

**2024-2025**

Master 1 Biologie Végétale

# **LUTTE CONTRE LA TAVELURE DU POMMIER**

***Les stimulateurs de défenses des plantes  
combinées avec une carence azotée***

**PAULINE BENOT**



**APPRENTISSAGE REALISE A L'UNITE  
EXPERIMENTALE HORTICOLE DE L'INRAE**

**PERIODE DU 14 AVRIL 2025 AU 2 SEPTEMBRE 2025**

Encadrante : Frédérique DIDELOT

Tuteur académique : Thomas GUILLEMETTE

## **Jury**

Philippe SIMIER : président

Jérémy CLOTAULT : auditeur

Frédérique DIDELOT : membre

Thomas GUILLEMETTE : membre



**INRAE**

Soutenue publiquement le 2 juillet 2025

<http://dune.univ-angers.fr>

### PARTIE RESERVEE A L'ETUDIANT(E)

Courriel: pauline.benot@etud.univ-angers.fr N° étudiant : 22008809

Je soussigné(e) (nom prénom) Bénot Pauline

certifie être l'auteur du document intitulé Lutte contre la tavelure, les stimulateurs de défenses  
des plantes combinés à une carence en azote

préparé sous la direction de Didelot Frédérique

et soutenu le 2 juillet 2025

Je certifie la conformité de la version électronique déposée avec l'exemplaire imprimé remis au jury et certifie disposer de tous les droits sur les documents figurant dans mon mémoire ou, à défaut, disposer de toutes les autorisations nécessaires auprès des ayants droits. Agissant en l'absence de toute contrainte et sachant que je dispose à tout moment d'un droit de retrait de mes travaux :

- ☒ J'autorise la diffusion du document en texte intégral par l'Université d'Angers :
- |            |   |             |  |
|------------|---|-------------|--|
| en accès : | <input checked="" type="checkbox"/> tout public | à compter : | <input checked="" type="checkbox"/> de la date de soutenance |
|            | <input type="checkbox"/> réservé UA             |             | <input type="checkbox"/> du .....                            |
- ☐ Je n'autorise pas la diffusion du document.

Le : 24 juin 2025 À : ANGERS Signature : 

### PARTIE RESERVEE AU (A LA) MAITRE DE STAGE

Nom du (de la) maître de stage : .....

- ☐ J'autorise la diffusion du document en texte intégral par l'Université d'Angers :
- |            |                                      |             |   |
|------------|--------------------------------------|-------------|---|
| en accès : | <input type="checkbox"/> tout public | à compter : | <input type="checkbox"/> de la date de soutenance |
|            | <input type="checkbox"/> réservé UA  |             | <input type="checkbox"/> du .....                 |
- ☐ Je n'autorise pas la diffusion du document.

Le : ..... À : ..... Signature : 

### PARTIE RESERVEE AU (A LA) PRESIDENT(E) DE JURY

Nom du (de la) président(e) de jury : .....

- ☐ J'autorise la diffusion du document en texte intégral par l'Université d'Angers :
- |   |            |                                      |             |   |
|---|------------|--------------------------------------|-------------|---|
| <input type="checkbox"/> sans corrections | en accès : | <input type="checkbox"/> tout public | à compter : | <input type="checkbox"/> de la date de soutenance |
| <input type="checkbox"/> avec corrections |            | <input type="checkbox"/> réservé UA  |             | <input type="checkbox"/> du .....                 |
- ☐ Je n'autorise pas la diffusion du document.

Le : ..... À : ..... Signature : 

## ENGAGEMENT DE NON PLAGIAT

Je, soussignée Pauline BENOT déclare être pleinement consciente que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publiée sur toutes formes de support, numérique ou papier, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée. En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour écrire ce mémoire.

signé par l'étudiante le 18 / 06 / 2025



## REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier la Faculté des Sciences de l'Université d'Angers, et tout particulièrement Thomas GUILLEMETTE, tuteur d'alternance de l'université, de m'avoir suivie tout au long de cette période d'alternance.

Je pense également à Arnaud LEMARQUAND, Ingénieur agronome et directeur d'unité, qui a cru en mon potentiel et m'a accueillie au sein de l'Unité Horticole de l'INRAE.

A ce titre, je souhaiterais remercier tout particulièrement Frédérique DIDELOT, Ingénieure agronome et directrice adjointe de l'unité, de m'avoir épaulée et conseillée dans le domaine de la protection des vergers.

Je tiens également à remercier toute l'équipe de l'unité, Sophie GRIMAUD, chef d'équipe, Jocelyn MAQUAIRE, responsable qualité, Ludovic BERVAS, responsable du désherbage, Christophe BROUARD, responsable des traitements du site, Amélie GUEMAS, responsable de l'irrigation, Anne-Françoise AMELINE, technicienne de recherche, Maryline CHOQUET, technicienne de recherche. Ils m'ont également accompagné tout au long de ma période au sein de mon alternance et m'ont fait part de leurs connaissances dans le domaine de l'arboriculture. Je remercie toute l'équipe de la Rétuzière avec qui j'ai eu l'occasion de travailler occasionnellement.

Je remercie également Sylviane HAMELINE, gestionnaire de l'unité.

Et pour finir, je tiens à remercier Frédérique DIDELOT, Thomas GUILLEMETTE d'avoir relu et corrigé ce rapport.

## GLOSSAIRE

Ascomycète : Champignon dont les spores sont contenues dans des asques, les ascomycètes forment une sous-classe, de près de 15 000 espèces (larousse.fr)

Ascospore : Spores issues de la reproduction sexuée chez les Ascomycètes, se formant à l'intérieur d'un asque qui est lui-même produit dans un périthèce (Alexandre, 2023)

Ascocarpe : Organe dans ou sur lequel se forment les asques (Okoro et al, 2024)

Asque : Cellule en forme de « sac » dans laquelle généralement 8 ascospores sont formées et qui caractérise les Ascomycètes (Alexandre, 2023)

Inoculum : Introduction des micro-organismes qui vont faire leur développement dans l'organisme introduit à l'origine d'une contamination (larousse.fr)

Périthèce : Fructification, en forme de bouteille, des champignons ascomycètes renfermant les asques (larousse.fr)

Saprophyte : organisme qui tire les substances nécessaires à partir de matières en décomposition (Alexandre, 2023)

Spore : Organe de dispersion et de multiplication (larousse.fr)

Stimulateur de défense des plantes : Substances ou produits, naturels ou non, capables d'induire (ou de préparer à l'induction), chez les plantes traitées, des réponses de défense conduisant à une meilleure résistance de la plante face à des stress biotiques (Masson, et al, 2015)

## LISTE DES ABREVIATIONS

ANOVA : Analyse de variance

ETI : Effector Triggered Immunity

HR : Réaction d'Hypersensibilité

IFT : Indice de Fréquence de Traitement

INRAE : Institut Nationale de la Recherche dans l'Agriculture, Alimentaire et l'Environnement

IRHS : Institut de Recherche de l'Horticulture et Semences, unité mixte de recherche (UMR) de proximité

NLR : Nucleotide binding Leucine rich Repeat

OAD : Outils d'Aides à la Décision

PFI : Production Fruitière Intégrée

PFI\_al : Production Fruitière Intégrée allégée

PTI : PAMP Triggered Immunity

PRR : Pathogen Associated Molecular Pattern

QTL : Quantitative Trait Loci

RIM : Relative Infection Measure

SAR : Résistance Systémique Acquise

SAU : Surface Agricole Utile

SDP : Stimulateur de Défenses des Plantes

UEH : Unité Expérimentale Horticole

## SOMMAIRE

Engagement de non plagiat.....	
Remerciements .....	
Glossaire .....	
Liste des abréviations.....	
Sommaire.....	
Table des Illustrations .....	
Table des Tableaux .....	
Table des Annexes .....	
Introduction .....	1
A.Établissement d'accueil : Unité Expérimentale Horticole.....	1
B.Contexte d'étude .....	3
C.Objectif de la période :.....	15
Matériels et Méthodes .....	17
A.Pathogène et matériel végétal .....	17
B.Protocole de l'essai .....	19
C.Méthode d'analyse statistique.....	29
Résultats .....	31
A.Impact du Soriale dans la protection du pommier contre la tavelure en juin 2024.....	31
B.Impact de l'azote sur la concentration en chlorophylle et flavonoïde sur feuilles en 2025 .....	33
Discussion .....	35
Conclusion .....	39
Bibliographie .....	41
Sitographie : .....	43
Table des matières.....	
Abstract .....	
Résumé .....	

## TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Organigramme de l'UEH - document interne.....	2
Figure 2 : Répartition de la production française de fruit en 2021 - Agreste, 2021 .	4
Figure 3 : Cycle biologique de la tavelure - Okoro et al, 2024.....	6
Figure 4 : Taches d'aspect velouté sur la face supérieur de la feuilles, taches provoquées par <i>Venturia inaequalis</i> – PB - 2023.....	6
Figure 5 : Taches de tavelure sur fruit - PB - 2023.....	6
Figure 6 : Évènements de mise en place des réponses de défense de la plante – Faessel et al, 2016 .....	10
Figure 8 : Protocole de traitement pour 2024 .....	20
Figure 7 : Dispositif expérimental de la parcelle avec les différentes modalités : les micro-parcelles marquées d'une croix sont hors essai .....	20
Figure 9 : Synthèse des traitements pour la saison 2024 avec les différents risques et dispersion des spores, les carrés rouges correspondent aux risques de contamination renvoyé par Rimpro .....	22
Figure 10 : Graphique des différents risques renvoyé par Rimpro en 2024 avec la couverture des traitements (courbe grisée) Les flèches bleues correspondent aux placements des traitements de Soriale réalisé en 2024 – Valentin Desmet 2024...	24
Figure 11 : Schéma des seuils de prise de décision en fonction des RIM .....	24
Figure 12 : Distributeur à engrais utilisé pour les épandages - Jocelyn Maquaire - 2020.....	26
Figure 13 : Schéma du protocole de prise de mesure sur les feuilles en fonction des semaines.....	28
Figure 14 : Graphique de l'incidence moyenne des feuilles tavelées en fonction des modalités en juin 2024.....	32
Figure 15 : Graphique de l'incidence moyenne des fruits tavelées en fonction des modalités en juin 2024.....	32
Figure 16 : Graphique de la concentration moyenne en chlorophylle des F0 et F1 en fonction des modalités Azote et de traitement tavelure en 2025 .....	34
Figure 17 : Graphique des différents risques prédits par le logiciel Rimpro et les couvertures des fongicides réalisés en 2025, le protocole de traitement est légèrement différent, les RIM>800 ont été couvert .....	I
Figure 18 : Graphique du ratio NBI des F0 et F1 en 2025, comme la normalité des résidus n'est pas vérifié malgré les transformations, aucune classe statistique n'est déterminé (réaliser un test de Kruskal- Wallis .....	III
Figure 19 : : Graphique de l'incidence moyenne des feuilles tavelées selon les blocs en 2024 .....	IV
Figure 20 : Graphique du pourcentage de fruits tavelés selon les modalités répartis selon les blocs en 2024 .....	IV
Figure 21 : Graphique de la concentration moyenne en chlorophylle dans les F0 et F1 en 2025 .....	V
Figure 22 : : Graphique du NBI des F0 et F1 en fonction des modalités au cours du temps.....	V



TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Les traitements tavelure et SDP qui ont été réalisés en 2024 ..... 22

Tableau 2 : Apport d'engrais réalisé en 2024..... 26

Tableau 3 : Apport d'engrais réalisé en 2025..... 26

Tableau 4 : Les traitements tavelure et SDP qui ont été réalisés en 2025 .....I

Tableau 5 : Résultats bruts des observations sur feuilles en 2024, seul l'incidence a été pris en compte pour les statistiques.....II

Tableau 6 : Résultats bruts des observations sur fruits en 2024, seule l'incidence a été pris en compte pour les statistiques.....II

Tableau 7 : Résultats bruts des concentrations en chlorophylle de F0 et F1 .....II

Tableau 8 : : Données brutes récoltées pour le ratio NBI (Chlorophylle/Flavonoïdes) ..... III

## TABLE DES ANNEXES

ANNEXE 1	Présentation des risques évaluées par Rimpro avec les différentes couvertures des traitement tavelure .....	I
ANNEXE 2	Données brutes pour les analyses statistiques .....	II
ANNEXE 3	Données brutes pour le NBI des F0 et F1 et la représentation graphique des données brutes.....	III
ANNEXE 4	Graphique des incidences moyennes des feuilles tavelées et fruits tavelés répartis selon les blocs en 2024.....	IV
ANNEXE 5	: Résultats statistiques de la concentration en Chlorophylle dans les feuilles F0 et F1 .....	V

## INTRODUCTION

### A. ÉTABLISSEMENT D'ACCUEIL : UNITE EXPERIMENTALE HORTICOLE

L'Unité Expérimentale Horticole (UEH) est une unité au sein de l'INRAE (Institut Nationale de la Recherche dans l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement). Son objectif est de proposer et de réaliser des dispositifs expérimentaux permettant d'étudier le comportement des plantes pérennes (plantes fruitières ou plantes d'ornements). En plus des expérimentations, cette unité est productrice de pommes en vente directe. Ces expérimentations sont mises en place en travaillant sur 3 leviers :

- levier génétique : création de variétés avec de faibles intrants et un rôle de sauvegarde des variétés dans les vergers avec des parcelles de « collection »,
- levier technologique : le déploiement de biocontrôle et la lutte biologique en mettant en place des essais étudiant les effets des stimulateurs de défenses des plantes (SDP), la stratégie de biocontrôle proche des luttés autocides et la lutte biologique contre le carpocapse à l'aide d'un parasitoïde,
- levier agronomique : combinaison des deux autres leviers et étude des plantes de services.

Cette unité travaille en particulier tout au long de l'année sur différents projets avec différents partenaires (l'IRHS principalement) : CapZéroPhyto (étude de différents leviers sur l'immunité du pommier contre la tavelure), Gemfruit (étude génétique sur la résistance aux maladies en fonction des croisements de variétés), FruitRescue (étude du comportement de pommiers issus de croisement de variétés sauvages face au réchauffement climatique), Suzocarpo (étude de l'introduction d'un parasitoïde pour lutter contre le carpocapse).

Lors de cette période, j'ai eu l'occasion de participer à tous ces différents projets en assistant à des réunions techniques, en participant aux différentes notations et observations, et également en participant à l'élaboration d'un protocole pour un prototype qui sera mis en place dès mars 2026.

L'UEH est composée de 17 agents titulaires organisés en 2 équipes de travail, basée sur les sites de Beaucouzé-Bois l'Abbé et de Champigné-La Rétuzière. Elles fonctionnent au quotidien de manière autonome et bénéficient de locaux et de matériels agricoles distincts. La figure 1 présente l'organigramme de l'entreprise.

