

L'Institut Agro Rennes-Angers

☒ Site d'Angers ☐ Site de Rennes

Année universitaire : 2024 - 2025	Mémoire de fin d'études
Spécialité : Horticulture	D'ingénieur de l'Institut Agro Rennes-Angers
Spécialisation :	(Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)
Protection des Plantes et Environnement en Horticulture	

Optimisation des méthodes de pulvérisation du virus de la granulose contre le carpocapse des pommes (*Cydia pomonella* L.)

Par : Camille METAYER

Soutenu à Angers le 12/09/2025 à 14h

Devant le jury composé de :

Président : JALOUX Bruno

Jury extérieur : LEMARQUAND Arnaud

Maître de stage : SIEGWART Myriam

Enseignant référent : SOUFFLET-FRESLON
Vanessa

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 souhaite exprimer toute ma gratitude au GISFruit, grâce auquel j'ai pu réaliser ce stage aux côtés de Myriam Siegwart, que je remercie tout particulièrement pour la qualité et la richesse de ses conseils. J'adresse également mes remerciements à Sophie Hardy, pour m'avoir accompagnée tout au long de cette expérience, ainsi qu'à Carine Mestre.

J'adresse également mes sincères remerciements à l'ensemble du GRCETA de Basse Durance, qui m'a accueillie une seconde fois avec une grande bienveillance. Je tiens à remercier tout spécialement Clément, Bruno et Jean-Philippe, pour leur disponibilité, leur aide précieuse lors de mes essais, mais surtout pour la générosité avec laquelle ils m'ont transmis leurs connaissances. Je souhaite également remercier chaleureusement les stagiaires du GRCETA pour leur aide au quotidien et la bonne ambiance qu'elles ont apporté tout au long du stage.

Je remercie également chaleureusement l'INRAe d'Avignon, et en particulier Elodie et Catherine pour leur aide lors de la préparation des essais et surtout pour la gestion des larves de carpocapse.

J'exprime également toute ma reconnaissance à l'INRAe de Montpellier pour leur accueil au sein de leurs locaux et pour la richesse des échanges. Je remercie tout spécialement Cyril Tinet et Jean-Paul Douzal pour le temps qu'ils m'ont consacré et leur collaboration précieuse sur les travaux de pulvérisation.

Un merci particulier à l'IFV, pour les échanges constructifs et intéressants que nous avons partagés.

Enfin, je souhaite adresser un immense merci à ma famille ainsi qu'à mes amis de l'INH, qui m'ont accompagnée tout au long de ces cinq années, en m'apportant soutien, rires et encouragements constants.

De tout mon cœur, merci à tous.

Table des matières

GLOSSAIRE	9
ABREVIATIONS	10
1. INTRODUCTION	1
2. ETAT DE L'ART	3
2.1. <i>Cydia pomonella</i> L., un papillon ravageur des pommiers	3
2.1.1. Généralités	3
2.1.2. Biologie de <i>Cydia pomonella</i> L.	3
2.1.3. Dégâts causés par <i>Cydia pomonella</i> L.....	3
2.1.4. Les méthodes de lutttes disponibles contre <i>Cydia pomonella</i> L.....	4
2.2. Le virus de la granulose, un biopesticide utilisé contre <i>Cydia pomonella</i> L.	5
2.2.1. Généralités sur le virus de la granulose	5
2.2.2. Les limites à l'utilisation du virus de la granulose en verger	6
2.3. La pulvérisation en verger	7
2.3.1. Les pulvérisateurs utilisés en verger.....	7
2.3.2. Réglages mécaniques influençant la pulvérisation.....	8
2.3.3. Conditions environnementales influençant la pulvérisation.....	9
2.4. Le diagnostic de la qualité de pulvérisation en verger.....	10
2.4.1. Les différents indicateurs.....	10
2.4.2. Evaluation de la qualité de la pulvérisation	11
2.4.3. L'analyse des papiers hydro sensibles	13
3. OBJECTIFS DE L'ETUDE ET QUESTIONS DE RECHERCHE	14
4. MATERIEL ET METHODES	16
4.1. Matériel biologique	16
4.2. Les dispositifs expérimentaux et modalités	16
4.2.1. Détermination du seuil d'efficacité du virus de la granulose contre <i>Cydia pomonella</i> L.	16
4.2.2. Evaluation de l'impact des conditions climatiques.....	20
4.2.3. Diagnostic de la qualité de la pulvérisation chez les producteurs.....	22
4.2.4. Analyses statistiques.....	23

5. RESULTATS	24
5.1. Déterminer le seuil d'efficacité du virus de la granulose contre <i>Cydia pomonella</i>	
5.1.1. Effet du taux de couverture foliaire sur l'efficacité du CpGV	24
5.1.2. Effet de la taille des impacts	25
5.1.3. Effet de l'interaction taux de couverture et taille des impacts	25
5.1.1. Effet de la quantité de virus	26
5.2. Les conditions météorologiques et la pulvérisation en verger	26
5.2.1. Effet de la température.....	26
5.2.2. Effet de l'hygrométrie	26
5.3. Choix d'outils pour le diagnostic de la pulvérisation en verger	27
5.3.1. Comparaison scanner et téléphone	27
5.3.2. Etalement des gouttes dans le temps	27
5.3.3. Utilisation d'applications mobiles.....	28
 6. DISCUSSION	 29
6.1. Le seuil d'efficacité du virus de la granulose contre <i>Cydia pomonella</i> L.....	29
6.2. Les conditions météorologiques et la pulvérisation en verger	30
6.3. Choix d'outil pour le diagnostic de la pulvérisation en verger	31
 7. CONCLUSION.....	 32
8. BIBLIOGRAPHIE	34
9. SITOGRAFIE.....	37
10. ANNEXES	38

Table des figures

Figure 1 : Production nationale de pommes (Agreste 2024)	
Figure 2 : Le carpocapse de la pomme, <i>Cydia pomonella</i> : a) Adulte sur une pomme b) Chrysalide dans une pomme c) Larve à côté d'un trou creusé dans une pomme d) Larve dans une pommotte (MAPAQ 2000)	
Figure 3 : Cycle biologique de <i>Cydia pomonella</i> dans la région PACA (Perrin 2022).....	
Figure 4 : Classification et composition des CpGV commercialisés en France (Adapté par Andermatt de Gebhardt et al., 2014 et Eberle et al., 2009 cité par Siegwart et al. 2020b)).	
Figure 5 : Pulvérisateur arboricole, trainé, à jets portés (C. Metayer)	
Figure 6 : Pulvérisateur pneumatique (C. Metayer)	
Figure 7 : Le réglage d'un pulvérisateur (C. Metayer).....	
Figure 8 : Tableau de débits (l/min) pour les buses à turbulence ATR 80° de chez ALBUZ	
Figure 9 : Delta T, relation entre la température et l'humidité relative (METOS 2025).....	
Figure 9 : Banc de contrôle de pulvérisation (AgriExpo 2025).....	
Figure 10 : le verger artificiel développé par le CTIFL (Verpont 2024)	
Figure 11 : 1. DropSight de Metos (METOS 2024) ; 2. Kit Evidence de BASF (BASF 2022) ; 3. Drop'In de Syngenta (Syngenta 2020)	
Figure 12 : Utilisation de papiers hydro sensibles pour le réglage d'un pulvérisateur (C. Metayer).....	
Figure 14 : Rampe de pulvérisation de l'INRAe de Montpellier (C. Metayer).....	
Figure 16 : Salle de séchage des feuilles, rangées par modalité (Sophie Hardy).....	
Figure 17 : Boîte à photos et images capturées à l'aide de cet outil (Sophie Hardy et C. Metayer)	
Figure 18 : Dose effective de produit (mL/m ²) en fonction du taux de couverture pour les gros impacts (C. Metayer)	
Figure 19 : Pose des larves au stade L1 sur les feuilles de pommier (C. Metayer)	
Figure 20 : Disposition des perches et passage du pulvérisateur pneumatique (C. Metayer)	
Figure 21 : Effet du taux de couverture sur la mortalité corrigée pour les produits EVO2 et Madex Pro. Chaque point représente une observation de mortalité corrigée (%) en fonction de la couverture réelle.	
Figure 23 : Effet de la taille des impacts (grosses, moyennes, petites) sur la mortalité corrigée (%) avec le produit Madex Pro. Les lettres (a, b, c) indiquent des différences significatives entre les traitements selon un test de Tukey (p < 0,05).	
Figure 24 : Effet de la taille des impacts et du taux de couverture sur la mortalité corrigée avec le produit Carpovirusine Evo2	
Figure 25 : Effet de la taille des gouttes et du pourcentage de couverture sur la mortalité corrigée avec le produit Madex Pro	
Figure 26 : Effet de la dose effective déposée sur la mortalité corrigée.....	
Figure 27 : Taux de couverture en fonction de la température, selon la hauteur et le type de pulvérisateur. La ligne rouge pointillée marque le seuil de 55 % de couverture.	
Figure 28 : Température de rupture de la relation température–couverture (régression segmentée). La température de rupture (break_T) estimée et les annotations (p < 0,05 ou n.s.) proviennent d'un test de Davies.	

Figure 29 : Taux de couverture en fonction de l'hygrométrie, selon la hauteur et le type de pulvérisateur. La ligne rouge pointillée marque le seuil de 55 % de couverture.	
Figure 30 : Comparaison des taux de couvertures obtenus d'après des photographies réalisées avec un scanner et un téléphone.....	
Figure 31 : Evolution du taux de couverture dans le temps après pulvérisation	
Figure 32 : Comparaison du taux de couverture obtenus via DepositScan et SmartSpray	
Figure 33 : Comparaison du taux de couverture obtenus via DepositScan et DropLeaf	
Figure 34 : Caractéristiques d'évaporation de gouttes d'eau sous deux environnements contrastés : (1) frais et humide (paramètres non spécifiés dans la source et (2) chaud et sec : 30°C, 50% HR (Sanderson, Huddleston 2004).....	

Table des tableaux

Tableau 1 : Nombre d'impacts par cm ² en fonction du type d'insecticide (Blondeau, Colin 2017)	
Tableau 2 : Risque de dérive et fixation des gouttes en fonction de la dimension des gouttelettes (Luca 2007).....	
Tableau 3 : Informations relatives aux feuilles prélevées pour la réalisation des tests (C. Metayer).....	
Tableau 4 : Réglages de la rampe de pulvérisation pour réaliser les différentes modalités (C. Metayer).....	
Tableau 5 : Taille des impacts selon les types de buses et les produits testés (C. Metayer)	

Annexes

Annexe I : Plan de la parcelle de la station de La Pugère.....	
Annexe II : Code R utilisé pour l'analyse des tests hybrides pour l'identification de la qualité de pulvérisation optimale.....	
Annexe III : Code R utilisé pour analyser l'effet de la température et de l'hygrométrie sur la pulvérisation.....	
Annexe IV : Code R utilisé pour réaliser des comparaisons : Exemple de la comparaison entre DeposiScan et SmartSpray.....	
Annexe V : Code R utilisé pour analyser l'étalement des impacts dans le temps	

GLOSSAIRE

Adjuvant : Substance ajoutée à une bouillie pour améliorer son efficacité (adhérence, étalement, pénétration...).

Bouillie : Liquide de pulvérisation composé d'un mélange d'eau et de produit formulé contenant une ou plusieurs substances actives et des adjuvants.

Epizootie : maladie qui frappe simultanément un grand nombre d'animaux de même espèce ou d'espèces différentes en un court laps de temps, dans une région donnée.

Rémanence : Produit phytosanitaire qui se maintient, qui persiste dans le sol, l'eau ou la récolte longtemps après avoir été appliqué.

Stade baladeur : Stade de la larve de *Cydia pomonella* juste après l'éclosion, avant pénétration dans le fruit.

Taille des impacts : diamètre des traces laissées par les gouttelettes sur papier hydro sensible. Elles reflètent la taille des gouttes et constitue un indicateur de la qualité de pulvérisation.

ABREVIATIONS

AB : Agriculture Biologique

CpGV : *Cydia pomonella Granulovirus*

DL₅₀ : Dose provoquant 50% de mortalité dans la population d'organismes étudiées, pendant un temps donné, par administration unique.

HR : Humidité relative

IFT : Indicateur de Fréquence de Traitements phytosanitaires

IFV : Institut Français de la Vigne et du Vin

INRAe : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

L1 : Larve de premier stade

1. INTRODUCTION

D'origine asiatique, la pomme a été introduite en Europe dès la Préhistoire. Au fil des siècles, le nombre de variétés a considérablement augmenté et on en dénombre aujourd'hui plusieurs milliers (Remongin 2021). En France, la pomme est le fruit le plus largement cultivé devant la prune, la pêche et la poire de table avec une production qui atteint 1,58 million de tonnes en 2023 (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire 2023) (Figure 1). Les principaux bassins de production sont le Sud-Est, le Centre Ouest et le Sud-Ouest. A l'échelle internationale, la France se positionne comme le 8^{ème} exportateur mondial, avec 321 tonnes exportées, majoritairement à destination du marché européen (Gutton 2025).

Cependant, la culture de la pomme est confrontée à d'importants enjeux environnementaux, notamment en ce qui concerne l'utilisation des produits phytosanitaires. En effet, le pommier est l'une des cultures les plus traitées avec un indice de fréquence de traitement (IFT) moyen de 29,5 sur l'ensemble de la production nationale en 2018 (Prost 2021). Cette forte dépendance aux traitements s'explique par la pression exercée par de nombreux bioagresseurs parmi lesquels *Cydia pomonella* (le carpocapse des pommes) est considéré comme un ravageur primaire pouvant entraîner une baisse de production allant jusqu'à 80% (Ivana PAJAČ, Ivan PEJIĆ, Božena BARIĆ 2011).

Les données récoltées entre 2022 et 2024 dans le cadre du Réseaux ferme du GRCETA de Basse Durance montre que l'IFT total des producteurs en pommier est de 19,88. On constate que la gestion du carpocapse des pommes en production fruitière intégrée repose sur l'utilisation de produits de synthèse et de biocontrôle avec un IFT total de 5,9 dont 3,5 de biocontrôle. Alors qu'en agriculture biologique (AB), cette gestion repose essentiellement sur l'utilisation de produit de biocontrôle avec un IFT total de 7,6 dont 7,3 de biocontrôle (Réseau ferme GRCETA, 2024).

Face aux risques pour la santé et la biodiversité liés à l'utilisation des produits phytosanitaires, le gouvernement a mis en place des plans d'action tels que la stratégie ECOPHYTO 2030 qui visent à réduire l'utilisation de ces produits. Cette démarche se traduit notamment par la recherche et le développement de solutions alternatives économiquement soutenables afin d'anticiper les potentiels retraits de substances actives (MASA 2024).

Dans ce contexte, des recherches sont effectuées sur l'utilisation de produits de biocontrôle tels que le virus de la granulose pour lutter contre *Cydia pomonella*. Ce biopesticide utilisé en France dès 1991 a vu son usage s'intensifier au fil des années conduisant à l'émergence de populations résistantes et à une baisse d'efficacité (Siegwart et al. 2020 ; Sauphanor et al. 2006 ; Lopez-Ferber et al. 2014). De plus, les tests d'efficacité du virus de la granulose contre *Cydia pomonella* montrent une mortalité importante des souches sensibles de ce papillon en laboratoire mais les performances du virus de la granulose en conditions réelles de vergers sont souvent plus faibles (Salamin et al. 2007).

Des travaux menés en 2024 ont cherché à identifier les facteurs permettant d'améliorer son efficacité. Il en ressort que la qualité de la pulvérisation constitue un levier majeur pour optimiser l'action du virus de la granulose en vergers (Delpech 2024).

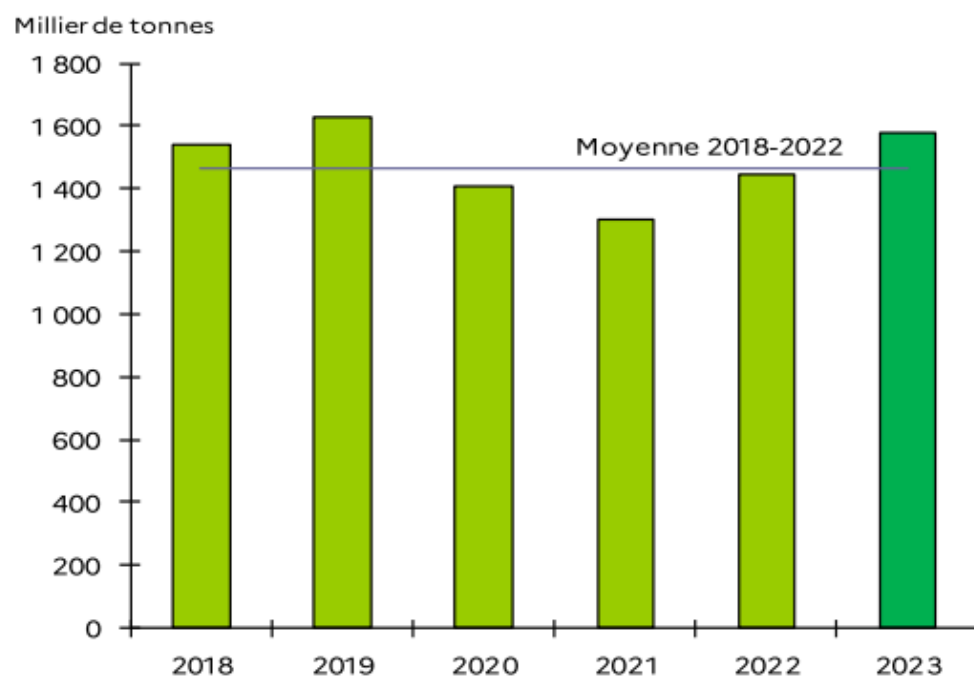


Figure 1 : Production nationale de pommes (Agreste 2024)

En effet, la pulvérisation d'un produit de contact qui n'atteint pas sa cible ou mal réparti est source de pertes d'efficacité, de risques économiques et de contaminations potentielles pour les personnes et l'environnement. Le choix de matériels adaptés (pulvérisateurs, buses), d'un réglage précis (volume par hectare, pression, vitesse d'avancement, débit de pulvérisation) ainsi que des conditions environnementales adaptées sont essentiels pour garantir une efficacité optimale. L'objectif de ce travail est donc d'identifier la qualité de pulvérisation permettant d'améliorer l'efficacité du virus de la granulose. Puis de proposer une méthode accessible et efficace permettant d'obtenir cette qualité de pulvérisation dans les exploitations.

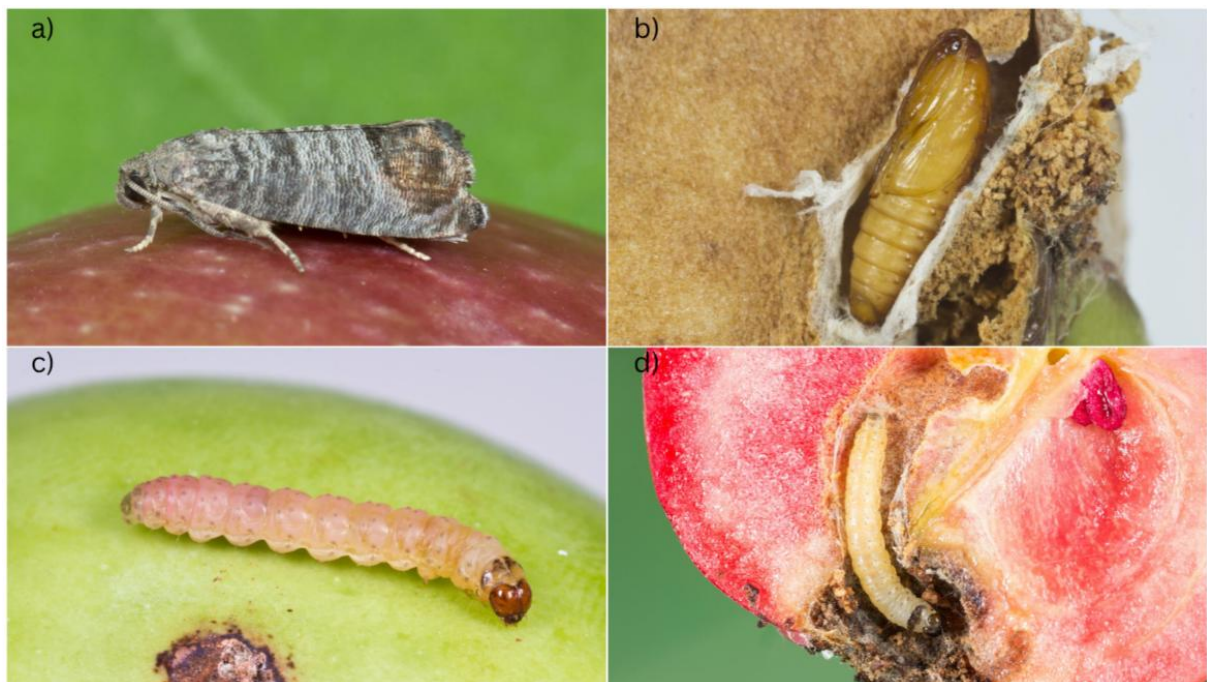


Figure 2 : Le carpocapse de la pomme, *Cydia pomonella* : a) Adulte sur une pomme b) Chrysalide dans une pomme c) Larve à côté d'un trou creusé dans une pomme d) Larve dans une pommette (MAPAQ 2000)

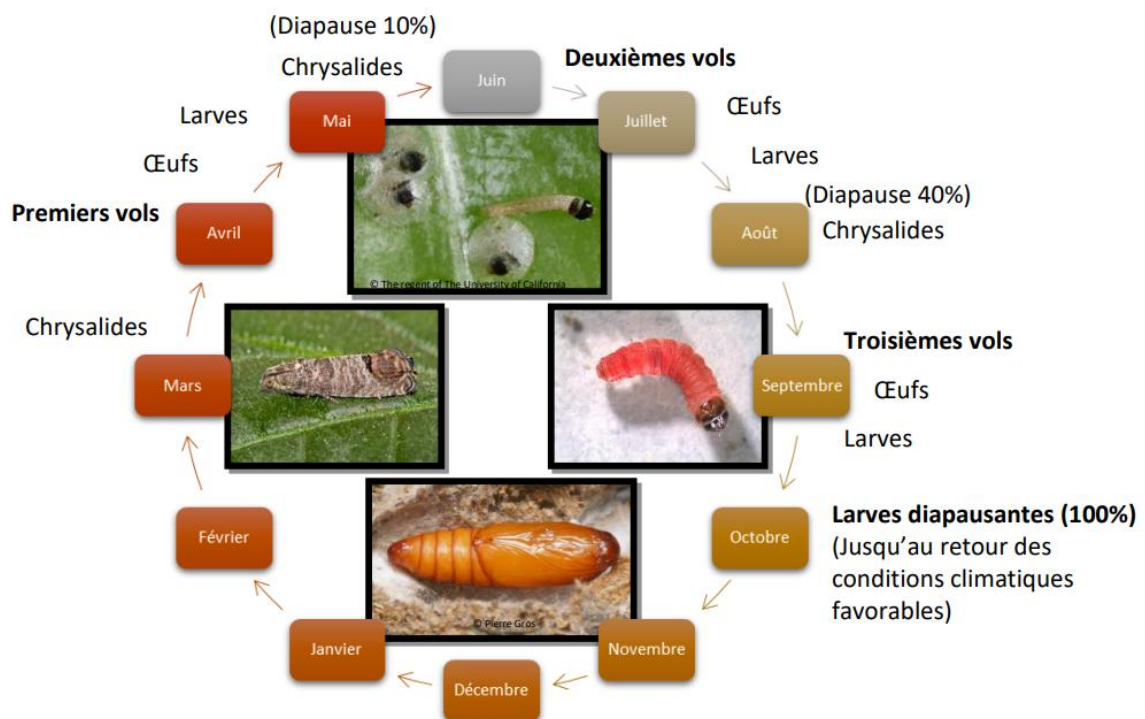


Figure 3 : Cycle biologique de *Cydia pomonella* dans la région PACA (Perrin 2022)

2. ETAT DE L'ART

2.1. *Cydia pomonella* L., un papillon ravageur des pommiers

2.1.1. Généralités

Le carpocapse des pommes, *Cydia pomonella* (Linnaeus, 1758) est un lépidoptère nocturne de la famille des Tortricidae. Ce ravageur cause des dommages importants notamment dans le sud de la France pouvant entraîner des pertes de rendement allant jusqu'à 80% de la production (Ivana PAJAČ, Ivan PEJIĆ, Božena BARIĆ 2011). *Cydia pomonella* se développe aussi sur d'autres plantes hôtes comme les poiriers, les pêchers, les abricotiers et les noyers (Matar 2013). Les adultes d'une envergure de 15 à 22 mm possèdent des ailes grisâtres avec des motifs distincts leur permettant de se camoufler sur les écorces et les feuilles (Figure 2). Les œufs d'un diamètre de 1mm sont blancs au moment de la ponte, un anneau rouge apparaît ensuite, puis une tête noire est visible avant l'éclosion. Les larves sont blanches à rosâtres avec une tête noire, les chenilles matures peuvent mesurer jusqu'à 19mm de long. Le cocon de *Cydia pomonella* mesure de 8 à 10mm de long et est de couleur brun-jaune à brun foncé (Ephytia 2015 ; Casado 2008)

2.1.2. Biologie de *Cydia pomonella* L.

Le cycle biologique du carpocapse est étroitement lié aux conditions climatiques. (Figure 3)

Cydia pomonella L. passe l'hiver sous forme de larve de dernier stade, en diapause à l'intérieur d'un cocon blanchâtre dissimulé dans les anfractuosités de l'écorce ou au niveau du sol. Au début du printemps, lorsque les températures dépassent 10°C, les larves se nymphosent à l'intérieur du cocon. La durée du développement de la pupe varie de 7 à 30 jours selon les conditions thermiques. Le développement des adultes nécessite une somme de températures journalières (degrés-jours) d'environ 100°J, ce qui permet l'émergence des premiers individus adultes dès la fin avril (Ivana PAJAČ, Ivan PEJIĆ, Božena BARIĆ 2011).

Les vols des adultes sont crépusculaires et ont lieu lorsque les températures restent supérieures à 15°C durant deux jours consécutifs, avec une humidité relative dépassant 60%. Dans les 48 heures suivant leur émergence, les femelles pondent en moyenne de 50 à 80 œufs sur les feuilles de pommier ou directement sur les fruits. Lorsque les fruits sont volumineux et facilement repérables, les femelles privilégient la ponte directement sur ces derniers. Cette stratégie vise à maximiser les chances de survie de leur progéniture en réduisant la distance que les jeunes larves devront parcourir pour pénétrer dans le fruit (Bitar et al. 2014).

