio mémoire/Action 1/R_Action1_pourc_fruits_attaques.csv", header=TRUE, sep=";", dec=".", fill=TRUE)

# Affecter les lignes de caractères en facteurs
data_action1fruits_attaques$Bloc<-as.factor(data_action1fruits_attaques$Bloc)
data_action1fruits_attaques$Modalite<-as.factor(data_action1fruits_attaques$Modalite)
data_action1fruits_attaques$date1<-as.factor(data_action1fruits_attaques$Date)
data_action1fruits_attaques$Date<-factor(data_action1fruits_attaques$date1,c("28/05/2024", "12/06/2024", "25/06/2024", "05/07/2024"))

# Ramener la série de données bornée entre 0 et 100 à bornée entre 0 et 1 exclus
xborne<-(data_action1fruits_attaques$Y1-0)/(100-0)
data_action1fruits_attaques$Y1<-p.beta(xborne)

# Afficher les données
str(data_action1fruits_attaques)

# Vérifier la présence de valeurs manquantes
colSums(is.na(data_action1fruits_attaques))
...

## EXPLORATION DES DONNEES
# Vérification de la présence d'outliers dans Y et de la distribution des valeurs de Y
{r datahist, include=TRUE, fig.height=6, fig.width=6}
par(mfrow=c(2,2))

# Boxpplot
boxplot(data_action1fruits_attaques$Y1,col='blue',ylab='Proportion de fruits attaqués')

# Cleveland plot
dotchart(data_action1fruits_attaques$Y1,pch=16,col='blue',xlab='Proportion de fruits attaqués ')

# Histogram
hist(data_action1fruits_attaques$Y1,col='blue',xlab='Proportion de fruits attaqués',main='')

# Quantile-Quantile plot
qqnorm(data_action1fruits_attaques$Y1,pch=16,col='blue',xlab='')
qqline(data_action1fruits_attaques$Y1,col='red')
...

# Si X est une variable quantitative indépendante, vérifier la distribution des X et des outliers. Si X est une variable qualitative indépendante, analyser le nombre de niveau et d'individus par niveau.
# Vérification du nombre de niveaux et du nombre d'individus par niveau
{r datafact, include=TRUE}
# Facteur Modalite
summary(data_action1fruits_attaques$Modalite)

# Facteur Date
summary(data_action1fruits_attaques$Date)

# Analyse de la relation potentielle entre Y et les X
{r graph Y vs X, include=TRUE, fig.height=4, fig.width=10}
par(mfrow=c(1,3))

# Facteur Modalite
boxplot(data_action1fruits_attaques$Y1 ~ data_action1fruits_attaques$Modalite, varwidth = TRUE, ylab = "Proportion de fruits attaqués", xlab = "Modalite", col=c('blue3','red2'), main = "")

# Facteur Date
plot(data_action1fruits_attaques$Y1 ~ data_action1fruits_attaques$Date,pch=16,col='blue',xlab="Date",ylab='Proportion de fruits attaqués')
...
```





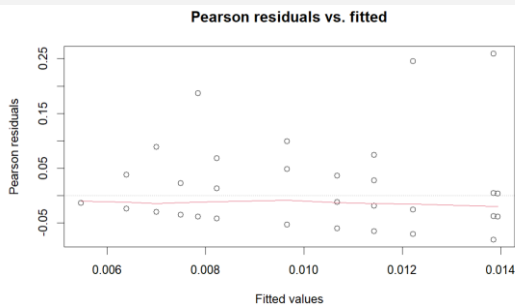
```

# Vérification des interactions entre les X
{r interaction, include=TRUE, fig.height=4, fig.width=10}
bwplot(Y1 ~ Modalite | Date, data = data_action1fruits_attaques ,
  ylab = list(label = "Modalite",
  cex = 1.5),
  strip = strip.custom(bg = "grey",
  par.strip.text = list(cex = 1.2)),
  scales = list(rot = 45, cex = 1.3),
  par.settings = list(
  box.rectangle = list(col = 1),
  box.umbrella = list(col = 1),
  plot.symbol = list(cex = .5, col = 1)))

## CONSTRUCTION DU MODELE
{r modele, include=TRUE}
modele_action1_fruits_attaques<-glmTMB(Y1 ~ Modalite + Date + Modalite:Date + (1|Bloc),
  data=data_action1fruits_attaques,
  family=beta_family())
summary(modele_action1_fruits_attaques)

## VERIFICATION DE L'AJUSTEMENT, DE L'HOMOSCEDASTICITE ET DE L'INDEPENDANCE DES RESIDUS
{r plot resid, include=TRUE}
plotresid(modele_action1_fruits_attaques)

```



```

## TEST DE WALD
{r test, include=TRUE}
Anova(modele_action1_fruits_attaques)

Response: Pourc_fruits_attaques
      Chisq Df Pr(>Chisq)
Modalite  10.752  6  0.096361 .
Date      12.317  3  0.006372 **
Modalite:Date 10.709 18  0.906288

---
signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

## TEST DE COMPARAISON MULTIPLE EN CONSERVANT LE FACTEUR SIGNIFICATIF
{r comparaisons multiples, include=TRUE}
library(dplyr)
library(tidyr)

# Calculer les moyennes ajustées
EMM<-emmeans(modele_action1_fruits_attaques, ~ Date, adjust="fdr", mode="link")
EMM
cld_results <- cld(EMM, details = FALSE, adjust = "fdr")

# Transformer les estimates back
valeurs <- back.emmeans(EMM, transform = "p.beta", n = 112)
rownames(valeurs) <- NULL
colnames(valeurs) <- c("trait", "SE.inf", "EMMean", "SE.sup")
valeurs <- separate(valeurs, trait, into = c("Date"), sep = ":")

# Ajouter les groupes de chiffres
cld_df <- as.data.frame(cld_results)
valeurs <- merge(valeurs, cld_df, by.x = c("Date"), by.y = c("Date"))

valeurs

## MISE EN FORME GRAPHIQUE
{r mise en forme graph, include=TRUE}
cbbPalette <- c("coral4", "coral2", "coral3", "coral")

valeurs$date1<-factor(valeurs$Date, c("28/05/2024", "12/06/2024", "25/06/2024", "05/07/2024" )) # Remettre dans l'ordre les dates

library(ggpubr)

ggplot(data=valeurs, aes(x=date1))+
  geom_bar(data=valeurs, mapping=aes(x=date1, y=EMMean, stat="identity", fill = cbbPalette)+ scale_y_continuous(labels =
  scales::percent, limits=c(0, max(valeurs$SE.sup)), oob = rescale_none)+
  labs(x="Date", y="Proportion moyenne ajustée des fruits attaqués par le carpacapse")+
  geom_errorbar(aes(x=date1, ymin=SE.inf, ymax=SE.sup), width=.2, position=position_dodge(.9)) +
  geom_text(aes(x = date1, y = SE.sup, label = .group), vjust = -0.5) +
  font("y1lab", size = 8)+
  theme(axis.text.x = element_text(size = 16),
  axis.ticks.x = element_blank(),
  axis.title.x = element_text(size = 18),
  axis.text.y = element_text(size = 16),
  axis.title.y = element_text(size = 18),
  legend.text = element_text(size = 16),
  legend.title = element_text(size = 18),
  strip.text = element_text(size = 18))