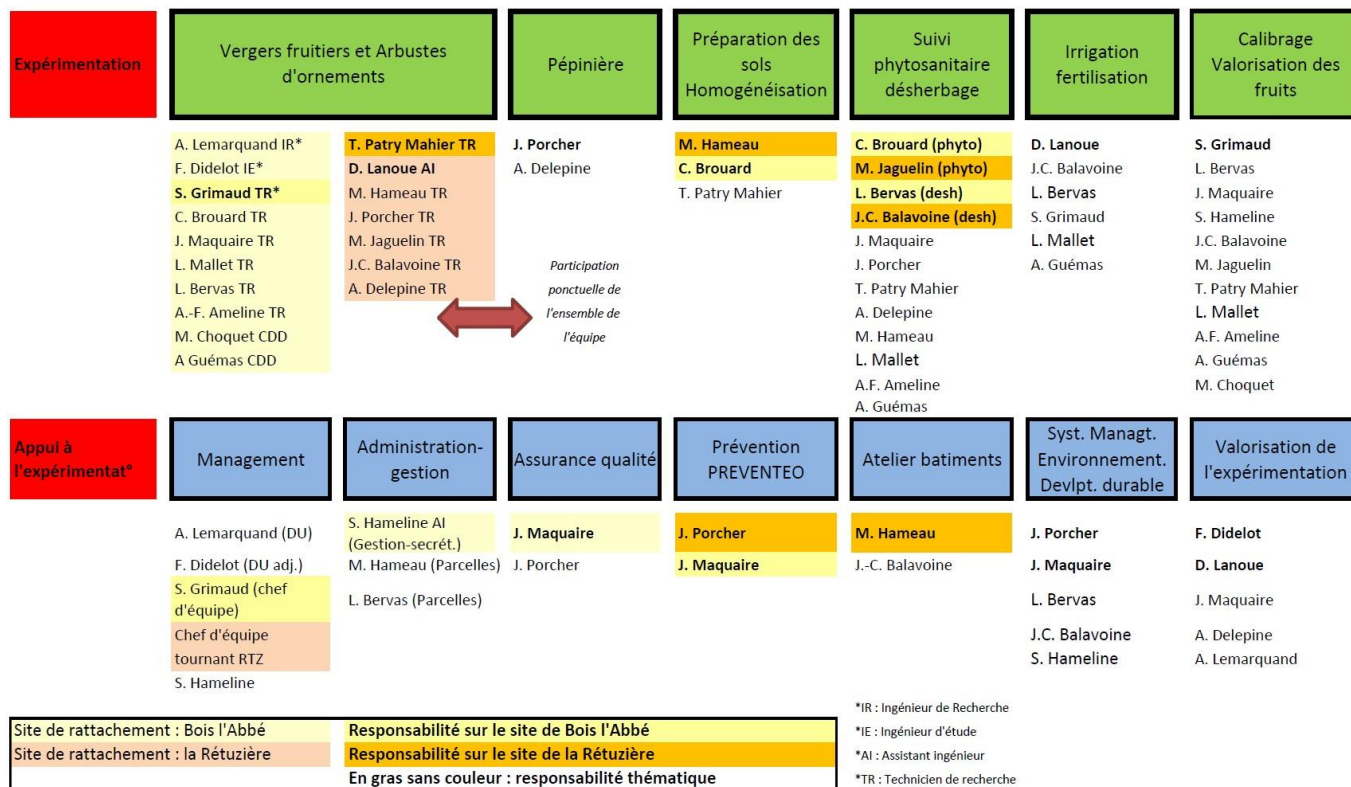


Figure 1 : Organigramme de l'UEH - document interne

## **B. CONTEXTE D'ETUDE**

### **1. Production de la pomme en France :**

En France, la pomme est l'un des fruits le plus consommé. Selon la figure 2, la pomme est le fruit le plus produit en France, cette production représente 54% de la production fruitière (Agreste.fr, 2021). Avec une production de 1,4 millions de tonnes en 2022-2023, la France fait partie des plus gros producteurs au niveau européen (Vergers écoresponsables, 2024). La région Pays de la Loire est la quatrième région de France pour la production de pomme de table, 16% de la production française en 2020 soit 217 000 tonnes de pommes. Cette production de pomme de table est essentiellement localisée dans le Maine-et-Loire (Chambre d'agriculture pays de la Loire, 2022). Les principales variétés de pommes cultivées sont Granny, Gala, Pink Lady, Jonagold, Golden et Elstar (Agriculture.gouv.fr, 2021).

Comparée aux autres fruits, la pomme est celle qui nécessite le plus de traitements. En 2018, la pomme conventionnelle compte en moyenne 31,5 IFT (Indice de Fréquence de Traitements) et la pomme bio compte 18,5 IFT (Agreste, 2021). Les traitements fongicides représentent la majeure partie de la protection des pommes. Le contrôle de la tavelure du pommier est la raison principale de l'utilisation de fongicides puisque 15 à 20 traitements par an sont réalisés pour le contrôle de ce champignon. Cette maladie provoque une baisse de rendement, elle rend inapte à la commercialisation des fruits même s'ils sont consommables (exigence 0 défaut de la distribution). Ainsi la lutte contre la tavelure du pommier représente un enjeu économique et environnemental majeur pour la production de fruits en France (Lucas, 2019).

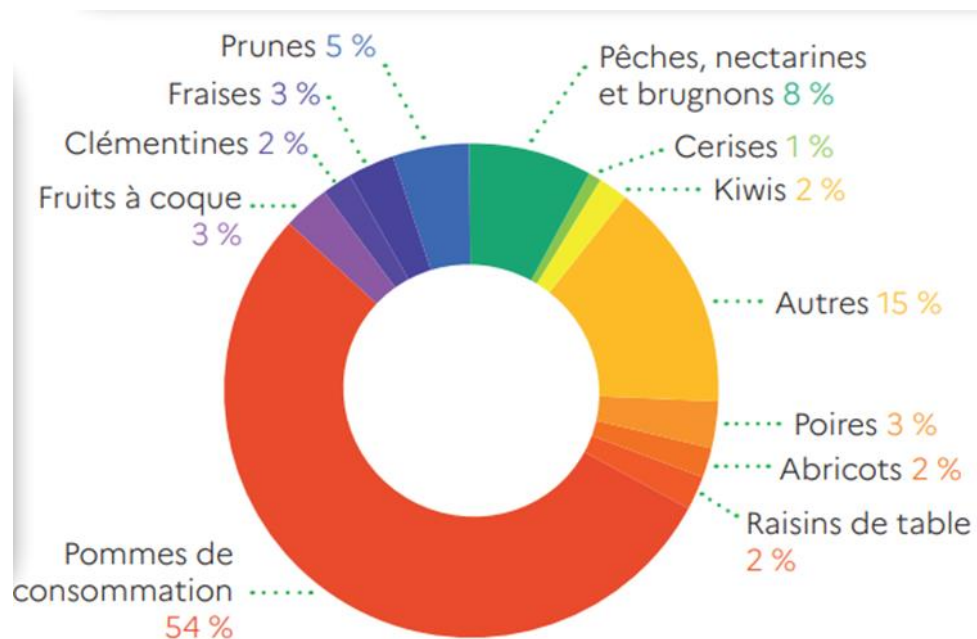


Figure 2 : Répartition de la production française de fruits en 2021 - Agreste, 2021

## 2. *Venturia inaequalis* : pathogène de la tavelure du pommier

### a. Cycle biologique

Le genre *Venturia* fait partie de l'embranchement des Ascomycètes et de la classe des Dothideomycètes. La tavelure du pommier est causée par le mycète hémibiotrophe *Venturia inaequalis* causant des dégâts importants dans la production de la pomme puisque la tavelure peut provoquer une diminution de 70% de la production. Cette baisse de rendement est dû notamment aux fruits infectés par la tavelure et sont donc devenus non commercialisables (Alexandre, 2023).

Son cycle biologique comprend deux phases de développement. La première correspond à la phase saprophytique, qui débute à l'automne et se termine au printemps. Lors de cette phase, ce champignon va réaliser la reproduction sexuée dans les feuilles mortes tombées au sol. La deuxième phase s'étend du printemps à l'automne. Dans cette phase, le champignon parasite les feuilles et les fruits. La figure 3 représente le cycle de développement de la tavelure (Alexandre, 2023).

Les spores sexuées (ascospores), renfermées dans des périthèces (ascocarpe), correspondent à l'inoculum primaire. Une fois arrivée à maturité, au printemps, les spores sont projetées vers les jeunes organes de la plante grâce à la pluie et au vent. Une fois les ascospores germées, les filaments germinatifs pénètrent sous la cuticule de la feuille et le mycélium se développe sous l'épiderme. Le mycélium bien développé va sporuler et les premiers symptômes de la maladie vont apparaître. Les nouvelles spores formées vont être dispersées par la pluie et le vent et vont de nouveau infecter la plante. Ce phénomène est l'inoculum secondaire. (Benejam, 2021)

### b. Symptômes causés sur le pommier par *Venturia inaequalis*

*V. inaequalis* va s'attaquer à deux organes du pommier : les feuilles et les fruits. Sur feuilles, des taches vert clair puis brunes par la suite sont observables. Ces taches sont rondes aux contours bien définies et à l'aspect velouté. Les parties infectées vont se dessécher, cela engendre une perte de la capacité photosynthétique (figure 4). Sur fruit, lors de leur formation, les organes les plus petits vont chuter. Lorsque les fruits sont formés, des taches noires sont visibles, une subérification des tissus atteints est une marque d'infection de la tavelure (figure 5). Malgré ces symptômes sur fruits, les chairs de la pomme ne sont pas atteintes (Boutry et al, 2023).



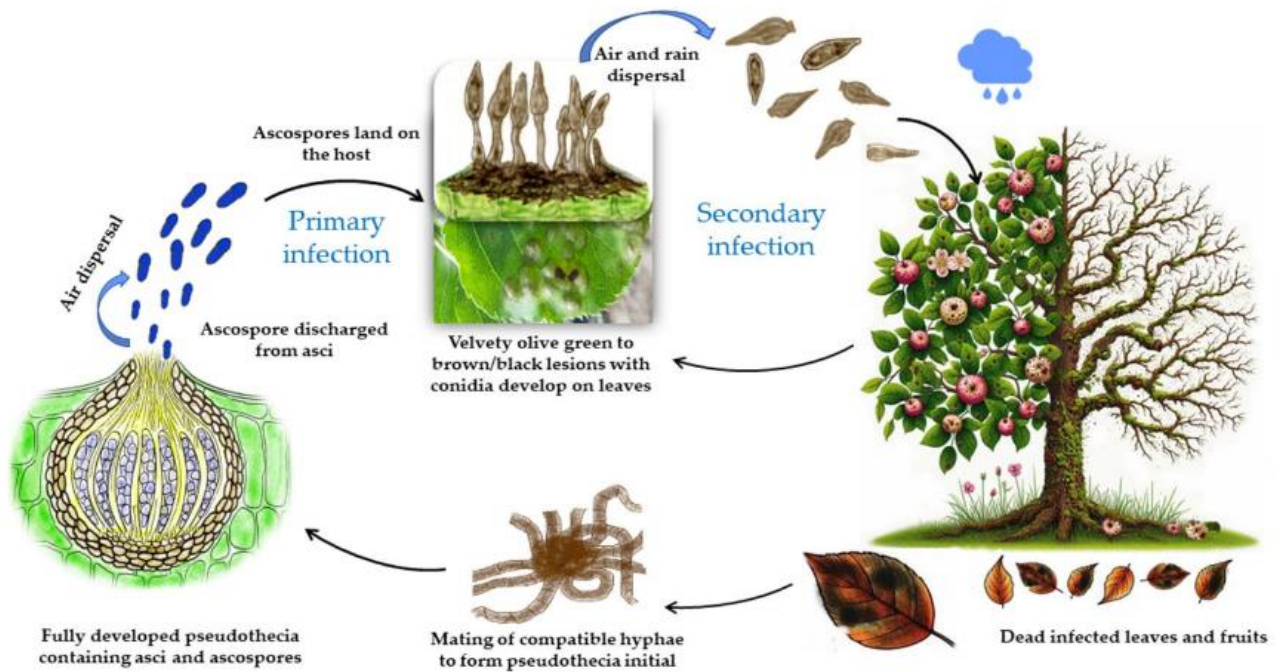


Figure 3 : Cycle biologique de la tavelure - Okoro et al, 2024



Figure 4 : Taches d'aspect velouté sur la face supérieure de la feuilles, taches provoquées par *Venturia inaequalis* – PB - 2023

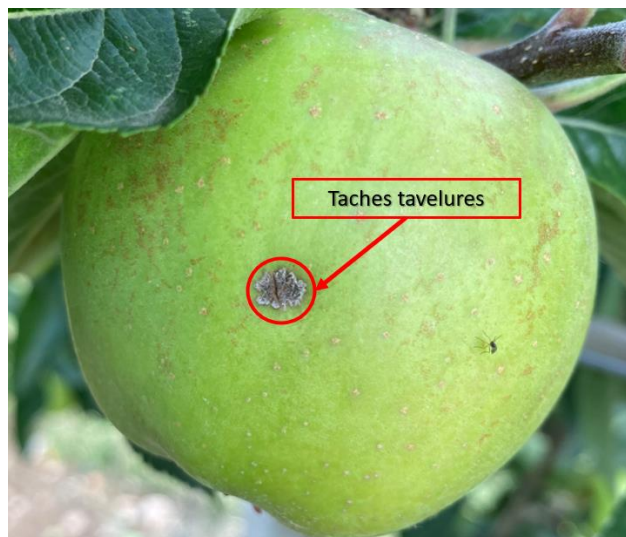


Figure 5 : Taches de tavelure sur fruit - PB - 2023



### 3. Méthode de lutte contre *Venturia inaequalis*

#### a. Prophylaxie

Les mesures prophylactiques vont permettre de réduire l'inoculum primaire afin d'éviter une éventuelle vague d'infection. Pour se faire, l'élimination de la litière de feuilles avant l'hiver permet de retirer les périthèces présents dans les feuilles mortes (Brun, Didelot et Parisi, 2007). Cette litière peut être broyée ou enfouie dans le sol, cette technique permet de limiter l'inoculum primaire (Brun, Didelot et Parisi, 2007).

#### b. Lutte génétique

L'espèce du pommier (*Malus x domestica*) comporte une très grande diversité génétique, mais seulement une dizaine de variétés représente les plus consommées en France (Brun et al, 2007). L'avènement de la biologie moléculaire et les approches de la cartographie génétique ont permis d'acquérir des connaissances sur le déterminisme génétique des résistances du pommier. 18 gènes majeurs et 11 QTLs (Quantitative Trait Loci) ont été mis en évidence (Benejam, 2021). Parmi ces gènes majeurs, le gène Rvi6 est le premier gène qui a été cloné. Il a été détecté dans la variété *Malus floribunda* (Benejam, 2021). 4 QTL de résistances partielles font l'objet d'une étude dans le cadre du projet CapZéroPhyto afin de favoriser la durabilité de la résistance (Rapport intermédiaire CapZéroPhyto, 2021-2025).

#### c. Lutte chimique

La lutte chimique est encore à ce jour la plus efficace (Alexandre, 2023). Cependant, l'utilisation répétée des fongicides risque d'entraîner une baisse d'efficacité et sélectionner les souches les plus résistantes (Durel et al, 2007). Il est important de varier les modes d'action des fongicides pour limiter l'apparition de cette résistance. Afin de réaliser au mieux le placement des traitements, les arboriculteurs peuvent s'aider d'Outils d'Aides à la Décision (OAD) afin de couvrir les risques les plus importants et pour avoir une utilisation raisonnée des fongicides (Alexandre, 2023). Le Vitisan® est un exemple de fongicide contre la tavelure, à base d'hydrogénocarbonate de potassium, il va endommager les parois du champignon qui va entraîner l'éclatement et le dessèchement des hyphes et spores en contact (Andermatt.fr, 2024).



#### d. Lutte biologique

Concernant la lutte biologique, des études ont permis d'identifier des organismes antagonistes de *V.inaequalis*. Ils sont capables de réduire de 95 à 99% la production d'ascospores (Carisse et al, 2024). Malheureusement, ces organismes ne possèdent pas d'homologation en France. Cependant, la bactérie *Bacillus subtilis* (Serenade®) est utilisée dans la lutte contre la tavelure. Elle permet de réduire le taux d'incidence sur le fruit près de 50% (Alexandre, 2023).

#### e. Stimulateurs des défenses des plantes

##### i. Mécanismes généraux

Un stimulateur des défenses des plantes est une substance qui, après application sur une plante, lui permet d'enclencher ses mécanismes naturels de défense et ainsi mettre la plante en état de résistance vis-à-vis d'un pathogène (Masson et al, 2015). L'origine de ces substances est diverse. Elles peuvent être issues du vivant comme par exemple extrait d'algue avec la laminarine (Benhamou et al, 2012), ou encore d'extrait de végétaux, de substances de synthèse (acibenzolar-S-méthyl pour le Bion® ou encore le phosphonate de potassium pour le Soriale®) ou substances minérales (poudres de roche) (Masson et al, 2015). Les différents SDP existants sont classés selon leur mode d'action et non par leur nature (Masson et Moigny, 2015). Le but des SDP est d'agir à travers la mise en place des défenses non spécifiques face à un stress biotique. Par la suite, l'activation directe des mécanismes de défense de la plante se fait et donne lieu à une réponse rapide. Dans certains cas, l'induction peut avoir comme conséquence une activation ultérieure plus rapide et plus intense des mécanismes de défenses (Faessel et al, 2016). La figure 6 présente les différentes étapes de mises en place des défenses à l'aide d'un SDP.

##### ii. Le phosphonate de potassium (KHP) :

Le phosphonate de potassium, molécule active du Soriale®, est connu pour induire les défenses de la plante et utilisé pour ses effets biocides sur les oomycètes du genre *Phyophthora* (Alexandre, 2024). L'efficacité du KHP a été récemment démontrée à plusieurs niveaux sur le pommier. Après l'application de KHP (Soriale) en traitement foliaire, des effets de protection partiels ont été démontrés avec la tavelure (Alexandre, 2024).

#### 4. Les stratégies de défenses des végétaux

Tout au long de l'évolution, toutes les plantes ont élaboré un véritable « système immunitaire » capable de se défendre face à une attaque d'un pathogène (Benhamou et al, 2012).