L'incubation des œufs dure d'une à trois semaines suivant les températures (Matar 2013). Elle dépend également de la somme des températures journalières supérieures à 10°C, avec un seuil fixé à 90 degrés-jour nécessaire avant l'éclosion (Boivin, Sauphanor 2007).

A l'éclosion, les jeunes larves traversent un stade dit « baladeur » durant lequel elles se déplacent activement à la recherche d'un fruit en réalisant des morsures sur les feuilles et les fruits. Cette période peut durer de douze minutes à vingt-quatre heures en laboratoire (SIEGWART Myriam, entretien personnel, Août 2025). Une fois le fruit localisé, la larve y pénètre en creusant une galerie jusqu'à la zone des pépins, où elle se nourrit. Le développement larvaire dure 20 à 30 jours et comprend cinq stades successifs.

A l'issue de la dernière phase, les larves quittent le fruit pour se nymphoser. C'est le seul moment où les larves émergent de nouveau à l'extérieur du fruit et ceci sans reprise d'alimentation, ce qui fait du stade baladeur la seule phase où la larve peut se contaminer avec du virus de la granulose, qui doit être ingéré pour être efficace. Selon la date et les conditions thermiques, les larves peuvent soit entrer en diapause et n'émerger qu'au printemps suivant, soit achever leur cycle et donner naissance à une autre génération au cours de la même année (Etalon 2010).

Selon les régions, l'insecte effectue deux à trois générations par an : en moyenne deux générations dans le nord de la France contre trois générations dans le sud où le climat est plus chaud et plus propice au développement rapide des insectes (Ephytia 2015a). Des modèles phénologiques fondés sur les données de développement de ce papillon suggèrent même que la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) pourrait voir apparaître une 4^{ème} génération dans les prochaines années sous l'effet du réchauffement climatique (Perrin 2022). Les deux premières générations sont complètes tandis que la 3^{ème}, voir la 4^{ème} sont partielles en raison de l'entrée en diapause de certaines larves. Cette entrée en diapause est déterminée par une interaction complexe entre la photopériode, la température et la qualité de l'alimentation (Boivin et Sauphanor 2007 ; Hmimina et Iraqui 2014).

2.1.3. Dégâts causés par *Cydia pomonella* L.

Les dégâts causés aux fruits sont engendrés par les larves de *Cydia pomonella*. Lors de leur stade dit « baladeur », les larves se déplacent sur le feuillage et les fruits, réalisant des morsures superficielles afin de s'alimenter. Elles creusent ensuite une galerie, le plus souvent au contact de deux fruits, entre un fruit et une feuille ou au niveau de la cavité de l'œil du fruit. Ces galeries s'étendent jusqu'à la cavité carpellaire où les larves vont consommer les pépins.

Les fruits attaqués présentent une maturation accélérée et ont tendance à chuter prématurément. Leur qualité commerciale est nulle. De plus, les dégâts créés par les larves vont favoriser le développement de moisissures (Ephytia 2015b).

Les attaques des carpocapses peuvent entraîner des répercussions importantes sur la production fruitière, notamment avec l'augmentation du nombre de générations par an lié au réchauffement climatique ainsi qu'à l'historique de pression de la parcelle. En absence de protection *Cydia pomonella* L. peut entraîner une baisse de production de 30 à 50% pouvant atteindre 80% lors des années fortement infestées (Ivana PAJAČ, Ivan PEJIĆ, Božena BARIĆ 2011).

2.1.4. Les méthodes de lutttes disponibles contre *Cydia pomonella* L.

Il existe plusieurs méthodes de lutte contre le carpocapse des pommes, dont certaines sont combinées dans le cadre de stratégies de lutte intégrée. Parmi les solutions les plus couramment utilisées, on trouve les insecticides de synthèse, en particulier les pyréthrinoides (cyperméthrine, deltaméthrine, esfenvalérate, lambda-cyhalothrine), mais aussi des molécules issues d'autres familles telles que l'émamectine benzoate, le spinosad (insecticide d'origine naturelle) et le tébufénozide, un régulateur de croissance (Merabet, Sevely 2025).

Cependant, des cas de résistance ont été observés chez *Cydia pomonella* vis-à-vis de plusieurs de ces familles d'insecticides compromettant leur efficacité à long terme (Fontaine et Caddoux 2012 ; Voudouris et al. 2011).

La lutte biologique est une alternative, elle repose sur l'utilisation d'organismes entomopathogènes tel que le virus de la granulose (CpGv), la bactérie *Bacillus thuringiensis* (Bt), des nématodes et le champignon entomopathogène, *Beauveria bassiana* (Perrin 2022). Des parasitoïdes comme *Mastrus Ridens* sont également étudiés pour leur capacité à parasiter les larves de carpocapse.

Une autre méthode de biocontrôle existante est la confusion sexuelle. Elle permet de perturber la reproduction du papillon en saturant l'atmosphère avec des phéromones synthétiques empêchant ainsi les mâles de localiser les femelles pour l'accouplement, ce qui réduit significativement les populations (Charbonneau et al. 2017).

Enfin, la lutte mécanique avec la pose de filets AltCarpo dans les vergers permet d'empêcher la ponte des papillons sur les fruits et de perturber les vols d'accouplement (FREDON Grand Est 2022).

2.2. Le virus de la granulose, un biopesticide utilisé contre *Cydia pomonella* L.

2.2.1. Généralités sur le virus de la granulose

Le virus de la granulose du carpocapse (*Cydia pomonella* Granulosis Virus, CpGV), a été isolé pour la première fois en 1964 au Mexique à partir de larves mortes de *Cydia pomonella* (Tanada, 1964 cité dans Morisset 2010). Ce virus hautement spécifique appartient à la famille des *Baculoviridae* et au genre des *Baculovirus*.

Depuis sa découverte, le CpGV a été multiplié sur des larves de carpocapses et de nombreuses études ont été menées pour évaluer son efficacité comme outil de lutte biologique (Morisset 2010). La commercialisation de produits de biocontrôle à base de CpGV constitue un levier pertinent face à la demande croissante d'alternatives pour remplacer les insecticides de synthèse. Il existe aujourd'hui plusieurs produits à base de CpGV homologués en France (Ephy 2025) : MadexPro (isolat CpGV-V15), Madex Twin (isolat CpGV-V22), Carpovirusine 2000 (isolat CpGV-M) et Carpovirusine Evo2 (isolat CpGV-R5). D'autres formulations sont homologuées aux Etats-Unis et au Canada : Granupom, Cyd-X (souche M), Virosoft CP4 (CpGV-CP4).

Les granulovirus sont constitués de particules virales insérées individuellement dans une capsule protéique appelée corps d'occlusion. Ce virus entomopathogène exerce une action larvicide et agit après avoir été ingérée par la larve. Après ingestion, les granules sont hydrolysés dans l'intestin de la larve, libérant les particules virales qui infectent d'abord l'intestin avant de se propager dans tous les tissus de l'insecte et provoquer la mort de l'hôte en 5 à 10 jours (Provost et al. 2008 ; Hess et Falcon 1987 ; Arthurs et Lacey 2004). Une dose minimale, estimée à une ou deux particules virales suffit à entraîner la mort de la larve.

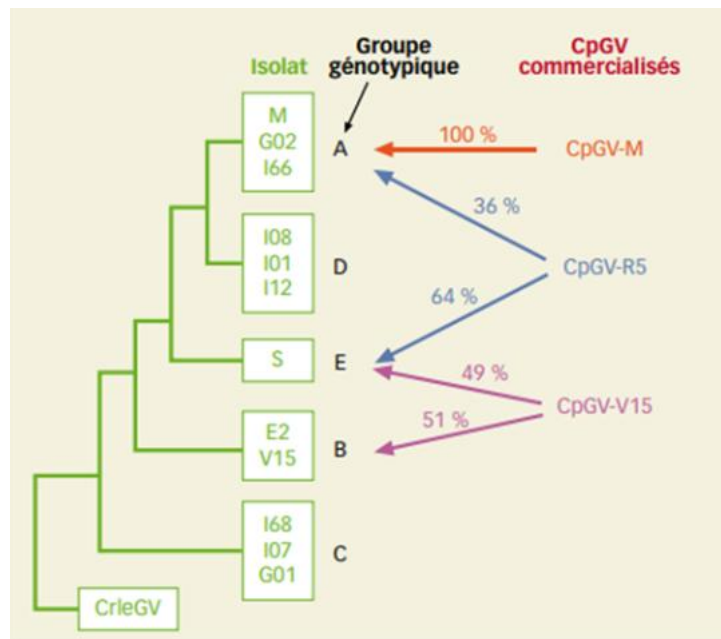


Figure 4 : Classification et composition des CpGV commercialisés en France (Adapté par Andermatt de Gebhardt et al., 2014 et Eberle et al., 2009 cité par Siegwart et al. 2020b)).

Par ailleurs, les excréments des larves infestées ainsi que les larves mortes constituent des foyers d'infection virale pour les autres larves de carpocapses (Provost et al. 2008 ; Tanada et Letjtenegcer 1966).

Cependant, l'usage intensif du CpGV, notamment en agriculture biologique où une seule souche virale (CpGV-M) était initialement utilisée sous le nom commercial Carpovirusine 2000 a conduit à l'émergence de résistance dans le sud de la France (Sauphanor et al. 2006b). Dès 2004, des populations de *Cydia pomonella* résistantes au CpGV-M (groupe génotypique A) ont été identifiées. À la suite de cette découverte, des travaux de recherches ont été menés pour trouver de nouveaux isolats viraux (Figure 4) :

- CpGV-R5 (présent dans Carpovirusine Evo2), mélange des groupes A et E
- CpGV-V15 (présent dans Madex Pro), mélange des groupes B et E
- CpGV-V22 (présent dans Madex Twin), appartenant au groupe A

Toutefois, il a été rapidement constaté que l'isolat CpGV-V22 est très proche génétiquement de la souche CpGV-M, ce qui le rend inefficace contre les populations déjà résistantes à cette dernière. En 2019, à la suite de surveillances menées en France et en Italie, des populations résistantes aux trois isolats viraux actuellement commercialisés ont été trouvées (Siegwart et al. 2020c). Cette situation soulève des questionnements quant à la durabilité à long terme des stratégies reposant sur ces souches de virus. En réponse, des travaux sont en cours pour identifier de nouveaux isolats viraux et des stratégies d'alternance des souches entre les générations successives de ravageurs sont réalisées pour limiter le développement des résistances.

2.2.2. Les limites à l'utilisation du virus de la granulose en verger

Un des principaux enjeux liés à l'utilisation du CpGV est la faible rémanence du virus après l'application sur le terrain. L'activité larvicide semble diminuer à 50% de sa valeur initiale après environ 8 jours au début de l'été et après 4 jours au milieu de l'été (Arthurs, Lacey 2004). Le principal facteur qui limite la durée de vie du CpGV est la radiation ultraviolette (UV), auxquels ils ne sont pas toujours soumis lors d'expériences en laboratoire. Les températures diurnes nettement plus élevées au milieu de l'été (>35 °C) peuvent également en être la cause (Arthurs, Lacey 2004). Les formulations commerciales de CpGV à base de différents adjuvants peuvent être des alternatives afin d'offrir une protection solaire acceptable aux particules virales (Morisset 2010). Cependant, la rémanence limitée du CpGV demeure un problème important nuisant à l'utilisation d'insecticides biologiques à base du granulovirus.

Une autre limite du virus de la granulose est qu'il ne cible efficacement que les larves néonates au stade baladeur, c'est-à-dire juste après l'éclosion et avant leur pénétration dans le fruit. En effet, une fois à l'intérieur du fruit, la larve y reste jusqu'à la fin de son développement, puis quitte le fruit uniquement pour se nymphoser dans l'écorce ou le sol (Pajač Živković, Pejic, Barić 2011). Il est donc essentiel d'avoir une connaissance précise de la période de ce stade (Boivin, Sauphanor 2007). Pour cela, on utilise des pièges à phéromones ainsi que des modèles phénologiques basés sur les degrés-jours.



Figure 5 : Pulvérisateur arboricole, trainé, à jets portés (C. Metayer)



Figure 6 : Pulvérisateur pneumatique (C. Metayer)

Ces outils permettent de prévoir les moments clés du cycle de vie du ravageur et de mieux positionner les différentes méthodes de lutttes possibles (Gabelle 2021).

Un autre défi dans l'utilisation du CpGV réside dans le fait que les larves néonates du carpocapse des pommes doivent ingérer une dose létale du virus avant de pénétrer dans les pommes. La DL_{50} est estimée de 1,37 à 28 corps d'occlusions de CpGV pour les larves au stade baladeur, ce qui est plutôt faible (Fan et al. 2022). Le nombre de morsure effectué par les larves néonates sur les feuilles avant de pénétrer dans le fruit est proportionnel à la durée du stade baladeur (Hinsberger 2020). Or, avec l'augmentation des températures, cette phase de déplacement des larves tend à se raccourcir soulevant ainsi la question de leur capacité à ingérer une quantité létale de virus pour mourir de virose.

Face à ces enjeux de rémanence, de durée du stade baladeur et de quantité minimale de virus à ingérer par les larves avant de pénétrer dans les pommes des solutions peuvent être mises en évidence sur les pratiques de la pulvérisation afin d'augmenter la probabilité de rencontre entre la larve et une particule virale.

2.3. La pulvérisation en verger

2.3.1. Les pulvérisateurs utilisés en verger

Pour réaliser les pulvérisations en verger deux types de pulvérisateurs sont fréquemment utilisés en arboriculture : Le pulvérisateur à pression de liquide et jet porté et le pulvérisateur pneumatique.

Les pulvérisateurs à pression de liquide et jets portés : La pulvérisation est réalisée par la fragmentation sous pression de la bouillie en gouttelettes plus ou moins fines, au travers d'orifices appelés buses avec des volumes compris entre 500 L/ha (volume réduit) et 1000 L/ha (volume normal). Les gouttelettes sont ensuite transportées dans le courant d'air d'un ventilateur qui les porte vers le feuillage des arbres. La veine d'air facilite la bonne pénétration des gouttes dans le feuillage en agitant la végétation (Irstea 2013)(Figure 5).

Les pulvérisateurs pneumatiques : La bouillie de traitement est acheminée à basse pression et à débit constant, jusqu'à des éclateurs situés dans un flux d'air à grande vitesse, où elle sera fragmentée en fines gouttelettes. Ce système conduit à une pulvérisation plus fine qui peut donc être davantage sensible à la dérive avec un volume de 250 L/ha (MATEVI 2024 ; Le Corre 2025). L'obtention de grosses gouttes sur ce type de pulvérisateur est difficile car la fragmentation de la bouillie repose sur un flux d'air. Lorsque le volume de bouillie appliqué à l'hectare est supérieur à 500l/ha, le débit de bouillie nécessaire arrivant aux éclateurs devient supérieur à la capacité de la ventilation à assurer une pulvérisation fine et complète (Figure 6). Les volumes hectare les plus appropriés pour ce type de pulvérisateur se situent entre 250 et 500 l/ha.

Des études sur d'autres méthodes de pulvérisations sont en cours. Le projet PulvéFix a notamment pour objectif de remplacer le tracteur et le pulvérisateur par un système de pulvérisation fixé sur la canopée en utilisant un réseau de micro-asperseurs pour appliquer les produits de protection des plantes (Verpont 2023).

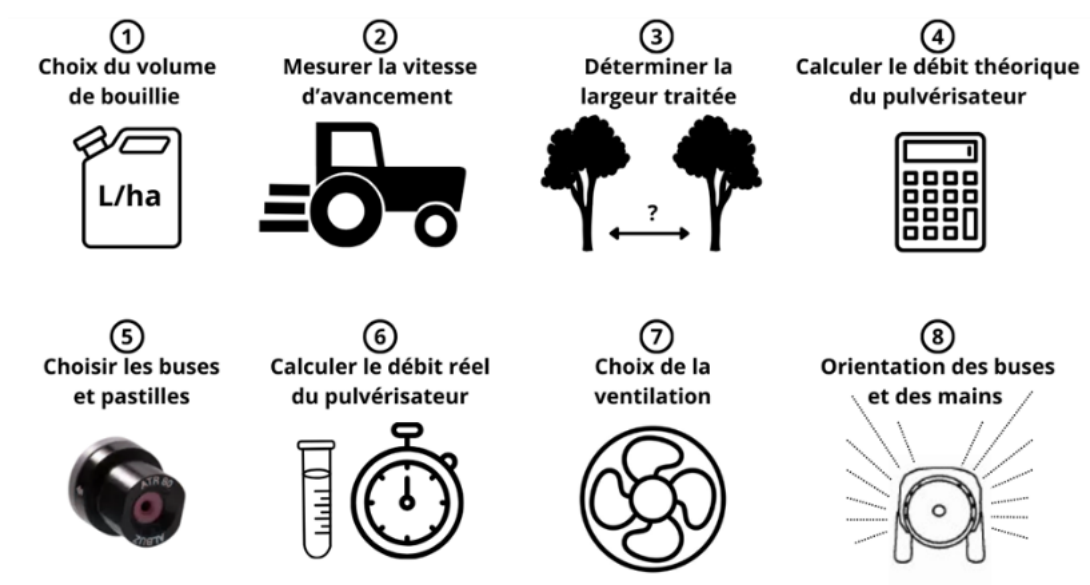


Figure 7 : Le réglage d'un pulvérisateur (C. Metayer)

Pression (bar)	BLANC	LILAS	MARRON	JAUNE	ORANGE	ROUGE	GRIS	VERT	NOIR	BLEU	VIOLET
5	0,27	0,36	0,48	0,73	0,99	1,38	1,50	1,78	2,00	2,45	3,05
6	0,29	0,39	0,52	0,80	1,08	1,51	1,63	1,94	2,18	2,67	3,32
7	0,32	0,42	0,56	0,86	1,17	1,62	1,76	2,09	2,35	2,87	3,57
8	0,34	0,45	0,60	0,92	1,24	1,73	1,87	2,22	2,50	3,06	3,81
9	0,36	0,48	0,64	0,97	1,32	1,83	1,98	2,35	2,64	3,24	4,03
10	0,38	0,50	0,67	1,03	1,39	1,92	2,08	2,47	2,78	3,40	4,23
11	0,39	0,52	0,70	1,07	1,45	2,01	2,17	2,58	2,90	3,56	4,43
12	0,41	0,55	0,73	1,12	1,51	2,09	2,26	2,69	3,03	3,71	4,61
13	0,43	0,57	0,76	1,17	1,57	2,17	2,35	2,79	3,14	3,85	4,79
14	0,44	0,59	0,79	1,21	1,63	2,25	2,43	2,89	3,26	3,99	4,96
15	0,46	0,61	0,81	1,25	1,69	2,33	2,51	2,99	3,36	4,12	5,12
16	0,47	0,63	0,84	1,29	1,74	2,40	2,59	3,08	3,47	4,25	5,28
17	0,48	0,64	0,86	1,33	1,79	2,47	2,67	3,17	3,57	4,37	5,43
18	0,50	0,66	0,89	1,37	1,84	2,54	2,74	3,25	3,67	4,49	5,58
19	0,51	0,68	0,91	1,40	1,89	2,60	2,81	3,34	3,76	4,61	5,73
20	0,52	0,70	0,93	1,44	1,94	2,67	2,88	3,42	3,85	4,72	5,87
21	0,54	0,71	0,95	1,48	1,99	2,73	2,95	3,50	3,94	4,84	6,00
22	0,55	0,73	0,98	1,51	2,03	2,79	3,01	3,57	4,03	4,94	6,14
23	0,56	0,74	1,00	1,54	2,07	2,85	3,07	3,65	4,12	5,05	6,27
24	0,57	0,76	1,02	1,58	2,12	2,91	3,14	3,72	4,20	5,15	6,4
25	0,58	0,77	1,04	1,61	2,16	2,97	3,20	3,80	4,28	5,25	6,52

Figure 8 : Tableau de débits (l/min) pour les buses à turbulence ATR 80° de chez ALBUZ

2.3.2. Réglages mécaniques influençant la pulvérisation

L'application efficace des produits phytosanitaires avec un pulvérisateur nécessite de maîtriser plusieurs réglages : volume de bouillie, vitesse d'avancement, largeur et hauteur traitées, choix des buses, pression, débit réel et ventilation (Figure 7).

Le volume de bouillie à l'hectare : Le volume normal utilisé pour le dosage des produits phytosanitaires est de 1000 L/ha. En pratique, le volume de traitement varie entre 250 et 1500 L /ha selon le stade végétatif du verger, le traitement et le type de pulvérisateur utilisé (Verpont 2021).

La vitesse d'avancement : La vitesse d'avancement varie généralement de 5.5 à 7 km/h pour les arbres fruitiers selon le type de pulvérisation souhaité (Quinio et al. 2014). Pour mesurer la vitesse d'avancement du tandem tracteur/pulvérisateur, il est nécessaire de baliser une distance et de chronométrer le temps nécessaire au tandem pour la parcourir.

$$Vitesse\ d'avancement(km/h) = \frac{Distance\ (m)}{Temps\ de\ déplacement\ (s)}$$

La largeur traitée : Elle varie en fonction de la densité de plantation des parcelles. En arboriculture le nombre de rangs traité par passage est généralement de 1 en haute saison.

$$Largeur\ traitée = Nombre\ de\ rangs * Ecartement\ entre\ rangs\ (m)$$

Le débit théorique total du pulvérisateur : Une fois le volume/hectare choisi, la vitesse d'avancement et la largeur de traitement, le débit théorique total du pulvérisateur est calculé :

$$Débit\ théorique\ total\ (L/min) = \frac{Vitesse\ d'avancement\ \left(\frac{km}{h}\right) * Largeur\ de\ plantation\ (m) * Volume\ de\ bouillie\left(\frac{L}{ha}\right)}{600}$$

Le choix des buses/pastilles : Le choix des buses est un des éléments clés pour l'application de produits phytosanitaires avec des appareils autres que pneumatiques (non équipés de buses).

En arboriculture, les buses traditionnellement utilisées sont les buses à turbulence qui génèrent un jet conique. On distingue différentes technologies de buses : les buses classiques et les buses à injection d'air. Le mécanisme des buses à injection d'air permet d'obtenir des gouttes de tailles plus importantes que lors de l'utilisation de buses classiques. Avec ces buses la pulvérisation est donc moins sensible à la dérive (Auvergne et al. 2017).

Le choix de la buse est fait en fonction du calibre qui est lié à la taille de l'orifice. A savoir que les gouttes seront d'autant plus fines si la buse possède un petit calibre et que la pression est importante (Figure 8).

Concernant la pression d'utilisation des buses, il est inutile qu'elle soit trop élevée car cela va créer des gouttes trop petites qui sont plus sensibles à la dérive. Cependant une pression trop faible engendrera de grosses gouttes qui auront du mal à aller jusqu'à la cime des arbres et à pénétrer dans le feuillage. Il faut donc trouver un bon compromis (Auvergne et al. 2017).

Pour les pulvérisateurs pneumatiques, des pastilles et non des buses sont utilisées. Les pastilles caractérisées par un calibre en $1/10^{\text{ème}}$ de mm vont permettre de fragmenter la veine liquide de la bouillie. Pour créer un jet à la sortie de la pastille, il faut un minimum de pression à 3 bars (MATEVI 2024).

Le débit réel du pulvérisateur : Il est important de vérifier que le débit des buses calculé théoriquement corresponde au débit réel du pulvérisateur au début de la saison et à chaque changement de buses.

La ventilation : Les pulvérisateurs à jet porté utilisés en pomiculture sont munis de ventilateurs de type « axial » qui permettent de faciliter l'atteinte de la cime des arbres.

L'orientation des buses et des mains sur les pulvérisateurs à jet portés et pneumatiques : Permet de diriger correctement la pulvérisation vers la cible végétale.

2.3.3. Conditions environnementales influençant la pulvérisation

Pour garantir une efficacité de la pulvérisation en verger pour tout type de traitement et notamment les biopesticides de contacts, les conditions météorologiques (température, humidité relative, vent) sont à prendre en compte ainsi que le stade végétatif de la culture car les gouttelettes vont être plus ou moins soumises aux phénomènes d'évaporation, de dérive et de ruissellement :

L'humidité relative aussi appelée hygrométrie correspond à la quantité de vapeur d'eau contenue dans un volume d'air donné par rapport au maximum qu'il pourrait contenir à une température et une pression donnée (Bergeron, Naud 1995). L'hygrométrie va influencer le taux d'évaporation lors d'une pulvérisation. Une humidité très élevée (>90%) peut supprimer l'évaporation et l'absorption des gouttelettes et engendrer une dérive. Une humidité faible (<45%) entraîne une évaporation rapide des gouttelettes entraînant une dérive de la pulvérisation (Ash 2023). Lors de la pulvérisation il est donc conseillé d'avoir une hygrométrie comprise entre 60 et 80% (Syngenta France 2023). Ces taux d'hygrométrie sont considérés comme optimaux afin de limiter la volatilisation des gouttelettes et d'améliorer l'hydratation de la surface des feuilles.

La température d'application recommandée est le plus souvent comprise entre 5°C et 20°C (Blondeau, Colin 2017) et il est déconseillé de traiter lorsque les températures sont supérieures à 25°C (Arvalis 2014). Une forte chaleur va augmenter la vitesse de dessiccation des gouttes et seule une partie du produit pulvérisé atteint la plante avant de s'évaporer (Syngenta France 2023).

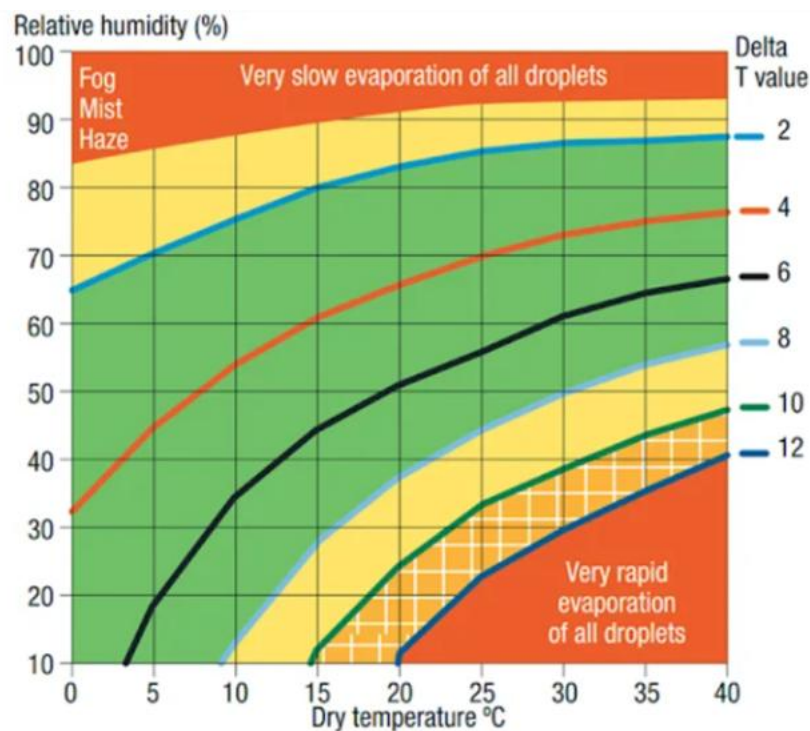


Figure 9 : Delta T, relation entre la température et l'humidité relative (METOS 2025)

Tableau 1 : Nombre d'impacts par cm^2 en fonction du type d'insecticide (Blondeau, Colin 2017)

INSECTICIDE	Systématique	20-30 impacts/ cm^2
	Contact	30-40 impacts/ cm^2
	Ingestion	30-40 impacts/ cm^2

En mettant en relation la température de l'air et l'humidité relative nous obtenons des plages où les conditions sont idéales pour réaliser la pulvérisation. Cette relation est illustrée par Delta T, un indicateur donnant le taux d'évaporation et la capacité de survie des gouttelettes (METOS 2025) (Figure 9).