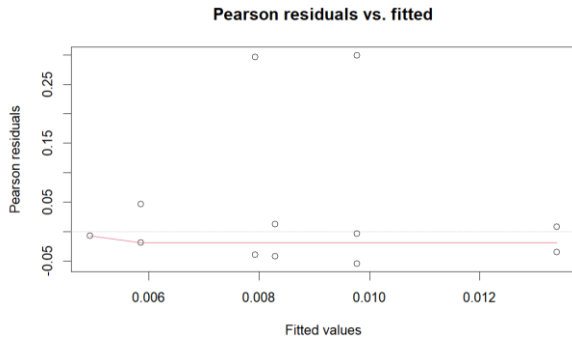
```



*Annexe 4 : Script R réalisé pour analyser statistiquement l'effet des différents traitements et de la date sur la variable Y3 dans le cadre de l'essai factoriel – le script utilisé est similaire à celui de l'Annexe 3 et n'est donc représenté qu'à partir de la construction du modèle où il diffère légèrement (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 28/06/2024)*

```
## VERIFICATION DE L'AJUSTEMENT, DE L'HOMOSCEDASTICITE ET DE L'INDEPENDANCE DES RESIDUS
```

```
{r plot resid, include=TRUE}
plotresid(modele_action1classe3)
```



```
## TEST DE WALD
```

```
{r test, include=TRUE}
Anova(modele_action1classe3)
```

```
Response: Pourc_Classe_3
      Chisq Df Pr(>Chisq)
Modalite 29.899 6 4.108e-05 ***
Date      12.624 3 0.005526 **
Modalite:Date 18.255 18 0.438993
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
## TEST DE COMPARAISON MULTIPLE EN CONSERVANT LES FACTEURS SIGNIFICATIFS
```

```
{r comparaisons multiples, include=TRUE}
library(dplyr)
library(tidyr)
```

```
# Calculer les moyennes ajustées
EMM <- emmeans(modele_action1classe3, ~ Date + Modalite, adjust = "fdr", mode = "link")
```

```
EMM
cld_results <- cld(EMM, details = FALSE, adjust = "fdr")
```

```
# Transformer les estimates back
valeurs <- back.emmeans(EMM, transform = "p.beta", n = 112)
rownames(valeurs) <- NULL
colnames(valeurs) <- c("trait", "SE.inf", "EMMean", "SE.sup")
valeurs <- separate(valeurs, trait, into = c("Date", "Modalite"), sep = ":") # Séparer les facteurs Date et Modalite dans le
tableau en deux colonnes distinctes
```

```
# Ajouter les groupes de chiffres
cld_df <- as.data.frame(cld_results)
valeurs <- merge(valeurs, cld_df, by.x = c("Date", "Modalite"), by.y = c("Date", "Modalite"))
```

```
valeurs
```

```
## MISE EN FORME GRAPHIQUE
```

```
{r mise en forme graph, include=TRUE}
```

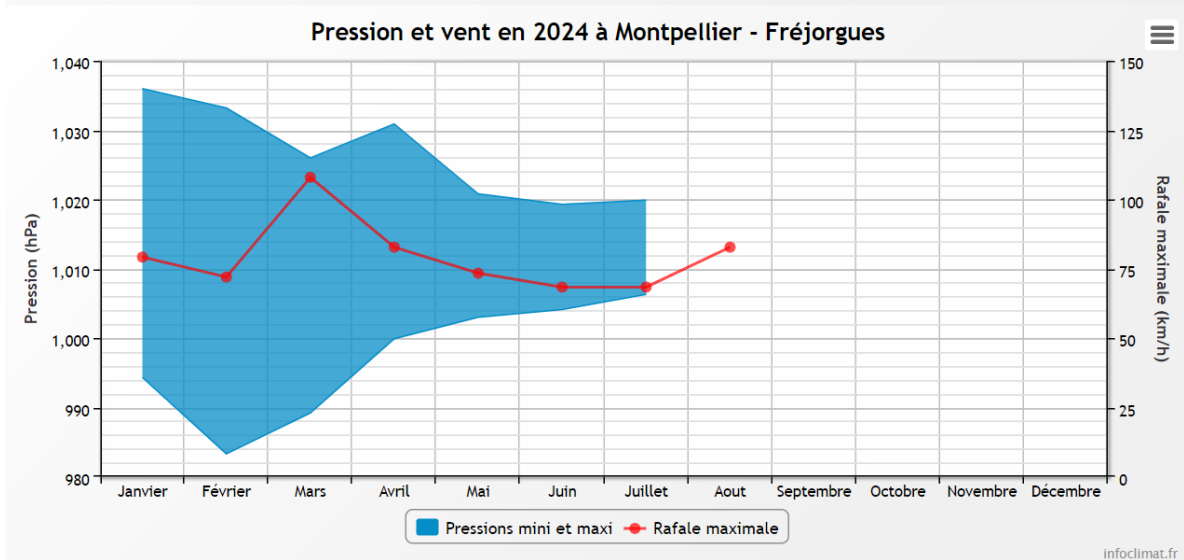
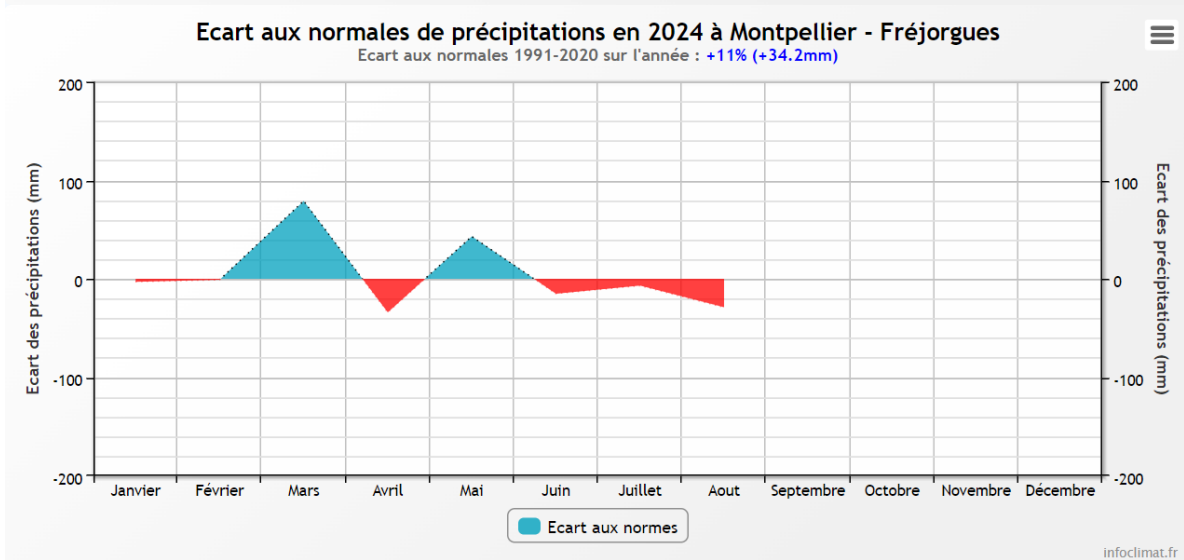
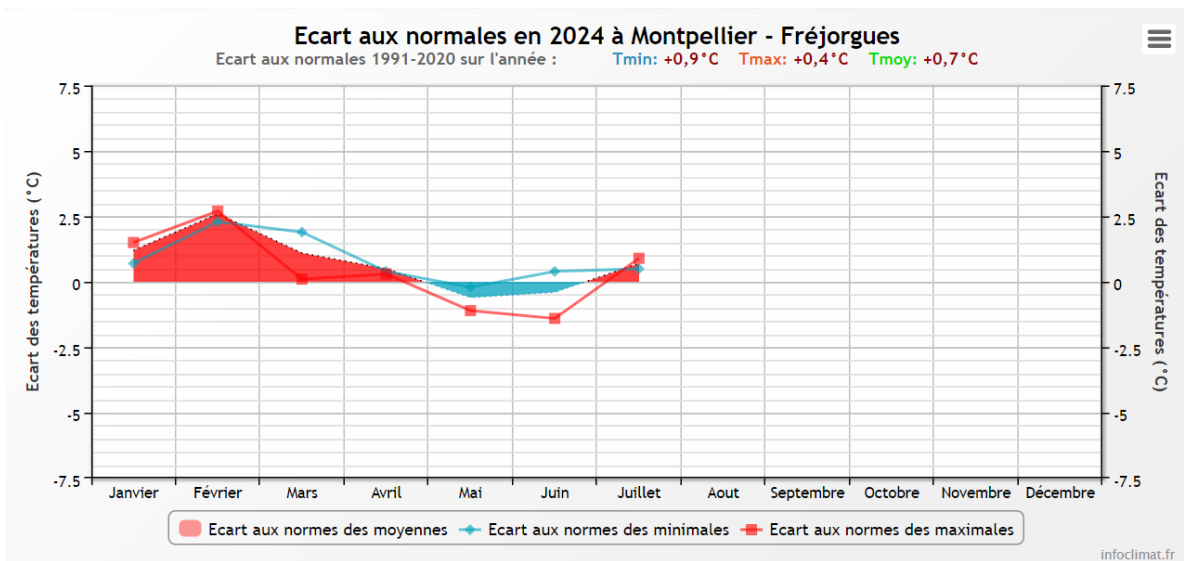
```
cbbPalette <- c("cyan3", "goldenrod1", "brown1", "darkmagenta", "darkolivegreen3", "cadetblue1", "darkorange")
```

