



UFR Sciences
2, Bd Lavoisier
49045 ANGERS Cedex
01

AGROCAMPUS OUEST
65 rue de ST Brieuc, CS 84 215, BP
35042 – Rennes, Cedex
Université de Rennes I
1,2 rue de Thabor, CS 46150 – 35065
Rennes Cedex

LA MORINIERE – 37800
Saint-Epain

Mémoire de Fin d'Etudes

CONFIDENTIEL 3 années

**Master 2 Sciences Technologie Santé
Mention Biologie et Technologie du Végétal
Spécialité : Production et Technologie du Végétal (ProTeV)**

Parcours : I Productions Végétales Spécialisées / Option : Produits phytosanitaires, réglementation et méthodes alternatives

Année universitaire 2016-2017

La pulvérisation, un levier pour réduire l'utilisation des produits phytosanitaires en arboriculture ?

Par : Richard LOTHION

Soutenu à Angers le : 20 septembre 2017

Maître de stage : Fanny LE BERRE

Tuteur : Tristan BOUREAU



UFR Sciences
2, Bd Lavoisier
49045 ANGERS Cedex
01

AGROCAMPUS OUEST
65 rue de ST Brieuc, CS 84 215, BP
35042 – Rennes, Cedex
Université de Rennes I
1,2 rue de Thabor, CS 46150 – 35065
Rennes Cedex

LA MORINIERE – 37800
Saint-Epain

Mémoire de Fin d'Etudes

CONFIDENTIEL 3 années

**Master 2 Sciences Technologie Santé
Mention Biologie et Technologie du Végétal
Spécialité : Production et Technologie du Végétal (ProTeV)**

Parcours : I Productions Végétales Spécialisées / Option : Produits phytosanitaires, réglementation et méthodes alternatives

Année universitaire 2016-2017

La pulvérisation, un levier pour réduire l'utilisation des produits phytosanitaires en arboriculture ?

Par : Richard LOTHION

Soutenu à Angers le : 20 septembre 2017

Maître de stage : Fanny LE BERRE

Tuteur : Tristan BOUREAU



**ENGAGEMENT DE NON-PLAGIAT
M2 PROTEV
2016-2017**

Je soussigné : LOTHION Richard

déclare être pleinement conscient(e) que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publiés sur toutes formes de support, y compris l'internet, 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 ce rapport, rédigé au cours de mon master 2 ProTeV. Je m'engage également à respecter les consignes données pour la rédaction de ce rapport.

A : Azay-le-Rideau

Le : 3 septembre 2017

Signature :

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Richard LOTHION'.

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réussite de mon stage et qui m'ont assisté au cours de la rédaction de ce rapport.

Tout d'abord je tiens à remercier mon maître de stage, Mme Le Berre Fanny, qui m'a accueilli, m'a fait bénéficier de son expérience ; elle a su répondre à mes questions qu'elles soient fonctionnelles ou techniques et m'a permis de faire mes preuves en me confiant plusieurs missions variées. Cela m'a donné l'occasion de mettre à l'épreuve mes connaissances, mon autonomie, mon organisation et mon relationnel. Je tiens aussi à remercier l'ensemble de notre équipe de travail pour l'ambiance et l'entente cordiale rendant mon travail agréable ce qui a été dans le sens de ma motivation.

J'ai également pris beaucoup de plaisir à côtoyer l'ensemble des employés de La Morinière tout au long de ce stage. D'une manière générale, j'adresse mes remerciements à l'ensemble des personnes de la station d'expérimentation, qui m'ont très bien intégré à leurs côtés et avec qui j'ai pris plaisir à travailler.

Je suis grandement reconnaissant envers l'entreprise qui m'a accordé sa confiance au regard de l'autonomie dans les responsabilités et les missions qui m'ont été confiées.

Je remercie également mon tuteur de stage, Mr Boureau Tristan, qui m'a aidé dans l'élaboration de mon rapport et qui a répondu à chacune de mes sollicitations ; mes parents, mon frère et principalement mon amie Charlotte qui ont toujours été présents lorsque le besoin s'en faisait sentir.

Enfin, je remercie l'équipe pédagogique du Master 2 Production et Technologie du Végétal qui m'a fourni les connaissances nécessaires à l'accomplissement de ce stage.