Le **vent** peut varier en termes de vitesse et de direction sur une même zone géographique et est donc considéré comme un obstacle à la pulvérisation. L'arrêté du 12 septembre 2006 interdit de traiter par un vent supérieur à 3 sur l'échelle de Beaufort (max 19km/h) (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire 2013). Au-delà de ces conditions, la dérive des gouttelettes est trop importante et une partie de la bouillie n'atteint pas la cible. Dans l'idéal, lors de la pulvérisation, le vent ne doit pas dépasser 2 sur l'échelle de Beaufort, c'est-à-dire une légère brise entre 6 et 11 km/h. Il existe aujourd'hui des outils permettant aux producteurs d'observer les conditions de vent en temps réel et au niveau du champ tel que le site meteoblue (meteoblue 2025) qui propose des cartes des vents indiquant la direction géographique générale et la vitesse du vent. Les stations météo spécifiques au site vont aussi permettre d'avoir des données détaillées sur la vitesse, la direction et les rafales de vent à la minute près.

La présence de **pluie** au moment du traitement est déconseillée et il est interdit de traiter lorsque l'intensité des précipitations est supérieure à 8mm/h au moment du traitement (Syngenta France 2023). Pour les produits foliaires, un temps minimum de 2h sans pluie après l'application est recommandé pour éviter un lessivage des produits par la pluie (Blondeau, Colin 2017).

La **rosée** peut favoriser l'efficacité des produits car elle permet de redistribuer la bouillie sur les feuilles. Il faut cependant être vigilant afin qu'elle n'entraîne pas un ruissellement sur le feuillage (METOS 2025).

2.4. Le diagnostic de la qualité de pulvérisation en verger

2.4.1. Les différents indicateurs

La pulvérisation est une des opérations essentielles dans la protection des cultures. Cependant, l'efficacité d'un traitement ne repose pas uniquement sur l'application d'un produit phytosanitaire mais dépend de la qualité et de la quantité de la pulvérisation (Thomazo 2013). Pour évaluer ces deux critères, plusieurs indicateurs peuvent être utilisés.

La pulvérisation peut être approchée par le **nombre d'impact par cm² de feuilles**. Il existe des données indiquant le nombre d'impacts nécessaire selon le type de produit car tous n'ont pas les mêmes exigences. Il est ainsi important d'adapter la pulvérisation de l'insecticide en fonction du mode d'action du produit : systémique, contact ou par ingestion (Tableau 1). Le virus de la granulose est un produit qui agit par ingestion. Ce dernier n'est pas mobile dans la plante. De ce fait, pour un traitement efficace, la couverture de la cible doit être optimale (Yème, Beets 2007).

Un autre indicateur complémentaire au nombre d'impacts par cm² est le **taux de couverture** du produit qui permet de visualiser les zones atteintes et par conséquent, d'évaluer la qualité de la pulvérisation.

Tableau 2 : Risque de dérive et fixation des gouttes en fonction de la dimension des gouttelettes (Luca 2007)

Taille	Dimension	Fixation sur les feuilles	Risque de dérive
Très fines	< 90 μm	Bonne	Très élevé
Fines	90 à 200 μm	Bonne	Elevé
Moyennes	200 à 300 μm	Bonne	Moyen
Grosses	300 à 450 μm	Moyenne avec risque de ruissellement	Faible
Très grosses	> 450 μm	Risque de ruissellement	Très faible

Cet indicateur est particulièrement utile pour le réglage du pulvérisateur, en ajustant des paramètres tels que la pression, le type et l'orientation des buses, la vitesse d'avancement, le volume appliqué à l'hectare ou encore la ventilation. Cependant, aucune recommandation standardisée n'existe à ce jour quant au taux de couverture minimal requis pour garantir l'efficacité d'un produit donné.

Au-delà du nombre d'impacts et du taux de couverture, la **taille des gouttes** joue un rôle déterminant sur le transport, le dépôt, la répartition et l'efficacité des pulvérisations. Des gouttes de petites tailles avec un diamètre inférieur à 150 μm auront l'avantage de rentrer facilement dans la frondaison mais vont être soumises à l'évaporation ainsi qu'à une dérive importante par le vent. A l'inverse, des gouttes trop grosses avec un diamètre supérieur à 300 μm risquent de ruisseler sur la végétation ou d'être trop lourdes pour être emportées jusqu'à la cime des arbres pouvant aller de 2m de hauteur pour les vergers piétons jusqu'à 4m de haut. La taille optimale des gouttes se situe entre 250 et 300 μm (Blondeau, Colin 2017). Lors de l'application de la bouillie, la difficulté consiste ainsi à trouver un compromis entre une pulvérisation de gouttes relativement fines permettant une couverture plus importante des surfaces traitées mais largement soumises à la dérive et des pulvérisations de gouttes plus grosses conduisant à une répartition moins importante, à un éventuel ruissellement mais induisant une dérive moindre (Luca 2007)(Tableau 2).

La quantité est le volume de bouillie pulvérisé par hectare. Cette quantité se traduit par un certain mouillage de la surface foliaire que l'on peut exprimer en litres par mètre carré de feuilles (l/m^2). A partir de cette valeur, il est possible d'estimer la quantité de dépôt de bouillie par unité de surface foliaire, ce qui nous donne la **dose effective** de dépôt. Cette notion est aujourd'hui rarement décrite et utilisée mais elle est mesurable (Verges 2024). Associée au taux de couverture, elle permet d'évaluer plus précisément si la pulvérisation est suffisante et homogène.

Pour réaliser une évaluation complète de la pulvérisation, les indicateurs suivants ont été mobilisés dans les expérimentations présentées dans ce rapport : le taux de couverture, la taille des gouttes ainsi que la dose effective de dépôt.

2.4.2. Evaluation de la qualité de la pulvérisation

Un dispositif de contrôle des pulvérisateurs obligatoire existe depuis le 1^{er} janvier 2009. Depuis le 1^{er} janvier 2021, ce contrôle technique doit être réalisé tous les trois ans par un organisme d'inspection agréé (DRAAF Grand Est 2023). Il porte sur l'état général et le bon fonctionnement de l'appareil : propreté, absence de fuites, performances de la pompe, symétrie du flux d'air, usure des buses ou pastilles, régularité des débits et précision des manomètres (Cavalier 2013). Cependant, ce contrôle ne prend pas en compte la qualité réelle de la pulvérisation. Il est donc essentiel que les producteurs disposent d'outils pour évaluer la qualité de leur pulvérisation. Plusieurs méthodes existent, chacune présentant ses avantages et ses limites.



Figure 9 : Banc de contrôle de pulvérisation (AgriExpo 2025)



Figure 10 : le verger artificiel développé par le CTIFL (Verpont 2024)

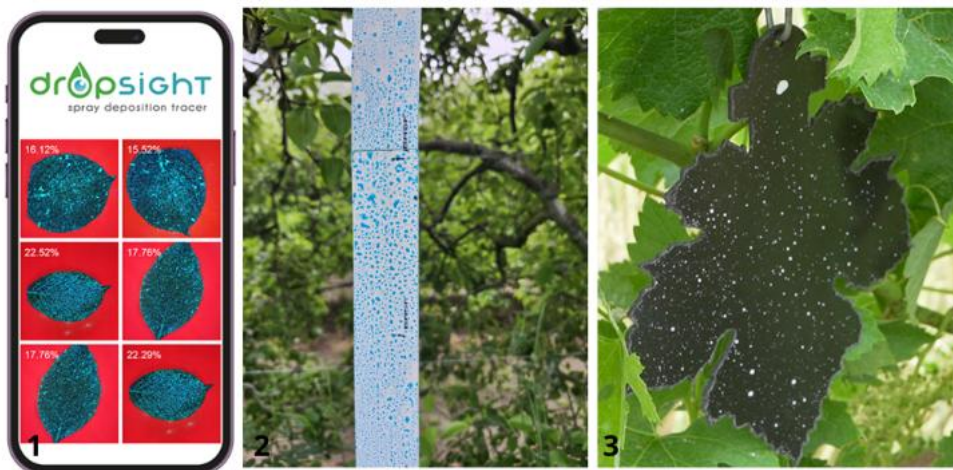


Figure 11 : 1. DropSight de Metos (METOS 2024) ; 2. Kit Evidence de BASF (BASF 2022) ; 3. Drop'In de Syngenta (Syngenta 2020)

Le **banc de contrôle de pulvérisation** vertical est utilisé pour le calibrage des pulvérisateurs. Ce dispositif permet de recueillir le liquide pulvérisé à l'aide de disques qui dirigent la bouillie vers des verres de mesures. Il est ainsi possible de mesurer la quantité de produit appliqué à différentes hauteurs (AgriExpo 2025). Ces bancs sont utilisés par les fabricants de pulvérisateurs, les centres de certifications et les centres d'expérimentations techniques pour garantir la conformité des équipements (Hudebine, Verpont 2021). Néanmoins, les limites sont qu'ils n'évaluent pas directement la qualité de la pulvérisation, notamment des critères tels que le taux de couverture ou la taille des gouttes. Le coût de ces systèmes est aussi très important, allant de 9000 € jusqu'à 60000 € selon les modèles (AgriExpo 2025) (Figure 9).

Un autre outil d'évaluation est le **verger artificiel** développé par le CTIFL. Il se compose de trois rangs de dix mètres : deux rangs de bordure et un rang central. Les rangs sont modulables en hauteur et en largeur afin de simuler différents stades de développement végétatif. Un dispositif de collecte des dépôts est placé au centre du rang principal. Il permet d'analyser la quantité de bouillie déposée et sa répartition dans les différents compartiments du verger artificiel (bas, haut, milieu, intérieur, extérieur). Cet outil est accessible aux centres techniques de recherches et aux équipementiers et fournisseurs souhaitant tester les performances de leurs pulvérisateurs (Verpont 2024)(Figure 10).

D'autres méthodes consistent à utiliser des supports artificiels ou la surface du végétal pour évaluer la qualité de la pulvérisation (Figure 11 et 12) :

L'entreprise Metos a développé un outil combinant un traceur fluorescent à incorporer dans la bouillie. Une fois pulvérisée en verger, les feuilles sont récoltées puis placées dans une boîte où elles sont photographiées. Une application dédiée, **Dropsight**, permet ensuite d'analyser plusieurs paramètres : taux de couverture, densité d'impact, volume de bouillie pulvérisée, taille des impacts de gouttes (METOS 2024).

BASF propose le **kit Evidence** comprenant une perche et un colorant bleu à ajouter à la cuve du pulvérisateur. Après la pulvérisation les impacts sont visibles directement sur la perche, permettant une évaluation visuelle de la pulvérisation (BASF 2022).

Syngenta propose **Drop'in** qui comprend des supports en polyéthylène noir, d'une forme simulant les feuilles d'arbres. Ceux-ci sont disposés dans le verger avant de réaliser une pulvérisation avec un mélange d'eau et d'argile blanche, visible sur le support noir. Un technicien attribue ensuite des notes pour évaluer la qualité de la pulvérisation (Syngenta 2020).

Enfin, une méthode couramment utilisée est celle des **papiers hydro sensibles**. Elle a été retenue pour réaliser les tests de pulvérisations présentés dans ce mémoire. Les papiers hydro sensibles sont des collecteurs artificiels qui passent du jaune au bleu au contact de l'eau. Bien qu'ils puissent sous-estimer la répartition et l'étalement de la bouillie sur des surfaces végétales, ils restent un indicateur comparatif efficace (Jason Deveau 2021a). En effet, cet outil peu onéreux permet un grand nombre de répétitions et peut-être utilisé par l'ensemble des producteurs et leur conseiller. En pratique, les papiers sont disposés à différentes hauteurs dans la canopée avant la pulvérisation.

Exploitation :		Tracteur :	
Date + heure :		Pulvérisateur :	
T° :		Volume/ha :	
Hygrométrie :		Vitesse/régime moteur :	
Ecartement des rangs :		Pression de travail :	

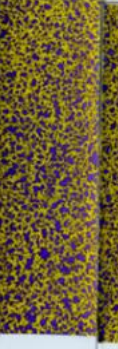
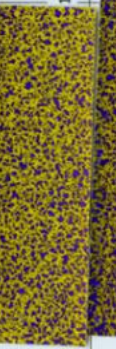
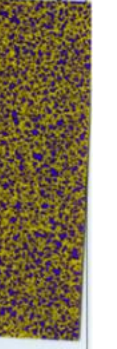
								
1.5	4	3	3	5	6	6	1	5

Figure 12 : Utilisation de papiers hydro sensibles pour le réglage d'un pulvérisateur (C. Metayer)

L'évaluation est ensuite généralement effectuée visuellement, mais il peut s'avérer difficile de différencier précisément un taux de couverture de 30 % d'un taux de 50 %, en particulier lorsque des observateurs différents interviennent. Afin de limiter ces biais d'interprétation, des logiciels ou applications mobiles peuvent permettre de réaliser une analyse précise et reproductible (CAVB 2006).

2.4.3. L'analyse des papiers hydro sensibles

Il est nécessaire de réaliser des prises de vues des papiers hydro sensibles avant de pouvoir les analyser. Pour garantir la fiabilité des comparaisons entre les papiers, plusieurs paramètres doivent être contrôlés afin de standardiser les conditions de capture d'images.

Tout d'abord, la résolution de l'image doit être identique. Une résolution minimale de 600 ppp est recommandée pour assurer une analyse précise, car les impacts des gouttelettes peuvent avoir un diamètre aussi réduit que 50 μm (Brandoli et al. 2020). Aussi, l'éclairage doit être homogène et constant sur l'ensemble du papier hydro sensible afin d'éviter les reflets ou zones d'ombres susceptibles de fausser les résultats de l'analyse. De plus, la prise de vue doit être parallèle au papier hydro sensible, cela permet d'éviter toute distorsion de l'image et garantit une échelle cohérente sur l'ensemble de la surface capturée. La distance de capture doit aussi être constante pour maintenir une échelle identique permettant de comparer plus facilement les images. Pour répondre à l'ensemble de ces exigences, la capture des images peut être réalisée à l'aide d'un scanner, d'un appareil photo ou d'un smartphone, à condition que ce dernier soit utilisé avec un support stable permettant de respecter les critères mentionnés précédemment.

Aussi, pour pouvoir réaliser une analyse des papiers hydro sensibles, comprenant la taille des impacts et la densité, il est nécessaire que le taux de couverture soit inférieur à 20%. Au-delà de ce pourcentage, les impacts de gouttes sont susceptibles de se chevaucher, ce qui rend difficile l'évaluation précise du système d'analyse du papier (Deveau 2021b ; Wu et al. 2025).

Lorsque les images des papiers hydro sensibles sont capturées en respectant les recommandations, l'analyse va pouvoir être effectuée à l'aide de divers outils. Sur ordinateur, des logiciels tels que ImageJ (ImageJ 2025), DepositScan (USDA 2016) ou Ilastik (Ilastik 2025) permettent une analyse fine des impacts. Du côté des applications mobiles, plusieurs solutions existent comme DropLeaf (Brandoli et al. 2020), SmartSpray (Nansen et al. 2021), DropScope (SprayX 2025) ou DropSight (METOS 2024) Aussi, certaines entreprises comme BASF et Syngenta proposent des prestations pour évaluer visuellement la pulvérisation avec d'autres supports que les papiers hydro sensibles.

3. OBJECTIFS DE L'ETUDE ET QUESTIONS DE RECHERCHE

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un stage de fin d'étude financé par le Groupement d'intérêt Scientifique Fruit (GIS Fruit) et réalisé en partenariat avec le GRCETA de Basse Durance, l'INRAE d'Avignon et la station d'expérimentation La Pugère. Il fait suite aux recherches menées par DELPECH, 2024 sur l'amélioration de la lutte biologique par biopesticides contre *Cydia pomonella* L. principal ravageur du pommier. Ces travaux ont mis en évidence que la qualité de la pulvérisation qui se caractérise par la taille des gouttelettes et le taux de couverture sur les feuilles (Zhu, Salyani, Fox 2011) est un facteur déterminant pour garantir l'efficacité du virus de la granulose. A ce jour, excepté les travaux réalisés par (Delpech 2024), il n'existe aucune norme de qualité de la pulvérisation pour un insecte ou une maladie spécifique (Zhu, Salyani, Fox 2011). Ces travaux réalisés pour *Cydia pomonella* et le virus de la granulose pourront par la suite être étendus à d'autres ravageurs des cultures et produits de lutte.

L'enjeu central peut se résumer par la problématique suivante :

Comment optimiser les méthodes de pulvérisation du CpGv pour un contrôle efficace de
Cydia pomonella L. en verger de pommiers ?

Pour y répondre, trois grands axes ont été définis, chacun structuré autour de questions de recherche précises :

Le **PREMIER OBJECTIF** est de déterminer la répartition optimale du virus de la granulose sur les feuilles de pommiers pour assurer son efficacité contre *Cydia pomonella*. Les biotests dit "hybrides" menés par (Delpech 2024) ont permis d'identifier un taux de couverture du virus de la granulose situé autour de 59% pour garantir une mortalité 84,4% de *Cydia pomonella*. Ces tests seront reproduits et approfondis en testant différents niveaux et types de couvertures (taux de couverture, taille des impacts, quantité) en conditions contrôlées afin d'affiner et de confirmer les résultats.

Questions de recherche :

- Peut-on valider l'existence d'un taux de couverture du CpGV et une efficacité associée contre *Cydia pomonella*, en fonction des modalités de pulvérisation (taux de couverture, taille des impacts, dose effective) ?
- La taille des impacts ainsi que leur répartition sur les feuilles ont-elles un impact sur l'efficacité du biopesticide ?

Hypothèse 1.1 : Le taux de couverture minimum de 59% trouvé par (Delpech 2024) garantit une efficacité de 84,4 % de mortalité avec du virus de la granulose contre *Cydia pomonella*.

Hypothèse 1.2 : Le taux de couverture nécessaire à l'efficacité du CpGV contre *Cydia pomonella* est influencé par la taille des gouttes car celles-ci conditionnent la répartition du virus sur la surface foliaire, ainsi que la probabilité d'ingestion par les larves.

Le **SECOND OBJECTIF** arrive une fois le seuil d'efficacité du produit établi en laboratoire. Il va consister à identifier les paramètres environnementaux (température, hygrométrie) qui influencent la qualité de la pulvérisation afin d'atteindre une couverture optimale dans les vergers pour le virus de la granulose.

Question de recherche :

- Quel est l'impact des conditions climatiques (température et hygrométrie) sur la qualité de la pulvérisation ?

Hypothèse 2.1 : Des températures élevées et une faible hygrométrie augmentent l'évaporation des gouttelettes et ainsi réduisent la couverture du végétal, particulièrement dans la partie haute du feuillage.

Le **TROISIEME OBJECTIF** est de développer un protocole de diagnostic de la pulvérisation fiable et accessible à destination des producteurs. La mise à disposition pour les producteurs d'outils pratiques leur permettra d'évaluer leur qualité de pulvérisation de manière rapide directement dans les vergers sans avoir besoin d'équipements de laboratoire.

Question de recherche :

- Comment permettre aux producteurs de contrôler efficacement la qualité de leur pulvérisation ?

Hypothèse 3 : Utilisation de perches portant des papiers hydro sensibles et d'une application téléphone afin de contrôler et analyser les papiers hydro sensibles.

Tableau 3 : Informations relatives aux feuilles prélevées pour la réalisation des tests (C. Metayer)

Nom de la parcelle	P16
Localisation	Station d'expérimentation La Pugère, Mallemort (13)
Variété	Granny Smith
Caractéristique de la variété	Floraison précoce, forte vigueur, très bonne productivité, sensible à la tavelure (DALIVAL, s. d.)
Année de plantation	2000
Distance de plantation	4 m x 1,25 m
Irrigation	Micro-asperion sous frondaison
Traitements	Aucun traitement anti-carpocapse

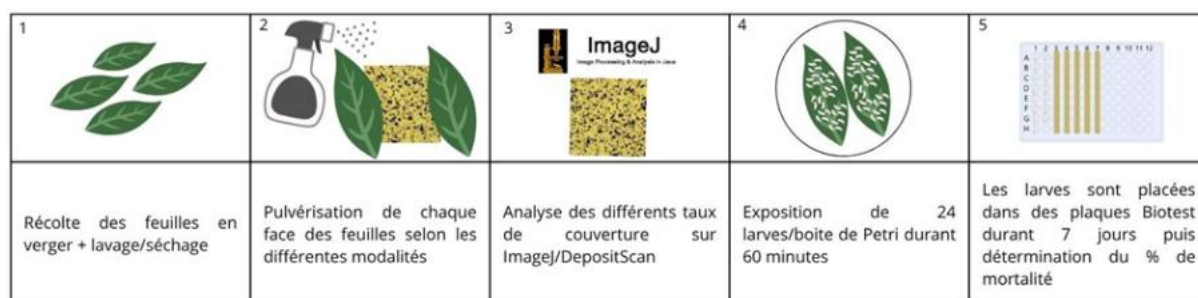


Figure 13 : Schéma récapitulatif de la réalisation d'un test hybride (C. Metayer)

4. MATERIEL ET METHODES

4.1. Matériel biologique

Souche de *Cydia pomonella* sensible au CpGV

Les larves utilisées durant les tests hybrides sont issues d'une souche de *Cydia pomonella* sensible à tous les isolats viraux commercialisés CpGV-M. Elle s'appelle Sv et est maintenue depuis 1995 au laboratoire de l'unité PSH de l'INRAE d'Avignon sans pression de sélection. Elles ont été obtenues à partir d'une population sauvage sensible prélevée dans un verger abandonné aux Vignières (13).

Support végétal

Les feuilles utilisées au cours des tests ont été prélevées sur des pommiers de la variété Granny Smith dans la station expérimentale de La Pugère située dans la commune de Mallemort (13). Elles proviennent d'un rang témoin non traité avec des insecticides contre *Cydia pomonella* afin d'éviter toute contamination susceptible de fausser les résultats des tests. (Tableau 3)

Virus de la granulose

Les produits de biocontrôle utilisés pour les tests sont la Carpovirusine Evo2 qui a été fournie par la société UPL (UPL 2025) ainsi que le MADEX PRO fourni par la société Andermatt France (Andermatt France 2025).

4.2. Les dispositifs expérimentaux et modalités

4.2.1. Détermination du seuil d'efficacité du virus de la granulose contre *Cydia pomonella* L.

Variables d'études et modalités

Au cours de cet essai, la variable à expliquer est la mortalité des larves de *Cydia pomonella* (Y). Les variables explicatives sont :

- X_1 le taux de couverture : de 0% à plus de 90%
- X_2 la taille des impacts : petit (350 μ m) – moyen (500 μ m) – gros (1000 μ m)
- X_3 le produit de biocontrôle : Carpovirusine EVO 2 – Madex Pro
- X_4 la dose effective de produit pulvérisé : de 0 μ L à 250 μ L

Gestion de l'essai

Le test hybride consiste à déposer des larves de *Cydia pomonella* sur des feuilles de pommiers préalablement traitées pendant une durée définie (mimant le stade baladeur), puis à placer ces larves sur un milieu artificiel indemne de virus durant 7 jours dans des conditions contrôlées en laboratoire avant d'évaluer leur mortalité (Figure 13).

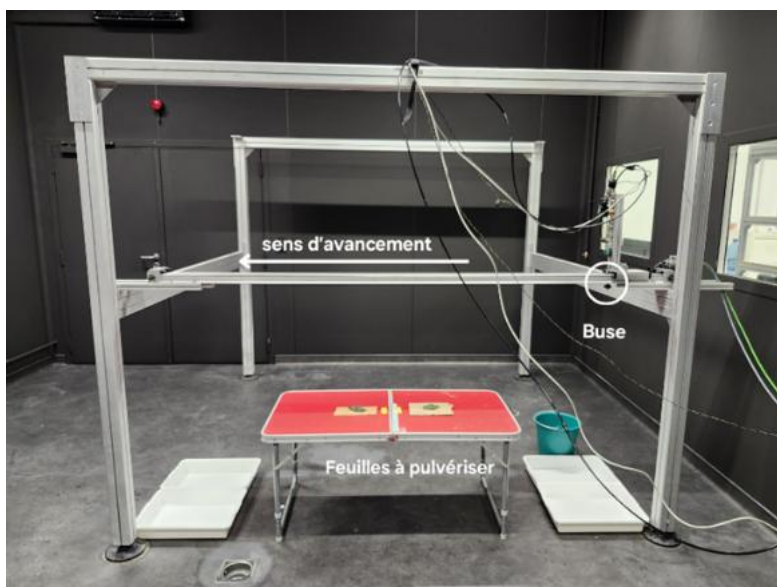


Figure 14 : Rampe de pulvérisation de l'INRAe de Montpellier (C. Metayer)

Tableau 4 : Réglages de la rampe de pulvérisation pour réaliser les différentes modalités (C. Metayer)

Moda de pulvé 04/06					
MODALITE	Test N°	VITESSE	BUSE	PRESSION	FEUILLES
EVO2 - 20% - Moyen		2,5 km/h	LECHLER AD 90-0067	2,5 bar	6 feuilles/moda lité
EVO2 - 40% - Moyen		1,25 km/h			
EVO2 - 60% - Moyen		0,81 km/h			
EVO2 - 80% - Moyen		0,63 km/h			
EVO2 - 20% - Petit		3,75 km/h	ALBUZ ATR Blanche	5 bar	
EVO2 - 40% - Petit		2,14 km/h			
EVO2 - 60% - Petit		1,61 km/h			
EVO2 - 20% - Gros		1,75 km/h	ALBUZ TVI 80 0050	5 bar	
EVO2 - 40% - Gros		0,88 km/h			
EVO2 - 60% - Gros		0,58 km/h			
Témoïn		-	-	-	

a. Prélèvement du support végétal

Des feuilles de pommier de la variété *Granny* sont utilisées comme support végétal pour nos expérimentations. Les travaux menés par Flavie Delpech en 2024 (Delpech 2024) avaient déjà été réalisés sur cette même variété.