```
valeurs$date1 <- factor(valeurs$Date, c("28/05/2024", "12/06/2024", "25/06/2024", "05/07/2024")) # Remettre dans l'ordre les dates
```

```
ggplot(data = valeurs) +
  geom_bar(aes(x = Modalite, y = EMMean, fill = Modalite), stat = "identity") +
  scale_fill_manual(values = cbbPalette, labels = c("Témoïn non traité", "Carpovirusine EVO 2", "Madex Pro", "Nouvelle souche",
"C.EVO 2 + CITROLE-A", "C.EVO 2 + Blossom Protect", "C.EVO 2 + Calsun")) +
  scale_y_continuous(labels = scales::percent, limits = c(0, max(valeurs$SE.sup)), oob = rescale_none) +
  labs(x = "Modalités", y = "Proportion moyenne ajustée de larves actives dues au carpocapse", fill = "Modalité") +
  geom_errorbar(aes(x = Modalite, ymin = SE.inf, ymax = SE.sup, width = .2, position = position_dodge(.9)) +
  geom_text(aes(x = Modalite, y = SE.sup, label = .group), vjust = -0.5) +
  facet_wrap(~date1, ncol = 4) +
  theme(axis.text.x = element_blank(),
  axis.ticks.x = element_blank(),
  axis.title.x = element_blank(),
  axis.text.y = element_text(size = 16),
  axis.title.y = element_text(size = 18),
  legend.text = element_text(size = 16),
  legend.title = element_text(size = 18),
  strip.text = element_text(size = 18))
```



*Annexe 5 : Relevés climatologiques de l'année 2024 exposant l'écart aux normales des températures (premier graphique), des précipitations (deuxième graphique) ainsi que la pression et le vent (troisième graphique) de la station météo Montpellier – Fréjorgues située à 17 km du site [36]*





*Annexe 6 : Détail des calculs des taux de pertes dus au transfert, à la diapause, à la nymphose et à l'émergence dans le cadre de l'expérience sur la survie des individus au sein des différents contenants (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 25/05/2024)*

Postulats de départ :

- Toutes les larves introduites initialement sont considérées vivantes
- Tous les individus notés disparus sont considérés morts ; cette mort peut être due à la prédation, au parasitisme ou à une mort naturelle.

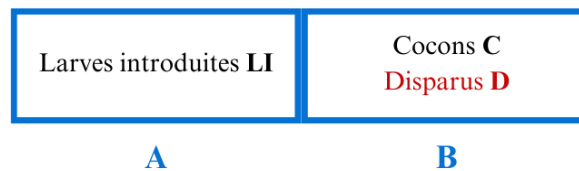
Pour tous les prochains calculs, nous utilisons l'initiale D pour la variable Disparus, correspondant aux individus n'ayant pas été retrouvés durant la phase en question.

1- Taux de pertes dues au transfert  $\tau(\text{transfert})$

Postulat 1 : une larve fait un seul cocon et un cocon ne peut contenir qu'une seule larve.

Théoriquement, l'ensemble des larves introduites forment des cocons, mais il existe une part cachée de cette population : les disparus. Nous créons donc le SYSTEME 1 où l'ensemble A est égal à l'ensemble B :

**SYSTEME 1**



Le taux de pertes dues au transfert représente alors la proportion de disparus au sein de ce système (en rouge) :

$$\tau(\text{transfert}) = \frac{D}{LI}$$

Or, sachant que A = B, nous pouvons facilement en déduire le nombre de disparus :

$$LI = C + D$$

$$D'ou D = LI - C$$

$$D'ou \tau(\text{transfert}) = \frac{LI - C}{LI}$$

2- Taux de pertes dues à la diapause  $\tau(\text{diapause})$

Postulats 2 :

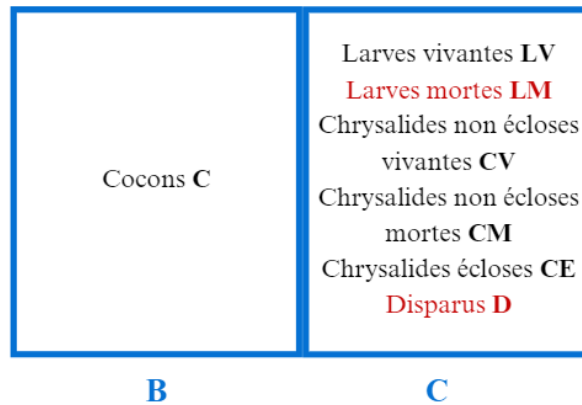
- Nous considérons que les larves vivantes sont capables de faire une chrysalide ultérieurement.
- Il y a 1/2 chance (définie arbitrairement car considérée comme étant la réponse la plus proche de la réalité en termes de probabilité) pour qu'un individu disparu soit une larve disparue ou une chrysalide disparue.

Théoriquement, l'ensemble des cocons donne des larves et des chrysalides, mais il existe une part cachée de cette population : les disparus. Nous créons donc le SYSTEME 2 où l'ensemble B est égal à l'ensemble C :





## SYSTEME 2



Le taux de pertes dues à la diapause représente alors la proportion de larves mortes et disparues au sein de ce système, en prenant en compte les postulats qui permettent d'approximer le nombre de larves mortes au sein des individus disparus sans lequel le taux est impossible à déterminer (en rouge) :

$$\tau(diapause) = \frac{LM + \frac{1}{2}D}{C}$$

Or, sachant que  $B = C$ , nous pouvons facilement en déduire le nombre de disparus :

$$C = LV + LM + CV + CM + CE + D$$

$$D'ou\ D = C - LV - LM - CV - CM - CE$$

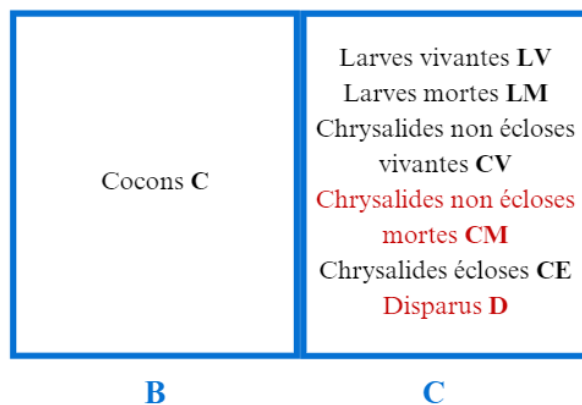
$$D'ou\ \tau(diapause) = \frac{LM + \frac{1}{2}(C - LV - LM - CV - CM - CE)}{C}$$

$$\tau(diapause) = \frac{C - LV + LM - CV - CM - CE}{2C} \text{ après simplification.}$$

### 3- Taux de pertes dues à la nymphose $\tau(nymphose)$

Nous reprenons les postulats et le système de la sous-partie 2 et gardons par conséquent le nombre de disparus :

## SYSTEME 2



Le taux de pertes dues à la diapause représente alors la proportion de chrysalides mortes et disparues au sein de ce système, en prenant en compte les postulats qui permettent d'approximer le nombre de chrysalides mortes au sein des individus disparus sans lequel le taux est impossible à déterminer (en rouge) :

$$\tau(nymphose) = \frac{CM + \frac{1}{2}D}{C}$$

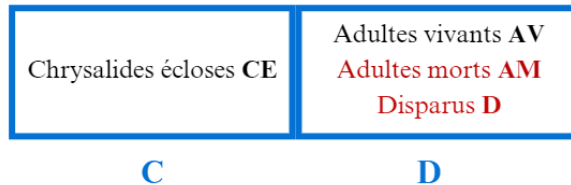


$$\text{D'où } \tau(\text{nymphose}) = \frac{C-LV-LM-CV+CM-CE}{2C} \text{ après simplification.}$$

#### 4- Taux de pertes dues à l'émergence $\tau(\text{émergence})$

Théoriquement, l'ensemble des chrysalides écloses donne des adultes, mais il existe une part cachée de cette population : les disparus. Nous créons donc le SYSTEME 3 où l'ensemble C est égal à l'ensemble D :

#### SYSTEME 3



Le taux de pertes dues à l'émergence représente alors la proportion d'adultes morts et disparus au sein de ce système (en rouge) :

$$\tau(\text{émergence}) = \frac{AM + D}{CE}$$

Or, sachant que  $C = D$ , nous pouvons facilement en déduire le nombre de disparus :

$$CE = AV + AM + D$$

$$\text{D'où } D = CE - AV - AM$$

$$\text{D'où } \tau(\text{émergence}) = \frac{AM+CE-AV-AM}{CE}$$

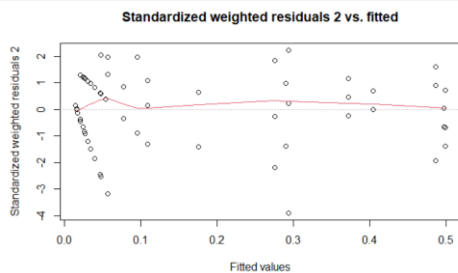
$$\tau(\text{émergence}) = \frac{CE-AV}{CE}.$$



*Annexe 7 : Script R réalisé pour analyser statistiquement l'effet des différents contenants et de la date sur la dégradation des fruits piqués dans le cadre de l'essai prototype – le script utilisé est similaire à celui de l'Annexe 3 et n'est donc représenté qu'à partir de la construction du modèle où il diffère (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 15/08/2024)*

```
## CONSTRUCTION DU MODELE
{r modele, include=TRUE}
modele_action2_degradation_fruits<-betareg(Pourc_degradation ~ Modalite + Date + Stade_degradation + Modalite:Date +
Modalite:Stade_degradation + Date:Stade_degradation,
data=data_action2_degradation_fruits)
summary(modele_action2_degradation_fruits)
```

```
## VERIFICATION DE L'AJUSTEMENT, DE L'HOMOSCEDASTICITE ET DE L'INDEPENDANCE DES RESIDUS
{r plot resid, include=TRUE}
plotresid(modele_action2_degradation_fruits)
```



```
## TEST DE WALD
{r test, include=TRUE}
Anova(modele_action2_degradation_fruits)
```