Table des matières

Glossaire

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des annexes

PARTIE I : INTRODUCTION	1
1.1 Présentation et structure d'accueil	1
1.2 Culture du pommier, quelques généralités.....	1
1.2.1 Les origines, de l'état sauvage à la domestication	1
1.2.2 Marché mondial, européen et français	2
1.2.3 Biologie et physiologie	2
1.2.4 Itinéraire technique.....	3
1.3 Mise en œuvre de la protection phytosanitaire	4
1.4 Qualité de la pulvérisation	5
1.4.1 Evaluation de la qualité.....	5
1.4.2 Méthode de quantification d'un traitement en arboriculture.....	6
1.5 matériel de pulvérisation en fruits a pepins	7
1.5.1 Pulvérisateurs	7
1.5.2 Buses	8
1.6 Facteurs influençant la pulvérisation	8
1.6.1 Conditions environnementales	8
1.6.2 Stade végétatif et structure	9
1.7 Caractérisation de la surface foliaire des arbres	9
1.7.1 TRV	9
1.7.2 LWA.....	9
1.7.3 Spectre lumineux.....	10
1.8 Expression et méthodes d'utilisation des intrants phytosanitaires.....	10
1.8.1 Mode d'expression de la dose	10

1.8.2 Moyens d'adaptation en Europe.....	11
1.9 Présentation du projet	12
PARTIE II : MATERIEL & METHODES	13
2.1 Estimation de la surface foliaire des arbres	13
2.2 Estimation de la qualité de pulvérisation.....	13
2.2.1 Tests préalables	13
2.2.2 Test à la tartrazine	14
2.3 Test d'adaptation des doses en grande parcelle	16
2.3.1 Dispositif expérimental et modalités étudiées.....	16
2.3.2 Efficacité biologique	16
2.3.3 Traitements des données	17
PARTIE III : RESULTATS	18
3.1. Estimation de la surface foliaire des arbres	18
3.1.1 TRV.....	18
3.1.2. LWA.....	18
3.1.3 Indicateurs combinés.....	18
3.2 Test de qualité de pulvérisation	19
3.2.1 Influence du type de pulvérisateur et ses réglages	19
3.2.2 Influence du stade végétatif du pommier	20
3.3 Adaptation des doses en grande parcelle	22
3.3.1 Pression phytosanitaire	22
3.3.2 Coût de la protection phytosanitaire	23
3.3.3 Efficacité biologique	23
PARTIE IV : DISCUSSION.....	24
4.1 Caractérisation de la surface foliaire des arbres	24
4.2. Qualité de pulvérisation	26
4.2.1 Jet porté, pulvérisation axiale.....	26
4.2.2 Jet porté, pulvérisation tangentielle.....	27
4.2.3 Pulvérisation pneumatique	28

4.3. Adaptation des doses	29
PARTIE V : CONCLUSION & PERSPECTIVES	32
5.1 Conclusion	32
5.2 Perspectives	33
Bibliographie.....	34
Annexes	

Glossaire

Arcure : Opération par laquelle les branches ou les rameaux sont recourbés vers le bas pour en diminuer la vigueur et accroître la production des fruits (Larousse.fr)

Atomiseur : Appareil servant à disperser des liquides, solutions ou suspensions (Larousse.fr)

Club : communauté d'intérêt pour le développement de nouvelle variété

Dérive : quantité de produits phytopharmaceutiques transportée hors de la zone soumise à pulvérisation sous l'action des courants d'air lors du processus d'application (Vignevin.com)

Dessiccation : action de dessécher (Larousse.fr)

Dose : quantité de produit à appliquer pour une surface donnée assurant un niveau d'efficacité satisfaisant (Larousse.fr)

Effet Venturi : phénomène de la dynamique des fluides où il y a formation d'une dépression dans une zone où les particules de fluides sont accélérées (Wikipédia.org)

Electrostatique : partie de la physique qui traite des phénomènes d'équilibre de l'électricité sur les corps électrisés (Larousse.fr)

Percentile : valeur de la variable qui divise la variable continue en cent groupes égaux (Linter-naute.com)

Liste des abréviations

ANSES : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

ATR : Alumine Turbulence Rodée

BBCH : Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und CChemische Industrie ou centre federal de recherche biologique, office federal variétale et de l'industrie chimique

BSF : Brilliant Sulfaflavine

CEB : Commission des Essais Biologiques

CTIFL : Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes

DNM : Diamètre Numérique Médian

DVM : Diamètre Volumétrique Médian

DOSAFRUT : Determination del volume de caldo en tratamientos fitosanitarios de plantaciones frutales ou détermination du volume de bouillie des traitements phytosanitaires en vergers fruitiers

ECPA : European Crop Protection Association ou Association Européenne de la protection des cultures

FAO : Food and Agriculture Organization of the United Nations ou Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

Ha : Hectare

Hl : Hectolitre

HT : Hors taxe

IBS : Inhibiteur de la Biosynthèse des Stérols

IDfel : Initiative Développement fruits et légumes

IFT : Indice de fréquence de traitement

IRSTEA : Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agri-culture

ISO : International Organization for Standardization ou Organisation internationale de normalisation