Les feuilles sont prélevées sur la station d'expérimentation de La Pugère, sur des arbres témoins non traités contre le carpocapse (Annexe 1 : parcelle de récolte). Les prélèvements sont effectués le jour même des manipulations afin de garantir un état de fraîcheur optimal et d'avoir un support végétal dans des conditions identiques au cours des deux jours de manipulations. Les feuilles récoltées sont saines, indemnes de maladies et d'attaques. Il s'agit de la cinquième feuille sur une pousse de l'année, prélevée à différents endroits pour éviter d'endommager les arbres.

Après le prélèvement, les feuilles sont immédiatement transportées dans une glacière jusqu'au laboratoire de l'INRAE de Montpellier. Chaque feuille est lavée à l'eau claire afin d'éliminer d'éventuels résidus d'insecticides de contact, qui pourraient avoir un impact sur les résultats de nos manipulations. Puis les feuilles sont séchées à l'air libre avant l'étape suivante.

b. Pulvérisation du support végétal

La pulvérisation a été réalisée au sein de l'INRAE de Montpellier où une rampe de pulvérisation (Figure 14) a été mise à notre disposition afin d'obtenir différents taux de couvertures avec différentes granulométries d'impacts. Les personnes réalisant les manipulations sont équipées d'équipements de protection individuelle (EPI) : gants, vêtements de protection, masque A2P3, lunettes, bottes.

La première étape consiste à préparer la bouillie contenant les produits de biocontrôle à tester. Afin de faciliter les manipulations et d'éviter toute contamination croisée, les produits testés ont été appliqués à des jours différents afin de réaliser une désinfection totale du matériel, des locaux et des manipulateurs entre les deux souches de virus : les essais avec Carpovirusine Evo2 ont été réalisés le premier jour, ceux avec Madex Pro le lendemain. La bouillie est versée dans une cuve et agitée avant chaque pulvérisation pour garantir son homogénéité.

La Carpovirusine Evo2 composée de l'isolat R5 est un bio-insecticide contenant 1.10^{13} corps d'inclusions viraux par litre de virus de la granulose. La dose d'emploi de la Carpovirusine Evo2 pour le traitement des pommiers est de 0,1 L/hL. Pour notre essai, 6mL de Carpovirusine Evo2 ont été dilués dans 6 litres d'eau.

Le Madex Pro contenant l'isolat V15 est un bio-insecticide composé de 3.10^{13} corps viraux par litre du virus de la granulose. La dose d'emploi de MadexPro pour le traitement des pommiers est de 0,1 L/ha. Pour notre essai, 0,8mL de MadexPro a été dilué dans 8L d'eau.



Figure 15 : Positionnement des feuilles et des papiers hydro sensibles lors de la pulvérisation (C. Metayer)



Figure 16 : Salle de séchage des feuilles, rangées par modalité (Sophie Hardy)

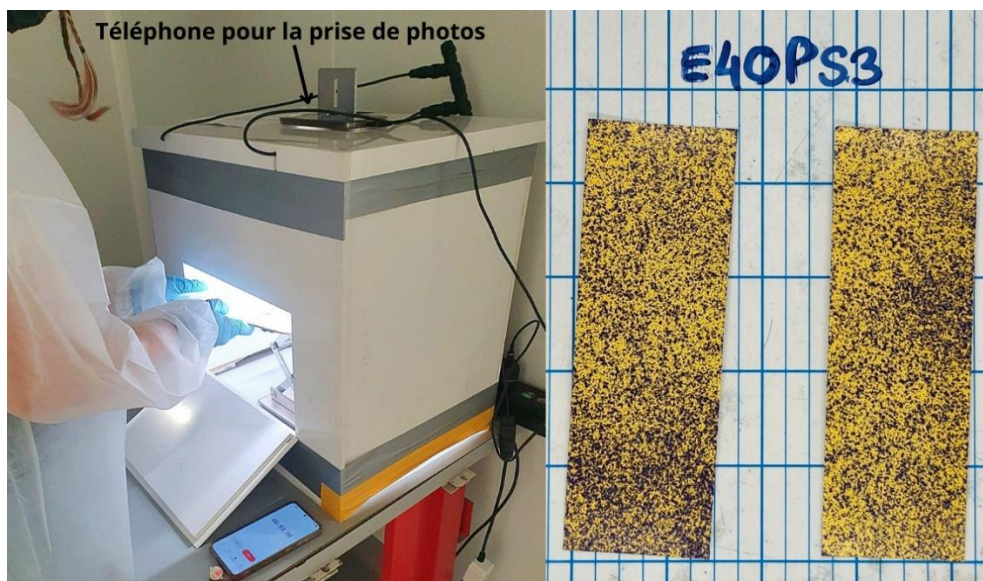


Figure 17 : Boîte à photos et images capturées à l'aide de cet outil (C. Metayer)

La seconde étape consiste à régler la rampe de pulvérisation (Figure 14). Les réglages sont déterminés au préalable de ces essais avec de l'eau en modifiant le type de buse, la pression ainsi que la vitesse d'avancement de la rampe et sont référencés sur un document (Tableau 4). Un test est effectué à chaque changement de buse à l'aide de papiers hydro sensibles pour vérifier le taux de couverture obtenu.

Lors de la troisième étape, les pulvérisations sont effectuées sur les feuilles de pommiers. Pour chaque modalité de traitement, six feuilles sont pulvérisées deux par deux. Elles sont épinglées sur un support en carton placé sous la rampe, accompagnées de deux papiers hydro sensibles servant de témoins pour évaluer la pulvérisation (Figure 15). La première pulvérisation est effectuée sur la face supérieure des feuilles. Après un séchage à l'air libre (Figure 16), celles-ci sont transférées sur un second support en carton afin de réaliser la pulvérisation sur la face inférieure. L'utilisation de cartons facilite l'identification, la manipulation et le transport des feuilles tout en évitant les risques de contaminations lors du changement de face.

La table où est réalisée la pulvérisation est désinfectée à l'aide d'un désinfectant à large spectre, le virkon, entre chaque passage de la rampe afin de limiter les contaminations (Vetoquinol 2025).

c. Analyse des papiers hydro sensibles

Les papiers hydro sensibles sont placés dans une boîte (Figure 17) équipée de LED, à une hauteur standardisée afin d'assurer des conditions d'éclairage et de cadrage similaires pour toutes les modalités. Un délai de 1 minute est chronométré entre la fin de la pulvérisation et la prise de la photo. Il a été défini afin de limiter les variations entre les prises de vue car les gouttes d'eau ont tendance à s'étaler sur le papier hydro sensible avec le temps. Les photos sont prises à l'aide d'un téléphone avec un capteur principal de cinquante mégapixels une fois les 60 secondes écoulées.

Les photos sont ensuite analysées à l'aide du logiciel DepositScan (USDA 2016) qui permet de donner le taux de couverture sur les papiers hydro sensibles de manière fiable et reproductible.

Les données sur les tailles des impacts ont été recueillies en amont (Tableau 5). Comme mentionné dans l'état de l'art, il est possible d'estimer la taille des impacts uniquement lorsque le taux de couverture est inférieur à 20%. Or, durant nos essais, les taux de couverture observés varient entre 10% et 90% rendant cette estimation impossible dans certains cas. Etant donné que la taille des impacts dépend du type de buse utilisé, nous avons réalisé des pulvérisations à un taux de couverture de 10% pour chacune des buses employées. Ces mesures nous ont permis de caractériser la taille des impacts pour chaque buse, et donc d'affilier une taille d'impact à chacune des modalités utilisées dans nos essais (Tableau 4).

Afin de déterminer la dose effective de bouillie déposée pour chaque modalité, une manipulation préalable a été réalisée avec l'aide de l'Institut Français de la Vigne et du Vin (IFV). Cette opération visait à établir la correspondance entre différents taux de couverture et les doses effectives de produit déposées sur les papiers hydro sensibles, en fonction des types de buses utilisées.

Tableau 5 : Taille des impacts selon les types de buses et les produits testés (C. Metayer)

TAILLE DES GOUTTES AVEC TAUX DE COUVERTURE A 10%											
MODALITE	BUSE	PRESSION (bar)	VITESSE (km/h)	DATE	PRODUIT	COUVERTURE (%)	DV1 (µm)	DV5 (µm)	DV9 (µm)	NBR GOUTTES	DENSITE (impact/cm²)
10%MOYENNE	LECHLERAD 90-0067	2,5	3,5	13-mai	eau	8,36	229	415	639	3256	38,9
10%MOYENNE	LECHLERAD 90-0067	2,5	3,5	13-mai	eau	8,18	231	413	647	2869	38
10%MOYENNE	LECHLERAD 90-0067	2,5	3,5	13-mai	eau	11,88	320	558	898	2230	28,2
10%GROSSE	ALBUZ TVI 80-0050	5	2,25	13-mai	eau	14,42	539	1058	1532	1048	13
10%GROSSE	ALBUZ TVI 80-0050	5	2,25	13-mai	eau	10,33	466	932	1438	796	12,4
10%GROSSE	ALBUZ TVI 80-0050	5	2,25	13-mai	eau	10,7	478	954	1322	830	11,8
10%PETITE	ALBUZ ATR 80 Blanche	5	5	13-mai	eau	12,21	218	408	665	5750	64
10%PETITE	ALBUZ ATR 80 Blanche	5	5	13-mai	eau	11,53	214	393	646	5306	65
10%PETITE	ALBUZ ATR 80 Blanche	5	5	13-mai	eau	14	228	414	647	5626	66,7
10%MOYENNE	LECHLERAD 90-0067	2,5	3,5	13-mai	EVO2	10,35	287	515	845	2423	29,6
10%MOYENNE	LECHLERAD 90-0067	2,5	3,5	13-mai	EVO2	8,52	249	445	724	2299	31
10%MOYENNE	LECHLERAD 90-0067	2,5	3,5	13-mai	EVO2	10,35	287	515	845	2423	29,6
10%GROSSE	ALBUZ TVI 80-0050	5	2,25	13-mai	EVO2	9,62	473	981	1444	760	10
10%GROSSE	ALBUZ TVI 80-0050	5	2,25	13-mai	EVO2	11,76	506	1107	2011	1060	12,8
10%GROSSE	ALBUZ TVI 80-0050	5	2,25	13-mai	EVO2	10,44	448	1063	2244	1149	15,2
10%PETITE	ALBUZ ATR 80 Blanche	5	5	13-mai	EVO2	8,65	191	302	450	4677	61,2
10%PETITE	ALBUZ ATR 80 Blanche	5	5	13-mai	EVO2	9,1	196	340	542	4567	59
10%PETITE	ALBUZ ATR 80 Blanche	5	5	13-mai	EVO2	8,28	200	344	540	4263	52,7
10%GROSSE	ALBUZ TVI 80-0050	5	2,25	13-mai	MADEXPRO	12,78	535	1126	1769	1061	12,6
10%GROSSE	ALBUZ TVI 80-0050	5	2,25	13-mai	MADEXPRO	11,62	434	946	1712	1327	17,9
10%GROSSE	ALBUZ TVI 80-0050	5	2,25	13-mai	MADEXPRO	10,75	460	1023	1787	1244	15,9
10%MOYENNE	LECHLERAD 90-0067	2,5	3,5	13-mai	MADEXPRO	9,51	248	448	684	2193	34,6
10%MOYENNE	LECHLERAD 90-0067	2,5	3,5	13-mai	MADEXPRO	10,35	262	465	693	2094	33,3
10%MOYENNE	LECHLERAD 90-0067	2,5	3,5	13-mai	MADEXPRO	9,34	261	474	720	2366	32
10%PETITE	ALBUZ ATR 80 Blanche	5	5	13-mai	MADEXPRO	9,36	217	362	561	3958	49,2
10%PETITE	ALBUZ ATR 80 Blanche	5	5	13-mai	MADEXPRO	15,35	214	386	645	6589	81,8
10%PETITE	ALBUZ ATR 80 Blanche	5	5	13-mai	MADEXPRO	15,06	218	377	613	6349	80

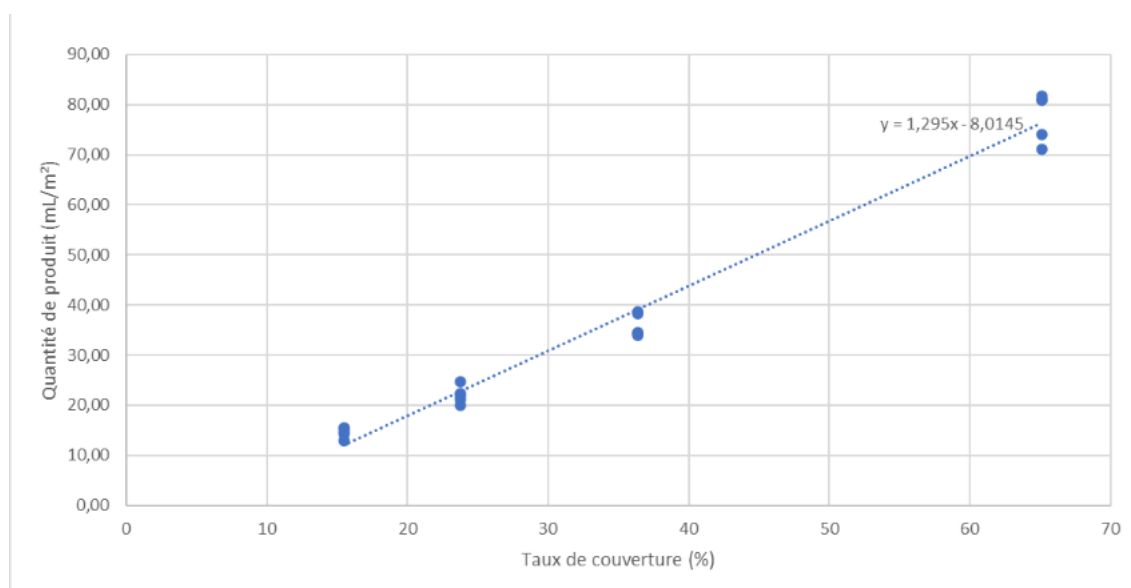


Figure 18 : Dose effective de produit (mL/m²) en fonction du taux de couverture pour les gros impacts (C. Metayer)

Cette expérimentation a favorisé un échange de savoir-faire et de compétences entre les deux structures. L'IFV est expérimenté dans le dosage de la quantité de produit pulvérisé et le GRCETA se spécialise davantage dans l'évaluation de la qualité de pulvérisation.

L'expérimentation s'est déroulée en plusieurs étapes :

- Préparation de la bouillie : Un traceur (colorant bleu) a été ajouté à la bouillie. Une courbe d'étalonnage a été réalisée permettant de relier la concentration du traceur à l'absorbance mesurée.
- Phase de pulvérisation : Pour chaque modalité (identiques à celles des tests hybrides visant à évaluer l'efficacité de la pulvérisation contre *Cydia pomonella*), trois papiers hydro sensibles et quatre collecteurs en plastique ont été disposés sous la rampe de pulvérisation et été pulvérisés.
- Analyse des dépôts :

Les papiers hydro sensibles ont été photographiés après la pulvérisation, puis analysés à l'aide du logiciel DepositScan. Cette analyse permet d'obtenir des données sur le taux de couverture ainsi que sur la taille des gouttes.

Les collecteurs ont été placés dans des boîtes en plastique distinctes, avant d'être analysés par spectrophotométrie. Cette analyse avec la courbe d'étalonnage, permet de quantifier la quantité de produit effectivement déposée.

- Des courbes de régressions linéaires sont établies afin de mettre en relation le taux de couverture, la taille des gouttes et la quantité de bouillie déposée (Figure 18).

d. Réalisation des test-hybrides

Les tests hybrides consistent à évaluer l'efficacité de différents gradients de couverture en observant la mortalité de larves de *Cydia pomonella* après contact avec des feuilles préalablement traitées.

Pour chaque modalité de traitement, six feuilles sont pulvérisées, puis disposées par paire dans des boîtes de Petri. Sur chaque paire de feuilles, 28 larves au stade L1 sont déposées à l'aide d'un pinceau humidifié, directement sur la face supérieure (Figure 19). Une fois l'ensemble des larves positionnées, l'opérateur note l'heure de fin de dépôt sur la boîte et démarre un chronomètre pour une durée d'exposition de 60 minutes. Cette durée est un compromis expérimental basé sur la littérature indiquant que le stade baladeur des larves peut varier de 12 minutes à 24 heures en laboratoire (SIEGWART Myriam, entretien personnel, Août 2025).

A la fin de l'exposition, les larves sont transférées dans des plaques biotest constituées de 96 puits partiellement remplies de milieu nutritif composé d'eau, d'acide acétique et d'une farine de soja (Stonefly Heliothis Diet, Ward's Science). Les plaques sont ensuite scellées avec du parafilm puis incubées durant 7 jours dans une étuve à 23°C avec une photopériode de 16 heures de lumière et 8 heures d'obscurité.



Figure 19 : Pose des larves au stade L1 sur les feuilles de pommier (C. Metayer)

À la suite des 7 jours d'incubation, l'évaluation de la mortalité est effectuée. En effet, selon la littérature, le virus de la granulose provoque généralement la mort des larves entre 5 et 10 jours après l'infection (Arthurs, Lacey 2004).

Les larves sont alors classées selon trois catégories :

- Mortes : Ne répondent pas à une stimulation mécanique ou présentent des signes de moisissure.
- Vivantes : Actives et mobiles
- Disparues : Absentes du puits, non retrouvées dans le milieu nutritif.

La mortalité corrigée des larves qui est la variable à expliquer est calculée à partir des mortalités "brutes" en ajustant par les mortalités témoins spécifique à Carpovirusine Evo2 et Madex Pro à partir de la formule de Schneider-Orelli (Bal, Sidati 2013) :

$$\text{Mortalité corrigée} = \frac{\text{Mortalité} - \text{Mortalité témoins}}{100 - \text{Mortalité témoins}} \times 100$$

4.2.2. *Evaluation de l'impact des conditions climatiques*

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'impact des conditions climatiques sur l'efficacité de la pulvérisation en vergers en déterminant des plages optimales de température et d'hygrométrie.

Variables d'études et modalités

Au cours de cet essai, les variables à expliquer sont la taille des impacts, le taux de couverture et l'homogénéité de la répartition sur l'arbre. Les variables explicatives sur lesquelles nous jouons sont :

- X_1 : La température
- X_2 : L'hygrométrie
- X_3 : Le type de pulvérisateur (pneumatique – à jet porté)

Gestion de l'essai

Les expérimentations sont réalisées à l'abri du vent sur le bord d'une parcelle chez un producteur du GRCETA basé à Saint-Rémy-de-Provence le 18/07/2025 pour le pulvérisateur pneumatique et le 05/08/2025 pour le pulvérisateur à jet porté.



Figure 20 : Disposition des perches et passage du pulvérisateur pneumatique (C. Metayer)

a. Réglage des pulvérisateurs

Les réglages des pulvérisateurs sont effectués le matin même des essais. L'objectif est d'obtenir avec le premier réglage un taux de couverture compris entre 50 et 60% minimum et une taille d'impacts fines/moyennes (400-500 μ m) en adéquation avec la qualité de pulvérisation efficace sélectionnée grâce aux premiers tests.

Les réglages du pulvérisateur pneumatique sont effectués à une température de 19,5°C et une hygrométrie de 75%. Le pulvérisateur est utilisé avec un volume hectare de 500L/ha à 6km/h. Le taux de couverture moyen mesuré via DepositScan est de 56% avec une taille d'impact moyenne (494 μ m).

Les réglages du pulvérisateur à jet porté sont effectués à une température de 14,2°C et une hygrométrie de 80%. Le pulvérisateur utilisé est un Chabas à 1000L/ha, 10 bar et une vitesse de 6,5 km/h. Le taux de couverture moyen mesuré via DepositScan est de 85% avec des impacts moyens, voir gros (660 μ m).

b. Mise en place de l'essai

Quatre perches de 4,5 mètres de hauteur sont installées d'un seul côté du pulvérisateur l'objectif étant d'observer l'évolution de la pulvérisation en fonction de l'évolution de la température et de l'hygrométrie. Les 4 perches permettent de vérifier l'uniformité de la pulvérisation sur une certaine distance, en limitant les biais liés au démarrage ou à d'éventuelles irrégularités de fonctionnement du pulvérisateur (Figure 20).

Chaque perche est équipée de papiers hydro-sensibles placés tous les 0,5 mètre, de 0,5 m à 4,5 m de hauteur. Simulant ainsi la structure d'un pommier standard et permettant d'évaluer la répartition de la pulvérisation sur toute la hauteur.

L'objectif étant de déterminer les conditions météorologiques favorables à la pulvérisation. Pour cela nous allons analyser l'évolution de la température et l'hygrométrie grâce aux appareils de mesure Elitech Gsp-6 (Elitech Technology 2025), placés :

- A l'ombre, à une hauteur d'1m50
- Au soleil, à une hauteur d'1m50
- Au niveau de la cime des arbres, à une hauteur de 3,5m - 4m

Une station météo (Agriscope 2020) présente dans le verger à 1m50 de hauteur est aussi utilisée pour identifier les changements de températures et hygrométrie avec un pas de temps de 15 minutes.

Bien que la vitesse du vent ne soit pas analysée en tant que variable expérimentale, elle est constamment contrôlée à l'aide d'un anémomètre placé à la cime des arbres. Les pulvérisations étant interdites au-delà d'un vent de 19 km/h et recommandées en dessous de 11 km/h, l'expérimentation a été conduite avec un vent inférieur à 9 km/h afin de minimiser son influence sur les résultats.

c. Passage des pulvérisateurs

Une fois les réglages terminés et les capteurs de températures et d'hygrométrie mis en place, des séries de pulvérisations à l'eau sont réalisées. Elles ont lieu à chaque changement de 2 degrés. À chaque passage, les papiers hydro sensibles sont systématiquement remplacés et les mesures de température et d'hygrométrie relevées. Cela permet de suivre l'évolution de l'efficacité de la pulvérisation en fonction des variations climatiques.

d. Analyse des papiers hydro-sensibles

Les papiers hydro-sensibles sont numérisés à l'aide du scanner Epson perfection V700 photo avec une résolution de 1200 dpi après la pulvérisation et analysés à l'aide du logiciel DepositScan. L'objectif est de déterminer les seuils climatiques critiques au-delà desquels la qualité de l'application du virus de la granulose est significativement altérée.

4.2.3. *Diagnostic de la qualité de la pulvérisation chez les producteurs*

Le diagnostic de la qualité de la pulvérisation est une étape essentielle pour les producteurs afin de garantir une application homogène sur l'ensemble de la hauteur du verger. Une méthode simple et applicable directement sur l'exploitation consiste à utiliser des papiers hydro sensibles. Pour cela, des perches de 4,5 mètres de hauteur sont disposées de part et d'autre du pulvérisateur, en reproduisant l'espacement inter-rangs de l'exploitation. Des papiers hydro sensibles sont fixés tous les 50 centimètres le long de ces perches. Après le passage du pulvérisateur, une analyse des papiers peut être réalisée.

Dans le cadre de nos différents essais, nous avons cherché à normaliser au maximum la capture des papiers hydro sensibles. Pour cela, nous avons utilisé soit une boîte assurant un éclairage, un angle de vue et une hauteur constante, soit un scanner. Cependant, ces équipements ne sont pas toujours disponibles chez les producteurs et difficilement utilisables sur le terrain. Il est donc nécessaire de leur proposer une méthode facilement réalisable sur l'exploitation.

Comparaison des différents outils de capture et d'analyse

Un premier test consiste à comparer les performances entre deux méthodes de capture : le scan à l'aide d'un scanner à plat Epson Perfection V700 Photo et la photographie à l'aide d'un smartphone équipé d'un capteur principal de 50 mégapixels. Après la capture, les papiers hydro sensibles sont analysés avec le logiciel DepositScan, en se concentrant uniquement sur le taux de couverture. Comme mentionné dans l'état de l'art, l'évolution de la taille des impacts et de la densité deviennent peu fiables lorsque le taux de couverture dépasse 20% à cause du chevauchement des gouttelettes (Wu, Yang, Lin 2025).

Evaluation de l'étalement des impacts dans le temps après la pulvérisation

Un second test vise à observer l'évolution de l'étalement des impacts dans le temps après la pulvérisation. Pour ce faire, des photographies des papiers hydro sensibles avec un smartphone possédant un capteur principal de 50 mégapixels sont prises immédiatement après la pulvérisation, puis à intervalles réguliers de 10 secondes pendant une durée totale de quatre minutes. Cet essai permet d'identifier les éventuelles variations d'étalement qui influencent l'analyse des papiers hydro sensibles.

Comparaison de différents outils d'analyses

Enfin, dans un objectif d'application sur le terrain, les performances d'analyses sont comparées entre différents outils. Pour simuler une situation réelle chez un producteur, les papiers hydro sensibles sont photographiés avec un téléphone portable équipé d'un capteur principal de 50 mégapixels. Les images sont ensuite analysées avec le logiciel DepositScan, utilisé comme référence, puis comparées aux résultats d'applications mobiles : SmartSpray et DropLeaf. Les taux de couverture obtenus sont ainsi comparés dans le but d'évaluer la fiabilité des applications mobiles.

4.2.4. Analyses statistiques

L'ensemble des analyses statistiques sont réalisées sur la version 4.5.0 du logiciel RStudio. Pour l'ensemble des analyses réalisées sur le logiciel RStudio, les données sont dans un premier temps importées et une exploration descriptive est réalisée.

Analyse des tests-hybrides pour identifier la qualité de pulvérisation idéale (Annexe 2)

Une ANCOVA est réalisée afin d'évaluer l'effet du produit utilisé, de la taille des gouttes, de la couverture réelle et de la dose effective sur la mortalité corrigée. Le modèle est ensuite simplifié à l'aide de la fonction `drop1()`. Les différentes interactions sont visualisées par des régressions linéaires, et des comparaisons post-hoc (Tukey) permettent d'affiner l'interprétation des résultats. Enfin, Les hypothèse de l'ANCOVA (normalité, homogénéité des variances, indépendance) sont vérifiées avec un diagnostic de résidus. Ceci garantit que les conclusions reposent sur un modèle approprié.

Analyse sur l'évaluation des impacts des conditions climatiques (Annexe 3)

Réalisation d'une régression linéaire multiple pour expliquer le taux de couverture en fonction de la température, de l'hygrométrie, du type de pulvérisateur et de la hauteur. Un modèle complet avec toutes les interactions (Température * hygrométrie * pulvérisateur * hauteur) est testé puis simplifié en gardant uniquement les effets principaux et les interactions significatives. Pour valider le modèle, une analyse des résidus est réalisée (QQ plot, test de Shapiro-Wilk pour la normalité et l'homoscédasticité). L'analyse révèle de légers écarts aux hypothèses mais demeure satisfaisante. La réalisation de graphiques a permis de visualiser les effets entre les variables.