```
Response: Pourc_fruits_degrades
Df    Chisq Pr(>Chisq)
Modalite 1 0.1022 0.74921
Date 1 0.0106 0.91805
Stade_degradation 7 513.2835 < 2.2e-16 ***
Modalite:Date 1 0.0139 0.90621
Modalite:Stade_degradation 7 17.7251 0.01327 *
Date:Stade_degradation 7 38.3786 2.567e-06 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
## TEST DE COMPARAISON MULTIPLE EN CONSERVANT LES FACTEURS SIGNIFICATIFS
```

```
{r comparaisons multiples, include=TRUE}
library(dplyr)
library(tidyr)

# Calcul des moyennes ajustées
EMM <- emmeans(modele_action2_degradation_fruits, ~ Stade_degradation * Modalite * Date, adjust = "fdr", mode = "link")
cld_results <- cld(EMM, details = FALSE, adjust = "fdr")
```

```
# Transformer les estimates back
valeurs <- back.emmeans(EMM, transform = "p.beta", n = 96)
rownames(valeurs) <- NULL
colnames(valeurs) <- c("trait", "SE.inf", "EMMean", "SE.sup")
valeurs <- separate(valeurs, trait, into = c("Stade_degradation", "Modalite", "Date"), sep = ":")
```

```
# Ajouter les groupes de chiffres
cld_df <- as.data.frame(cld_results)
valeurs <- merge(valeurs, cld_df, by.x = c("Stade_degradation", "Modalite", "Date"), by.y = c("Stade_degradation", "Modalite", "Date"))

# Réordonner Les facteurs
valeurs$Stade_degradation <- factor(valeurs$Stade_degradation, levels = c("ND", "NDP", "LD", "LDP", "MD", "MDP", "FD", "FDP"))
valeurs$Date <- factor(valeurs$Date, levels = c("26/07/2024", "09/08/2024"))

# Créer la variable de réordonnement
valeurs$StadeModalite <- factor(paste(valeurs$Stade_degradation, valeurs$Modalite, sep = "."),
levels = c("ND.Caisse", "ND.Seau", "NDP.Caisse", "NDP.Seau", "LD.Caisse", "LD.Seau", "LDP.Caisse", "LDP.Seau", "MD.Caisse", "MD.Seau", "MDP.Caisse", "MDP.Seau", "FD.Caisse", "FD.Seau", "FDP.Caisse", "FDP.Seau"))
```

```
## MISE EN FORME GRAPHIQUE
```

```
{r mise en forme graph, include=TRUE}
cbbPalette <- c("ND" = "skyblue1", "NDP" = "slateblue1", "LD" = "steelblue1", "LDP" = "slateblue2",
"MD" = "steelblue2", "MDP" = "slateblue3", "FD" = "skyblue3", "FDP" = "slateblue4")

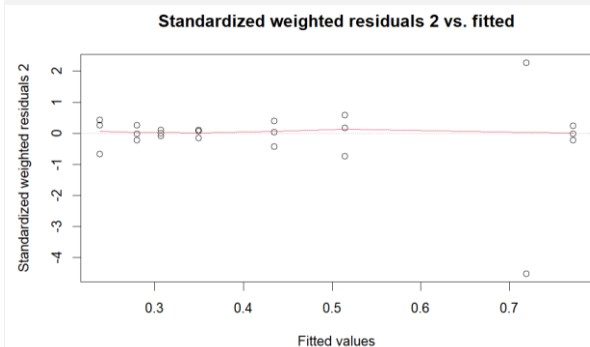
# Création du graphique
ggplot(data=valeurs, aes(x=StadeModalite, y=EMMean, fill=Stade_degradation)) +
geom_bar(stat="identity", position=position_dodge(), show.legend = FALSE) +
scale_y_continuous(labels = scales::percent, limits=c(0, max(valeurs$SE.sup, na.rm = TRUE)), oob = scales::rescale_none) +
labs(x="Modalite", y="Proportion moyenne des différents stades de dégradation") +
geom_errorbar(aes(ymin=SE.inf, ymax=SE.sup), width=.2, position=position_dodge(.9)) +
geom_text(aes(y = SE.sup, label = .group), vjust = -0.5, position = position_dodge(.9)) +
facet_wrap(~ Date, ncol = 4) +
scale_fill_manual(values=cbbPalette) +
theme(
axis.text.x = element_text(size = 16, angle = 45, hjust = 1),
axis.ticks.x = element_blank(),
axis.title.x = element_text(size = 18),
axis.text.y = element_text(size = 16),
axis.title.y = element_text(size = 18),
legend.text = element_text(size = 16),
legend.title = element_text(size = 18),
strip.text = element_text(size = 18) )
```



*Annexe 8 : Script R réalisé pour analyser statistiquement l'effet des différents contenants sur le taux de pertes au cours des différentes phases du cycle des individus diapausants de la troisième génération de 2023 dans le cadre de l'essai prototype – le script utilisé est similaire à celui de l'Annexe 3 et n'est donc représenté qu'à partir de la construction du modèle où il diffère (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 03/07/2024)*

```
## CONSTRUCTION DU MODELE
{r modele, include=TRUE}
modele_action2_taux_pertes<-betareg(Pourc_pertes ~ Modalite + Phase_cycle + Modalite:Phase_cycle,
data=data_action2taux_pertes)
summary(modele_action2_taux_pertes)
```

```
## VERIFICATION DE L'AJUSTEMENT, DE L'HOMOSCEDASTICITE ET DE L'INDEPENDANCE DES RESIDUS
{r plot resid, include=TRUE}
plotresid(modele_action2_taux_pertes)
```