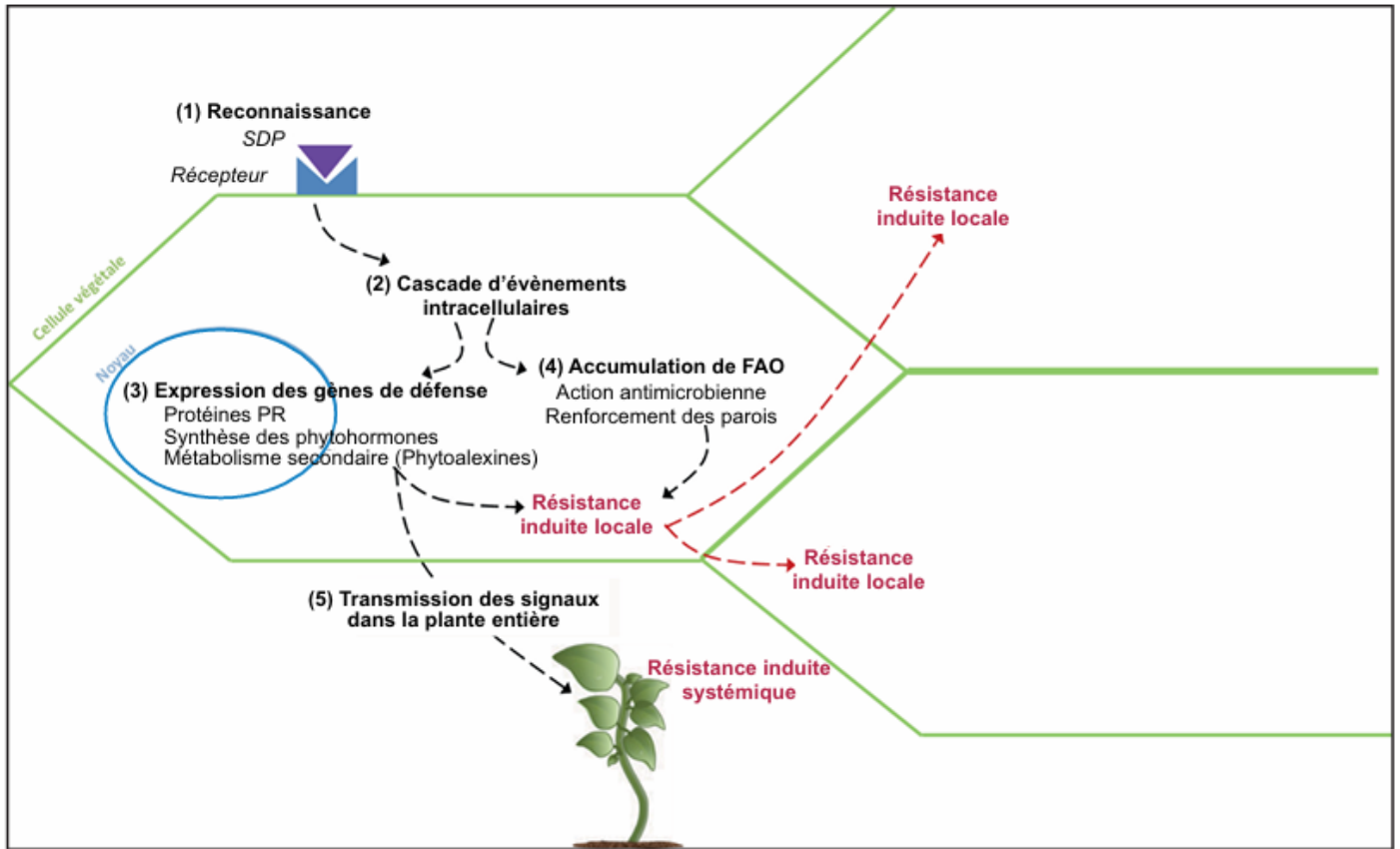


Figure 6 : Évènements de mise en place des réponses de défense de la plante – Faessel et al, 2016 :

1) Reconnaissance du SDP par un récepteur, 2) Cascades d'évènements intracellulaires (dépolérisation de la membrane, entrée importante d'ions  $\text{Ca}^{2+}$ , activation de protéines kinases pour la transmission du signal au sein de la cellule) menant à la résistance induite, 3) Expression des gènes de défenses : activations des facteurs de transcriptions et induction de la synthèse des molécules de défenses (protéines PR, phytohormones, phytoalexines, etc.), 4) Accumulation de Formes Actives de l'Oxygène (FAO) : ces molécules ont des actions antimicrobiennes et sont impliqués dans le renforcement de la paroi des cellules, 5) Transmission des signaux dans la plante entière : mise en place de la résistance systémique acquise.

### a. Résistance passive

Les barrières structurales constitutives représentent le premier obstacle rencontré par un agent pathogène avant qu'il ne soit en contact avec la paroi. Parmi ces barrières, la cuticule, qui est composée de cutine au pouvoir hydrophobe, est la structure protectrice la plus efficace. Les champignons pathogènes ont acquis, avec l'évolution, la capacité de produire des enzymes qui sont capables de dégrader la structure de la cuticule et leur permettre d'entrer dans la plante. D'autres structures, comme les poils, les trichomes ou encore les épines, sont susceptibles d'empêcher la propagation du pathogène (Benhamou et al, 2012).

En parallèle de ces barrières, la plante produit continuellement des molécules de défenses. Parmi ces molécules, des composés phénoliques sont produits. Ces molécules sont bien connues pour leur propriété antifongique, ils vont avoir un effet délétère sur la germination des spores ou encore sur la croissance mycélienne (Benhamou et al, 2012).

### b. Résistance active non spécifique (PTI) et spécifique (ETI)

La plante possède des récepteurs transmembranaires de types Pattern Recognition Receptor (PRR) qui ont la capacité de reconnaître des motifs moléculaires produits par les pathogènes, comme par exemple, la chitine des parois fongiques. Ces molécules sont appelées PAMP (Pathogen Associated Molecular Pattern) (Mobarak,2024). Ce type de reconnaissance va déclencher l'immunité basale qui correspond à la PAMP Triggered Immunity (PTI). Cette résistance est non spécifique. Cependant, les micro-organismes sont capables de contourner cette défense. Ils vont sécréter des effecteurs qui vont venir bloquer la signalisation des récepteurs PRR. Ces effecteurs sont sécrétés lorsque le pathogène possède le gène d'avirulence correspondant. Avec l'évolution, la plante a mis en place des récepteurs capables de reconnaître ces effecteurs (Nucleotide binding Leucine rich Repeat (NLR)) synthétisé par un gène de défense (gène virulence) (Benhamou, et al, 2012). Cette résistance est appelée Effector Triggered Immunity (ETI) (Mobarak,2024) et correspond à la résistance spécifique et génétique selon la théorie « gène pour gène » (Benhamou, et al, 2012).

### a. La résistance systémique acquise

La plante active son système de défense premièrement de manière locale dans la cellule. Puis par la suite, des molécules messagères (ex : acide salicylique) vont se propager pour obtenir une défense systémique. Ce phénomène est appelé la Résistance Systémique Acquise (SAR) (Benhamou, et al,2012, Mobarak,2024).



Dans le système de défense des plantes, des phytohormones ont un rôle majeur dans la propagation du signal de défense au sein de la plante entière. Après la détection d'un micro-organisme, une accumulation d'acide salicylique, d'acide jasmonique et d'éthylène au niveau du site infectieux est observée (Mobarak,2024). Suite à cette accumulation de ces hormones, la plante va produire un signal au niveau du site de la première infection. Par la suite, ces signaux vont être transportés de manière systémique au sein de la plante pour être enfin perçus dans les tissus distaux (Mobarak,2024). Ce système de résistance va permettre à la plante une rapidité à mettre ses défenses en place et de plus, cela lui permet un armement dans ces défenses sans trop de dépense énergétique (Mobarak,2024).

## 5. Fertilisation azotée

### a. Assimilation de l'azote

L'azote est un élément essentiel dans le développement de la plante. Il intervient dans des processus physiologiques comme la photosynthèse et la photorespiration (Mobarak,2024). Il est naturellement présent dans l'environnement sous forme de minéraux (nitrate ou ammonium) ou organique (acides aminés, urée) (Verly, 2019). L'azote est absorbé par les racines sous forme de minérale ou organique. Le type de sol, de culture ou encore l'environnement peuvent influencer la variation de l'azote dans le sol (Verly,2019).

Pour optimiser la croissance des plantes, des apports de fertilisants azotés sont réalisés. L'azote est apporté soit sous forme de nitrate soit sous forme d'ammonium. Cependant, un apport trop conséquent d'ammonium est toxique pour la plante. La majorité des nitrates apportés n'est pas absorbée entièrement par la plante. Une partie de ces fertilisants est malheureusement lessivée avec les eaux pluviales. Cet excès de nitrate va donc se retrouver dans les eaux souterraines qui vont s'écouler dans les rivières, qui elles-mêmes vont s'écouler dans la mer. Ces eaux riches en nitrate vont induire la prolifération d'algues qui sont une menace majeure pour les écosystèmes marins. Il est donc essentiel de maîtriser les apports de fertilisants pour la croissance des plantes afin de préserver les écosystèmes aquatiques (Verly,2019).

### a. Rôle dans les défenses des plantes

L'azote est aussi un élément important dans le développement des défenses de la plante. Lorsque la plante se retrouve en milieu carencé en azote, la croissance va être ralentie, les gènes du métabolisme primaire vont être réprimés tandis que les gènes de la voie de biosynthèse des flavonoïdes (métabolites secondaires intervenants dans la protection des plantes) vont être induits (Alexandre, 2023).





Cependant, l'azote peut avoir un effet bénéfique ou négatif en fonction du pathosystème considéré (Alexandre, 2023). La fertilisation va avoir un impact sur la physiologie de la plante, l'induction des défenses de la plante et aussi jouer un rôle sur l'agressivité du pathogène (Verly, 2019). L'impact de l'apport d'azote n'est pas le même selon la molécule apportée :

- nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) : stimulation de la production de polyamine qui renforcent la paroi, cela permet de limiter la propagation des pathogènes (Mobarak, 2024), en parallèle, le nitrate est nécessaire dans la synthèse de monoxyde d'azote ( $\text{NO}$ ) qui agit comme un signal lors de la HR et la mise en place de la SAR (Wendehenne et al, 2014),
- ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) : accumulation de nutriments tel que les acides aminés dans les apoplastes, favorable pour le développement des pathogènes biotrophes (Mobarak, 2024).

## **C.OBJECTIF DE LA PERIODE :**

C'est donc dans ce contexte que s'inscrit le projet CapZéroPhyto auquel je participe et qui fait l'objet de ce rapport.

Ce projet est financé par l'Agence Nationale de Recherche de 2021 à 2027. L'objectif de celui-ci est d'adapter le concept d'immunité écologique à la protection des cultures sur les Rosaceae (Pommier) et les Solanaceae (Tomate) (cultiver-protéger-autrement.fr, 2025). Le pommier et la tomate sont des cultures représentatives de la production fruitière et également les cultures les plus traitées (Mobarak, 2024). Ce projet a pour but de proposer de nouvelles stratégies de protection basées sur l'utilisation de leviers immunitaires destinés à induire les défenses des cultures. Cinq leviers sont étudiés seuls ou combinés : résistances génétiques, plantes de services, solutions de biocontrôle (SDP), flash UV-C et apport d'azote (cultiver-protéger-autrement.fr, 2025).

Plusieurs parcelles au sein de l'UEH rentrent dans ce projet. Pour cette année, j'ai travaillé principalement sur l'étude de l'apport d'azote combiné à l'utilisation de SDP dans la protection contre la tavelure du pommier. A travers cet essai, nous cherchons à savoir s'il existe une interaction entre le levier azote et le levier SDP dans la protection du pommier face à la tavelure.

En parallèle de cette étude, un suivi physiologique a été réalisé en effectuant chaque semaine une mesure de la concentration en chlorophylle et en flavonoïdes sur les feuilles. Nous cherchons à démontrer si oui ou non il y a un effet de la carence sur la production de chlorophylles et de flavonoïdes au sein des feuilles.



## MATERIELS ET METHODES

### A. PATHOGENE ET MATERIEL VEGETAL

#### 1. Le pathogène de la tavelure

*V. inaequalis* est présent naturellement dans la parcelle. Aucune contamination artificielle n'est réalisée.

#### 2. Conduite des arbres sur la parcelle

Dans le cadre de cet essai, la variété Brookfield est utilisée pour l'étude de l'immunité du pommier face à la tavelure puisqu'elle est sensible à cette maladie et au chancre (Dalival.com,2025). Elle est un mutant de la variété Gala. Elle a comme caractéristique :

- Une vigueur moyenne,
- Une mise à fruit rapide,
- Un bon niveau de production,
- Peu sensible à l'alternance (phénomène de production de fruits irrégulière).

En arboriculture, l'utilisation de porte-greffe est réalisée. Le porte-greffe a pour rôle de fournir le système racinaire au greffon, il va également permettre une mise à fleur plus rapide du greffon et par la suite une production de fruit plus rapide, il peut également apporter des résistances faces à certaines maladies ou ravageurs (Alexandra,2025). Dans cette parcelle, Brookfield est greffée sur le porte-greffe G11. Ce porte-greffe est tolérant au feu bactérien, au *Phytophthora*, au puceron lanigère et au gel. Il fait peu ou pas de rejets (Dalival.com,2023).

Cette parcelle a été plantée le 14 décembre 2016. Chaque arbre est espacé de 1,20 m et la surface totale de la parcelle est de 1536 m<sup>2</sup>. Chaque rang compte 96 arbres, au total, 288 arbres sont plantés.



## B. PROTOCOLE DE L'ESSAI

### 1. Dispositif expérimental

La figure 7 représente le dispositif expérimental de la parcelle de l'essai (P05). Elle est constituée de 16 micro-parcelles contenant 6 arbres répartis sur 3 rangs (96 arbres par rang). Dans le cadre du projet Cap Zéro Phyto, cet essai a pour but de mettre en évidence l'interaction entre les applications de SDP combiné à une carence en azote afin de stimuler l'immunité du pommier contre la tavelure du pommier. L'essai est donc réparti selon 4 modalités combinant 2 facteurs :

- Modalité Traitement SDP :
  - PFI al : cette modalité suit la conduite des vergers dite en PFI (Protection Fruitière Intégrée) sauf pour les traitements anti-tavelure PFI al pour Production Fruitière Intégrée allégée, seul les risques élevés prédits par Rimpro seront couverts,
  - Soriale : cette modalité est traitée par le SDP Soriale qui va remplacer le traitement anti-tavelure
- Modalité Azote :
  - Carence : aucun apport d'unité d'azote est effectué en 2024 et 2025
  - Azote : un apport de 34 unités d'azote est apporté au mois d'avril.

Chaque modalité est répétée trois fois (3 blocs).

### 2. Traitements tavelure

La figure 8 présente le protocole des traitements pour l'année 2024. Du stade C au stade D3, des traitements préventifs ont été réalisés avant pluie (Super Boullie Macclesfield 80, Curatio, Syllit max (cf figure 9 et 10)). A partir du stade D3, l'application du Soriale débute avec une cadence de traitement tous les 7 jours plus ou moins en fonction de la météo. Une fois le stade D3 dépassé, seul le Soriale est appliqué et aucun fongicide n'est appliqué excepté les risques supérieurs à 1500 RIM renvoyés par Rimpro (cf c. *Modèle de prévision des risques tavelure : Rimpro*). En 2024, aucun risque n'a dépassé les 1500 RIM donc aucun fongicide n'a été appliqué durant la fenêtre de traitement pour le SDP.

Après 6 applications du Soriale, l'essai est fini. Le premier traitement du Soriale a été réalisé le 27 mars 2024 et le dernier, le 2 mai 2024. Suite au dernier traitement Soriale, des traitements préventifs et curatifs ont été réalisés suite aux différents risques annoncés (cf *Tableau 1*).

Les traitements sont réalisés à l'aide d'un atomiseur S21 à biturbines verticales. Le volume théorique appliqué à l'hectare est de 400 litres. Les traitements réalisés en 2025 sont présentés dans l'Annexe 1.

	Soriale cadence				ESSENCIEL				PAS de SDP			
Modalité	1	6	7	12	13	15	19	24	25	30		
rang 1	Soriale_AZOTE				PFI_al_CARENCE				PFI_al_AZOTE			
rang 2												
rang 3												
Bloc	1				1				1			
parcelle	1				2				5			












  

Modalité	31	36	37	42	43	48	49	54	55	60	61	66
rang 1	ESSENCIEL_AZOTE				Soriale_AZOTE				Soriale_CARENCE			
rang 2												
rang 3												
Bloc	2				2				2			
parcelle	6				7				10			

Modalité	67	72	73	74	79	84	85	90	91	96		
rang 1	Soriale_AZOTE				PFI_al_CARENCE				Soriale_CARENCE			
rang 2												
rang 3												
Bloc	3				3				3			
parcelle	12				14				16			

Figure 8 : Dispositif expérimental de la parcelle avec les différentes modalités : les micro-parcelles marquées d'une croix sont hors essai

												Mai/juin
stades	C	C3	D	D3	E	E2	F1	F2	G	H	I	fin des conta Ire (= BSV + 15 jrs-3 sem)
BBCH	mars									fin avril		
	Début SDP SDP en préventif si besoin tous les 7J +ou -2J en fonction de la météo											
PFI al	Traitement préventif avant pluie				Aucun fongicide ( sauf si Rim > 1500 après avis ResPom)							Fin de l'essai, traitement éradiquant si nécessaire + préventif
PFI al + Soriale	Traitement préventif avant pluie				SORIALE en cadence + Traitements PFI_al							Fin de l'essai, traitement éradiquant si nécessaire + préventif

Soriale : 1,9Kg/ha pour 400l de bouillie soit 0,475kg/hl

Figure 7 : Protocole de traitement pour 2024

### a. PFI Allégée

En PFI allégée, quatre fongicides ont été appliqués : la SUPER BOUILLIE MACCLESFIELD 80®, le CURATIO®, du SYLLIT® et le VITISAN®.