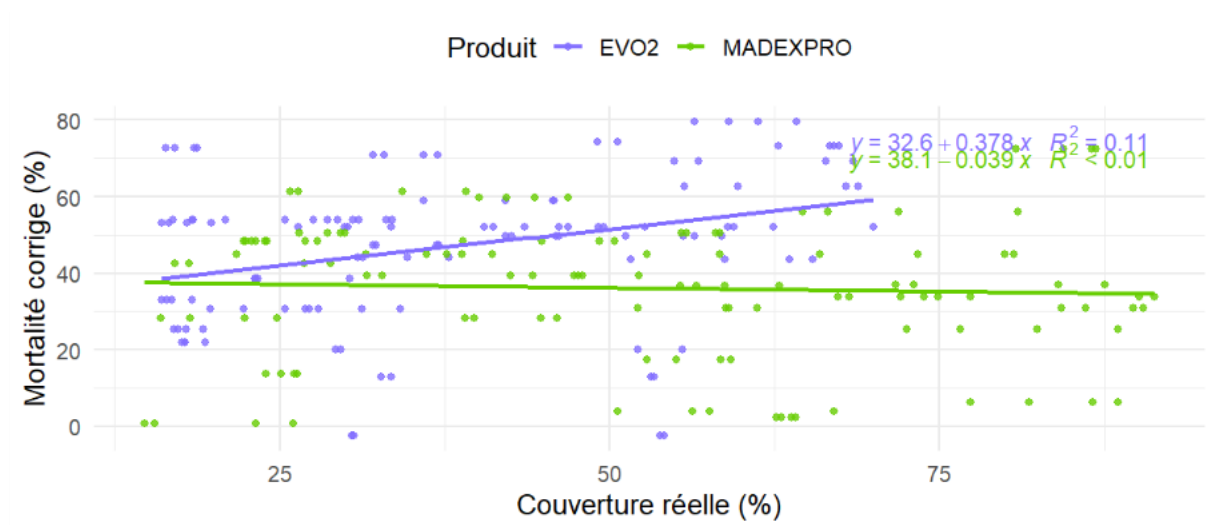


Figure 21 : Effet du taux de couverture sur la mortalité corrigée pour les produits EVO2 et Madex Pro. Chaque point représente une observation de mortalité corrigée (%) en fonction de la couverture réelle.

Analyse pour la réalisation d'un diagnostic des outils (Annexe 4 et 5)

Comparaison des taux de couverture obtenus avec DepositScan, SmartSpray et DropLeaf ainsi que la prise de captures avec un téléphone ou un scanner afin d'évaluer la concordance. Des statistiques descriptives sont calculées avec la fonction *describe* pour caractériser les différentes variables. La relation existante entre deux méthodes est ensuite visualisée à l'aide de la librairie *ggplot2*. La normalité des différences est évaluée par un test de Shapiro-Wilk. Comme la normalité n'est pas validée, un test non paramétrique de Wilcoxon apparié est ensuite réalisé. Il permet d'évaluer si la médiane des différences entre les deux outils est significativement différente de zéro. Puis la médiane des différences est extraite.

5. RESULTATS

5.1. Déterminer le seuil d'efficacité du virus de la granulose contre *Cydia pomonella*

Pour déterminer une qualité de pulvérisation garantissant une mortalité suffisante des larves de *Cydia pomonella*, des tests hybrides sont menés avec deux produits à base de CpGV : Carpovirusine Evo2 et Madex Pro. L'ensemble des données comprends 246 observations réparties selon différentes modalités.

5.1.1. Effet du taux de couverture foliaire sur l'efficacité du CpGV

La relation entre, le **pourcentage de couverture** réelle, et, la mortalité corrigée des larves, a été explorée à l'aide de régressions linéaires, les résultats sont visibles sur la Figure 21.

Pour **Carpovirusine Evo2**, il existe une relation positive entre le taux de couverture et la mortalité corrigée. Bien que le coefficient de détermination R^2 soit faible, la tendance est présente : plus le taux de couverture est élevé, plus la mortalité augmente. Au-dessus d'un taux de couverture de 55%, la mortalité corrigée est de plus de 60% et augmente plus le taux de couverture augmente.

Pour **Madex Pro**, l'efficacité est plus faible et aucune tendance nette n'est observée. La ligne de régression est quasiment horizontale, montrant une absence d'effet du pourcentage de couverture sur la mortalité.

Ces premiers résultats suggèrent que le seuil de 59% de taux de couverture trouvé par (DELPECH 2024) ne garantit pas une mortalité proche de 84 % dans nos essais. L'efficacité maximale reste plus faible néanmoins elle semble pertinente pour Carpovirusine Evo2.

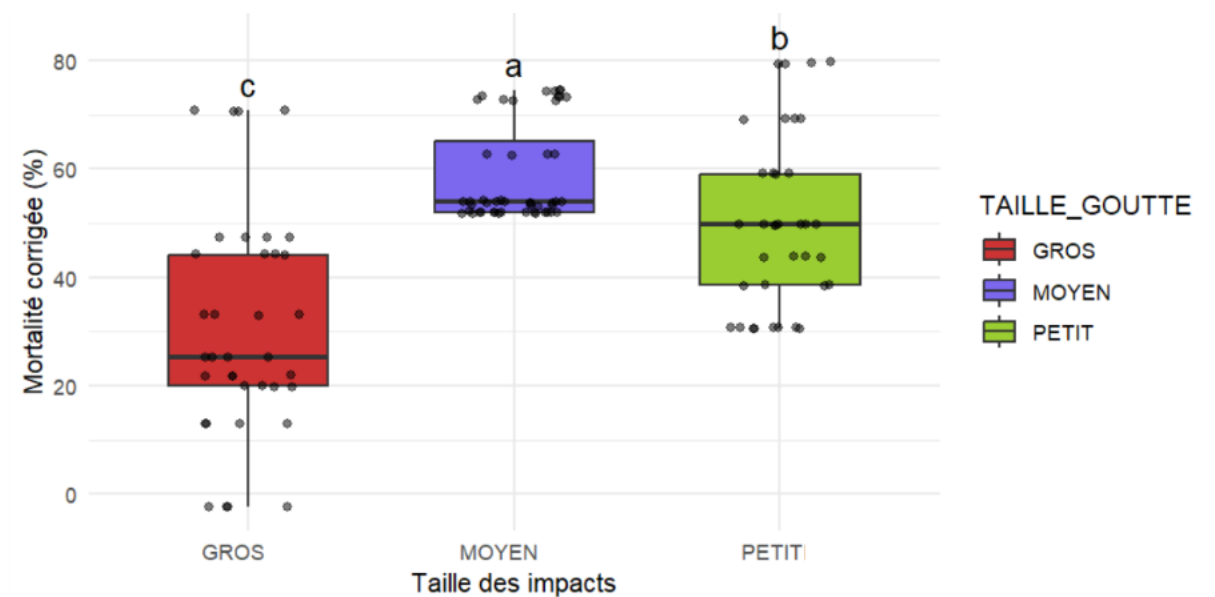


Figure 22 : Effet de la taille des impacts (grosses, moyennes, petites) sur la mortalité corrigée (%) avec le produit EVO2. Les lettres (a, b, c) indiquent des différences significatives entre les traitements selon un test de Tukey ($p < 0,05$).

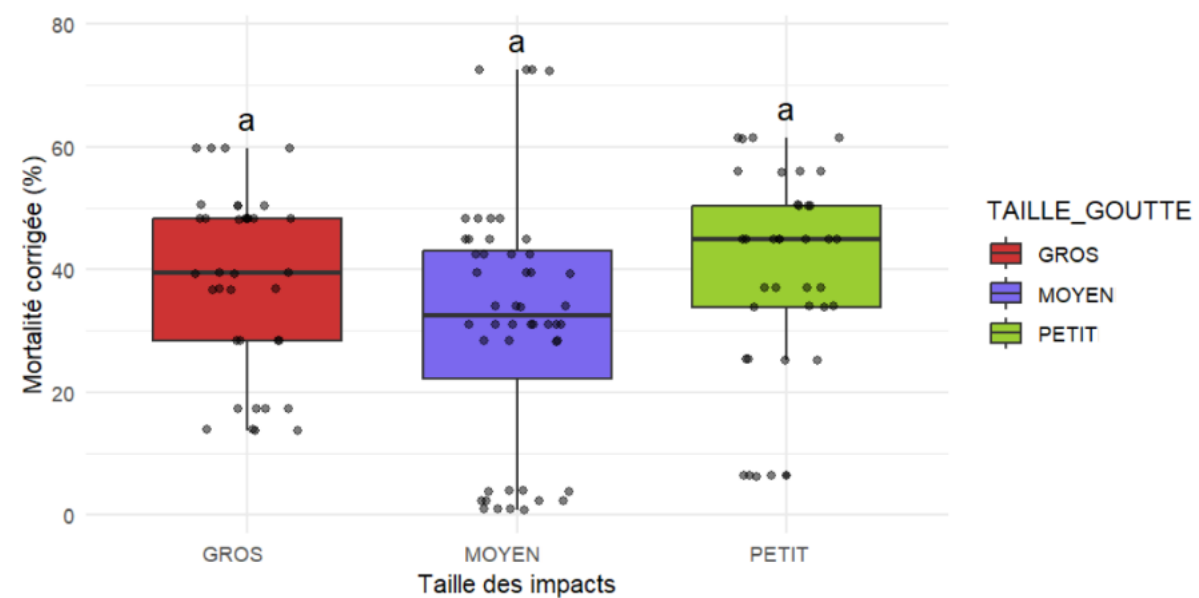


Figure 23 : Effet de la taille des impacts (grosses, moyennes, petites) sur la mortalité corrigée (%) avec le produit Madex Pro. Les lettres (a, b, c) indiquent des différences significatives entre les traitements selon un test de Tukey ($p < 0,05$).

5.1.2. Effet de la taille des impacts

Les résultats de l'effet de la **taille des impacts** (gros, moyen, petit) sur la mortalité corrigée des larves de *Cydia pomonella* sont présentés sous forme de Boxplots (Figure 22 et 23).

Pour le produit **Carpovirusine Evo2**, la taille des impacts a un effet significatif sur l'efficacité du virus de la granulose. Les impacts de tailles moyennes provoquent la mortalité la plus élevée, avec une médiane autour de 55% de mortalité corrigée. Les petits impacts entraînent une mortalité intermédiaire significativement différente de celle des impacts moyens. Les gros impacts donnent quant à eux les résultats les plus faibles avec une médiane inférieure à 30%. Ces différences sont statistiquement significatives, comme l'indiquent les lettres distinctes obtenues avec le test de Tukey. Ces résultats montrent que pour la Carpovirusine Evo2, la taille des impacts semble influencer la répartition et la disponibilité du virus sur l'ensemble de la feuille affectant ainsi la probabilité de contact avec les larves.

Pour **Madex Pro**, comme pour l'essai sur le taux de couverture foliaire, aucun effet significatif de la taille des impacts n'a été observé. Les trois tailles d'impacts présentent des mortalités corrigées similaires avec des médianes entre 35% et 45%. Cela nous indique que pour Madex Pro, l'efficacité ne dépend pas directement de la taille des impacts sur le feuillage.

5.1.3. Effet de l'interaction taux de couverture et taille des impacts

L'effet de l'**interaction** entre le **pourcentage de couverture** et la **taille des impacts** sur la mortalité corrigée est visible sur les courbes de régression linéaires des figures 24 et 25.

Pour le produit **Carpovirusine Evo2**, seule la modalité petits impacts montre une relation significative entre la couverture et la mortalité. La pente de la droite de régression avec un $R^2=0,54$ est positive avec la mortalité qui augmente de 0,774% quand le taux de couverture augmente de 1%. Les droites de régression pour les impacts moyens et gros ne sont pas significatives avec des R^2 respectif de 0,05 et 0,02. On observe tout de même une tendance légèrement croissante pour la modalité des impacts moyens et décroissantes pour les gros impacts avec une dispersion importante de la mortalité pour ces derniers.

Pour **Madex Pro**, les petits impacts présentent une relation négative avec un $R^2=0,4$. La mortalité est plus élevée aux faibles taux de couvertures et diminue quand la couverture augmente. Pour les impacts moyens on observe une augmentation de la mortalité lorsque le taux de couverture augmente néanmoins la tendance est faible avec un $R^2=0,06$ et la droite se trouve sous la barre des 50% de mortalité. Pour les gros impacts aucun effet de la couverture n'est observé et le R^2 est inférieur à 0,01. De manière générale, un taux de mortalité plus faible est observé avec Madex Pro

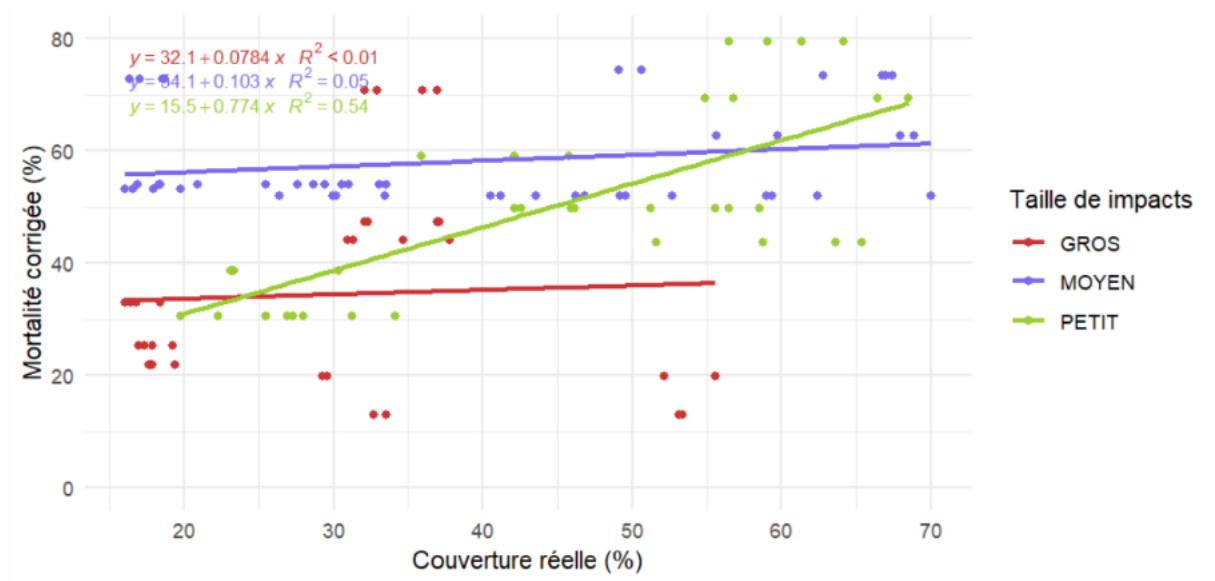


Figure 24 : Effet de la taille des impacts et du taux de couverture sur la mortalité corrigée avec le produit Carpovirusine Evo2

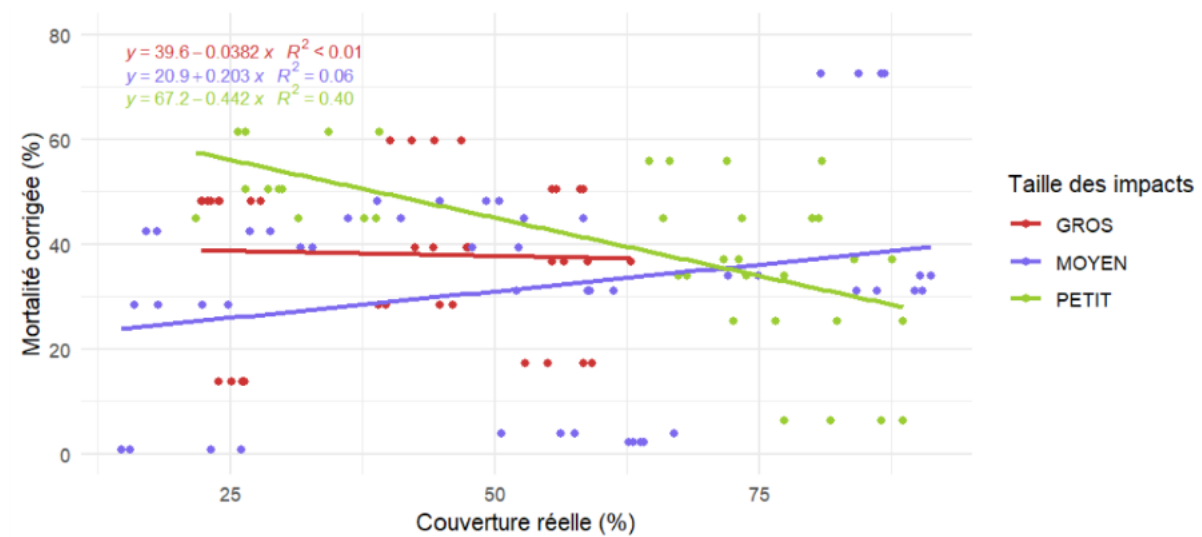


Figure 25 : Effet de la taille des gouttes et du pourcentage de couverture sur la mortalité corrigée avec le produit Madex Pro

5.1.1. Effet de la quantité de virus

La quantité de bouillie totale réellement déposée sur la surface foliaire (exprimée en ml/m²) a une absence d'effet significatif sur l'efficacité des produits (Figure 26). En effet, pour Carpovirusine Evo2 ainsi que pour Madex Pro, les pentes des régressions linéaires sont faibles et les $R^2 < 0,01$.

5.2. Les conditions météorologiques et la pulvérisation en verger

Pour limiter le nombre de courbes et ainsi faciliter la lecture des figures 27 et 29, seules les hauteurs de 1, 2, 3 et 4 mètres y sont présentées pour visualiser les dépôts sur l'ensemble de l'envergure de la perche.

5.2.1. Effet de la température

Le taux de couverture diminue quand la température augmente, puis se stabilise autour d'un palier aux alentours de 23°C (Figure 27). Sur le graphique la ligne en pointillés rouges à 55% de couverture représente le seuil à ne pas franchir à la baisse. Nous avons défini ce seuil à partir des tests évaluant la qualité de pulvérisation à privilégier pour les producteurs. Il est un bon compromis pour assurer une efficacité acceptable tout en limitant les risques de lessivages liés à une application excessive de produit.

Pour le **pulvérisateur à jet porté**, aux hauteurs 1, 2 et 3 m, une baisse du taux de couverture est observable entre 15°C et 22-24°C, puis arrive une stabilisation autour de 50-60% de couverture aux températures plus élevées. Les régressions segmentées permettent de confirmer un changement de pente significatif grâce au test de Davies. Les températures de rupture amenant à un plateau sont de 23,3°C à 1m de hauteur, de 22,7°C à 2m de hauteur, de 23,7°C à 3m de hauteur (Figure 28). A 4 m, le taux de couverture passe sous le seuil des 50% dès les 17°C. Mis à part pour les 4 mètres de hauteur, le taux de couverture se stabilise au-dessus du seuil critique de 50% de couverture, assurant ainsi une pulvérisation efficace jusqu'à 3 mètres de hauteur lorsque les températures atteignent 30°C.

Pour le **pulvérisateur pneumatique** la tendance du taux de couverture est décroissante et le seuil des 50% est franchi aux alentours de 20°C. Jusqu'à 25°C le taux de couverture continue de diminuer puis se stabilise autour de 37%.

En pratique, le seuil >50% est atteignable aux températures les plus fraîches et plus aisément avec le pulvérisateur à jet porté aux hauteurs 1-3 m.

5.2.2. Effet de l'hygrométrie

Sur la figure 29, nous observons que de manière globale, le taux de couverture augmente avec l'hygrométrie.

Pour le **pulvérisateur à jet porté**, entre 55 et 70% d'hygrométrie, les courbes de 1m à 3m restent proches du seuil de 50% de couverture. Au-delà on observe une augmentation du taux de couverture atteignant les 60 à 80%. Pour la hauteur à 4 m, la couverture est de moins de 25% mais augmente quand l'hygrométrie augmente.

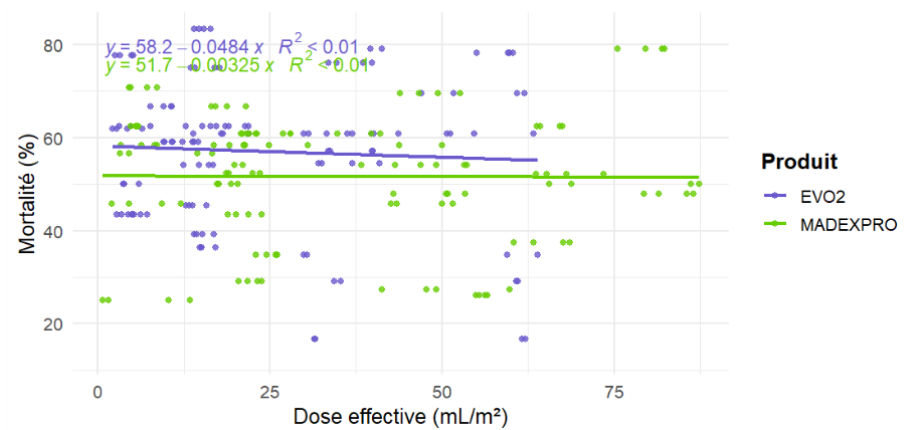


Figure 26 : Effet de la dose effective déposée sur la mortalité corrigée

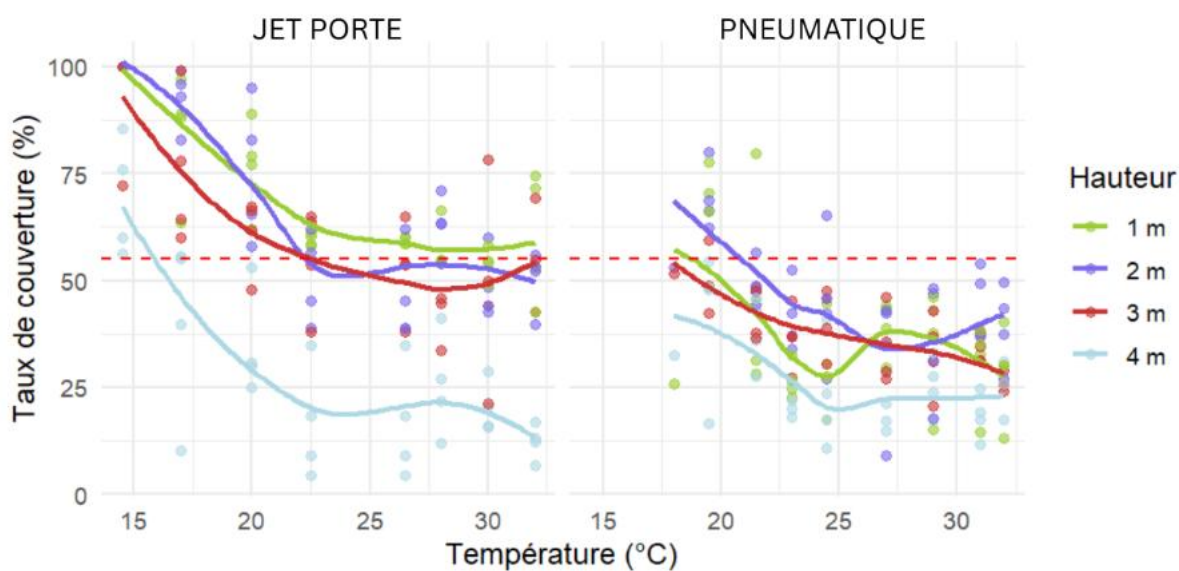


Figure 27 : Taux de couverture en fonction de la température, selon la hauteur et le type de pulvérisateur. La ligne rouge pointillée marque le seuil de 55 % de couverture.

	PULVERISATEUR	HAUTEUR	break_T	p_Davies	sig
	<fct>	<fct>	<dbl>	<dbl>	<chr>
1	JETPORTE	1 m	23.2	0.00143	p < 0,05
2	JETPORTE	2 m	22.7	0.00190	p < 0,05
3	JETPORTE	3 m	23.7	0.0252	p < 0,05
4	JETPORTE	4 m	17.8	0.00946	p < 0,05
5	PNEUMA	1 m	23.0	0.342	n.s.
6	PNEUMA	2 m	26.7	0.0382	p < 0,05
7	PNEUMA	3 m	22.6	0.558	n.s.
8	PNEUMA	4 m	24.9	0.118	n.s.

Figure 28 : Température de rupture de la relation température–couverture (régression segmentée). La température de rupture (break_T) estimée et les annotations (p < 0,05 ou n.s.) proviennent d'un test de Davies.

Pour le **pulvérisateur pneumatique**, on observe une tendance à la hausse du taux de couverture quand l'hygrométrie augmente. Autour de 55% d'hygrométrie, les taux de couverture sont compris entre 25 et 38% de couverture. Autour de 75% d'hygrométrie, les taux de couverture sont compris entre 38 et 55% de couverture.

La dispersion est non négligeable sur les figures 27 et 29 mais la forme des courbes confirme une augmentation du taux de couverture lorsque les températures diminuent et l'hygrométrie augmente.

5.3. Choix d'outils pour le diagnostic de la pulvérisation en verger

5.3.1. Comparaison scanner et téléphone

Le premier test est réalisé afin de comparer les performances de deux méthodes de capture des papiers hydro sensibles :

- Scanner à plat Epson Perfection V700 photo
- Smartphone équipé d'un capteur principal de 50 mégapixels

La figure 30 illustre la relation entre les taux de couverture obtenus à partir des photos prises par téléphone et ceux obtenus à partir des scans. La droite d'égalité représente la situation idéale dans laquelle les deux méthodes de capture donnent exactement les mêmes résultats. La majorité des points sont proches de cette droite ce qui indique que les deux méthodes de capture donnent des taux de couverture proches après l'analyse sur le logiciel DepositScan. La droite de régression s'écarte néanmoins légèrement de la droite d'égalité, ceci indique une tendance du téléphone à sous-estimer légèrement les taux de couverture. La différence médiane entre les deux méthodes est de -1,01% et un test de Wilcoxon apparié indique que cette différence est significative ($p=0,00038$).

Cette différence bien que significative reste faible et est tolérable pour une application sur le terrain. L'utilisation d'un smartphone est davantage accessible qu'un scanner sur le terrain et représente une alternative tout à fait acceptable pour réaliser un diagnostic de qualité de pulvérisation.

5.3.2. Étalement des gouttes dans le temps

L'évolution du taux de couverture en fonction du temps est analysée à partir de mesures réalisées sur 10 papiers hydro sensibles.