```
## TEST DE WALD
{r test, include=TRUE}
Anova(modele_action2_taux_pertes)
```

```
Response: Pourc_pertes
```

	Df	Chisq	Pr(>Chisq)
Modalite	1	0.6354	0.425371
Phase_cycle	3	14.8073	0.001989 **
Modalite:Phase_cycle	3	1.1593	0.762772

---  
Signif. codes: 0 '\*\*\*\*' 0.001 '\*\*\*' 0.01 '\*\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```
## TEST DE COMPARAISON MULTIPLE EN CONSERVANT LE FACTEUR SIGNIFICATIF
```

```
{r comparaisons multiples, include=TRUE}
library(dplyr)
library(tidyr)

# Calculer les moyennes ajustées
EMM<-emmeans(modele_action2_taux_pertes,~ Phase_cycle, adjust="fdr", mode="link")
EMM
cld_results <- cld(EMM, details = FALSE, adjust = "fdr")

# Transformer les estimates back
valeurs <- back.emmeans(EMM, transform = "p.beta", n = 24)
rownames(valeurs) <- NULL
colnames(valeurs) <- c("trait", "SE.inf", "EMMean", "SE.sup")
valeurs <- separate(valeurs, trait, into = c("Phase_cycle"), sep = ":")

# Ajouter les groupes de chiffres
cld_df <- as.data.frame(cld_results)
valeurs <- merge(valeurs, cld_df, by.x = c("Phase_cycle"), by.y = c("Phase_cycle"))

valeurs
```

```
## MISE EN FORME GRAPHIQUE
```

```
{r mise en forme graph, include=TRUE}
palette<-factor(c("turquoise2", "turquoise4", "turquoise3", "turquoise1"))

valeurs$Phase_cycle1<-factor(valeurs$Phase_cycle, c("Transfert", "Diapause", "Nymphose", "Emergence")) # Remettre dans l'ordre

ggplot(data=valeurs, aes(x=Phase_cycle))+
  geom_bar(data=valeurs, mapping=aes(x=Phase_cycle1, y=EMMean), stat="identity", fill = palette)+ scale_y_continuous(labels =
scales::percent, limits=c(0, max(valeurs$SE.sup)), oob = rescale_none)+
  labs(x="Phase du cycle", y="Proportion moyenne ajustée des pertes de carpacapse")+
  geom_errorbar(aes(x=Phase_cycle, ymin=SE.inf, ymax=SE.sup), width=.2, position=position_dodge(.9)) +
  geom_text(aes(x = Phase_cycle, y = SE.sup, label = .group), vjust = -0.5) +
  font("y1ab", size = 8)+
  theme(axis.text.x = element_text(size = 16),
axis.ticks.x = element_blank(),
axis.title.x = element_text(size = 18),
axis.text.y = element_text(size = 16),
axis.title.y = element_text(size = 18),
legend.text = element_text(size = 16),
legend.title = element_text(size = 18),
strip.text = element_text(size = 18))
```

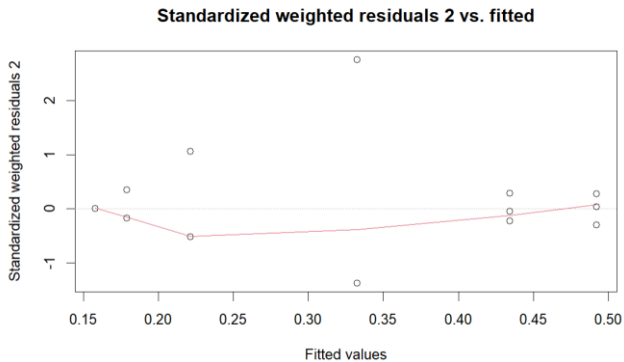




*Annexe 9 : Script R réalisé pour analyser statistiquement l'effet des différents contenants sur le taux de pertes au cours des différentes phases du cycle des individus de la seconde génération de 2024 dans le cadre de l'essai prototype – le script utilisé est similaire à celui de l'Annexe 3 et n'est donc représenté qu'à partir de la construction du modèle où il diffère (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 12/08/2024)*

```