La SUPER BOUILLIE MACCLESFIELD 80® est une bouillie bordelaise qui convient à l'Agriculture Biologique. Il est composé de cuivre de sulfate à 200g/kg soit 20% p/p et est sous forme de poudre mouillable (wp) (Nufarm.com, 2024). Il a été appliqué en tant que préventif avant les premiers traitements du Soriale à une dose de 1kg/ha.

Le CURATIO® est un fongicide de biocontrôle, à base de polysulfure de calcium et utilisable en Agriculture Biologique. Il a une action multisite et aucune résistance du pathogène n'est connue à ce jour (Andermatt.fr, 2024). Il a été appliqué en préventif avant la première application du Soriale et également en curatif après la fin de l'essai. Il a été appliqué à une dose de 8 kg/ha.

Le SYLLIT® est un fongicide à base de dodine autorisé spécifiquement sur fruits à pépins et fruits à noyaux. Il a un effet préventif et curatif sur le champignon, il agit sur les différentes formes du champignon (ascospores et conidies). (Uplcorp.com, 2025). Il a été appliqué en tant que curatif à la fin de l'essai à une dose 5 kg/ha.

Le VITISAN® est un fongicide de biocontrôle utilisable en Agriculture Biologique. Il est composé d'Hydrogénocarbonate de potassium (KHCO<sub>3</sub>). C'est un fongicide de contact qui présente des effets préventifs ou curatifs en début d'infection (Andermatt.fr,2022). Il a été appliqué suivant la première application de Soriale au vu des forts Rim estimé par Rimpro (cf figure 10) à une dose de 1,25 kh/ha.

### b. Soriale

Le SORIALE® est un SDP constitué de phosphonate de potassium (KHP) à 755 g/L. Cette molécule va activer de manière naturelle les défenses de la plante en stimulant le système immunitaire de la plante en absence de pathogène, et déclenche l'activation de molécules d'alerte et de récepteurs de reconnaissance du pathogène. En théorie, lorsque la plante est réellement attaquée par un pathogène, elle est préparée à réagir rapidement. Les cellules attaquées envoient des signaux qui pourront initier des défenses précoces. Il a été appliqué à une dose de 1.9 kg/ha.

Tableau 1 : Les traitements tavelure et SDP qui ont été réalisés en 2024

Produit	Date de traitements	Dose (kg/hl)	Volume (L/ha)	Dose (kg/ha)
Super Boullie Macclesfield 80	14-mars-24	0,25	400	1
curatio 8	21-mars-24	2	400	8
soriale	27-mars-24	0,475	400	1,9
syllit max	29-mars-24	0,3125	400	1,25
soriale	5-avr.-24	0,475	400	1,9
soriale	11-avr.-24	0,475	400	1,9
soriale	18-avr.-24	0,475	400	1,9
soriale	25-avr.-24	0,475	400	1,9
soriale	2-mai-24	0,475	400	1,9
vitisan	14-juin-24	1,25	400	5
curatio 8	18-juin-24	2	400	8
curatio 8	1-juil.-24	2	400	8
curatio 8	10-juil.-24	2	400	8
Super Boullie Macclesfield 80	12-sept.-24	0,25	400	1

Synthèse protection tavelure P05 2024

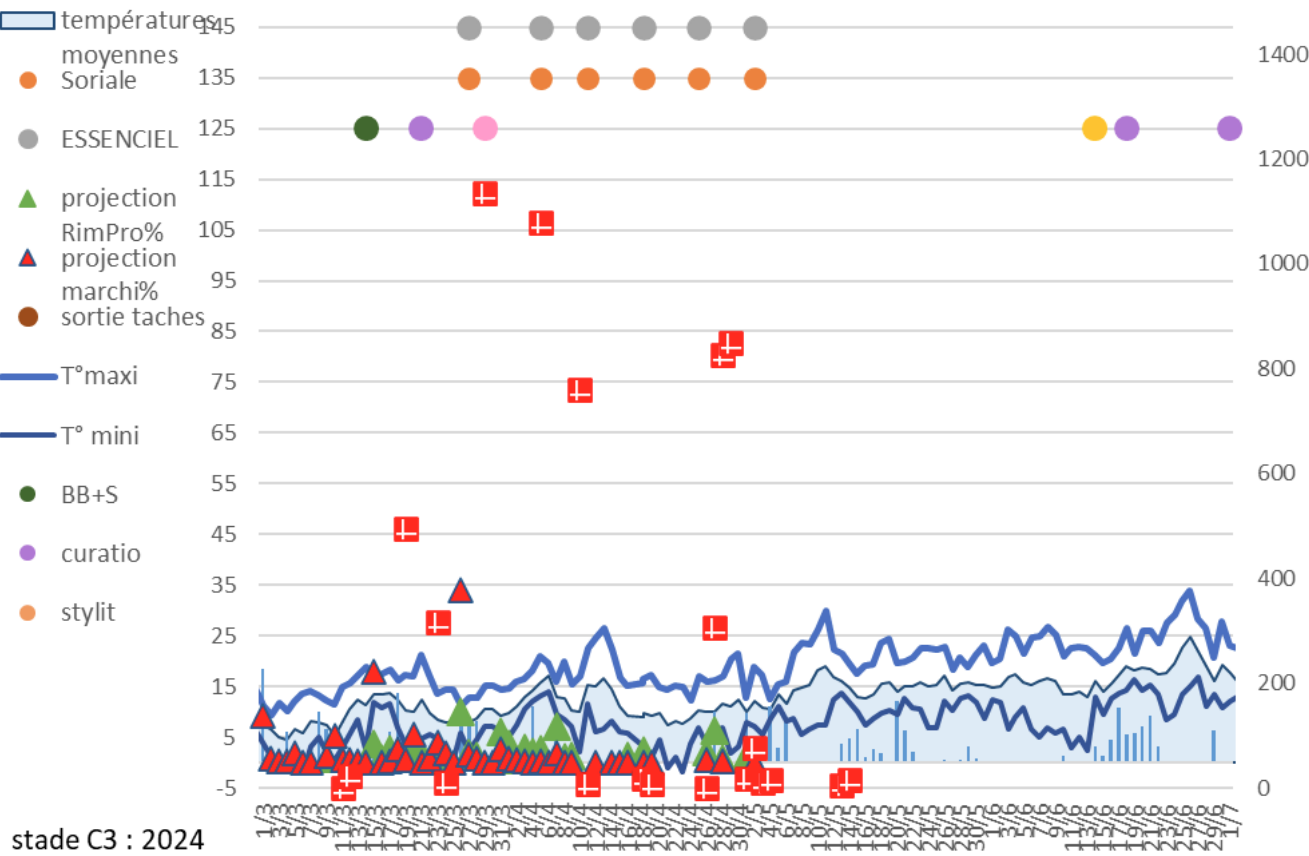


Figure 9 : Synthèse des traitements pour la saison 2024 avec les différents risques et dispersion des spores, les carrés rouges correspondent aux risques de contamination renvoyé par Rimpro



### c. Modèle de prévision des risques tavelure : Rimpro

Le logiciel RIMpro est un modèle qui a été créé en 1993 par Marc TRAPMAN, un technicien arboricole des Pays-Bas. Cet outil permet de calculer les risques épidémiologiques de plusieurs maladies et ravageurs, notamment la tavelure. Le logiciel calcule ces risques de contamination de tavelure selon trois paramètres : la météo, la biologie des bioagresseurs, et la phénologie du pommier. A l'UEH, le logiciel RIMpro est relié à la station météo installée directement sur site. RIMpro interprète en continu les données météorologiques (températures, précipitation, durée d'humectation des feuilles) associées à des informations biologiques (maturité des spores, stade de sensibilité du végétal). Il permet d'estimer le niveau de risque de contamination passée et prévue (2/3 jours) et de décider de l'utilisation des traitements anti-tavelure, préventif ou stop.

La figure 10 représente le graphique que renvoie le logiciel Rimpro. La couleur bleu ciel, en bas de l'écran, indique la durée d'humectation sur le feuillage. Le bleu foncé indique les précipitations. L'absence de couleur signifie l'absence de précipitation et d'eau sur les feuilles. Au-dessus, deux bandes rouges expriment la maturité des ascospores (inoculum primaire). Les spores immatures sont en rouge foncé et les spores matures en rouge clair. Le calcul tient compte d'un stock initial théorique de spores de 10 000 spores, lorsque les conditions de maturation sont favorables, le logiciel estime une quantité de spores matures. Les spores matures seront alors projetées lors de prochaines précipitations (hors nuit).

On remarque également un histogramme jaune représentant la quantité de spores projetées. La courbe blanche symbolise la quantité de spores en cours de germination présentes sur le feuillage. La zone orange correspond au début de l'infection dans les tissus de la feuille. La courbe rouge estime l'importance et l'ampleur de l'infection appelée RIM (Relative Infection Measure). La hauteur de la courbe est proportionnelle à l'infection, donc plus la courbe est élevée, plus les symptômes sont sévères. En effet, le Rim prend à la fois en compte le volume de spores projetées, la durée de survie des spores et le niveau d'infection. La figure 11 est le schéma des seuils d'interventions en fonction des RIM.

Par exemple si le RIM est à égal à 1000, cela signifie que chacune des 1000 ascospores donneront une tache sur un stock théorique initial établie à 10 000 ascospores. La précision de ce logiciel est à relativiser notamment dans la modélisation de quantité d'ascospores projetées, notamment en fin de période de projection primaires (Rim pro sous-estime les projections). De plus, il ajuste les prévisions météorologiques les prévisions peuvent changer d'une heure à l'autre.

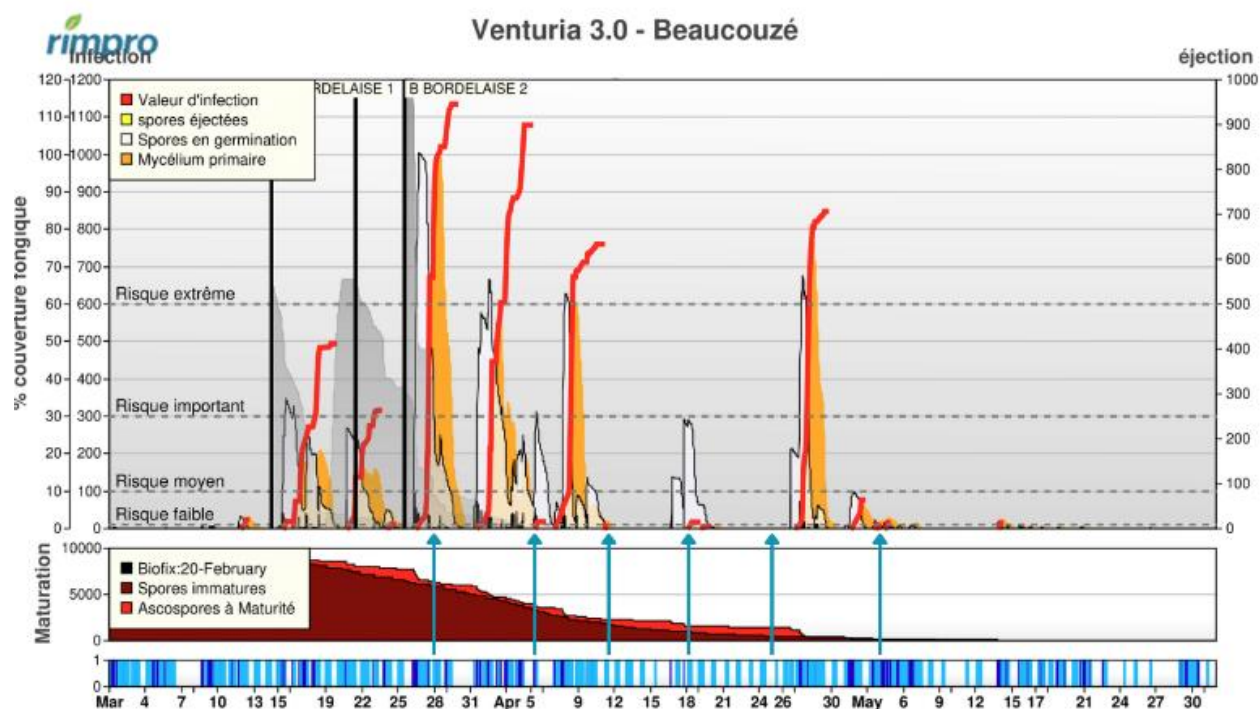


Figure 10 : Graphique des différents risques renvoyé par Rimpro en 2024 avec la couverture des traitements (courbe grisée) Les flèches bleues correspondent aux placements des traitements de Soriale réalisé en 2024 – Valentin Desmet 2024

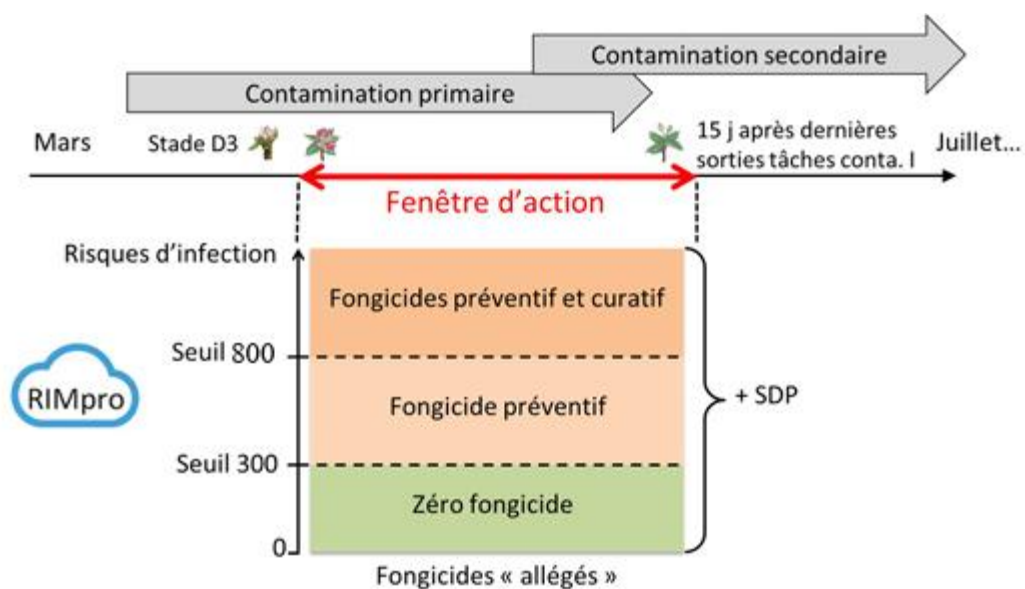


Figure 11 : Schéma des seuils de prise de décision en fonction des RIM

### 3. Apport d'engrais azoté

Avant toute plantation de l'essai, une analyse de sol est effectuée pour connaître l'état du sol. Cette première analyse détermine les premiers apports de fumure afin de préparer au mieux la parcelle. Des apports d'Ammonitrate à 33,5% et du nitrate de chaux à 15,5% ont débuté à partir de 2019 sur cette parcelle. La modalité AZOTE a reçu les deux types d'apport tandis que la modalité Carence a reçu uniquement du Nitrate de chaux. A partir de 2023, la modalité Carence ne reçoit plus aucun apport d'azote.

Les quantités d'engrais apportées sont calculées selon plusieurs critères : le rendement visé (qui est de 40 tonnes/ha), des besoins de la plante et également l'azote présent dans le sol grâce aux analyses de reliquats azotés réalisées chaque année sur chaque micro-parcelle.

Les apports en azote sont réalisés au printemps afin de permettre à la plante une meilleure mise en activité. Le tableau 2 et le tableau 3 présente les différents apports qui ont été réalisés en 2024 et en 2025.

L'épandage de l'ammonitrate s'effectue à la main pour une meilleure précision au vu de la petite taille des micro-parcelles, afin d'éviter de mettre de l'azote dans les parcelles carencées. L'apport de nitrate de CaO se fait, quant à lui, à l'aide d'un distributeur qui est présenté dans la figure 12.