Une légère augmentation du taux de couverture dans le temps est observable sur la figure 31. L'équation de la droite obtenue est : $y = 0,05x + 22,66$. Cela suggère une augmentation moyenne du taux de couverture d'environ 0,05% par seconde. Cependant l'analyse visuelle du nuage de points révèle que l'augmentation du taux de couverture est plus importante dans les premières secondes, puis tend à se stabiliser au-delà de 150 secondes. Ceci informe que l'étalement des gouttes atteint progressivement une limite qui se traduit par un effet plateau.

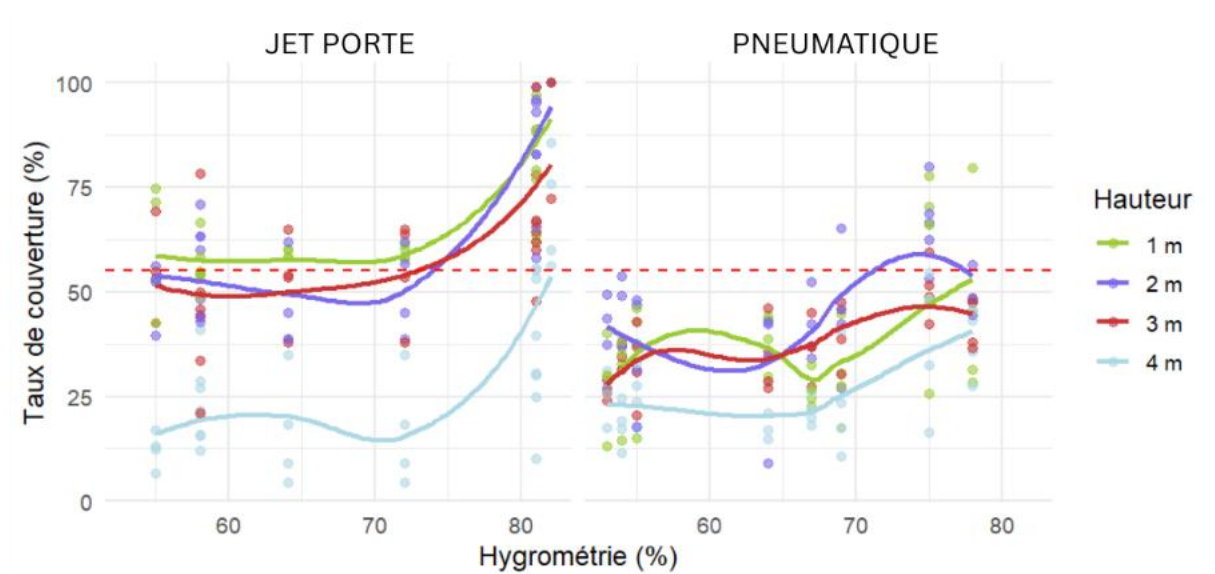


Figure 29 : Taux de couverture en fonction de l'hygrométrie, selon la hauteur et le type de pulvérisateur. La ligne rouge pointillée marque le seuil de 55 % de couverture.

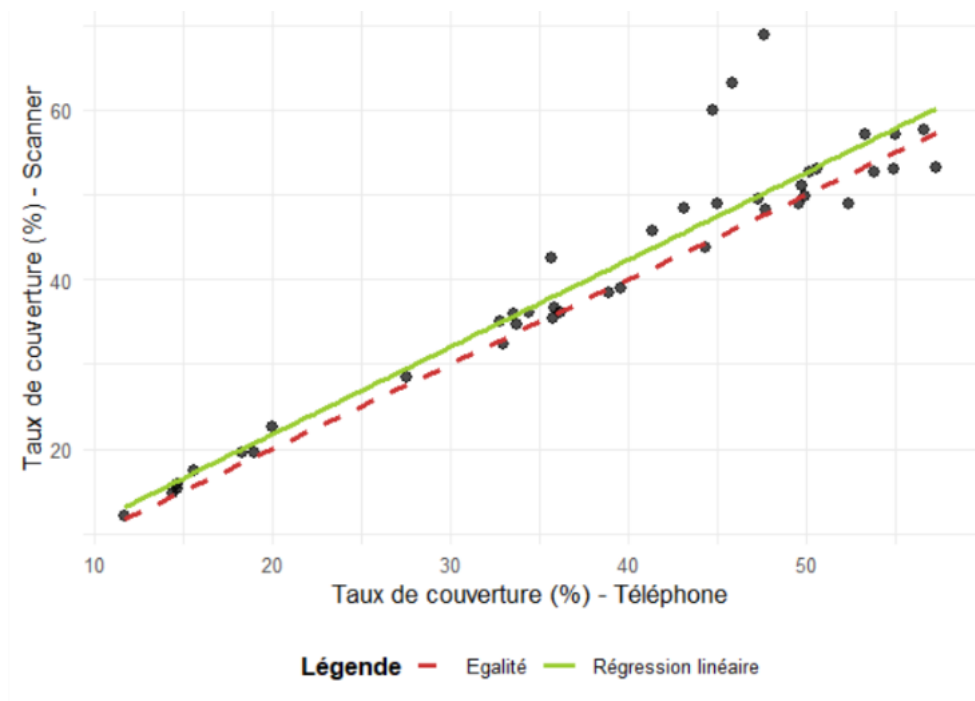


Figure 30 : Comparaison des taux de couvertures obtenus d'après des photographies réalisées avec un scanner et un téléphone

Au vu de ces résultats, pour garantir la reproductibilité des analyses, il est nécessaire de standardiser le temps d'attente entre la pulvérisation et la photographie des papiers hydro sensibles. Un délai de 3 minutes peut être recommandé pour assurer la stabilité du taux de couverture.

5.3.3. *Utilisation d'applications mobiles*

Les performances d'analyses des taux de couverture sont comparées entre DepositScan qui fait état de référence et les applications mobiles SmartSpray et DropLeaf.

Les résultats (Figure 32) mettent en évidence une forte corrélation entre les taux de couverture estimés par DepositScan et ceux estimés par SmartSpray. La droite de régression obtenue présente une pente proche de celle de la droite d'égalité ce qui indique une relation étroite entre les deux méthodes. Toutefois, un test statistique (test de Wilcoxon, $p = 0,0118$) révèle une différence significative entre les deux méthodologies d'analyses, avec un écart médian de -0,62%. Ceci indique que SmartSpray a tendance à légèrement surestimer le taux de couverture par rapport à DepositScan. Sur le terrain, cet écart est négligeable et ne compromet pas l'interprétation des résultats. L'application mobile SmartSpray est une alternative fiable et suffisamment précise pour un usage terrain. Elle permet d'évaluer de manière rapide et efficace la qualité de la pulvérisation. Pour l'application DropLeaf (Figure 33), le test de Wilcoxon révèle une différence significative ($p = 2,5 \cdot 10^{-8}$) entre les deux méthodologies d'analyses, avec un écart médian de 55,69%. Ceci indique que l'application DropLeaf surestime de manière importante le taux de couverture par rapport à DepositScan. Etant donné cet écart important, il n'est pas conseillé d'utiliser l'application DropLeaf pour analyser le taux de couverture.

L'objectif de ce travail est de trouver un protocole de diagnostic de la pulvérisation fiable, simple d'utilisation et adapté aux conditions de terrain afin de permettre aux producteurs d'évaluer la qualité de leurs pulvérisations. Les résultats des tests valident l'hypothèse 3, selon laquelle l'utilisation de perches avec des papiers hydro sensibles combinée à une application mobile constitue une solution intéressante pour le contrôle de la pulvérisation en verger. Ce protocole va permettre aux producteurs de réaliser eux-mêmes un diagnostic de leur pulvérisateur qui favorisera ainsi une meilleure maîtrise de la qualité d'application des produits phytosanitaires.

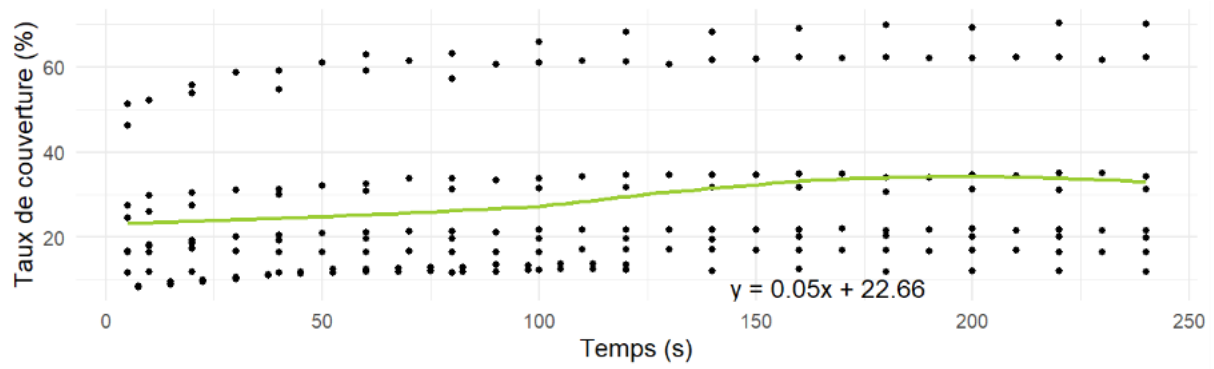


Figure 31 : Evolution du taux de couverture dans le temps après pulvérisation

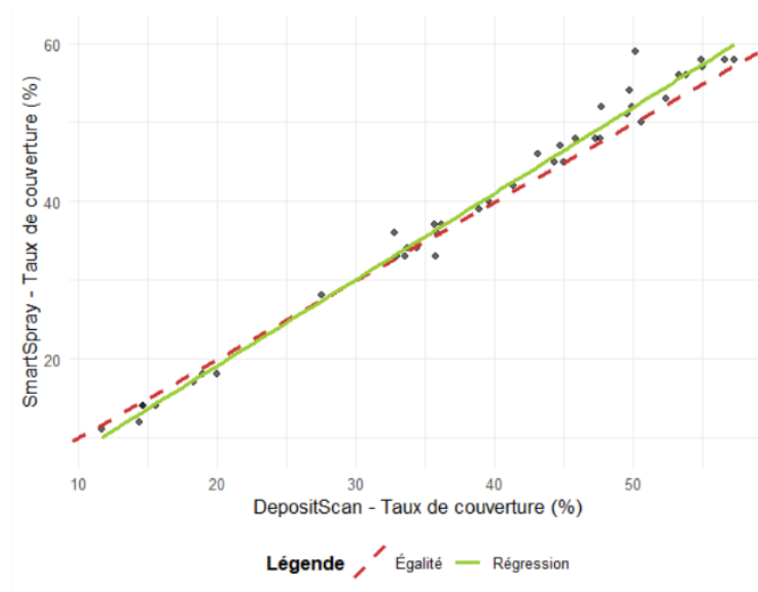


Figure 32 : Comparaison du taux de couverture obtenus via DepositScan et SmartSpray

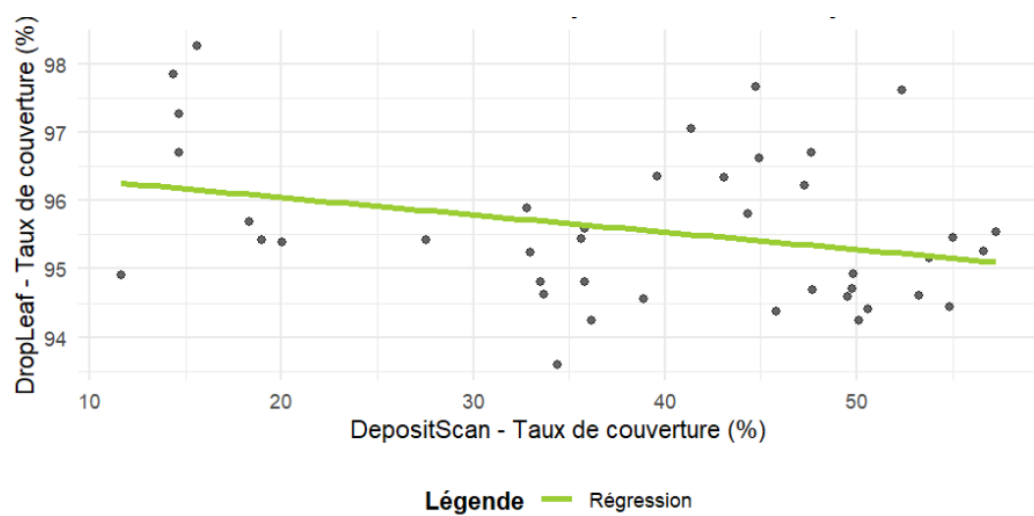


Figure 33 : Comparaison du taux de couverture obtenus via DepositScan et DropLeaf

6. DISCUSSION

6.1. Le seuil d'efficacité du virus de la granulose contre *Cydia pomonella* L.

Les résultats mettent en évidence que la mortalité des larves de *Cydia pomonella* dépend des interactions entre le produit, la taille des gouttes et le taux de couverture. Avec Carpovirusine Evo2, la mortalité augmente nettement avec le pourcentage de couverture lorsque les gouttes sont petites. A l'inverse, pour Madex Pro le taux de couverture ainsi que la taille des gouttes ne permettent pas d'augmenter la mortalité et celle-ci reste linéaire sans être significative.

Les différences d'efficacité observées entre Carpovirusine Evo2 et Madex Pro peuvent suggérer un effet de la formulation des produits. Les matières actives utilisées sont différentes : Carpovirusine Evo2 contient l'isolat R5 (mélange de virus appartenant aux groupes génotypiques A et E) tandis que Madex Pro contient l'isolat V15 (mélange de virus appartenant aux groupes génotypiques B et E)(Alletti et al. 2017). Pour identifier précisément cet effet isolat, il serait intéressant de réaliser des analyses moléculaires sur des larves mortes et survivantes après avoir ingérées le CpGV afin d'identifier les isolats viraux responsables de la mortalité des larves et ceux qui ne semblent pas avoir d'impact. Un produit phytosanitaire comprend aussi des co-formulants qui confèrent aux produits phytopharmaceutiques les propriétés nécessaires à son application et qui peuvent assurer des fonctions secondaires pouvant moduler son efficacité. Les formulations exactes des deux produits n'étant pas publiques, on peut supposer que Carpovirusine Evo2 ait dans sa formulation des substances favorables à l'attractivité ou l'ingestion. Par exemple, l'ajout d'adjuvant comme la levure *Saccharomyces cerevisiae* associée à du sucre permettrait d'améliorer les performances du CpGV (Knight, Basoalto, Witzgall 2015). Par ailleurs, dans les comparaisons entre Madex Pro et Carpovirusine Evo2, nous constatons souvent une tendance du MadexPro à être moins performant. Cela confirme que la différence d'efficacité observée ne provient pas du protocole expérimental ni de la manipulation mais bien du produit lui-même (Delpech 2024).

Nous savons que le CpGV agit pas ingestion sur *Cydia pomonella*. Des impacts fins et nombreux augmentent la densité de produits sur les zones d'alimentation des larves expliquant la réponse positive observée avec la Carpovirusine Evo2 avec des petites gouttes. Plus il y a des micro-impacts sur les feuilles, plus la probabilité qu'une larve ingère du virus est élevée.

Les résultats indiquent qu'avec la Carpovirusine Evo2, il faut privilégier des petits impacts et une couverture supérieure à 55% pour obtenir une mortalité de 60%. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus par Flavie Delpech l'année dernière lors de son stage quand bien même elle avait utilisé une méthodologie différente.

Table II.7-2—Evaporation characteristics for water droplets under two environmental conditions

Droplet size	Time to extinction	Fall distance	Time to extinction	Fall distance
(μm)	(Sec)	(M)	(Sec)	(M)
50	14	0.5	4	0.15
100	57	8.5	16	24
200	227	136.5	65	39

Figure 34 : Caractéristiques d'évaporation de gouttes d'eau sous deux environnements contrastés : (1) frais et humide (paramètres non spécifiés dans la source et (2) chaud et sec : 30°C, 50% HR (Sanderson, Huddleston 2004).

Ils concordent aussi avec d'autres travaux sur les virus entomopathogènes qui soulignent la nécessité d'un taux de couverture élevé du virus appliqué afin d'obtenir une efficacité élevée dans la lutte contre les ravageurs. Par ailleurs, l'ensemble de ces recherches tendent à montrer que l'utilisation de fines gouttelettes augmente le nombre d'impacts par cm², favorisant ainsi de fortes épizooties chez les insectes (Dorneles Junior et al. 2022). Pour Madex Pro, les relations observées ne sont pas significatives, il est donc difficile de préconiser une pulvérisation type.

Pour garantir l'efficacité de la Carpovirusine Evo2, il est nécessaire d'optimiser les réglages du pulvérisateur (volume hectare, vitesse d'avancement, débit, buses et pastilles, ventilation) et de choisir des conditions météorologiques favorables afin d'atteindre la qualité de pulvérisation visée.

6.2. Les conditions météorologiques et la pulvérisation en verger

La tendance globale observée est une diminution du taux de couverture quand la température augmente et lorsque l'hygrométrie diminue. Elle s'explique par l'accélération de l'évaporation des gouttelettes avant l'impact et l'augmentation du risque de dérive.

Le décrochage est plus marqué lorsque les papiers sont hauts car les gouttes ont une distance à parcourir plus longue et sont donc davantage sujettes à la dérive et à l'évaporation. A l'inverse, les positions à 1, 2 et 3 m ont un taux de couverture plus important ce qui concorde avec les ruptures de pentes détectées autour de 22°C pour ces hauteurs et plus précocement à 4 m. Cette tendance est confirmée par la figure 34 : le tableau de durée de vie des gouttelettes montre que sous conditions chaudes et sèches, les petites gouttes (50-100 µm) s'évaporent en quelques secondes et ne parcourent que de faibles distances, alors que les grosses gouttes plus grossières résistent davantage. Cet élément explique le déficit d'impact au sommet de la perche.

Concernant l'efficacité du pulvérisateur pneumatique, elle paraît ici plus faible et atteint rarement le seuil de 50% de couverture. Deux éléments peuvent l'expliquer :

- Les réglages initiaux étaient déjà bas (56%) ce qui explique que le taux de couverture est passé sous le seuil dès les températures modérées
- Le pulvérisateur pneumatique fait des gouttes plus fines que le pulvérisateur à jet porté. Elles sont donc davantage sensibles à l'évaporation.

Pour réaliser une évaluation de performance équitable entre les deux pulvérisateurs, il serait pertinent d'obtenir des taux de couverture identiques au départ puis de suivre la dégradation avec l'évolution de la température et de l'hygrométrie. Aussi, dans le cadre de nos essais, les tests réalisés avec le pulvérisateur à jet porté et ceux réalisés avec le pulvérisateur pneumatique n'ont pas eu lieu le même jour et à presque un mois d'intervalle. Les conditions météorologiques étaient donc différentes avec des températures plus basses et une hygrométrie plus élevée lors des essais avec le jet porté, ce qui a pu favoriser l'obtention d'un taux de couverture plus élevé. Pour limiter ce biais, il serait préférable de réaliser les essais simultanément, dans les mêmes conditions climatiques.

Par ailleurs, un entretien avec les conseillers du GRCETA de Basse Durance a permis de préciser le contexte de la région : environ 80% des pulvérisateurs utilisés dans le sud-est sont des pulvérisateurs à jet porté, contre seulement 20% de pulvérisateurs pneumatiques (Ozkan 2022). Ceci est lié à plusieurs facteurs. Tout d'abord le pulvérisateur à jet porté est historiquement le plus répandu dans les vergers de pommiers en raison de son coût d'investissement et d'une maintenance relativement simple. Aussi, avec son brassage de l'air important, il est jugé adapté aux vergers ayant un volume de feuillage important. Enfin, de nombreux arboriculteurs ont été formés et équipés avec ce matériel et tendent à reproduire le même schéma. Néanmoins, les pulvérisateurs pneumatiques présentent des atouts techniques, notamment une plus grande finesse de pulvérisation et une meilleure répartition de la bouillie (MATEVI 2025). Ceci permet d'atteindre une pulvérisation efficace notamment pour des produits de contacts tel que le virus de la granulose.

Sur le plan opérationnel, ces essais nous permettent de définir des créneaux de température et d'hygrométrie à privilégier. Il faut **privilégier les températures fraîches inférieures à 22-24°C** ainsi qu'une **hygrométrie élevée, supérieure à 70%**. Concrètement, les débuts de matinée et les fins de journée, voire la nuit sont les fenêtres les plus favorables pour la pulvérisation du virus de la granulose.

6.3. Choix d'outils pour le diagnostic de la pulvérisation en verger

La comparaison entre le scanner à plat et le smartphone 50 MP montre une très bonne concordance des taux de couverture. L'écart d'environ 1% est significatif mais faible donc tolérable pour un diagnostic terrain. En effet, pouvoir utiliser un téléphone pour la capture des papiers hydro sensibles est un gain de simplicité et de temps. Pour limiter les biais de la capture, la prise des photos doit être réalisée correctement en évitant les reflets, en assurant une mise au point nette, en restant parallèle au papier hydro sensible. Il serait intéressant de tester d'autres modèles de téléphones avec des résolutions plus faibles afin d'identifier la qualité photo minimale requise pour pouvoir réaliser la capture des papiers hydro sensibles.

Concernant l'étalement des gouttes dans le temps, il est plus important durant les trois premières minutes puis se stabilise. Un délai d'attente de trois minutes entre la pulvérisation et la photo paraît pertinent pour améliorer la reproductibilité. Néanmoins, il est nécessaire d'être vigilant car le taux de couverture ainsi que la taille des impacts vont pouvoir jouer sur l'étalement des gouttes. En effet, plus le taux de couverture et les tailles d'impacts sont élevés plus l'étalement risque de se prolonger et d'être important. Un test rapide avec des séries comprenant différents niveaux de pulvérisation et taille d'impacts permettrait de confirmer ce point. Aussi, les tests ont été réalisés avec des papiers hydro sensibles de la marque Syngenta or une étude (jason Deveau 2021) montre que l'étalement des gouttes varie selon les marques de papier hydro sensible. Il est donc important d'être vigilant quant au choix du support utilisé, afin d'assurer la comparabilité des taux de couverture avec nos résultats.

Une des applications mobiles testée, présente des résultats convaincants pour son utilisation sur le terrain. Elle permet de réduire la subjectivité de l'évaluation visuelle et va être utile aux producteurs afin d'ajuster leurs pulvérisateurs en temps réel pour optimiser l'efficacité et réduire la dérive. De plus, les résultats (photos, taux de couverture) peuvent être stockés, comparés dans le temps et partagés avec des conseillers.

En pratique, pour l'objectif visé qui est d'outiller les producteurs afin qu'ils puissent évaluer rapidement la qualité de leur pulvérisation, le smartphone couplé à l'application mobile Smart Spray fonctionne et permet d'assurer fiabilité, facilité d'usage et rapidité de l'opération.

7. CONCLUSION

Le carpocapse est un ravageur majeur du pommier pouvant causer de lourdes pertes de production. Au cours de ce travail, nous avons cherché à optimiser les méthodes de pulvérisation du virus de la granulose pour un contrôle efficace de *Cydia pomonella* en verger de pommier.

L'étude présente met en évidence qu'il est possible d'améliorer l'action du virus de la granulose en réalisant des réglages réguliers des pulvérisateurs grâce à des outils d'analyses efficaces et faciles d'utilisation comme l'application SmartSpray. L'objectif est de tendre vers une pulvérisation de qualité, caractérisée par un taux de couverture supérieur à 55% et des impacts de gouttes de taille petite à moyenne. Nous avons également montré l'influence des conditions climatiques : lorsque les températures sont supérieures à 22-24°C et l'hygrométrie inférieure à 70%, le taux de couverture diminue et l'efficacité du traitement s'en trouve réduite, ce qui souligne l'importance de réaliser les traitements dans des conditions météorologiques favorables. Les pratiques des producteurs doivent ainsi évoluer et s'adapter à ces contraintes de pulvérisation plus exigeantes.

Néanmoins, les mortalités obtenues avec le virus restent limitées (environ 60%) et ne permettent pas un contrôle complet du ravageur. Une poursuite des recherches est nécessaire pour renforcer l'efficacité de ce virus : l'ajout d'adjuvant, de co-formulants pour la couverture ou l'attractivité du virus de la granulose mais aussi une réflexion sur l'adaptation des pulvérisateurs aux produits de biocontrôle de contact qui nécessitent un mouillage plus important que les produits systémiques. Des réglages fins (volume par hectare, vitesse d'avancement, pression, ventilation) sont essentiels mais parfois difficiles à atteindre sur toute la hauteur du verger. Une étude approfondie des pulvérisateurs utilisés dans les exploitations serait nécessaire pour peut-être pouvoir proposer par la suite une adaptation technique du matériel.

Ces conclusions mettent en évidence la complexité de l'utilisation des produits de biocontrôle. En effet, au-delà des réglementations qui encadrent la pulvérisation des produits phytosanitaires, l'efficacité de ces solutions repose largement sur la capacité des producteurs à adapter leurs pratiques et à maîtriser la technicité qu'elles nécessitent.

L'étude réalisée s'est centrée sur le virus de la granulose, mais elle ouvre la voie à une réflexion plus large. Elle pourrait être transposée à d'autres types de biocontrôle et également sur des produits de contact ou des produits à action systémique. Un tel travail permettrait de mieux comprendre les conditions d'application de ces produits et pourrait être intégrée dans une démarche globale de réduction de l'usage des intrants chimiques.

8. BIBLIOGRAPHIE

AGRESTE, 2024. *Production de pommes 2024 : léger recul en France et prix en hausse* [en ligne]. octobre 2024. Disponible à l'adresse : <https://www.bnsp.insee.fr/ark:/12148/bc6p0933vv8.pdf>

ALLETTI, Gianpiero Gueli, SAUER, Annette J., WEIHRAUCH, Birgit, FRITSCH, Eva, UNDORF-SPAHN, Karin, WENNEMANN, Jörg T. et JEHLE, Johannes A., 2017. Using Next Generation Sequencing to Identify and Quantify the Genetic Composition of Resistance-Breaking Commercial Isolates of *Cydia pomonella* Granulovirus. *Viruses*. 4 septembre 2017. Vol. 9, n° 9, pp. 250. DOI 10.3390/v9090250.

ARTHURS, S. P. et LACEY, L. A., 2004. Field evaluation of commercial formulations of the codling moth granulovirus: persistence of activity and success of seasonal applications against natural infestations of codling moth in Pacific Northwest apple orchards. *Biological Control*. 1 novembre 2004. Vol. 31, n° 3, pp. 388-397. DOI 10.1016/j.biocontrol.2004.05.004.

ARVALIS, 2014. Pulvérisation sur céréales : soigner les conditions d'application des phytos. *ARVALIS* [en ligne]. 21 février 2014. Disponible à l'adresse : <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/pulverisation-sur-cereales-soigner-les-conditions-dapplication-ds-phytos> [Consulté le 17 avril 2025].