Kg : Kilogramme

l : Litre

LAI : Leaf Area Index ou Index de Surface Foliaire

LiDar : Light / laser detection and ranging ou télédétection par lumière / laser

LWA : Leaf Wall Area ou Surface de la haie foliaire

OA : Opti-Ajust

OAD : Outil d'Aide à la Décision

ONEMA : Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques

PACA : Provence-Alpes-Côte d'Azur

PACE : Pesticide dose rate Adjustment to the Crop Environment ou ajustement de la dose de pesticide à l'environnement de la culture

SFT : Surface Foliaire Totale

SAU : Surface Agricole Utile

SDHI : Succinate DesHydrogénase Inhibitor ou inhibiteur de la succinate déshydrogénase

TNT : Témoin non traité

TRV : Tree Row Volume ou Volume de la haie foliaire

TVI : Turbulence Venturi Iso

ZNT : Zone de Non Traitement

Liste des figures

Figure 1 : Station d'expérimentation la Morinière.....	1
Figure 2 : La Morinière au cœur des réseaux	1
Figure 3 : Prévision de la récolte 2016.....	2
Figure 4 : Bassins de production français et les pourcentages associés	2
Figure 5 : Conduite en palmette (à gauche), en buisson (au milieu) et en drapeau (à droite)	3
Figure 6 : Conduite en solaxe (à gauche) et en mur fruitier (à droite)	3
Figure 7 : Nombre moyen de traitement phytosanitaires en pommes de table 2016.....	4
Figure 8 : Surface recouverte par plusieurs tailles de gouttelettes	5
Figure 9 : Coefficient d'homogénéité du spectre de pulvérisation	5
Figure 10 : Révélation de la fluorescéine en verger	6
Figure 11 : Principe de pulvérisation a jet projeté.....	7
Figure 12 : Principe de pulvérisation a jet porté.....	7
Figure 13 : Principe de pulvérisation pneumatique	7
Figure 14 : Mode de fonctionnement d'une buse à fentes.....	8
Figure 15 : Mode de fonctionnement d'une buse à turbulence	8
Figure 16 : Mode de fonctionnement d'une fente à injection d'air	8
Figure 17 : Méthode de calcul et principe du TRV exprimé en m^3/ha	9
Figure 18 : Méthode de calcul et principe du LWA exprimé en m^2/ha	9
Figure 19 : Lidar monté sur un tracteur, et principe de fonctionnement.....	10
Figure 20 : Test aux papiers hydrosensibles avec le pulvérisateur de référence.....	13
Figure 21 : Quali'drop avec le pulvérisateur opti-ajust.....	13
Figure 22 : Passages du pulvérisateur tous les rangs et un rang sur deux	14
Figure 23 : Dispositions des papiers collecteurs au sein de la canopée	14
Figure 24 : Collecteurs PVC disposés sur feuilles et sol.....	14
Figure 25 : Courbe étalon.....	15
Figure 26 : Plaque pour spectrophotomètre.....	15
Figure 27 : Formule permettant de déterminer l'indice de traitement.....	16

Figure 28 : Pourcentage d'évolution de l'indicateur TRV et du LWA	18
Figure 29 : Représentation de la parcelle 21 ligne 2 conduite en axe d'après les données Lidar	18
Figure 30 : Quantité de tartrazine captée par la végétation avec les 3 pulvérisateurs en juin	19
Figure 31 : Papiers hydrosensibles du pulvérisateur équipé de buses ATR à gauche et de buses TVI en haut de la rampe à droite.	19
Figure 32 : Quantité totale de tartrazine captée et boîte à moustache correspondantes	19
Figure 33 : Quantité de tartrazine captée par la végétation avec le pulvérisateur Berthoud à 4 dates ..	20
Figure 34 : Quantité totale de tartrazine captée et boites à moustaches correspondantes	20
Figure 35 : Résultats obtenus pour l'essai tartrazine avec les pourcentages de répartition entre les 3 aires (canopée, air, sol) du volume pulvérisé, le détail du volume capté au sein des zones de la canopée et du sol (en ng/dm ² pour 1g de traceur à l'hectare) en fonction du pulvérisateur et du litrage hectare utilisé	21
Figure 36 : Evolution de la surface foliaire (en bleu) et du volume foliaire (en orange) pour la parcelle subissant l'adaptation des doses	22
Figure 37 : Indice de fréquence de traitement (a) et sa réduction (b) selon les modalités	22
Figure 38 : Coût des intrants phytosanitaires (a) et leurs réductions (b).	23
Figure 39 : Pourcentage de pousses touchées par une maladie ou un ravageur en fonction des adaptations de dose le le 10 juillet.....	23
Figure 40 : Problème rencontré en verger par l'utilisation du lidar	25
Figure 41 : Différences d'interprétation des données manuelles et lidar pour le LWA	25
Figure 42 : Effet du type de pulvérisateur à ventilation axiale et tangentielle sur la dérive.....	26
Figure 43 : Schéma représentant le fonctionnement du système d'électro-statisme	28
Figure 44 : Schéma et photo du dispositif de pulvérisation sur frondaison.....	33
Figure 45 : Endothérapie végétale sur palmier.....	33
Figure 46 : Bâche anti-pluie	33