Tableau 2 : Apport d'engrais réalisé en 2024

Date	Engrais	Unité d'azote	Épandage
<b>29/04/2024</b>	Ammonitrate 33.5%	34	Manuel
<b>07/06/2024</b>	Nitrate de CaO 15,5%	16	Distributeur à engrais

Tableau 3 : Apport d'engrais réalisé en 2025

Date	Engrais	Unité d'azote	Épandage
<b>09/04/2025</b>	Ammonitrate 33.5%	34	Manuel
<b>28/05/2025</b>	Nitrate de CaO 15,5%	16	Distributeur à engrais



Figure 12 : Distributeur à engrais utilisé pour les épandages - Jocelyn Maquaire - 2020

## 4. Méthodes d'observations

Toutes notations et observations sont effectuées sur le rang 2, de l'arbre 2 à 5 par micro-parcelle. Le choix de ce rang central permet d'éliminer l'effet bordure lors de l'interprétation des analyses statistiques.

### a. Notation sur feuilles et fruits au cours de la saison

Lors des observations, deux organes sont observés : les feuilles et les fruits.

Pour la notation sur feuilles, une sélection de 6 pousses par arbre est réalisée (3 pousses réparties de part et d'autre de l'arbre). Pour chaque pousse, le nombre de feuilles totales et celles tavelées (au moins une tache) sont comptabilisées afin d'obtenir une incidence du nombre de feuilles tavelées sur le nombre de feuilles totales.

20 fruits sont observés pour chaque arbre, 10 fruits pour chaque côté de l'arbre. Parmi ces 20 fruits, ceux qui sont tavelés (au moins une tache) sont comptabilisés.

### b. Concentration en Chlorophylle et Flavonoïdes

Un suivi physiologique a été effectué chaque semaine à partir du 28 avril 2025. Des mesures de chlorophylles et de flavonoïdes ont été réalisées sur différentes feuilles sur plusieurs semaines à l'aide d'une pince DUALEX SCIENTIFIC+™ de Force A.

Pour se faire, seuls les arbres 2 à 5 des micro parcelles 1,2,4,5,7,8,9,10,12,14,15,16 du rang 2 ont été suivis. Les micro-parcelles qui n'ont pas été suivies ne font pas partie de l'essai. Les mesures ont été réalisées sur des pousses à bourses (un bouton floral) de la manière suivante (figure 13) :

- Semaine 0 (S0) : Mesure de F0 qui est la dernière feuille déroulée de la pousse, il faut compter le nombre de feuille en dessous de celle-ci sur la pousse (ne pas compter les feuilles de la rosette),
- Semaine 1 (S1) : Mesure de la dernière feuille déroulée (F1) + F0,
- Semaine 2 (S2) : Mesure de la dernière feuille déroulée (F2) + F1 + F0,
- Semaine 3 (S3) : Mesure de la dernière feuille déroulée (F3) + F2 + F1,
- Semaine 4 (S4) : Mesure de la dernière feuille déroulée (F4) + F3 + F2.

Ces mesures ont été réalisées jusqu'à la notation tavelure (6 juin 2025). Au total, j'ai récupéré 3 mesures par feuilles.

Le but de ces mesures est de tester une différence sur la concentration en chlorophylle et le ratio Chlorophylle/Flavonoïde en fonction des parcelles azotées et carencées au fil du temps tout en prenant en compte les traitements SDP.

Dualex : 1 mesure par feuille



F0 = Feuille 0  
F1 = Feuille 1  
F2 = Feuille 2  
F3 = Feuille 3  
F... = Dernière  
feuille sortie

○ Feuille mesurée

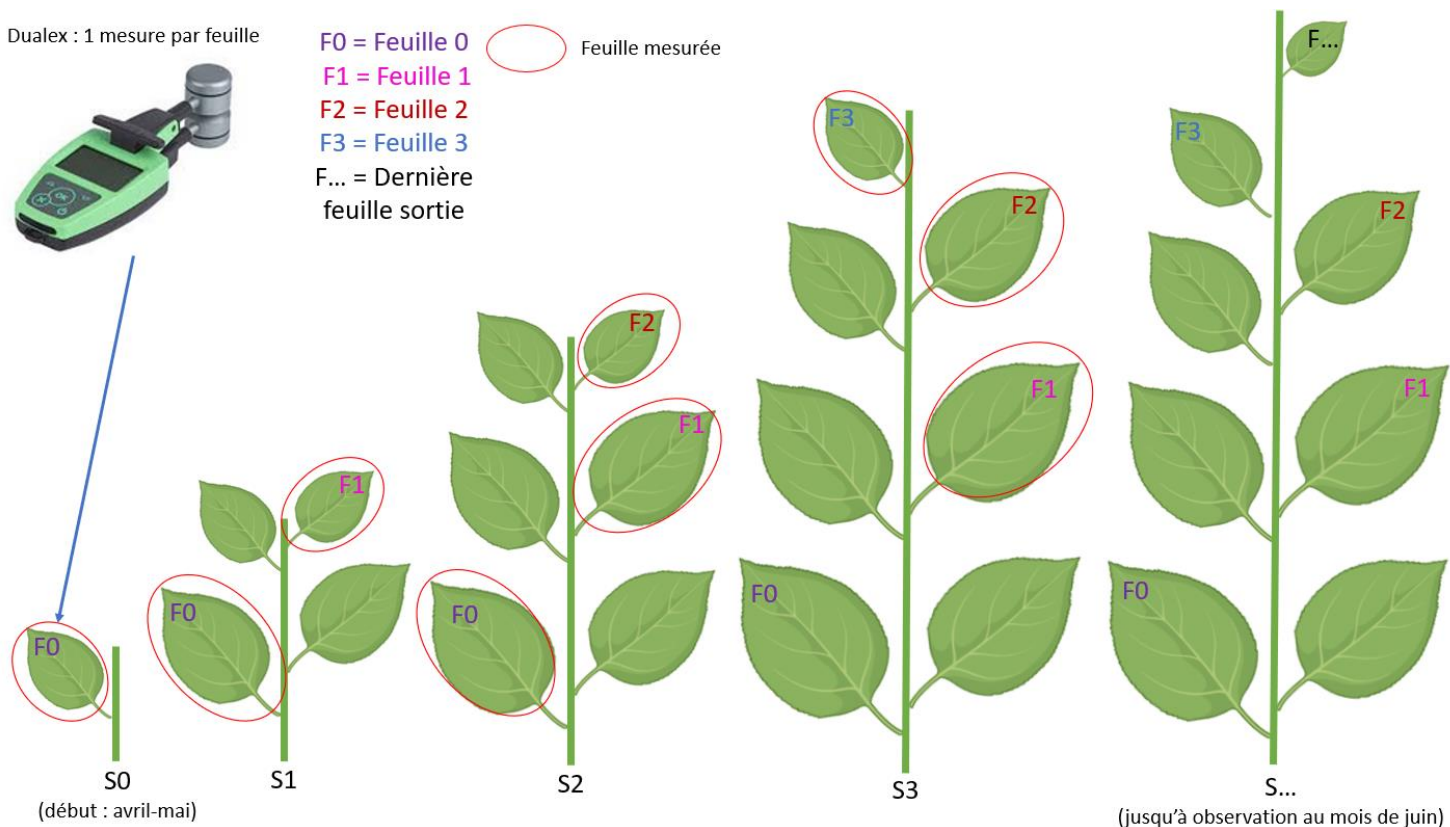


Figure 13 : Schéma du protocole de prise de mesure sur les feuilles en fonction des semaines



## C.METHODE D'ANALYSE STATISTIQUE

L'analyse statistique est réalisée sur le logiciel R studio à l'aide du package de base, tidyr pour la fonction drop\_na (élimination des mesures manquantes) et agricolae pour la fonction HSD.test (test de Tuckey).

Pour réaliser mes statistiques, une analyse de variance (ANOVA) est effectuée à deux facteurs (modalités (PFL\_al\_azote, PFI\_al\_carencé; SORIALE\_azot et SORIALE carencé) et blocs). L'ANOVA est une analyse statistique paramétrique pour laquelle la normalité des résidus et l'homoscédasticité des résidus doivent être vérifiées.

Pour se faire, j'ai utilisé le test de Shapiro – Wilk pour vérifier la normalité des résidus suivi d'un test de Bartlett pour l'homoscédasticité des résidus. La normalité des résidus n'étant pas toujours vérifiée, j'ai tout d'abord regardé l'état de mes résidus en observant les éventuelles valeurs aberrantes, celles qui sortent de la courbe (trop élevées par rapport aux autres données).

Après retrait des valeurs aberrantes (jusqu'à trois valeurs aberrantes retirées), j'ai de nouveau réalisé un test de Shapiro –Wilk et un Bartlett sur le nouveau modèle effectué à partir du nouveau jeu de données.

Dans certains cas, malgré la suppression des valeurs aberrantes, la normalité n'était toujours pas vérifiée. J'ai donc réalisé une transformation logarithmique sur tout le jeu de données (sans supprimer de valeurs). A la suite de cette transformation, un test Shapiro-Wilk et un test Bartlett ont de nouveau été réalisés sur le modèle à partir des données transformées.

Lorsque toutes les conditions de l'ANOVA ont été validées. Un test de Tuckey a été réalisé lorsque des différences significatives ont été démontrées. Ce test nous permet de classer nos différents facteurs selon des classes statistiques.





## RESULTATS

### A. IMPACT DU SORIALE DANS LA PROTECTION DU POMMIER CONTRE LA TAVELURE EN JUIN 2024

Seules les données de 2024 sont analysées et présentées dans ce rapport par manque de temps pour analyser les données de 2025. Un comparatif entre les deux années sera présenté lors de ma soutenance (2 juillet 2025).

En 2024, les risques élevés de projections n'ont pas été couverts par des traitements tavelure (cf figure 11). De plus, les données brutes sont présentées dans l'Annexe 2.

#### 1. Incidence sur feuilles (Figure 14)

En moyenne, 51% des feuilles ont été tavelées toutes modalités confondues. En 2024, la pression de la maladie était assez importante, elle s'explique du fait que les risques  $RIM > 800$  n'ont pas été couverts et que les conditions météorologiques ont été favorables au développement de la tavelure.

Après analyse ANOVA à 2 facteurs (modalités et Blocs), des différences significatives sont ressorties. Tout d'abord, aucun effet bloc n'a été trouvé. Par la suite nous constatons grâce la figure 14, que la modalité PFI allégé combinée à de l'azote a un niveau de maladie statistiquement plus élevé que la modalité PFI allégée combinée à une carence en azote (14% de différence entre ces groupes de comparaison). Nous avons le même constat lorsque nous comparons la modalité Soriale combiné à de l'azote et combiné à une carence, le niveau de maladie étant statistiquement plus faible dans le cas de la carence (16% d'écart).

#### 2. Incidence sur fruits (Figure 15)

En moyenne, 48% des fruits sont tavelées en prenant toutes les modalités confondues. Cette pression peut s'expliquer de la même manière que pour les feuilles, du fait que les plus gros risques de contaminations n'ont pas été couverts.

Suite à l'ANOVA à 2 facteurs (modalités TraitementxAzote et Blocs), aucun effet significatif des blocs n'est ressorti. A la différence des feuilles, aucune différence significative est montrée que ce soit entre le PFI allégée avec ou sans azote, ou entre le Soriale avec ou sans azote. Cependant, en comparant le groupe PFI allégée Carence avec le groupe Soriale Carence, le Soriale a un effet significatif plus faible que la PFI allégée dans le cas d'une carence. Un écart d'au moins 19% est observé entre ces deux modalités dans le cas d'une combinaison avec une carence en azote.

Incidence moyenne des feuilles tavelées (%) en fonction des modalités azote et traitement en juin 2024

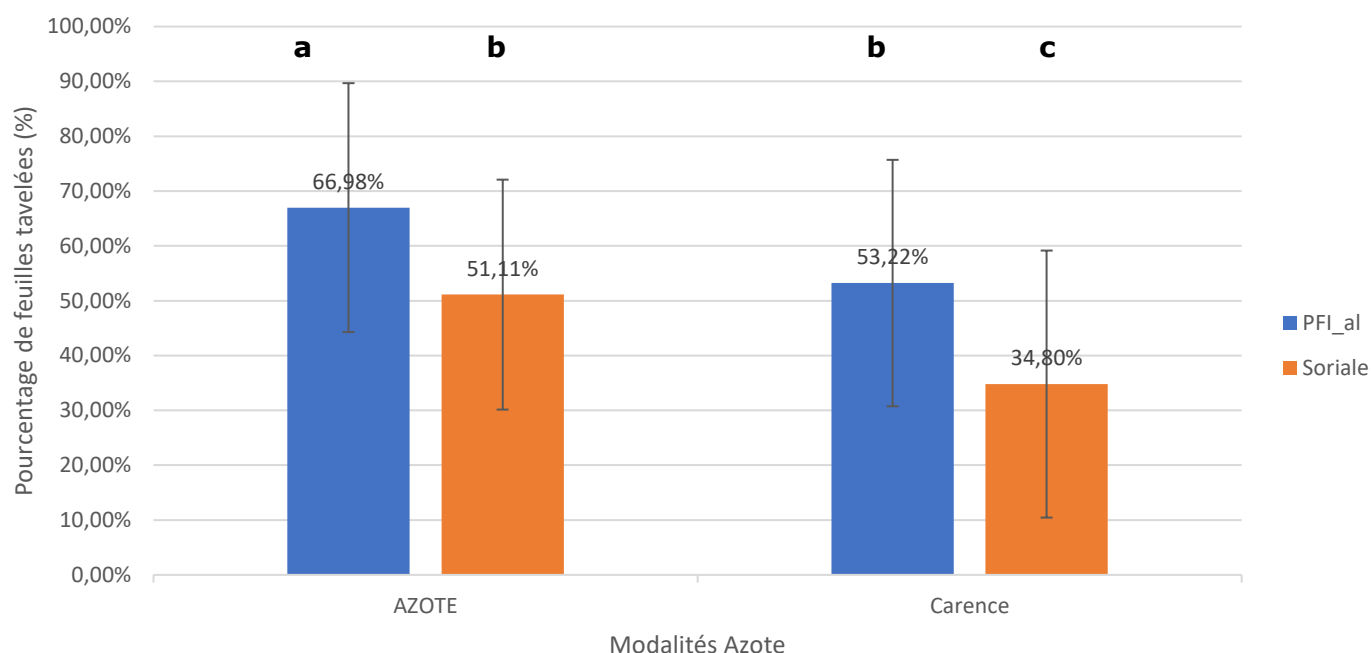


Figure 14 : Graphique de l'incidence moyenne des feuilles tavelées en fonction des modalités en juin 2024

Incidence moyenne des fruits tavelés (%) en fonction des modalités azote et traitement en juin 2024

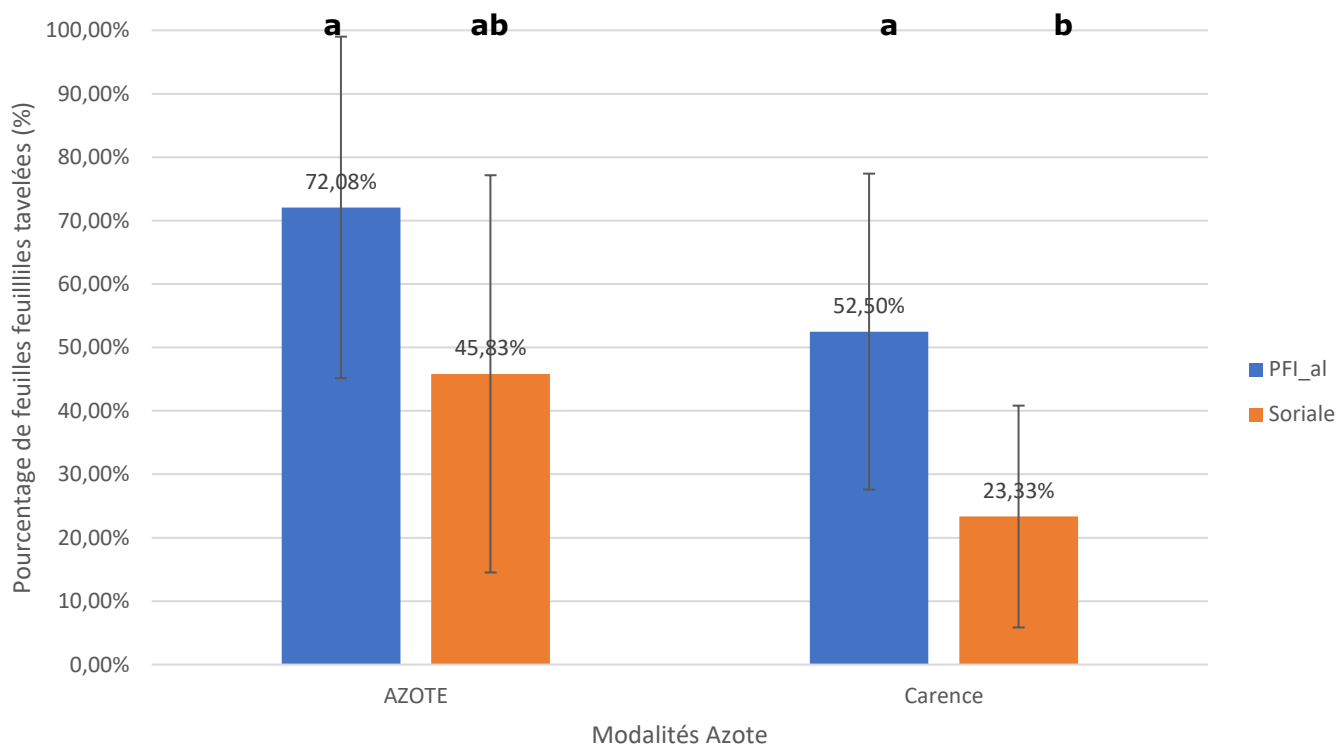


Figure 15 : Graphique de l'incidence moyenne des fruits tavelés en fonction des modalités en juin 2024

## **B. IMPACT DE L'AZOTE SUR LA CONCENTRATION EN CHLOROPHYLLE ET FLAVONOÏDE SUR FEUILLES EN 2025**

C'est la première année qu'un suivi physiologique est effectué en regardant l'évolution de 2 types de métabolites présent dans la feuille (la chlorophylle et les flavonoïdes). Quelques difficultés ont été rencontrées lors de la période de prise de mesures. Premièrement, le début des mesures a été réalisé un peu tard par rapport à la croissance des pousses et un certain nombre de pousses n'ont pas eu de mesure pour des feuilles au-delà de la F1. C'est pourquoi, j'ai réalisé uniquement des analyses statistiques sur les F0 et F1 puisque j'ai trois mesures pour chacune d'entre elles, à l'exception de certaines F0 pour lesquels les pousses ont été abîmées et elles ont été remplacées.