## CONSTRUCTION DU MODELE
{r modele, include=TRUE}
modele_action2_taux_pertes<-betareg(Pourc_pertes ~ Modalite + Phase_cycle + Modalite:Phase_cycle,
data=data_action2taux_pertes, link="cloglog")
summary(modele_action2_taux_pertes)

## VERIFICATION DE L'AJUSTEMENT, DE L'HOMOSCEDASTICITE ET DE L'INDEPENDANCE DES RESIDUS
{r plot resid, include=TRUE}
plotresid(modele_action2_taux_pertes)
```



```
## TEST DE WALD
{r test, include=TRUE}
Anova(modele_action2_taux_pertes)

Response: Pourc_pertes
      Df  Chisq Pr(>Chisq)
Modalite      1  0.1304  0.71805
Phase_cycle   3 10.6553  0.01374 *
Modalite:Phase_cycle 3  0.0952  0.99241
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
## TEST DE COMPARAISON MULTIPLE EN CONSERVANT LE FACTEUR SIGNIFICATIF
{r comparaisons multiples, include=TRUE}
library(dplyr)
library(tidyr)

# Calculer les moyennes ajustées
EMM<-emmeans(modele_action2_taux_pertes,~ Phase_cycle, adjust="fdr", mode="link")
EMM
cld_results <- cld(EMM, details = FALSE, adjust = "fdr")

# Transformer les estimates back
valeurs <- back.emmeans(EMM, transform = "p.beta", n = 24)
rownames(valeurs) <- NULL
colnames(valeurs) <- c("trait", "SE.inf", "EMMean", "SE.sup")
valeurs <- separate(valeurs, trait, into = c("Phase_cycle"), sep = ":")

# Ajouter les groupes de chiffres
cld_df <- as.data.frame(cld_results)
valeurs <- merge(valeurs, cld_df, by.x = c("Phase_cycle"), by.y = c("Phase_cycle"))

valeurs
```

```
## MISE EN FORME GRAPHIQUE
{r mise en forme graph, include=TRUE}
# Remplacer les valeurs pour la phase "Transfert" par 0
valeurs$EMMean[valeurs$Phase_cycle == "Transfert"] <- 0
valeurs$SE.inf[valeurs$Phase_cycle == "Transfert"] <- 0
valeurs$SE.sup[valeurs$Phase_cycle == "Transfert"] <- 0

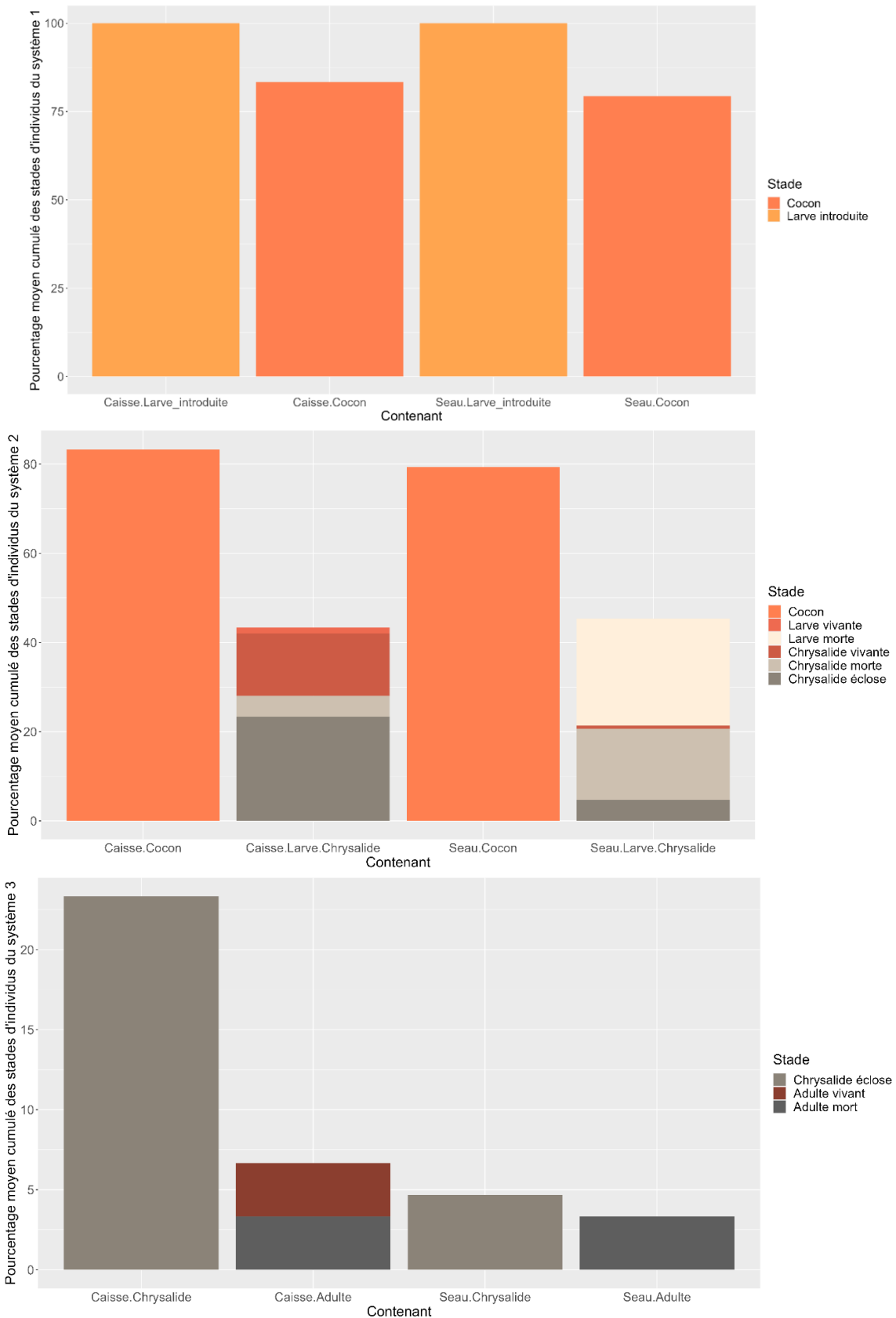
# Créer le graphique
palette <- factor(c("turquoise2", "turquoise4", "turquoise3", "turquoise1"))

valeurs$Phase_cycle1<-factor(valeurs$Phase_cycle, c("Transfert","Diapause","Nymphose","Emergence")) # Remettre dans l'ordre

ggplot(data=valeurs, aes(x=Phase_cycle))+
  geom_bar(data=valeurs, mapping=aes(x=Phase_cycle1,y=EMMean),stat="identity", fill = palette)+ scale_y_continuous(labels =
scales::percent,limits=c(0,max(valeurs$SE.sup)),oob = rescale_none)+
  labs(x="Phase du cycle", y="Proportion moyenne ajustée des pertes de carpopapse")+
  geom_errorbar(aes(x=Phase_cycle,ymin=SE.inf, ymax=SE.sup), width=.2,position=position_dodge(.9)) +
  theme(axis.text.x = element_text(size = 16),
axis.ticks.x = element_blank(),
axis.title.x = element_text(size = 18),
axis.text.y = element_text(size = 16),
axis.title.y = element_text(size = 18),
legend.text = element_text(size = 16),
legend.title = element_text(size = 18),
strip.text = element_text(size = 18))
```