ASH, Guy, 2023. Cas d'utilisation : Pulvériser ou ne pas pulvériser - METOS by Pessl Instruments. *METOS par Pessl Instruments* [en ligne]. 31 mai 2023. Disponible à l'adresse : <https://metos.at/en/use-case-to-spray-or-not-to-spray/> [Consulté le 16 avril 2025].

AUVERGNE, Christophe, CARRA, Mathilde, CAVALIER, Renaud, CODIS, Sébastien, CUQ, Sébastien, DELPUECH, Xavier, LION, Julien, RUELLE, Bernadette, THIERY, Julien et VERGÈS, Adrien, 2017. *Guide pratique de réglages et d'utilisation des pulvérisateurs viticoles - Comment bien choisir et régler son appareil pour protéger sa vigne et l'environnement* [en ligne]. Janvier 2017. Disponible à l'adresse : https://www.vignevin.com/wp-content/uploads/2019/03/CAHIER_PULVE-1.pdf

BAL, Amadou Bocar et SIDATI, Sidi Mohamed, 2013. Réduction des doses efficaces d'insecticides contre les larves de criquet pèlerin (*Schistocerca gregaria* Forskål, 1775 : Orthoptera, Acrididae) par utilisation de quantités réduites de phénylacétonitrile. 2013.

BERGERON, André et NAUD, Colette, 1995. L'humidité relative et la température. *Centre de conservation du Québec* [en ligne]. 1995. Disponible à l'adresse : <https://www.ccq.gouv.qc.ca/index-id=171.html> [Consulté le 16 avril 2025].

BITAR, Loris, GORB, Stanislav, ZEBITZ, Claus et VOIGT, Dagmar, 2014. Egg adhesion of the codling moth *Cydia pomonella* L. (Lepidoptera, Tortricidae) to various substrates: II. Fruit surfaces of different apple cultivars. *Arthropod-Plant Interactions*. 1 février 2014. Vol. 8, pp. 57-77. DOI 10.1007/s11829-013-9288-6.

BLONDEAU, Philippe et COLIN, Daniel, 2017. *Fiche N°2 : Optimiser la pulvérisation* [en ligne]. octobre 2017. Disponible à l'adresse : https://correze.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Nouvelle-Aquitaine/095_Inst-Correze/Documents/03_Environnement/PBP_2_Optimiser_la_pulverisation.pdf

BOIVIN, Thomas et SAUPHANOR, Benoît, 2007. Phénologie et optimisation de la protection contre le carpocapse des pommes. *Innovations Agronomiques*. 1 janvier 2007. Vol. 1, pp. 23-31.

BRANDOLI, Bruno, SPADON, Gabriel, ESAU, Travis, HENNESSY, Patrick, CARVALHO, Andre, RODRIGUES JR, Jose et AMER-YAHIA, Sihem, 2020. *DropLeaf: a precision farming smartphone application for measuring pesticide spraying methods*.

CASADO, Daniel, 2008. *Cydia pomonella* (L.) behavior and responses to host volatiles. <http://www.tesisenxarxa.net>. 17 novembre 2008.

CAVALIER, 2013. *LE CONTRÔLE PÉRIODIQUE OBLIGATOIRE DES PULVÉRISATEURS* [en ligne]. 2013. Chambre d'agriculture du Gard. Disponible à l'adresse : https://gard.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/235_chambre_dagriculture_du_gard/Documents/Agroequip_Charte_riverains_Voisinage/PULVERISATEURS_Fiche-controle.pdf

CAVB, 2006. *Vérifier la qualité de votre pulvérisation* [en ligne]. 2006. Disponible à l'adresse : <https://www.cavb.fr/wp-content/uploads/2021/11/PAPIERS-HYDROSENSIBLES-Mode-demploi.pdf>

CHARBONNEAU, A, VANOOSTHUYSE, F, CHOUINARD, G et CORMIER, D, 2017. *DES GAINS ENVIRONNEMENTAUX À UTILISER LA CONFUSION SEXUELLE CONTRE LE CARPOCAPSE DE LA POMME* [en ligne]. 2017. Irda. Disponible à l'adresse : <https://irda.qc.ca/media/up5f0s23/irda-confusionsexuellecarpocapsepomme-affichesscientifiques-2017.pdf>

DELPECH, Flavie, 2024. *Optimisation de la lutte biologique par micro-organisme contre le carpocapse des pommes* [en ligne]. Unité PSH, INRAE Avignon : Institut Agro Montpellier. Disponible à l'adresse : <https://www.gis-fruits.org/content/download/4627/45377?version=1>

DEVEAU, Jason, 2021a. Évaluation du papier sensible à l'eau – Partie 1 – Pulvérisateurs 101. [en ligne]. 9 juillet 2021. Disponible à l'adresse : https://sprayers101.com/assessing_wsp_pt1/ [Consulté le 18 mars 2025].

DEVEAU, Jason, 2021b. Évaluation du papier sensible à l'eau – Partie 3 – Pulvérisateurs 101. [en ligne]. 27 juillet 2021. Disponible à l'adresse : https://sprayers101.com/assessing_wsp_pt3/?utm_source=chatgpt.com [Consulté le 28 juillet 2025].

DEVEAU, jason, 2021. Comparaison de trois marques de papier hydrosensible. [en ligne]. 2021. Disponible à l'adresse : <https://www.syngenta.ca/fr/agronomy/papier-hydrosensible> [Consulté le 31 août 2025].

DORNELES JUNIOR, Joáz, RAETANO, Carlos Gilberto, PRADO, Evandro Pereira et OLIVEIRA, Regiane Cristina De, 2022. Application technology of SfMNPV-6nd in the control of fall armyworm. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2022. Vol. 57, pp. e02800. DOI 10.1590/s1678-3921.pab2022.v57.02800.

DRAAF GRAND EST, 2023. Contrôle technique des pulvérisateurs. *DRAAF Grand Est | Direction régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt région Grand Est* [en ligne]. 7 juillet 2023. Disponible à l'adresse : <https://draaf.grand-est.agriculture.gouv.fr/controle-technique-des-pulverisateurs-a136.html>

[Consulté le 26 juillet 2025].

Last

Modified:

2023-07-07

EPHYTIA, 2015a. Pomme - Biologie, épidémiologie. *Ephytia* [en ligne]. 23 novembre 2015. Disponible à l'adresse : <https://ephytia.inra.fr/fr/C/21535/Pomme-Biologie-epidemiologie> [Consulté le 20 mars 2025].

EPHYTIA, 2015b. Pomme - Principaux symptômes. *Ephytia* [en ligne]. 22 novembre 2015. Disponible à l'adresse : <https://ephytia.inra.fr/fr/C/21534/Pomme-Principaux-symptomes> [Consulté le 16 avril 2025].

ETALON, Daniel, 2010. *Le Carpocapse - Cydia pomonella* L [en ligne]. mai 2010. Disponible à l'adresse : https://www.vergers-vivants.fr/wp/wp-content/uploads/2021/07/FT1-Carpo_web.pdf

FAN, Jiangbin, JEHLE, Johannes A., RUCKER, Ann et NIELSEN, Anne L., 2022. First Evidence of CpGV Resistance of Codling Moth in the USA. *Insects*. 10 juin 2022. Vol. 13, n° 6, pp. 533. DOI 10.3390/insects13060533.

FONTAINE, Séverine et CADDoux, Laetitia, 2012. *Résistance du carpocapse des pommes (Cydia pomonella) vis-à-vis des pyréthrinoïdes* [en ligne]. 2012. Disponible à l'adresse : https://draaf.grand-est.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Bilan_Carpo_Pyrethr_2012_cle816d2d.pdf

FREDON GRAND EST, 2022. *CARPOCAPSES DES POMMES ET DES POIRES* [en ligne]. 2022. Disponible à l'adresse : <https://fredon.fr/grand-est/presse/la-lutte-biologique-contre-le-carpocapse-des-pommes>

GABELLE, A, 2021. Protection contre le carpocapse des pommes et des poires | Ecophytopic. *CTIFL* [en ligne]. juin 2021. Disponible à l'adresse : <https://ecophytopic.fr/pic/concevoir-son-systeme/protection-contre-le-carpocapse-des-pommes-et-des-poires> [Consulté le 14 juillet 2025].

GUTTON, Martin, 2025. La pomme en 2023-2024. [en ligne]. mai 2025. Disponible à l'adresse : https://rnm.franceagrimer.fr/bilan_campagne?pomme

HESS, Roberta T. et FALCON, L. A., 1987. Temporal events in the invasion of the codling moth, *Cydia pomonella*, by a granulosis virus: An electron microscope study. *Journal of Invertebrate Pathology*. 1 septembre 1987. Vol. 50, n° 2, pp. 85-105. DOI 10.1016/0022-2011(87)90108-X.

HINSBERGER, Aurélie, 2020. *Structuration des populations virales chez les baculovirus. Importance de l'infection multiple*. [en ligne]. phdthesis. IMT - MINES ALES - IMT - Mines Alès Ecole Mines - Télécom. Disponible à l'adresse : <https://theses.hal.science/tel-03124440> [Consulté le 26 août 2025].

HMIMINA, M'Hamed et IRAQUI, Salma, 2014. Cycle évolutif et voltinisme du Carpocapse (*Cydia pomonella* L., Lepidoptera, Tortricidae) exprimés par le piégeage sexuel et les degrés-jours dans la région d'Azrou. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires* [en ligne]. 6 décembre 2014. Disponible à l'adresse : https://www.agrimaroc.org/index.php/Actes_IAPH2/article/view/370

HUDEBINE, Yoan et VERPONT, Florence, 2021. *Comparaison de la dérive générée par des éclateurs et par des buses à injection d'air : cas du pulvérisateur Turbo 2 CHABAS* [en ligne]. 17 décembre 2021. CTIFL. Disponible à l'adresse : <https://groupeperret.fr/wp-content/uploads/2024/02/CR-essai-Derive-Turbo-2-CHABAS-2021.pdf>

IVANA PAJAČ, IVAN PEJIĆ, et BOŽENA BARIĆ, 2011. *Agriculturae Conspectus Scientificus*. [en ligne]. 2011. Vol. 76, n° 2. Disponible à l'adresse : <https://acs.agr.hr/acs/index.php/acs/article/view/554>

KNIGHT, Alan L., BASOALTO, Esteban et WITZGALL, Peter, 2015. Improving the Performance of the Granulosis Virus of Codling Moth (Lepidoptera: Tortricidae) by Adding the Yeast *Saccharomyces cerevisiae* with Sugar. *Environmental Entomology*. 1 avril 2015. Vol. 44, n° 2, pp. 252-259. DOI 10.1093/ee/nvv008.

LE CORRE, Maude, 2025. Pulvérisation : les pratiques et réglages pour limiter son impact sur l'environnement | Réussir fruits & légumes. [en ligne]. 16 juillet 2025. Disponible à l'adresse : <https://www.reussir.fr/fruits-legumes/regler-pour-mieux-pulveriser> [Consulté le 24 juillet 2025].

LOPEZ-FERBER, Miguel, SIEGWART, Myriam, LIBOUREL, Gilles et PACA, RéfBioArbo, 2014. RESISTANCE DU CARPOCAPSE AU VIRUS DE LA GRANULOSE : quelques explications et leurs conséquences en Agriculture Biologique. . 2014.

LUCA, Magali Simone Marie de, 2007. *Contribution à la modélisation de la pulvérisation d'un liquide phytosanitaire en vue de réduire les pollutions* [en ligne]. phdthesis. Université de la Méditerranée - Aix-Marseille II. Disponible à l'adresse : <https://theses.hal.science/tel-00195424> [Consulté le 17 avril 2025].

MASA, 2024. Le Plan Ecophyto : 2018, II, II+ et stratégie 2030 | Ecophytopic. [en ligne]. 2024. Disponible à l'adresse : <https://ecophytopic.fr/pic/pour-aller-plus-loin/le-plan-ecophyto-2018-ii-ii-et-strategie-2030#accordeon-55186> [Consulté le 26 juin 2025].

MATAR, Mariline Maalouly Maalouly, 2013. *Déterminants du parasitisme larvaire du carpocapse du pommier au Sud Est de la France* [en ligne]. phdthesis. Université d'Avignon. Disponible à l'adresse : <https://theses.hal.science/tel-01124267> [Consulté le 20 mars 2025].

MERABET, Maréva et SEVELY, Cyril, 2025. *Coût 2025 des approvisionnements en arboriculture : INSECTICIDES ACARICIDES*. 2025. Chambre d'Agriculture de Vaucluse.

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA SOUVERAINETÉ ALIMENTAIRE, 2013. Maîtrise des produits phytosanitaires (pesticides) : une utilisation strictement encadrée. *Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire* [en ligne]. 30 avril 2013. Disponible à l'adresse : <https://agriculture.gouv.fr/maitrise-des-produits-phytosanitaires-pesticides-une-utilisation-strictement-encadree> [Consulté le 17 avril 2025].

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA SOUVERAINETÉ ALIMENTAIRE, 2023. Infographie - Les fruits et légumes : une production arboricole, fruitière et maraîchère très diversifiée. *Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire* [en ligne]. 17 mars 2023. Disponible à l'adresse : <https://agriculture.gouv.fr/infographie-les-fruits-et-legumes-une-production-arboricole-fruitiere-et-maraichere-tres> [Consulté le 9 juillet 2025].

MORISSET, Olivier, 2010. Évaluation de l'efficacité et de la compatibilité de *Trichogramma minutum* riley (Hymenoptera : Trichomatidae) et du virus de la granulose du carpocapse (CpGV) pour leur utilisation conjointe contre *Cydia pomonella* L. (Lepidoptera : Tortricidae) en vergers de pommiers. . 2010.

NANSEN, Christian, VILLAR, Gabriel Del, RECALDE, Alexander, ALVARADO, Elvis et CHENNAPRAGADA, Krishna, 2021. Phone App to Perform Quality Control of Pesticide Spray Applications in Field Crops. *Agriculture*. 24 septembre 2021. Vol. 11, n° 10, pp. 916. DOI 10.3390/agriculture11100916.

OZKAN, Erdal, 2022. Sprayers for Effective Pesticide Application in Orchards and Vineyards. [en ligne]. 10 janvier 2022. Disponible à l'adresse : <https://ohioline.osu.edu/factsheet/fabe-533> [Consulté le 29 août 2025].

PAJAČ ŽIVKOVIĆ, Ivana, PEJIC, Ivan et BARIĆ, Božena, 2011. Codling Moth, *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae) – Major Pest in Apple Production: an Overview of its Biology, Resistance, Genetic Structure and Control Strategies. *Agriculturae Conspectus Scientificus*. 1 juin 2011. Vol. 76, pp. 87-92.

PERRIN, Marie, 2022. *Gestion du carpocapse du pommier : impact du changement climatique sur la lutte contre Cydia pomonella dans les vergers de Provence* [en ligne]. thesis. Avignon. Disponible à l'adresse : https://theses.fr/2022AVIG0602?utm_source=chatgpt.com [Consulté le 10 juillet 2025].

PROST, Corinne, 2021. Enquête Pratiques phytosanitaires en arboriculture en 2018IFT et nombre de traitements. [en ligne]. mai 2021. Disponible à l'adresse : https://www.agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Chd2108/cd2021-8_IFT-phytofruits_2018.pdf

PROVOST, Caroline, VALÉRO, José, VINCENT, Charles et RASAMIMANANA, H., 2008. Virosoft CP4: premier virus homologué au Canada pour usage en agriculture. *Antennae*. 1 avril 2008. Vol. 15, pp. 3-6.

QUINIO, C, DOUSSON, F, LEPEE, P, MOREAU, F, VACHON, C et LEBON, V, 2014. *Bien régler son pulvérisateur en arboriculture fruitière et viticulture pour optimiser l'efficacité des traitements* [en ligne]. décembre 2014. Chambre d'agriculture Limousin. Disponible à l'adresse : https://ecophytopic.fr/sites/default/files/Bien_regler_son_pulverisateur_en_arbo-viti_VF%5B1%5D.pdf [Consulté le 14 avril 2025].

REMONGIN, Xavier, 2021. La pomme, le fruit préféré des Français. *Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire* [en ligne]. 21 octobre 2021. Disponible à l'adresse : <https://agriculture.gouv.fr/la-pomme-le-fruit-prefere-des-francais> [Consulté le 26 juin 2025].

SALAMIN, C., CHARMILLOT, P.J., PASQUIER, D. et PEEVA, P., 2007. Efficacité du virus de la granulose appliqué par trempage des pommes sur des larves de carpocapse *Cydia pomonella*. . 2007. pp. 207-209.

SANDERSON, Robert et HUDDLESTON, Ellis, 2004. II.7 Factors Affecting Application and Chemical Deposition. . 2004.

SAUPHANOR, Benoit, BERLING MARIE, TOUBON JEAN-FRANÇOIS, REYES MARITZA, DELNATTE JULIEN et ALLEMOZ PHILIPPE, 2006a. Carpocapse des pommes

cas de résistance au virus de la granulose en vergers biologiques. *PHYTOMA*. février 2006. N° 590, pp. 24-27.

SIEGWART, Myriam, MAUGIN, Sandrine, BESSE, Samantha, LOPEZ-FERBER, Miguel, HINSBERGER, Aurélie et GAUFFRE, Bertrand, 2020a. Le carpocapse des pommes résiste au virus de la granulose. *Phytoma la Défense des Végétaux*. novembre 2020. N° 738, pp. 45-50.

SIEGWART, Myriam, MAUGIN, Sandrine, BESSE, Samantha, LOPEZ-FERBER, Miguel, HINSBERGER, Aurélie et GAUFFRE, Bertrand, 2020c. Evolution des résistances du carpocapse des pommes à différents isolats du virus de la granulose. *Phytoma la Défense des Végétaux* [en ligne]. novembre 2020. Disponible à l'adresse : <https://hal.science/hal-03695737> [Consulté le 19 juin 2025].

TANADA, Y. et LETJTENEGCER, RUTH, 1966. *Histopathology of a Granulosis-Virus Disease of the Codling Moth, Carpocapsa pomonella* [en ligne]. 1966. Disponible à l'adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0022201168902619>

THOMAZO, Marie, 2013. *Optimisation de la pulvérisation* [en ligne]. juin 2013. Disponible à l'adresse : https://www.agriculture-gapeau.fr/fileadmin/user_upload/Provence-Alpes-Cote_d_Azur/043-eve-gapeau/Mes_fichiers/3_Solutions_Filieres/Viticulture/Fichiers/Viticulture_Pulverisation_Optimiser_pulve_2013.pdf

VERGES, Adrien, 2024. *Concepts dépôts de pulvérisation*. 12 décembre 2024.

VERPONT, Florence, 2021. *PulvArbo : pour une utilisation efficace et adaptée des pulvérisateurs en arboriculture Non définie* [en ligne]. mai 2021. CTIFL. Disponible à l'adresse : <https://www.ctifl.fr/pulvarbo-pour-une-utilisation-efficace-et-adaptee-des-pulverisateurs-en-arboriculture> [Consulté le 18 avril 2025].

VERPONT, Florence, 2023. Protéger les vergers de pommiers grâce à PulVéFix. *acta* [en ligne]. 25 avril 2023. Disponible à l'adresse : <https://www.acta.asso.fr/realisations/protoger-les-vergers-de-pommiers-grace-a-pulvefix/> [Consulté le 14 avril 2025].

VERPONT, Florence, 2024. Un verger artificiel pour l'optimisation de la pulvérisation en arboriculture. *INFOSCTIFL*. novembre 2024. N° 403, pp. 30-35.

VOUDOURIS, Costas Ch., SAUPHANOR, Benoît B., FRANCK, Pierre, REYES, Maritza, MAMURIS, Zissis, TSITSIPIS, John A., VONTAS, John et MARGARITOPOULOS, John T., 2011. Insecticide resistance status of the codling moth *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae) from Greece. *Pesticide Biochemistry and Physiology*. 2011. Vol. 100, n° 3, pp. 229-238. DOI 10.1016/j.pestbp.2011.04.006.

WU, Chia-Lin, YANG, Chuan-Kai et LIN, Ji-Yang, 2025. Water-sensitive paper detection and spray analysis. *Multimedia Tools and Applications* [en ligne]. 12 mars 2025. DOI 10.1007/s11042-025-20697-2. [Consulté le 28 juillet 2025].

YÈME, Pierre-Yves et BEETS, Benoît, 2007. Choisir la qualité de pulvérisation adapté. *Perspectives agricoles*. janvier 2007. N° 330, pp. 38-39-40.

ZHU, Heping, SALYANI, Masoud et FOX, Robert D., 2011. A portable scanning system for evaluation of spray deposit distribution. *Computers and Electronics in Agriculture*. 1 mars 2011. Vol. 76, n° 1, pp. 38-43. DOI 10.1016/j.compag.2011.01.003.

9. SITOGRAPHIE

AGRIEXPO, 2025. Banc de contrôle de pulvérisation vertical by AAMS BV | AgriExpo. [en ligne]. 2025. Disponible à l'adresse : <https://www.agriexpo.online/fr/prod/aams-bv/product-168180-177697.html> [Consulté le 24 juillet 2025].

AGRISCOPE, 2020. Agriscope. *Agriscope* [en ligne]. 2020. Disponible à l'adresse : <https://www.agriscope.fr/> [Consulté le 20 août 2025].

ANDERMATT FRANCE, 2025. Madex® Pro - Insecticide Biocontrôle utilisable en AB. *Andermatt France* [en ligne]. 2025. Disponible à l'adresse : https://pro.andermatt.fr/insecticides/21-madex-pro.html?srsId=AfmBOopJ-sinxAei4VGvvd7nWgToUgLXTxRxU4g334YelYQ8l_gAP_V [Consulté le 25 juin 2025].

BASF, 2022. Evidence : optimiser le réglage de la pulvérisation. [En ligne]. 2022. Disponible à l'adresse : https://www.agro.basf.fr/fr/aide_a_la_decision/conseils_de_traitement/evidence_a_la_vigne/ [Consulté le 17 mars 2025].

ELITECH TECHNOLOGY, 2025. Elitech GSP-6 Digital Temperature and Humidity Data Logger Detachable Dual Probes -40°F to 158°F Max Accuracy up to ±0.6°F Audio Alarm Calibration Certificate Max/Min Value Display. *Elitech Technology, Inc.* [en ligne]. 2025. Disponible à l'adresse : <https://www.elitechus.com/en-fr/products/elitech-gsp-6-temperature-and-humidity-data-logger-16000-points-refrigeration-cold-chain-temperature-recorder> [Consulté le 25 août 2025].

E-PHY, 2025. ephy. [en ligne]. 2025. Disponible à l'adresse : <https://ephy.anses.fr/> [Consulté le 19 juin 2025].

ILASTIK, 2025. ilastik - ilastik. [en ligne]. 2025. Disponible à l'adresse : <https://www.ilastik.org/> [Consulté le 6 juillet 2025].

IMAGEJ, 2025. Introduction. [en ligne]. 2025. Disponible à l'adresse : <https://imagej.net/ij/docs/intro.html> [Consulté le 6 juillet 2025].

IRSTEA, 2013. E6 - Pulvérisateur arboricole, traîné, à jet porté [en ligne]. mai 2013. Disponible à l'adresse : https://agriculture.gouv.fr/sites/default/files/e6_pulve_arboricole.pdf

MAPAQ, 2000. IRIIS phytoprotection. *IRIIS phytoprotection* [en ligne]. 2000. Disponible à l'adresse : <https://www.iriisphytoprotection.qc.ca/> [Consulté le 10 juillet 2025].

MATEVI, 2024. Pulvérisateur Pneumatique : Description et Réglages | Matevi. *MATEVI, la base des données de matériels viti-vinicoles* [en ligne]. mai 2024. Disponible à l'adresse :

<https://www.matevi-france.com/fr/pulverisateur-pneumatique.html>
[Consulté le 17 avril 2025].

MATEVI, 2025. Pulvérisateur Pneumatique : Description et Réglages | Matevi. [en ligne]. 2025. Disponible à l'adresse : <https://www.matevi-france.com/fr/pulverisateur-pneumatique.html> [Consulté le 29 août 2025].

METEOBLUE, 2025. Météo Saint-Rémy-de-Provence. *meteoblue* [en ligne]. 24 juillet 2025. Disponible à l'adresse : https://www.meteoblue.com/fr/meteo/semaine/saint-r%c3%a9my-de-provence_france_2977214 [Consulté le 24 juillet 2025].

METOS, 2024. *DropSight® Droplet Size Distribution (DSD) Functionality* [en ligne]. octobre 2024. Disponible à l'adresse : <https://dropsight.ag/wp-content/uploads/2024/10/DROPSIGHT-Droplet-size-distribution.pdf> [Consulté le 17 mars 2025].

METOS, 2025. Bonnes conditions météorologiques de traitement -. [en ligne]. 2025. Disponible à l'adresse : <https://www.agrifind.fr/alertes/conseil/conditions-meteorologiques-utilisation-produits-phyto/> [Consulté le 17 avril 2025].

SPRAYX, 2025. SprayX :: DropScope SprayFlow – Calibração Digital de Pulverizadores – Fluxômetro, manômetro, leitor de papeis hidrossensíveis. [en ligne]. 2025. Disponible à l'adresse : <https://www.sprayx.com.br/> [Consulté le 27 août 2025].

SYNGENTA, 2020. Evaluer la répartition de la pulvérisation avec Drop'in. *Syngenta France* [en ligne]. 8 avril 2020. Disponible à l'adresse : <https://www.syngenta.fr/agriculture-durable/proteger-l-eau-et-l-air/article/repartition-pulverisation-drop-in> [Consulté le 25 mars 2025].

SYNGENTA FRANCE, 2023. Consulter impérativement la météo avant traitements. *Syngenta France* [en ligne]. 22 septembre 2023. Disponible à l'adresse : <https://www.syngenta.fr/agriculture-durable/proteger-eau-et-air/article/consulter-meteo> [Consulté le 17 avril 2025].