Suite à l'ANOVA des données concernant la chlorophylle, aucune différence significative est montrée entre les modalités PFI allégée et Soriale combiné à de l'azote et de même pour la combinaison sans azote (figure 16). De plus, aucune différence significative ne ressort entre les F0 et F1 au sein de la modalité Azote et de la modalité Carence.

Cependant, lorsque la modalité PFI allégée avec azote est comparée à la modalité PFI allégée carence, une différence significative est montrée. De même pour la modalité Soriale avec et sans azote. Au vu de ces résultats, nous avons donc une différence significative entre la modalité Azote et la modalité Carence, l'effet du traitement tavelure ou SDP n'a quant à lui aucun effet sur la concentration en chlorophylle des feuilles (figure 16).

Lors de l'analyse statistique concernant les données du NBI, la normalité des résidus n'étant pas vérifiée pour les données du ratio chlorophylle/flavonoïdes, aucune conclusion ne peut être faite. J'obtiens néanmoins le graphique présenté dans l'Annexe 3. Dans ce cas, un test non paramétrique comme le test de Kruskal- Wallis est intéressant d'effectuer afin de mettre en évidence des différences significatives ou non. Par manque de temps, je n'ai pas pu le réaliser.

Une analyse statistique des feuilles par semaine a été réalisée, l'Annexe 5 correspond aux résultats de la concentration en Chlorophylle (figure 22) et aux résultats pour le ratio de Chlorophylle/Flavonoïdes (figure 23).

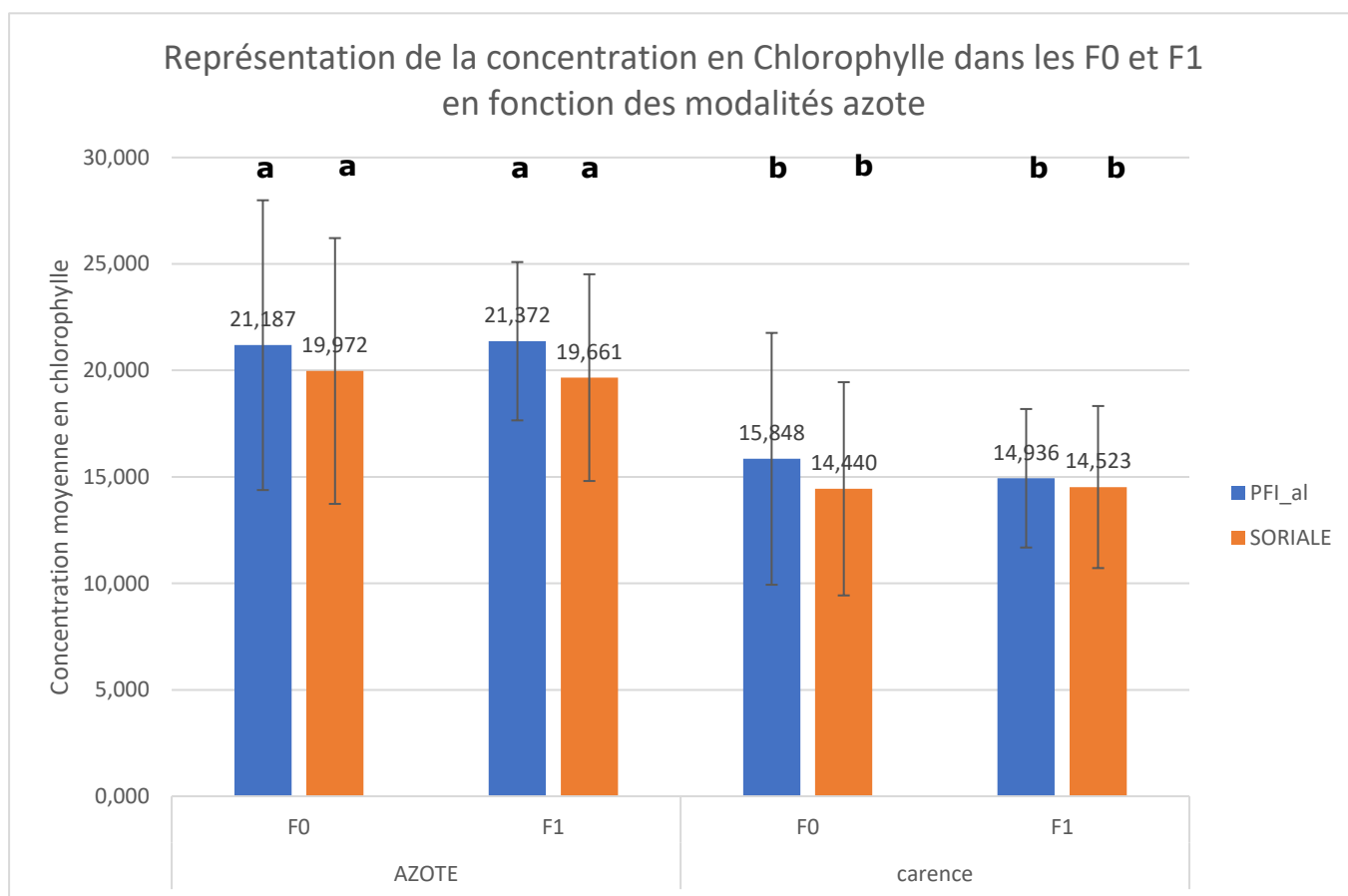


Figure 16 : Graphique de la concentration moyenne en chlorophylle des F0 et F1 en fonction des modalités Azote et de traitement tavelure en 2025

## DISCUSSION

Cette étude avait pour objectif d'étudier l'utilisation de SDP (Soriale) combiné à un régime limité en azote sur le pommier en verger, afin de mieux comprendre son immunité contre la tavelure causée par l'agent *V.inaequalis*. Des observations de niveau d'attaque de la maladie sur fruits et sur feuilles ont été réalisées en juin 2024 (et 2025). En complément, un suivi physiologique avait pour objectif de démontrer l'impact du régime azoté et des traitements sur la croissance des jeunes feuilles. Des mesures de concentrations en chlorophylle et flavonoïdes ont été réalisées sur plusieurs semaines pour mesurer l'évolution de la croissance de ces jeunes feuilles.

D'après les résultats observés et analysés statistiquement, un effet de la carence azoté est montré dans la protection du pommier contre la tavelure sur feuilles. Le niveau d'incidence de la maladie est plus bas lorsque le Soriale est combiné à une carence en azote. L'efficacité du Soriale azoté est identique à celui de la PFI allégée carencée. Sur feuilles, l'utilisation du Soriale serait intéressant dans la protection, il permettrait de limiter la propagation de la maladie sur les feuilles.

Sur fruit, l'effet de la carence en azote n'est pas aussi marqué que pour les feuilles. Un effet du Soriale sans azote est tout de même intéressant comparé au PFI allégée sans azote puisque le Soriale compte seulement 23% de fruit tavelées et le PFI allégée 52%. Dans ce cas, la combinaison du SDP Soriale combiné à une carence a un effet significatif dans la protection des fruits contre la tavelure.

Suite à ces constats, nous avons donc une meilleure efficacité lorsque le biocontrôle SDP (Soriale) est combiné à une carence en azote. Cette méthode permettrait de limiter l'utilisation des fongicides sur une parcelle. L'analyse des résultats sur cette année 2025 sera montré lors de la soutenance pour vérifier la répétabilité des résultats.

En ce qui concerne le suivi de la pression maladie au sein de la parcelle, il serait tout de même intéressant d'inclure une modalité témoin non traitée afin de se rendre compte de la pression de la maladie réelle au sein de la parcelle et de déterminer s'il y a un gradient ou non.

Le suivi physiologique a montré une différence marquée entre l'apport d'azote et la carence en azote. Ces résultats confirment que l'azote a un impact dans la production de la chlorophylle et sur le ratio NBI (cf Annexe 5).



Les feuilles qui ont reçu de l'azote ont une concentration plus forte que celles qui ont été carencées. Cela confirme bien que dans le cas d'une limitation en azote chez le pommier, le métabolisme primaire est ralenti notamment avec une baisse de l'activité photosynthétique dû à une baisse de production de chlorophylle au sein de ses feuilles (Mobarak,2024).

Le ratio chlorophylle sur flavonoïde montre que la concentration en flavonoïdes est plus importante dans le cas de la modalité carence en azote. L'accumulation de flavonoïdes dans les feuilles de la modalité carence est plus importante que dans la modalité Azote (cf Annexe 5). Pour rappel, les flavonoïdes sont des molécules qui interviennent dans la protection de la plante contre la menace des pathogènes. De plus, ces résultats sont en adéquation avec les résultats trouvés par Térance Mobarak. Il a démontré lors de sa thèse, que la limitation en azote induisait une accumulation des flavonoïdes dans la plante. Dans cette famille chimique, certaines molécules ont des effets anti-microbiens et vont donc venir renforcer la protection immunitaire lorsque ces deux leviers sont combinés (Mobarak, 2024).

Lorsque les résultats de la notation tavelure de 2024 et le suivi physiologique réalisé cette année (2025) sont confrontés, la carence jouerait un rôle dans la protection de la tavelure lorsqu'elle est combinée avec le Soriale notamment dû à l'accumulation de métabolites secondaires de la famille des flavonoïdes. Cette carence permettrait de réduire les symptômes de la maladie et d'augmenter l'efficacité du Soriale. Ce phénomène a été démontré lors de l'étude de l'interaction des leviers azote, SDP et génétique pour l'amélioration de l'immunité du pommier vis-à-vis de la tavelure réalisée par Solène Alexandre en 2023. En étudiant l'interaction de l'apport d'azote avec un autre SDP qui est le Bion, elle a trouvé que la carence en azote combiné à ce SDP était intéressante dans la protection contre la tavelure. La limitation en azote réduit la sévérité des symptômes de la maladie et augmente l'efficacité du Bion (Alexandre,2023). Elle a démontré que l'efficacité du Soriale combiné à un itinéraire technique PFI était moins efficace qu'un itinéraire technique uniquement de PFI. Mais son efficacité de protection reste suffisamment élevée pour limiter le développement de la tavelure (Alexandre, 2023).





## CONCLUSION

Cet essai a fait l'objet de l'étude de l'immunité du pommier contre la tavelure en testant une solution de biocontrôle dite SDP combinée à une carence en azote.

Les résultats montrent que la carence en azote réduit l'apparition de symptômes et augmente l'efficacité de protection du Soriale contre la tavelure. Le Soriale a une meilleure efficacité que la PFI allégée.

La carence en azote a également un impact dans la production de chlorophylle dans les feuilles. Cette différence commence à se faire sentir seulement 2 ans après l'arrêt total d'apport de nitrate de CaO dans les micro-parcelles sans azote. Les arbres compris dans les micro-parcelles carencées ont un aspect moins vigoureux que ceux présents sur les micro-parcelles ayant un apport d'azote.

En perspective, cet essai a pu démontrer qu'une carence en azote est intéressante dans la protection du pommier lorsqu'elle est combinée au Soriale. Cependant, la question de l'impact (perte de vigueur) de cette carence sur ces arbres peut se poser. Que se passe-t-il lorsque cette carence est utilisée chaque année ? Un risque de perdre les arbres totalement ?

Dans le cadre de l'étude, continuer à tester cette méthode pourrait être une bonne solution afin de constater de l'impact de la carence sur le long terme. En parallèle, une étude sur la quantité d'engrais azoté optimale à apporter serait pertinente pour essayer de tendre vers un effet de la carence dans la protection du pommier, ou alterner l'apport d'azote d'une année sur l'autre.

Une analyse comparative des résultats obtenus en 2024 et 2025 pourrait permettre de montrer une répétabilité dans l'efficacité de cette combinaison Soriale et carence contre la tavelure du pommier. De plus, confronter les données récoltées avec le suivi physiologique et les résultats de l'observation tavelure 2025 confirmerait ou non le constat obtenu en comparant les résultats tavelure 2024 et le suivi physiologique réalisé en 2025.

Le suivi de la maladie pourrait être intéressant en intégrant une modalité de témoin non traité afin de connaître la pression de la maladie au sein de la parcelle. Ce suivi pourrait nous indiquer l'existence d'un éventuel gradient sur la parcelle.



## BIBLIOGRAPHIE

- Alexandre, S. (2023).** Etude de l'interaction des leviers azote, SDP et génétique pour l'amélioration de l'immunité du pommier vis-à-vis de la tavelure. *Mémoire de fin d'étude M2 Biologie Végétale : Gestion de la Santé des Plantes*. Université d'Angers, 80 p.
- Benejam, J. (2021).** Résistance du pommier à la tavelure et au feu bactérien : Interaction génétiques et induites par les SDP. *Doctorat Sciences Agricoles*, 260 p. Université d'Angers, 260 p.
- Benhamou, N., & Rey, P. (2012).** Stimulateurs des défenses naturelles des plantes : une nouvelle stratégie phytosanitaire dans un contexte d'écoproduction durable. *Phytoprotection*, pp. Vol 92, numéro 1 .
- Boutry, C., & Oeser, N. (2023, mars 13).** Stratégie de lutte contre les maladies. *Biofruitnet*.
- Brun, L., Didelot, F., & Parisi, L. (2007).** Stratégie de protection innovante contre la tavelure du pommier : conception, évaluation et intégration en verger. *Innovations Agronomiques*, pp. 1, 33-45.
- Carisse, O., & Rolland, D. (2004).** Effect of timing of application of the biological control agent *Microsphaeropsis ohracea* on the production and ejection pattern of ascospores by *Venturia Inaequalis*. *Phytopathology*, pp. 1305-1314.
- Coutand, C., & Sylvie Colleu. (2025, janvier 8).** *Cap Zéro Phyto*. Récupéré sur [cultiver-protéger-autrement.fr/les-projets/cap-zero-phyto](https://www.cultiver-protéger-autrement.fr/les-projets/cap-zero-phyto)
- Durel, C.-E., Laurens, F., Caffier, V., Le cam, V., & Sapoukhina, N. (2007).** Les apports de l'innovation variétale menées pour améliorer la résistance du pommier. *Innovations Agronomiques*, pp. 1, 47-61.
- Faessel, L., & Tostvint, C. (2016).** Les produits de stimulation en agriculture : un état des connaissances. *Centre d'études et de prospectives, Service de la statistique et de la prospective*. pp. 7-39.
- Journée nationale Pommes, la Morinière . (2024, juin 20).** *Vergers Ecoresponsables*
- Lucas, L. (2019).** Etudes des stimulateurs de défense des plantes contre la tavelure du pommier. *DUT Génie biologique option Agronomie* . Université d'Angers.
- Mobarak, T. (2024).** Nitro-Défense : Interaction entre statut azoté et stimulateur de défense des plantes (SDP) pour une immunité améliorée du pommier. *Sciences Agricoles , Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement*. Université d'Angers, 251 p.
- Moisson, M., & Moigny, F. (2015).** Fiche Technique : Stimulateur de Défenses Naturelles. *Agriculture et territoires, Chambre d'Agriculture Puy-de Dôme*. 4 p.
- Okoro, C. (2024).** Intergating Biological Control Agents for Enhanced Management of Apple Scab (*Venturia inaequalis*) : Insights, Risks, Challenges, and Prospects. *Agrochemicals*, pp. 3,1, 118-146.
- Verly, C. (2019).** Caractérisation de l'effet de Stimulateur Défense des Plantes en fonction du développement et de l'apport de l'azote. *Phytopathologie et phytopharmacie*. Université Paris Saclay (COMUE), 295 p.
- Wendehenne, D. (2014).** Free radical-mediated systemic immunity in plants. *Plant Biology*, pp. 20, 127-134.