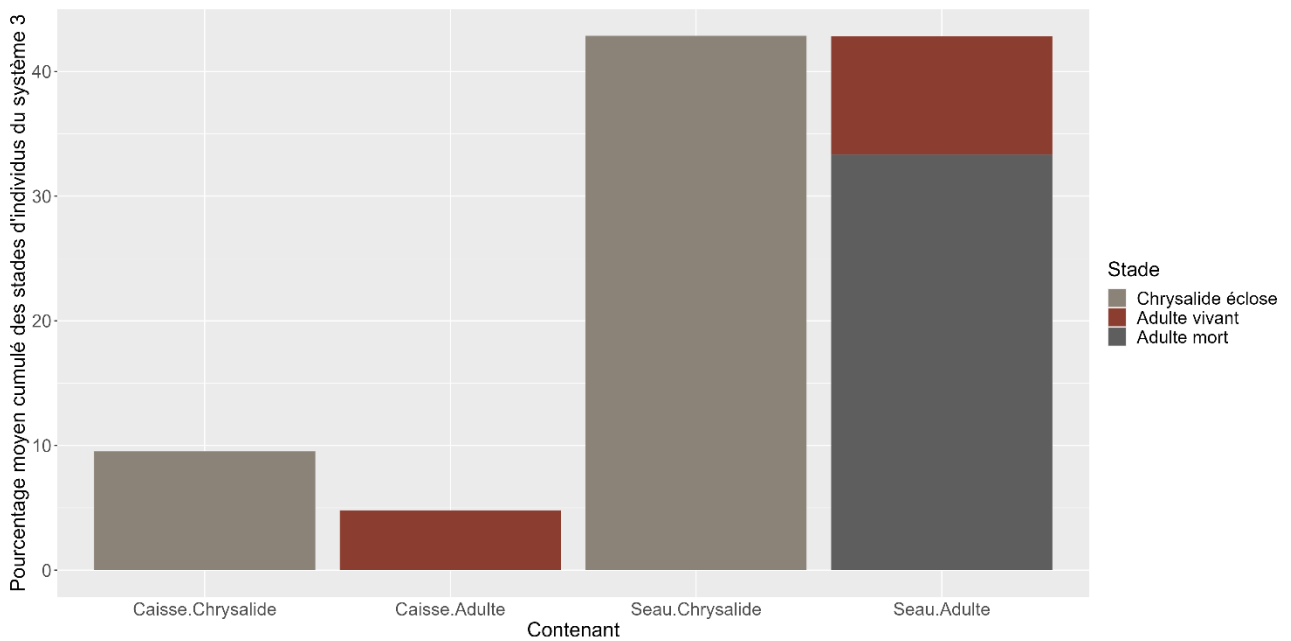
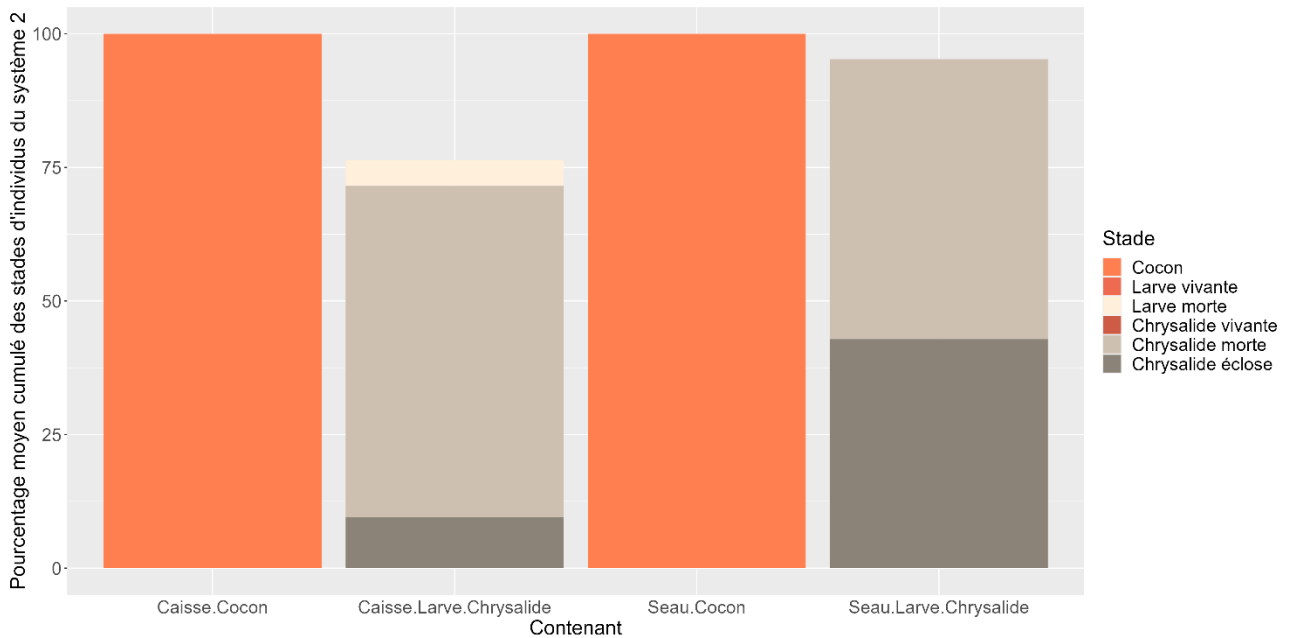