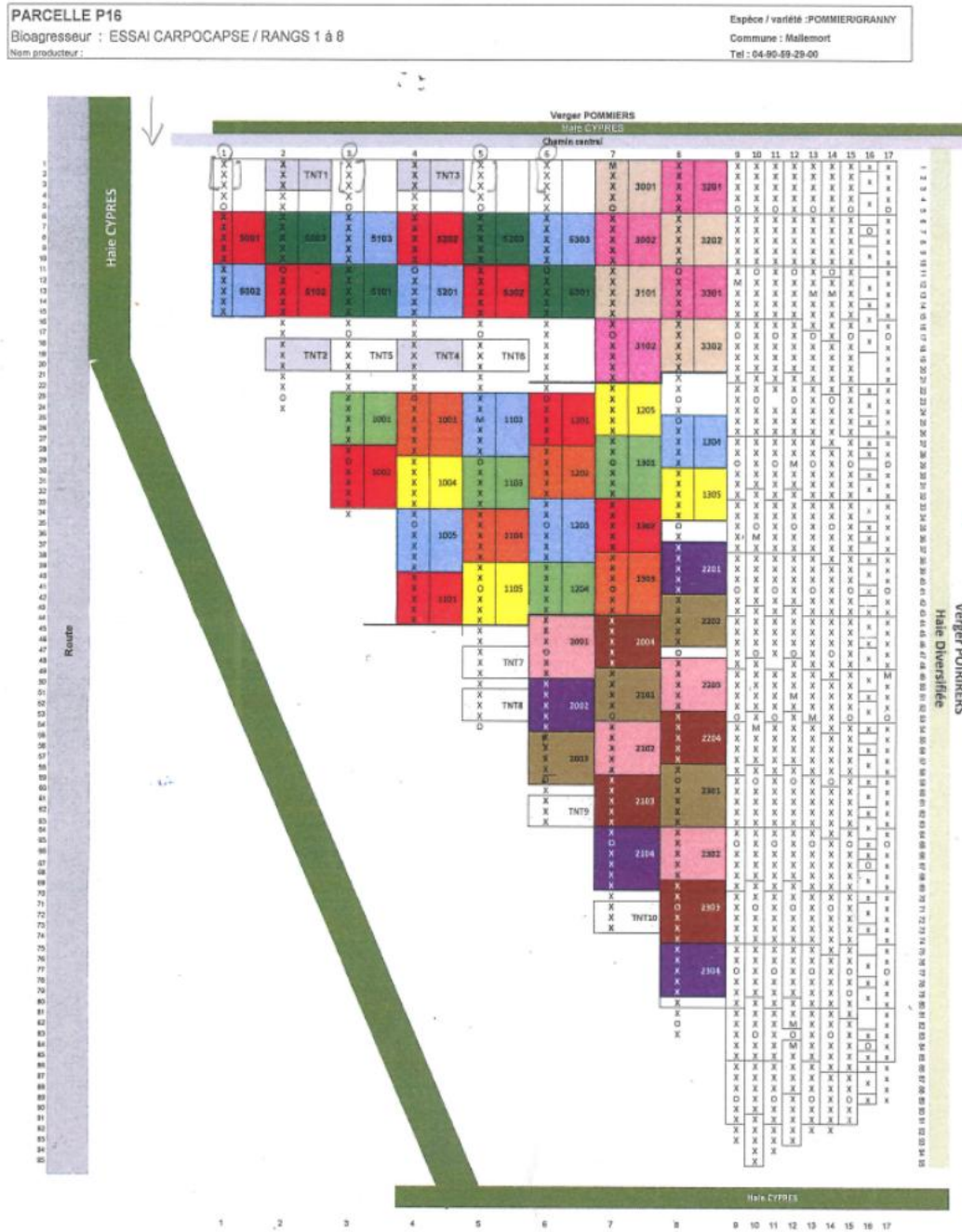
UPL, 2025. UPL | France. [en ligne]. 2025. Disponible à l'adresse : <https://www.uplcorp.com/fr/produit-d%C3%A9tails/carpovirusine-evo-2> [Consulté le 25 juin 2025].

USDA, 2016. Télécharger : USDA ARS. [en ligne]. 2016. Disponible à l'adresse : <https://www.ars.usda.gov/research/software/download/?softwareid=247> [Consulté le 17 mars 2025].

VETOQUINOL, 2025. Virkon | Vetoquinol. [en ligne]. 2025. Disponible à l'adresse : <https://biosecurite.vetoquinol.ca/fr/content/virkon> [Consulté le 26 juillet 2025].

10. ANNEXES

Annexe I : Plan de la parcelle de la station de La Pugère



Annexe II : Code R utilisé pour l'analyse des tests hybrides pour l'identification de la qualité de pulvérisation optimale

```
#IMPORTATION DES DONNEES ####
Donnees <- read_excel("C:/Users/camil/Documents/Camille Metayer GRCEA/1. Seuil d'efficacité du virus/Résultats
Mtp/SCRIPTS/Donnees_TestMontpellier.xlsx")

#Afficher les données
str(Donnees)
#Vérifier la présence de valeurs manquantes :
colSums(is.na(Donnees))

#CALCUL DE LA MORTALITE
Donnees$MORTALITE <- (Donnees$LARVES_MORTES / Donnees$TOTAL_LARVES) * 100
head(Donnees)

#Calcul de la mortalité corrigée
# Valeurs de mortalité témoin
Temoin_MADEXPRO <- 24.3687
Temoin_EVO2 <- 18.5606

# Création d'une colonne de mortalité témoin en fonction du produit
Donnees$Mortalite_temoin <- ifelse(Donnees$PRODUIT == "MADEXPRO", Temoin_MADEXPRO,
                                   ifelse(Donnees$PRODUIT == "EVO2", Temoin_EVO2, NA))
# Calcul de la mortalité corrigée
Donnees$MORTALITE_CORRIGEE <- ((Donnees$MORTALITE - Donnees$Mortalite_temoin) /
                               (100 - Donnees$Mortalite_temoin)) * 100

EVO2 <- Donnees %>%
  filter(PRODUIT=="EVO2")

MADEXPRO <- Donnees %>%
  filter(PRODUIT=="MADEXPRO")

#Réalisation de l'ANCOVA ####
modele <- lm(MORTALITE_CORRIGEE ~ PRODUIT + TAILLE_GOUTTE + COUVERTURE_REEL + VOLUME_PERCU +
            PRODUIT:TAILLE_GOUTTE + PRODUIT:COUVERTURE_REEL + PRODUIT:VOLUME_PERCU + TAILLE_GOUTTE:COUVERTURE_REEL +
            TAILLE_GOUTTE:VOLUME_PERCU + COUVERTURE_REEL:VOLUME_PERCU,
            data = Donnees)

#Résumé du modèle
drop1(modele, test="F")

modele <- lm(MORTALITE_CORRIGEE ~ PRODUIT + TAILLE_GOUTTE + COUVERTURE_REEL + VOLUME_PERCU +
            PRODUIT:TAILLE_GOUTTE + PRODUIT:COUVERTURE_REEL + PRODUIT:VOLUME_PERCU,
            data = Donnees)

#Résumé du modèle
drop1(modele, test="F")
summary(modele)
#On obtient un R² = 0,3885 et un R² ajusté de 0,3644

#Comprendre les interactions du modèle ####
# Interaction entre produit et taille de goutte ####

#GGplot pour EVO2
ggplot(EVO2, aes(x=COUVERTURE_REEL, y=MORTALITE_CORRIGEE, color=TAILLE_GOUTTE)) +
  geom_point(size=1.5) +
  geom_smooth(method=lm, se=FALSE) +
  scale_color_manual(values = c("PETITE" = "olivedrab3", "MOYENNE" = "mediumslateblue", "GROSSE"="brown3")) +
  stat_poly_eq(aes(label = paste(..eq.label.., ..rr.label.., sep = "~~~")),
              formula = y ~ x,
              parse = TRUE,
              method = "lm",
              small.p = TRUE,
              size = 3)+
  labs(
    title = "Effet de la taille des impacts et du taux de couverture sur la mortalité - EVO2",
    x = "Couverture réelle (%)",
    y = "Mortalité corrigée (%)",
    color = "Taille de impacts"
  ) +
  scale_y_continuous(limits = c(0, 80)) +
  theme_minimal() +
  theme(
    plot.title = element_text(hjust = 0.5, size = 12, face = "bold"), # Centrer le titre
    axis.title = element_text(size = 11)
  )
)
```



```

#REGRESSION LINEAIRE + TUKEY
# Effet de la taille des gouttes sur la mortalité corrigée ###
#EVO2
EVO2$TAILLE_GOUTTE <- as.character(EVO2$TAILLE_GOUTTE)
LM_TAILLE <- lm(data=EVO2, MORTALITE_CORRIGEE ~ TAILLE_GOUTTE)
summary(LM_TAILLE)
#Tukey
TukeyEVO2 <- HSD.test (LM_TAILLE, "TAILLE_GOUTTE", alpha = 0.05, group = TRUE, main = NULL, unbalanced=FALSE,
                      console=FALSE)

TukeyEVO2
"
MORTALITE_CORRIGEE groups
MOYENNE      58.82967      a
PETITE       50.10673      b
GROSSE       30.34266      c
"

# Préparation des lettres pour le graphique
tukey_letters <- TukeyEVO2$groups %>%
  rownames_to_column("TAILLE_GOUTTE") %>%
  mutate(TAILLE_GOUTTE = as.character(TAILLE_GOUTTE))

# Positionnement des lettres sur le graphique
positions <- EVO2 %>%
  group_by(TAILLE_GOUTTE) %>%
  summarise(max_y = max(MORTALITE_CORRIGEE, na.rm = TRUE)) %>%
  ungroup() %>%
  mutate(TAILLE_GOUTTE = as.character(TAILLE_GOUTTE)) %>%
  left_join(tukey_letters, by = "TAILLE_GOUTTE")

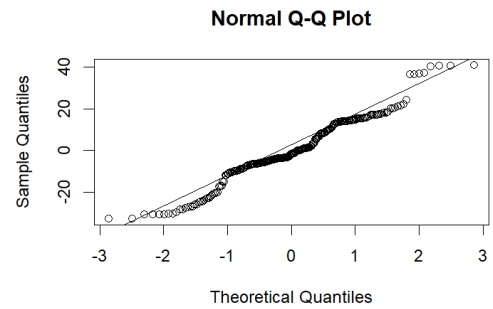
#graphique pour EVO2
ggplot(EVO2, aes(x = TAILLE_GOUTTE, y = MORTALITE_CORRIGEE)) +
  geom_boxplot(aes(fill = TAILLE_GOUTTE), width = 0.6) +
  geom_jitter(width = 0.2, alpha = 0.5) +
  geom_text(data = positions, aes(x = TAILLE_GOUTTE, y = max_y + 5, label = groups), size = 5) +
  scale_fill_manual(values = c("PETITE" = "olivedrab3", "MOYENNE" = "mediumslateblue", "GROSSE"="brown3")) +
  labs(
    title = "Effet de la taille des impacts sur la mortalité corrigée - EVO2",
    x = "Taille des impacts",
    y = "Mortalité corrigée (%)"
  ) +
  theme_minimal() +
  theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5, face = "bold"))

# Interactions entre produit et couverture réel
# Graphique avec ggplot
# Graphique avec équations et R²
ggplot(Donnees, aes(x = COUVERTURE_REEL, y = MORTALITE_CORRIGEE, color = PRODUIT)) +
  geom_point(size = 1.5, alpha = 0.8) + # Points avec transparence
  geom_smooth(method = "lm", se = FALSE, linetype = "solid", size = 1) + # Lignes de régression
  stat_poly_eq(
    aes(label = paste(..eq.label.., ..rr.label.., sep = "~~~")),
    formula = y ~ x,
    parse = TRUE,
    label.x = "right",
    label.y = "top", # pour positionner les équations
    size = 4
  ) +
  scale_color_manual(values = c("EVO2" = "slateblue1", "MADEXPRO" = "chartreuse3")) +
  labs(
    title = "Effet de la couverture réelle sur la mortalité corrigée",
    x = "Couverture réelle (%)",
    y = "Mortalité corrige (%)",
    color = "Produit"
  ) +
  theme_minimal(base_size = 14) +
  theme(
    plot.title = element_text(face = "bold", hjust = 0.5),
    legend.position = "top"
  )

```

```
### Pouvoir explicatif du modèle : R²
# R² du modèle
summary(modele) #Le R² ajustée = 0,3644

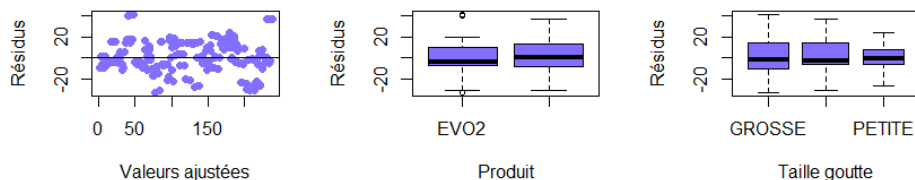
#VALIDATION DU MODELE
#Normalité des résidus
shapiro.test(residuals(modele))
qqnorm(residuals(modele)); qqline(residuals(modele))
#W = 0.9697, p-value = 5.799e-05 : W proche de 1 donc OK
```



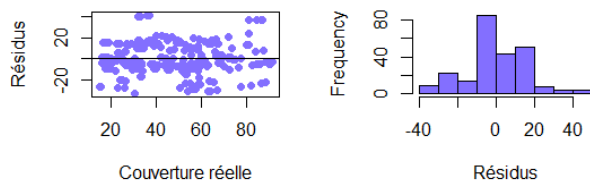
```
#HOMOGENEITE
# Extraire les données utilisées dans le modèle
donnees_modele <- na.omit(Donnees)
# Recalculer les résidus pour éviter les décalages
residus <- residuals(modele)
# Tracer avec les bonnes données
par(mfrow = c(2, 3))
plot(residus,
     col = "slateblue1",
     pch = 16,
     xlab = "Valeurs ajustées",
     ylab = "Résidus",
     main = "Résidus et valeurs ajustées")
abline(h = 0)
boxplot(residus ~ donnees_modele$PRODUIT,
        varwidth = TRUE, col = "slateblue1", ylab = "Résidus", xlab = "Produit")
boxplot(residus ~ donnees_modele$TAILLE_GOUTTE,
        varwidth = TRUE, col = "slateblue1", ylab = "Résidus", xlab = "Taille goutte")
plot(residus ~ donnees_modele$COUVERTURE_REEL,
     pch = 16, col = "slateblue1", ylab = "Résidus", xlab = "Couverture réelle")
abline(h = 0)
plot(residus ~ donnees_modele$QUANTITE_PA,
     pch = 16, col = "slateblue1", ylab = "Résidus", xlab = "Quantité PA")
abline(h = 0)

# Histogramme des résidus
hist(residus, col = "slateblue1", main = "Histogramme des résidus", xlab = "Résidus")
```

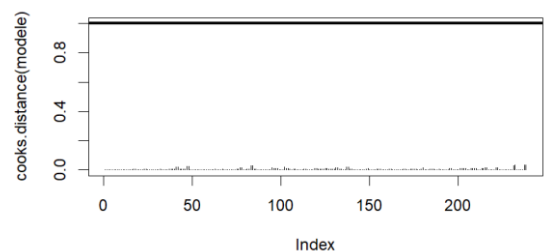
Résidus et valeurs ajustées



Histogramme des résidus



```
#INDEPENDENCE
par(mfrow = c(1, 1))
plot(cooks.distance(modele), type = "h", ylim = c(0, 1))
abline(h = 1, col = "black", lwd = 3)
```



Annexe III : Code R utilisé pour analyser l'effet de la température et de l'hygrométrie sur la pulvérisation

```
#Importation des données
donnees <- read_excel("C:/Users/camil/Documents/Camille Metayer GRCEA/3. Identification des leviers pour
                    améliorer la pulvé/Leviers climatiques/Resultats essais T et H.xlsx")
str("donnees")
colSums(is.na(donnees)) #Non, aucune valeur manquante

donnees$PULVERISATEUR <- factor(donnees$PULVERISATEUR)

#Etape 2 : MODELE DE REGRESSION LINEAIRE MULTIPLE ####
# Modèle global
mod <- lm(TAUX_DE_COUVERTURE ~ TEMPERATURE + HYGROMETRIE + HAUTEUR + PULVERISATEUR, data = donnees)
summary(mod)
#Modèle avec interactions
mod_inter <- lm(TAUX_DE_COUVERTURE ~ TEMPERATURE * HYGROMETRIE * HAUTEUR * PULVERISATEUR, data = donnees)
summary(mod_inter)
modele <- lm(TAUX_DE_COUVERTURE ~ TEMPERATURE +
             HYGROMETRIE +
             HAUTEUR +
             PULVERISATEUR +
             TEMPERATURE:HYGROMETRIE +
             TEMPERATURE:HAUTEUR +
             TEMPERATURE:PULVERISATEUR +
             HYGROMETRIE:PULVERISATEUR +
             HAUTEUR:PULVERISATEUR +
             HYGROMETRIE:HAUTEUR,
             data = donnees)
summary(modele)
modele <- lm(TAUX_DE_COUVERTURE ~ TEMPERATURE +
             HYGROMETRIE +
             HAUTEUR +
             PULVERISATEUR +
             TEMPERATURE:HYGROMETRIE +
             HYGROMETRIE:PULVERISATEUR +
             HAUTEUR:PULVERISATEUR +
             HYGROMETRIE:HAUTEUR,
             data = donnees)
summary(modele) #Voici le modèle que l'on retient

#Il est maintenant temps de valider le modèle :
# Résidus vs ajustés
plot(modele, which = 1)

# Q-Q plot
plot(modele, which = 2)

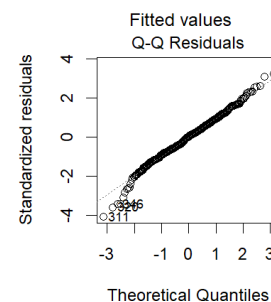
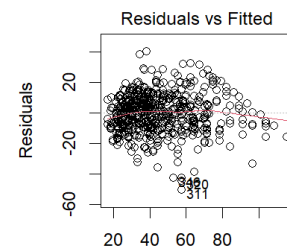
# Shapiro-Wilk pour la normalité
shapiro.test(residuals(modele)) #W=0,99075 et p-value=0,0016

# Homoscédasticité
library(car)
ncvTest(modele)
#Chisquare = 8.338183, Df = 1, p = 0.003882

#4 HAUTEURS sont représentées : 1 2 3 et 4m
# sélection des 4 hauteurs souhaitées
hauteurs_voulues <- c(1, 2, 3, 4)
dfH <- donnees %>%
  filter(HAUTEUR %in% hauteurs_voulues) %>%
  mutate(
    HAUTEUR = factor(HAUTEUR,
                     levels = hauteurs_voulues,
                     labels = c("1 m", "2 m", "3 m", "4 m"))))

# Graphe
seuil <- 55 # seuil de 50% de couverture

ggplot(dfH,
       aes(x = TEMPERATURE, y = TAUX_DE_COUVERTURE, color = HAUTEUR)) +
  geom_point(alpha = 0.6, size = 1.8) +
  geom_smooth(method = , formula = y ~ x, se = FALSE) +
  geom_hline(yintercept = seuil, color = "red", linetype = "dashed", linewidth = 0.7) +
  facet_wrap(~ PULVERISATEUR) +
  scale_color_manual(values = c("1 m" = "olivedrab3",
                                "2 m" = "mediumslateblue",
                                "3 m" = "brown3",
                                "4 m" = "lightblue")) +
  labs(title = "Effet de la température sur le taux de couverture",
       x = "Température (°C)",
       y = "Taux de couverture (%)",
       color = "Hauteur") +
  theme_minimal(base_size = 12)
```



Annexe IV : Code R utilisé pour réaliser des comparaisons : Exemple de la comparaison entre DepositScan et SmartSpray

```
# Lire les données
data <- read_excel("C:/Users/camil/Documents/Camille Metayer GRCETA/2. Outils diagnostic de la qualité
                  de pulvé/Comparaison DepositScan et applications/Comparaison DepositScan SmartSpray.xlsx")
# Afficher les noms de colonnes pour vérifier
names(data)
head(data)

# Stat descriptives
describe(data[, c("COUVERTURE_DEPOSITSCAN", "COUVERTURE_SMARTSPRAY")])

# COMPARAISON DEPOSITSCAN VS SMARTSPRAY
# Comparer les distributions
ggplot(data, aes(x = COUVERTURE_DEPOSITSCAN, y = COUVERTURE_SMARTSPRAY)) +
  geom_point() +
  geom_abline(slope = 1, intercept = 0, linetype = "dashed", color = "brown3") +
  geom_smooth(method = "lm", se = TRUE, color = "olivedrab3") +
  labs(title = "DepositScan vs SmartSpray : Taux de couverture",
       x = "DepositScan",
       y = "SmartSpray") +
  theme_minimal()
# ROUGE = ligne d'égalité parfaite. Si un point est sur la ligne, les deux méthodes ont le même résultat.
# BLEUE = montre si la relation est proche de linéaire.

# Calcul des différences
data <- data %>%
  mutate(Diff = COUVERTURE_DEPOSITSCAN - COUVERTURE_SMARTSPRAY)

# Test de normalité sur les différences
shapiro <- shapiro.test(data$Diff)
print(shapiro)
# W = 0.91682 ; p-value = 0,005405 significatif

# Test de Wilcoxon apparié (non paramétrique)
wilcox_result <- wilcox.test(data$COUVERTURE_DEPOSITSCAN,
                             data$COUVERTURE_SMARTSPRAY,
                             paired = TRUE)

print(wilcox_result)
# p-value = 0,01175 La p-value est inférieur à 5% donc il existe une différence statistiquement significative

median(data$Diff)
# median(data$diff) = -0,62. SmartSpray donne en moyenne des taux de couverture supérieur à DepositScan de 0,62%
# La différence n'est pas importante, nous allons pouvoir utiliser l'application SmartSpray!
```

Annexe V : Code R utilisé pour analyser l'étalement des impacts dans le temps

```
# Lire les données
data <- read_excel("C:/Users/camil/Documents/Camille Metayer GRCETA/2. Outils diagnostic de la qualité de pulvé/
  Etalement dans le temps/Etalement des gouttes dans le temps.xlsx")
data$PAPIER <- as.factor(data$PAPIER)
names(data)
head(data)
str(data)

# Régression linéaire pour tous les papiers
modele <- lm(COVERTURE ~ TEMPS, data = data)
coefs <- coef(modele)
equation <- paste0("y = ", round(coefs[2], 2), "x + ", round(coefs[1], 2))

# Graphique : tous papiers confondus avec l'équation affichée
ggplot(data, aes(x = TEMPS, y = COVERTURE)) +
  geom_point(color = "black") +
  geom_smooth(method = "lm", color = "olivedrab3", se = FALSE) +
  annotate("text",
    x = max(data$TEMPS)*0.6,
    y = min(data$COVERTURE),
    label = equation,
    hjust = 0,
    size = 5,
    color = "black") +
  labs(
    title = "Evolution du taux de couverture dans le temps après pulvérisation",
    x = "Temps (s)",
    y = "Taux de couverture (%)" ) +
  theme_minimal(base_size = 14) +
  theme(plot.title = element_text(face = "bold", hjust = 0.5))

# Power test pour vérifier si le nombre de papier différent est suffisant
# Paramètres pour l'ANOVA
k <- length(unique(data$PAPIER)) # nombre de papiers différents
n_total <- nrow(data) # taille totale de l'échantillon
n_par_groupe <- n_total / k # taille moyenne par groupe

# Choisir un effet f (taille de l'effet attendue) - à adapter :
# f = 0.1 (petit), 0.25 (moyen), 0.4 (grand)
f <- 0.25 # ici, effet moyen supposé

# Test de puissance
pwr_result <- pwr.anova.test(k = k, n = n_par_groupe, f = f, sig.level = 0.05)
print(pwr_result)
"|
k = 10
n = 18.7
f = 0.25
sig.level = 0.05
power = 0.6216536
""
```

		Diplôme : Ingénieur de l'Institut Agro Rennes-Angers Spécialité : Horticulture Spécialisation / option : Protection des Plantes et de l'Environnement en Horticulture Enseignant référent : Vanessa Soufflet-Freslon	
Auteur(s) : Camille Metayer Date de naissance* : 29/01/2002		Organisme d'accueil : Inrae d'Avignon, GRCETA de Basse Durance, Station d'expérimentation la Pugère Adresse : DOM Saint Paul - Site Agropa 228 rte AERD, 84140 Montfavet	
Nb pages : 32 Annexe(s) : 5		Maître de stage : Myriam Siegwart, Sophie Hardy, Carine Mestre	
Année de soutenance : 2025			
Titre : Optimisation des méthodes de pulvérisation du virus de la granulose contre le carpocapse des pommes (<i>Cydia pomonella</i> L.) Title: Optimization of Spray Methods for the Granulosis Virus against Codling Moth (<i>Cydia pomonella</i> L.)			
Résumé : La pomme, fruit le plus cultivé en France, est fortement touchée par le carpocapse (<i>Cydia pomonella</i> L.). Sa gestion repose encore largement sur les produits phytosanitaires, mais les objectifs d'Ecophyto 2030 incitent à explorer des alternatives comme le biocontrôle. Parmi elles, le virus de la granulose a montré un potentiel intéressant. Des travaux récents (Delpech, 2024) soulignent que la qualité de la pulvérisation conditionne son efficacité. Ce travail a visé à optimiser l'application du virus de la granulose par l'amélioration de la pulvérisation. Les résultats indiquent qu'une efficacité correcte ($\approx 60\%$ de mortalité) est atteinte lorsque la couverture dépasse 55% avec des gouttelettes de petite à moyenne taille. Les conditions climatiques influencent fortement ces performances : au-delà de $22-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ et avec une hygrométrie $< 70\%$, la couverture chute sous l'effet de l'évaporation et de la dérive. L'ajustement précis des pulvérisateurs (volume, pression, vitesse, débit) et l'usage d'outils de diagnostic accessibles comme les papiers hydro sensibles et l'application SmartSpray apparaissent essentiels pour décrire et améliorer la pulvérisation.			
Abstract: Apple, the most widely grown fruit in France, is heavily affected by codling moth (<i>Cydia pomonella</i> L.). Its management still largely relies on plant protection products, but the objectives of Ecophyto 2030 encourage the exploration of alternatives such as biocontrol. Among them, the granulosis virus has shown promising potential. Recent studies (Delpech, 2024) highlight that spray quality, defined by coverage rate and droplet size, is a key factor for its effectiveness. This work aimed to optimize the application of the granulosis virus by improving spray quality. Results show that a satisfactory efficacy ($\approx 60\%$ mortality) is achieved when coverage exceeds 55% with small to medium-sized droplets. Climatic conditions strongly affect performance: above $22-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ and with relative humidity below 70%, coverage decreases significantly due to evaporation and drift. Precise sprayer adjustments (volume, pressure, speed, flow rate) and the use of accessible diagnostic tools such as water-sensitive papers or the SmartSpray application are essential to describe and improve spraying. However, mortality remains partial and does not ensure complete pest control. Improvements may come from adding adjuvants, adapting sprayers to contact products, and strengthening growers' technical knowledge. This study underlines the complexity of biocontrol and the need for fine-tuned practices to reduce chemical inputs in orchards.			
Mots-clés : Carpocapse, Pulvérisation, Taux de couverture, Taille des impacts, Conditions climatiques, Diagnostic			
Key Words: Codling moth, Spraying, Coverage rate, Droplet size, Climatic conditions, Diagnosis			