## SITOGRAPHIE :

LAROUSSE, Définition : Ascomycète.

.<https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/ascomyc%C3%A8te/23261> (consulté le 24/06/2025)

LAROUSSE, Définition inoculum.

<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/inoculum/186458>. (consulté le 15/05/2025)

LAROUSSE, Définition Périthèce.

<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/p%C3%A9rith%C3%A8ce/59637>. (consulté le 24/06/2025)

LAROUSSE. Définition Spore.

<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/spore/74318>. (consulté le 24/06/2025)

Bernadette, L et Lousteau, M. Une production 2022 au niveau de la moyenne quinquennale. (2022). [https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/IraFru22145/2022\\_145inforapPomme.pdf](https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/IraFru22145/2022_145inforapPomme.pdf). (consulté le 24/06/2025)

Chambre d'agriculture. Pays de la Loire. (2022).[https://rd-pays-de-la-loire.chambres-](https://rd-pays-de-la-loire.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Pays_de_la_Loire/2022/2022_etat_des_lieux_de_la_filiere_arboricole.pdf)

[agriculture.fr/fileadmin/user\\_upload/National/FAL\\_commun/publications/Pays de la Loire/2022/2022\\_etat\\_des\\_lieux\\_de\\_la\\_filiere\\_arboricole.pdf](https://rd-pays-de-la-loire.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Pays_de_la_Loire/2022/2022_etat_des_lieux_de_la_filiere_arboricole.pdf). (consulté le 20/05/2025)

Coutand, C et Colleu S. Cap Zéro Phyto. (2025). <https://www.cultiver-protéger-autrement.fr/les-projets/cap-zero-phyto>. (consulté le 12/06/2025)

DALIVAL. Variété Brookfield Baignet C.O.V.(2022).

<https://www.dalival.com/pommes/brookfield-baigent/>.(consulté le 12/06/2025)

DALIVAL. Geneva G11 C.O.V. (2022). <https://www.dalival.com/portegreffe/g11/>. (consulté le 12/06/2025)

NUFERM. Super Bouillie Macclesfield 80®. (2025).

<https://nufarm.com/fr/product/super-bouillie-macclesfield-80/>. (consulté le 12/06/2025)

ANDERMATT. Curatio. (2022). <https://www.anderstatt.com/fr/produit/curatio/> (consulté le 12/06/2025)



ANNEXE 1 Présentation des risques évaluées par Rimpro avec les différentes couvertures des traitement tavelure en 2025

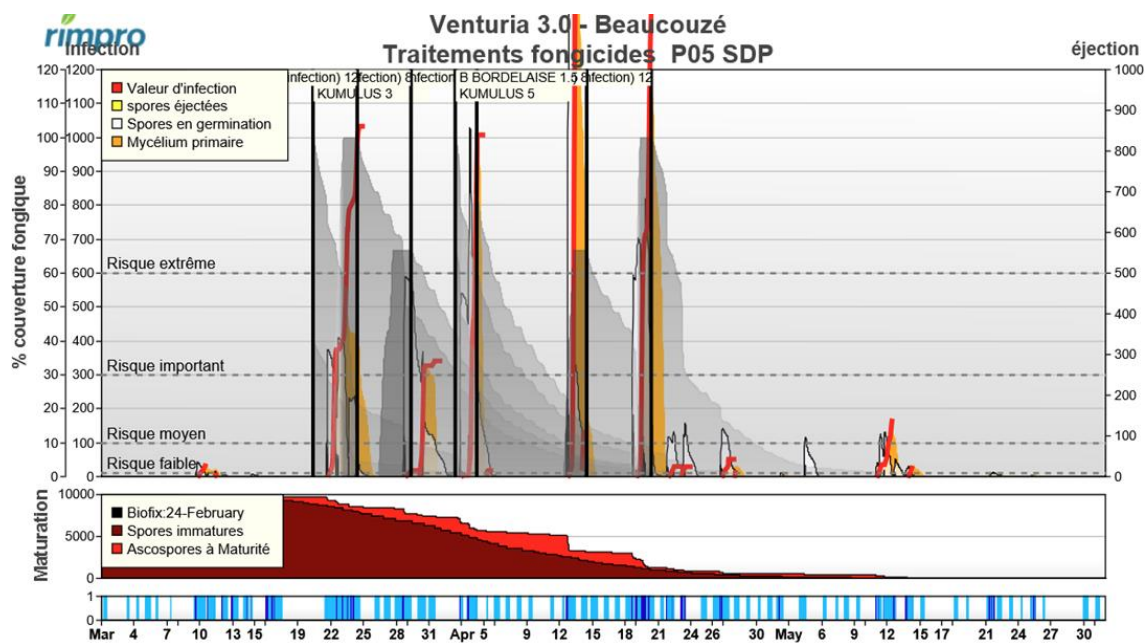


Figure 17 : Graphique des différents risques prédits par le logiciel Rimpro et les couvertures des fongicides réalisés en 2025, le protocole de traitement est légèrement différent, les RIM>800 ont été couvert

Tableau 4 : Les traitements tavelure et SDP qui ont été réalisés en 2025

Produit	Date de traitements	Dose (kg/hl)	Volume (L/ha)	Dose (kg/ha)
Super Bouillie Macclesfield 80	20-mars-25	0,38	400	1,5
curatio 12	24-mars-25	3,00	400	12
curatio 8	29-mars-25	2,00	400	8
Super Bouillie Macclesfield 80	2-avr.-25	0,38	400	1,5
soriale	4-avr.-25	0,48	400	1,9
curatio 10	4-avr.-25	2,50	400	10
soriale	11-avr.-25	0,48	400	1,9
curatio 8	14-avr.-25	2,00	400	8
soriale	17-avr.-25	0,48	400	1,9
curatio 12	20-avr.-25	3,00	400	12
soriale	24-avr.-25	0,48	400	1,9
soriale	30-avr.-25	0,48	400	1,9
soriale	7-mai-25	0,48	400	1,9
soriale	16-mai-25	0,48	400	1,9

## ANNEXE 2 Données brutes pour les analyses statistiques

Tableau 5 : Résultats bruts des observations sur feuilles en 2024, seul l'incidence a été pris en compte pour les statistiques

	Nombre de feuilles totales	Nombre de feuilles tavelées	Incidence
<b>AZOTE</b>	<b>1347</b>	<b>787</b>	<b>59,05%</b>
PFI_al	677	450	66,98%
Soriale	670	337	51,11%
<b>Carence</b>	<b>1396</b>	<b>601</b>	<b>44,01%</b>
PFI_al	647	344	53,22%
Soriale	749	257	34,80%
<b>Total général</b>	<b>2743</b>	<b>1388</b>	<b>51,53%</b>

Tableau 6 : Résultats bruts des observations sur fruits en 2024, seule l'incidence a été pris en compte pour les statistiques

	Nombre de fruits observés	Nombre de fruits tavelés	Incidence
<b>AZOTE</b>	<b>480</b>	<b>283</b>	<b>58,96%</b>
PFI_al	240	173	72,08%
Soriale	240	110	45,83%
<b>Carence</b>	<b>480</b>	<b>182</b>	<b>37,92%</b>
PFI_al	240	126	52,50%
Soriale	240	56	23,33%
<b>Total général</b>	<b>960</b>	<b>465</b>	<b>48,44%</b>

Tableau 7 : Résultats bruts des concentrations en chlorophylle de F0 et F1

Moyenne des concentrations de chlorophylles							
Les modalités :	F0_S0	F0_S1	F0_S2	F1_S1	F1_S2	F1_S3	Moyenne totale
<b>AZOTE</b>	<b>12,726</b>	<b>22,678</b>	<b>26,527</b>	<b>18,51 6</b>	<b>18,899</b>	<b>24,135</b>	<b>20,552</b>
PFI_al	12,771	23,592	27,197	19,598	19,774	24,743	21,279
SORIALE	12,681	21,725	25,827	17,433	18,025	23,527	19,815
<b>Carence</b>	<b>9,941</b>	<b>16,333</b>	<b>19,239</b>	<b>13,10 6</b>	<b>13,740</b>	<b>17,342</b>	<b>14,930</b>
PFI_al	10,826	17,049	19,888	13,358	13,939	17,509	15,385
SORIALE	9,057	15,647	18,617	12,853	13,541	17,175	14,482
<b>Moyenne totale</b>	<b>11,334</b>	<b>19,506</b>	<b>22,883</b>	<b>15,81 1</b>	<b>16,320</b>	<b>20,738</b>	<b>17,741</b>



### ANNEXE 3 Données brutes pour le NBI des F0 et F1 et la représentation graphique des données brutes

Tableau 8 : : Données brutes récoltées pour le ratio NBI (Chlorophylle/Flavonoïdes)

Moyenne NBI							
Modalités	F0_S0	F0_S1	F0_S2	F1_S1	F1_S2	F1_S3	Moyenne totale
<b>AZOTE</b>	<b>7,775</b>	<b>16,881</b>	<b>18,011</b>	<b>13,294</b>	<b>13,174</b>	<b>16,752</b>	<b>14,293</b>
PFI_al	8,006	17,552	18,408	14,492	14,350	17,658	15,077
SORIALE	7,543	16,180	17,597	12,097	11,998	15,846	13,497
<b>Carence</b>	<b>5,771</b>	<b>11,087</b>	<b>11,981</b>	<b>8,634</b>	<b>8,845</b>	<b>10,413</b>	<b>9,441</b>
PFI_al	6,358	11,816	12,481	8,906	9,195	11,158	9,955
SORIALE	5,185	10,389	11,503	8,363	8,495	9,668	8,934
<b>Total général</b>	<b>6,773</b>	<b>13,984</b>	<b>14,996</b>	<b>10,964</b>	<b>11,009</b>	<b>13,583</b>	<b>11,867</b>

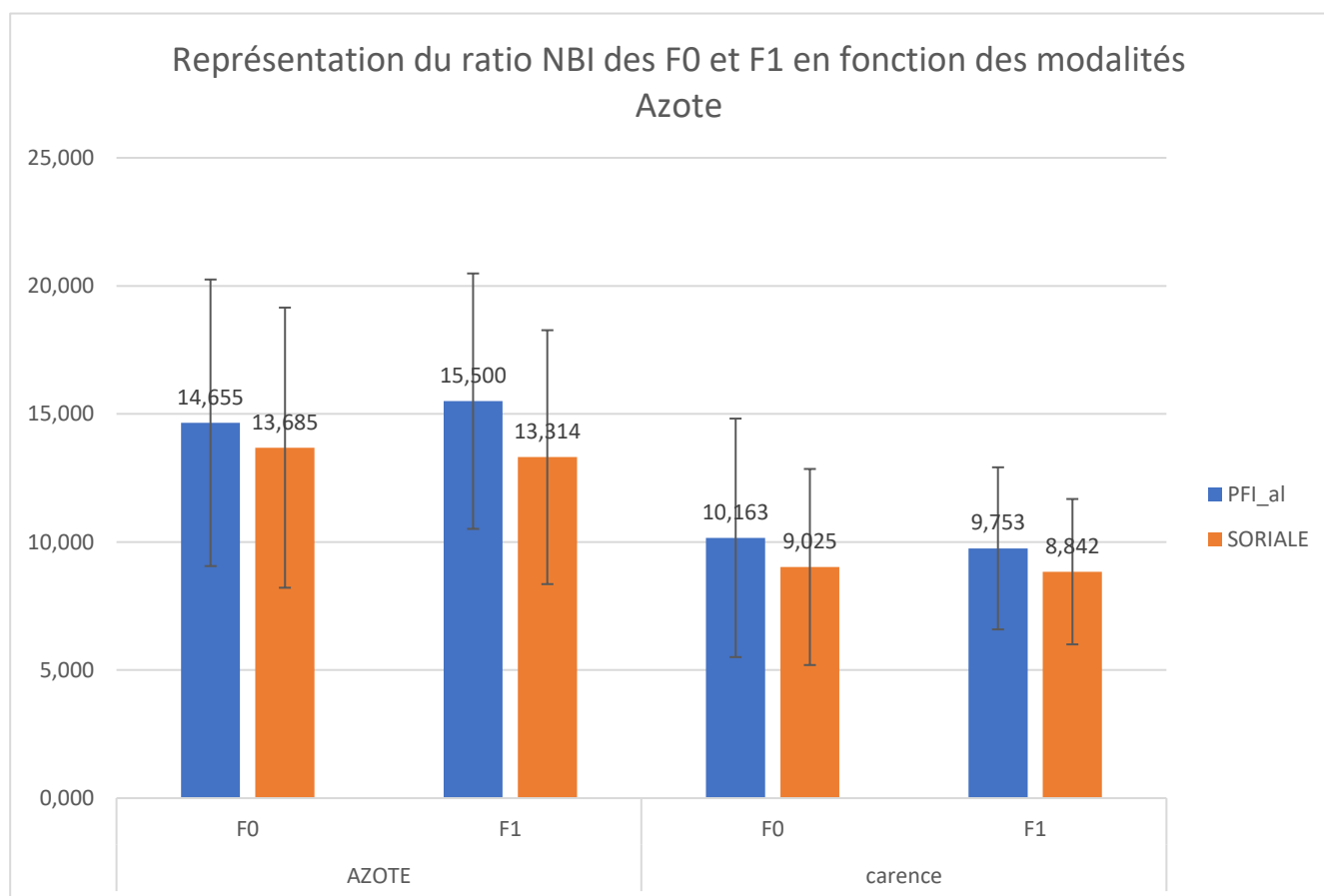


Figure 18 : Graphique du ratio NBI des F0 et F1 en 2025, comme la normalité des résidus n'est pas vérifiée malgré les transformations, aucune classe statistique n'est déterminée (réaliser un test de Kruskal- Wallis

# ANNEXE 4 Graphique des incidences moyennes des feuilles tavelées et fruits tavelés répartis selon les blocs en 2024

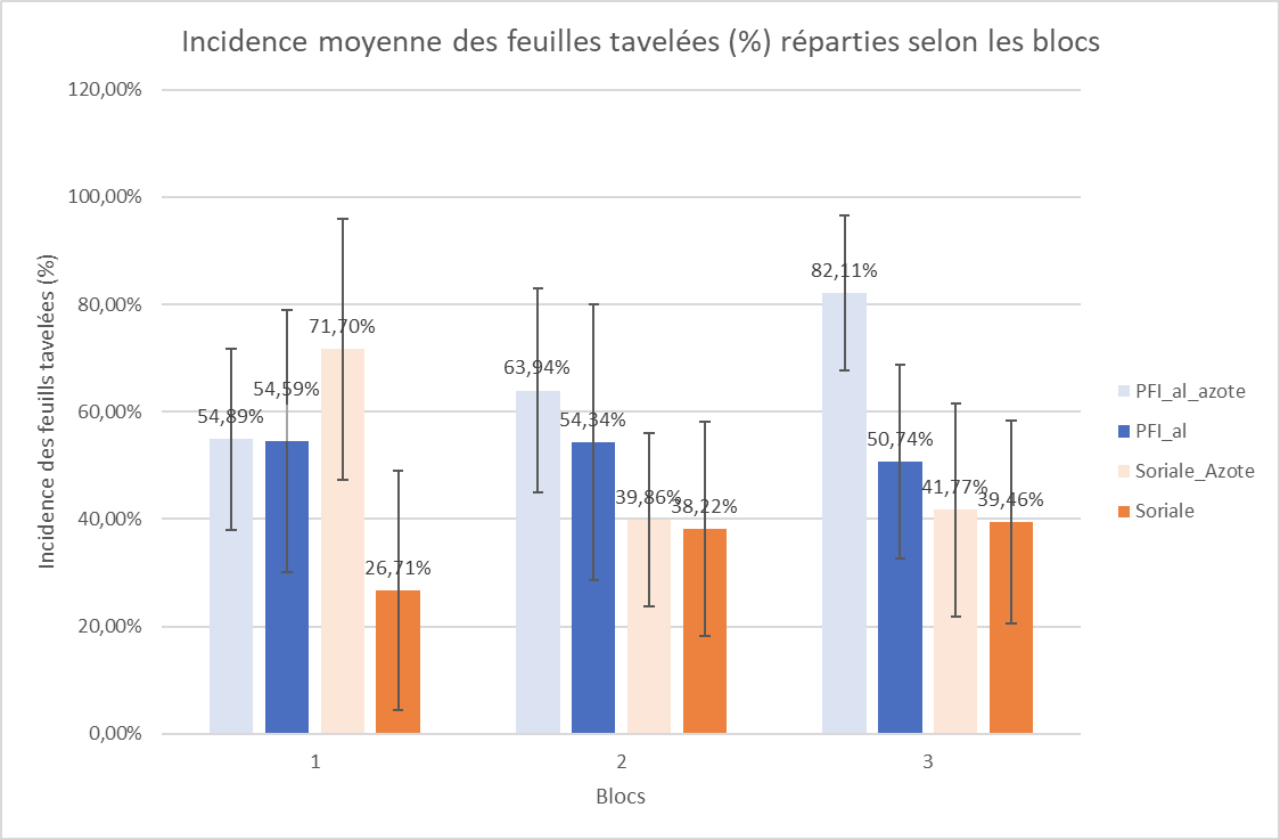


Figure 19 : : Graphique de l'incidence moyenne des feuilles tavelées selon les blocs en 2024