**Annexe 10 :** Représentation graphique des différents stades d'individus retrouvés dans les deux contenants et regroupés au sein des ensembles A et B pour le SYSTÈME 1 (premier graphique), B et C pour le SYSTÈME 2 (deuxième graphique) et C et D pour le SYSTÈME 3 (troisième graphique) de façon à mettre en lumière le nombre d'individus disparus au sein de chaque système – les systèmes étant décrits **Annexe 6** (Anaïs Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 10/07/2024)





**Annexe 11** : Représentation graphique des différents stades d'individus retrouvés dans les deux contenant et regroupés au sein des ensembles B et C pour le SYSTEME 2 (premier graphique) et C et D pour le SYSTEME 3 (deuxième graphique) de façon à mettre en lumière le nombre d'individus disparus au sein de chaque système – les systèmes étant décrits **Annexe 6** (le SYSTEME 1 n'est pas représenté car aucune perte d'individus n'y est recensée) (Anais Kiehl, SudExpé site de Marsillargues, 14/08/2024)



	Diplôme : Ingénieure en Horticulture Spécialité : Horticulture Spécialisation / option : PPEH Enseignant référent : Bruno JALOUX	
Auteur(s) : Anaïs KIEHL Date de naissance : 03/11/2000	Organisme d'accueil : SudExpé site de Marsillargues	
Nb pages : 45      Annexe(s) : 11	Adresse : Mas Carrière, 34590 Marsillargues	
Année de soutenance : 2024	Maître de stage : Hélène JOIE	
Titre français : Optimisation de techniques de protection intégrée contre <i>Cydia pomonella</i> L. le carpocapse du pommier		
Titre anglais : Optimisation of integrated protection techniques against <i>C. pomonella</i> L. the codling moth		
Résumé (1600 caractères maximum) : La combinaison et l'intégration de techniques de biocontrôle ont été testées afin d'optimiser la lutte contre <i>Cydia pomonella</i> L. L'expérimentation de trois souches de virus de la granuloïse et de leur adjuvantation et association n'a pas exposé de différences significatives entre les traitements, excepté pour la nouvelle souche qui a semblé moins efficace. L'absence de pression au sein de l'essai a pu biaiser ces résultats. L'essai système concernant trois stratégies de protection a exposé un effondrement de la stratégie intégrant de techniques de biocontrôle, et de la référence PFI. Cela peut s'expliquer par un historique de pression élevé, ou par une mauvaise gestion du positionnement des traitements. La dernière stratégie, limitant l'usage des insecticides de synthèse par l'intégration de méthodes de biocontrôle, s'est montrée efficace et a exposé l'importance de prendre en compte l'hétérogénéité des sites et l'historique de pression. L'essai en conditions contrôlées relatif à l'adaptation de l'augmentorium a exposé le succès de trois mailles (Alt'Carpo, Alt'Droso et Alt'Eurytoma) à piéger le carpocapse tout en laissant s'échapper <i>Anagyrus fusciventris</i> de taille équivalente à <i>Mastrus ridens</i> , parasitoïde spécifique du ravageur. L'expérience avec ce dernier est à réitérer. La dégradation de fruits piqués et la survie du carpocapse au sein d'un seau et d'une caisse ont aussi été testées, mais ces expériences sont à améliorer pour contrôler les facteurs nécessaires à leur succès. L'objectif est d'optimiser le prototype en vue de l'expérimenter en conditions réelles.		
Abstract (1600 caractères maximum) : The combination and integration of biocontrol techniques were tested in order to optimise control of <i>Cydia pomonella</i> L. Experimentation with three strains of granulosis virus and their adjuvantation and combination did not reveal any significant differences between treatments, except for the new strain, which appeared to be less effective. The absence of pressure within the trial may have biased these results. The system trial involving three protection strategies showed a collapse in the strategy incorporating biocontrol techniques, and in the PFI reference. This may be explained by a history of high pressure, or by poor management of the positioning of treatments. The last strategy, limiting the use of synthetic insecticides by integrating biocontrol methods, proved effective and showed the importance of taking into account the heterogeneity of the sites and the history of pressure. The controlled conditions trial on the adaptation of the augmentorium demonstrated the success of three meshes (Alt'Carpo, Alt'Droso and Alt'Eurytoma) in trapping codling moth while allowing the escape of <i>Anagyrus fusciventris</i> of equivalent size to <i>Mastrus ridens</i> , a parasitoid specific to the pest. The experiment should be repeated with the latter. The degradation of pricked fruit and the survival of codling moth within a bucket and a crate have also been tested, but these experiments need to be improved to control the factors necessary for their success. The aim is to optimise the prototype with a view to testing it under real conditions.		
Mots-clés : <i>Cydia pomonella</i> L., techniques de biocontrôle, virus de la granuloïse, adjuvantation, stratégie de protection intégrée, augmentorium, maille, parasitoïde, <i>Mastrus ridens</i> , contenant		
Key Words : <i>Cydia pomonella</i> L., biocontrol techniques, granulosis virus, adjuvantation, integrated protection strategy, augmentorium, mesh, parasitoid, <i>Mastrus ridens</i> , container		