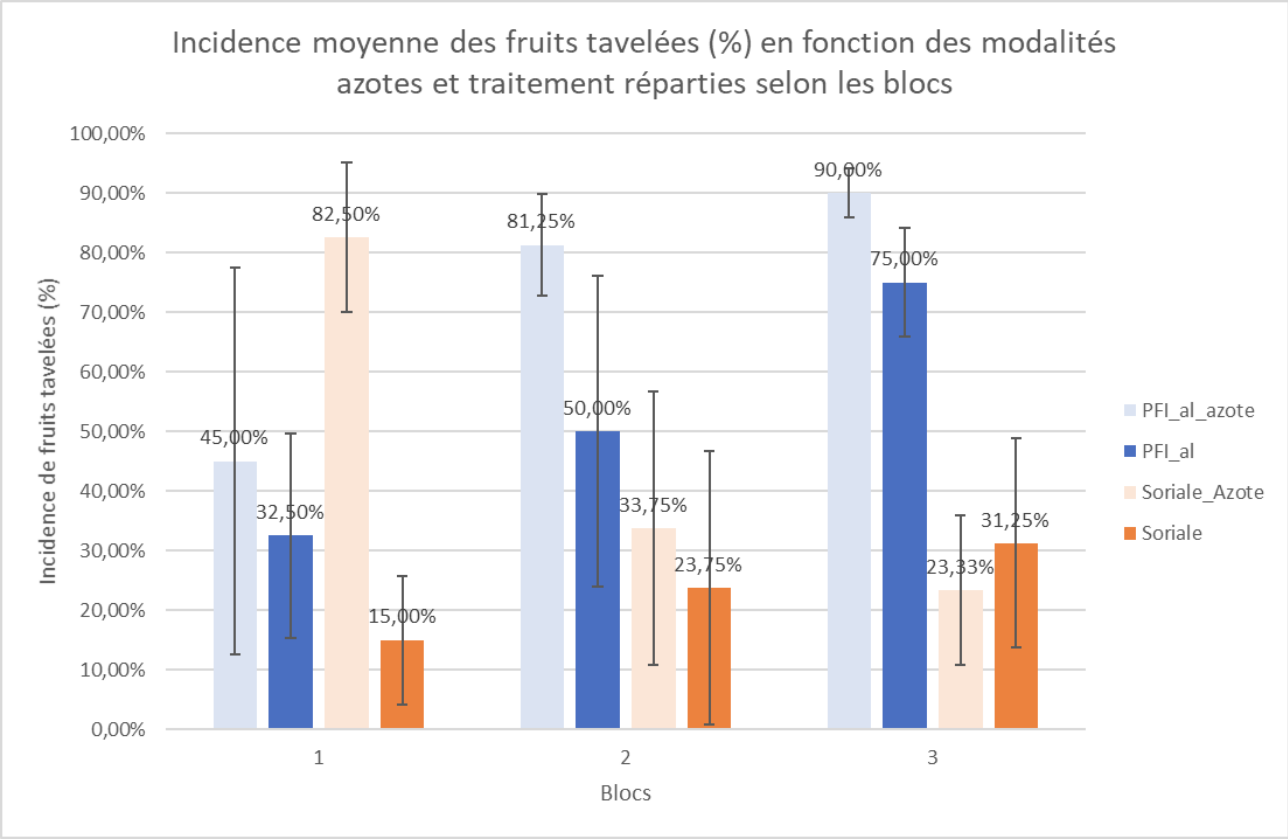


Figure 20 : Graphique du pourcentage de fruits tavelés selon les modalités répartis selon les blocs en 2024

ANNEXE 5 : Résultats statistiques de la concentration en Chlorophylle dans les feuilles F0 et F1

Représentation de la concentration en Chlorophylle dans les F0 et F1 en fonction des modalités

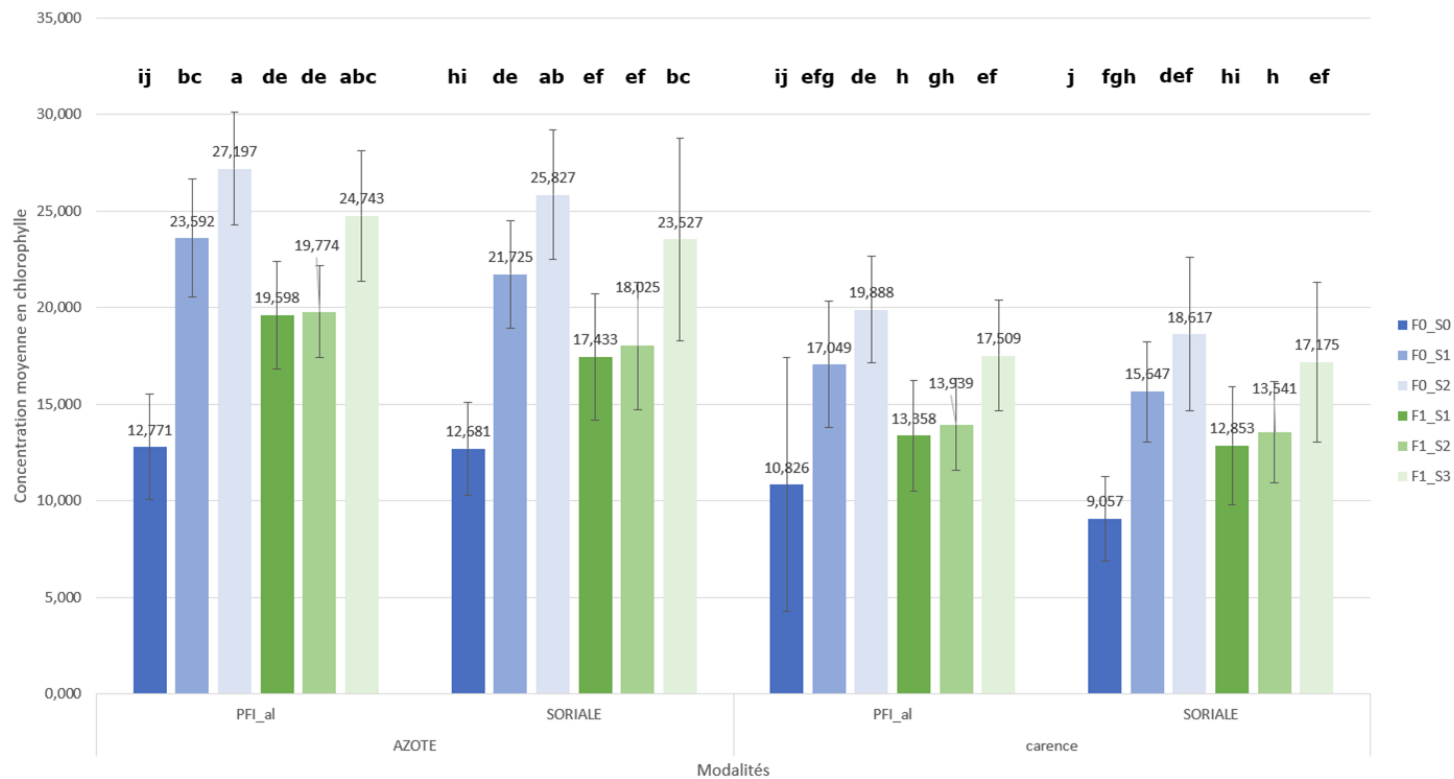


Figure 21 : Graphique de la concentration moyenne en chlorophylle dans les F0 et F1 en 2025

Représentation du NBI (Chlorophylle/Flavonoïdes) des F0 et F1 en fonction des modalités

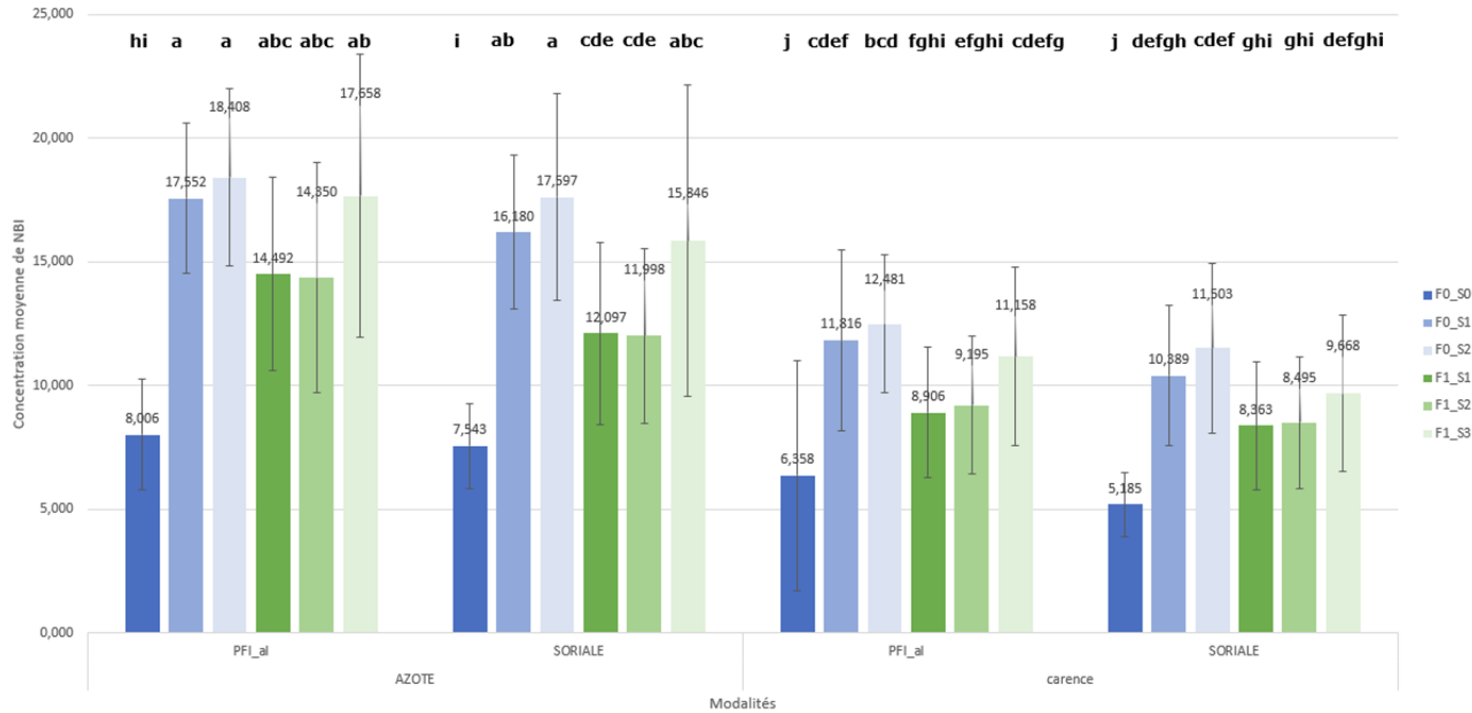


Figure 22 : : Graphique du NBI des F0 et F1 en fonction des modalités au cours du temps



## TABLE DES MATIERES

Engagement de non plagiat.....	
Remerciements .....	
Glossaire .....	
Liste des abréviations.....	
Sommaire.....	
Table des Illustrations .....	
Table des Tableaux .....	
Table des Annexes .....	
Introduction.....	1
A.Établissement d'accueil : Unité Expérimentale Horticole.....	1
B.Contexte d'étude .....	3
1.Production de la pomme en France : .....	3
2. <i>Venturia inaequalis</i> : pathogène de la tavelure du pommier .....	5
a. Cycle biologique.....	5
b. Symptômes causés sur le pommier par <i>Venturia inaequalis</i> ...	5
3.Méthode de lutte contre <i>Venturia inaequalis</i> .....	7
a. Prophylaxie .....	7
b. Lutte génétique.....	7
c. Lutte chimique.....	7
d. Lutte biologique .....	9
e. Stimulateurs des défenses des plantes.....	9
4.Les stratégies de défenses des végétaux .....	9
a. Résistance passive .....	11
b. Résistance active non spécifique (PTI) et spécifique (ETI).....	11
a. La résistance systémique acquise .....	11
5.Fertilisation azotée.....	13
a. Assimilation de l'azote .....	13
a. Rôle dans les défenses des plantes .....	13

C.Objectif de la période :.....	15
Matériels et Méthodes .....	17
A.Pathogène et matériel végétal .....	17
1.Le pathogène de la tavelure .....	17
2.Conduite des arbres sur la parcelle .....	17
B.Protocole de l'essai .....	19
1.Dispositif expérimental .....	19
2.Traitements tavelure .....	19
a.    PFI Allégée .....	21
b.    Soriale .....	21
c.    Modèle de prévision des risques tavelure : Rimpro .....	23
3.Apport d'engrais azoté .....	25
4.Méthodes d'observations .....	27
a.    Notation sur feuilles et fruits au cours de la saison .....	27
b.    Concentration en Chlorophylle et Flavonoïdes .....	27
C.Méthode d'analyse statistique .....	29
Résultats .....	31
A.Impact du Soriale dans la protection du pommier contre la tavelure en juin 2024.....	31
1.Incidence sur feuilles (Figure 14).....	31
2.Incidence sur fruits (Figure 15) .....	31
B.Impact de l'azote sur la concentration en chlorophylle et flavonoïde sur feuilles en 2025 .....	33
Discussion .....	35
Conclusion .....	39
Bibliographie .....	41
Sitographie : .....	43
Table des matières .....	
Abstract .....	
Résumé.....	

## RESUME

### LUTTE CONTRE LA TAVELURE DU POMMIER : Les stimulateurs de défenses des plantes combinées avec une carence azotée

*Venturia inaequalis*, agent pathogène induisant la tavelure du pommier, est le bioagresseur le plus problématique dans la production des pommes. La gestion de cette maladie nécessite de nombreuses applications de fongicides. Avec l'émergence de résistances et la baisse du nombre de produits homologués, la nécessité de développer de nouvelles stratégies de protection durables et efficace est en marche. Des études ont été et sont encore menées afin d'étudier l'immunité du pommier en combinant différent levier (génétique, apport d'azote, utilisation de Stimulateur des Défenses des Plantes). Nous avons donc étudié le levier de l'apport en azote combiné à une utilisation de SDP (Soriale) dans la protection de la tavelure du pommier. Les résultats obtenus montrent que la carence en azote réduit l'apparition de symptômes et augmente l'efficacité de protection du Soriale contre la tavelure. Un suivi physiologique a également été réalisé. L'effet de la carence a aussi démontré qu'elle jouait un rôle dans la physiologie de la plante notamment dans la réduction de la production de chlorophylle et une augmentation de l'accumulation des flavonoïdes.

Mots-clefs : *Venturia inaequalis*, tavelure, immunité du pommier, SDP

## ABSTRACT

### FIGHT AGAINST APPLE SCAB: Plant defense stimulators combined with a nitrogen deficiency

*Venturia inaequalis*, a pathogen inducing apple scab, is the most problematic pest in apple production. The management of this disease requires numerous fungicide applications. With the emergence of resistance and the decrease in the number of approved products, the need to develop new sustainable and effective protection strategies is underway. Studies have been and are still being conducted to study apple immunity by combining different tools (genetics, nitrogen supply, use of Plant Defense Stimulators). We therefore studied the lever of nitrogen supply combined with a use of PDS (Soriale) in the protection of apple scab. The results obtained show that nitrogen deficiency reduces the appearance of symptoms and increases the effectiveness of Soriale's protection against scab. A physiological follow-up was also carried out. The effect of the deficiency also demonstrated that it played a role in the physiology of the plant, particularly in reducing chlorophyll production and increasing flavonoid accumulation.

Key words : *Venturia inaequalis*, apple scab, immunity of the apple tree, Plant Defense Stimulators