Liste des tableaux

Tableau I : Pratiques phytosanitaires en arboriculture en Val de Loire	4
Tableau II : Caractéristiques des grosses et petites gouttes	5
Tableau III : Caractéristiques des parcelles étudiées pour les indicateurs de surface foliaire.....	13
Tableau IV : Modalités étudiées en juin pour la qualité de pulvérisation	15
Tableau V : Caractéristiques de la parcelle d'essai Pulvarbo.....	16
Tableau VI : Modalités étudiées.....	16
Tableau VII : Moyen permettant de calculer la dose pour la modalité BBCH	16
Tableau VIII : Nombre de produits utilisés au cours de la saison en fonction des cibles	22
Tableau IX : Caractéristiques des buses ATR et TVI	26
Tableau X : Impact des indicateurs sur l'IFT et les coûts	30

Liste des annexes

Annexe I : Principaux stades phénologiques du pommier	I
Annexe II : Ravageurs et maladies rencontrés au verger de La Morinière	II
Annexe III : Tests aux papiers hypersensibles pour le pulvérisateur Berthoud	III
Annexe IV : Plan parcellaire Pulvabo	IV
Annexe V : Calendrier de traitement des produits et leurs caractéristiques	V
Annexe VI : Données météorologiques durant l'essai qualité de pulvérisation.....	VII
Annexe VII : Tests statistiques utilisés pour la qualité de pulvérisation.....	VIII



Figure 1 : Station d'expérimentation la Morinière

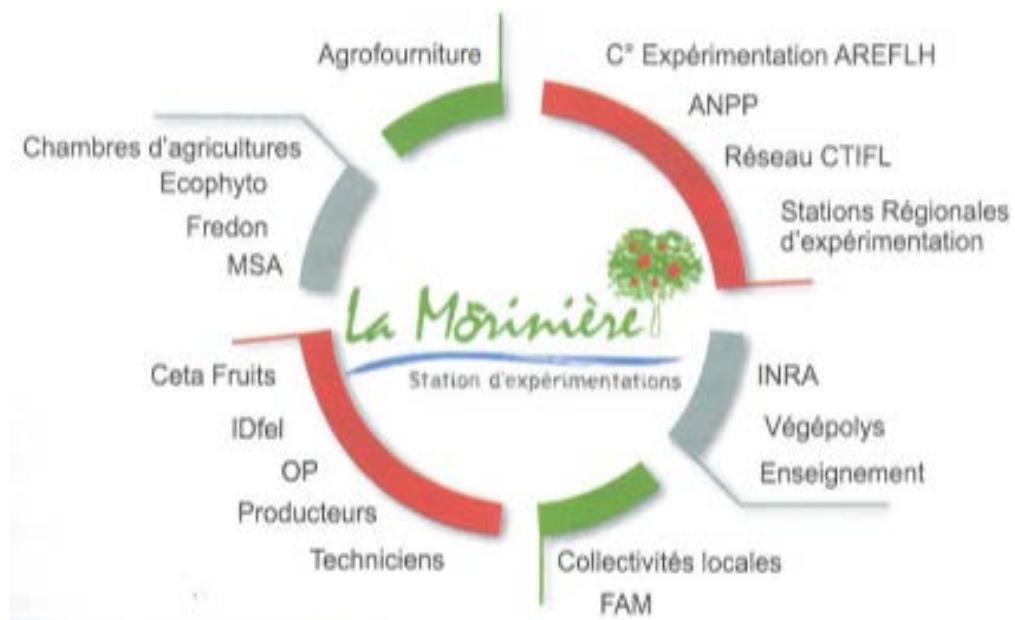


Figure 2 : La Morinière au cœur des réseaux

PARTIE I : INTRODUCTION

1.1 PRESENTATION ET STRUCTURE D'ACCUEIL

Crée en 1980 à l'initiative des organisations de producteurs du Val de Loire, la Station d'Etudes et d'Expérimentations Fruitières Nord-Loire La Morinière (Figure 1) est implantée sur la commune de Saint-Epain (Indre-et-Loire) sur plus de 65 ha dont 37 ha de plantations. Le verger de La Morinière regroupe toutes les espèces et variétés de référence du Val de Loire. Il se compose de la manière suivante : 28 ha de pommier dont 2,8 ha en bio avec un panel variétal étendu de variétés club, de références et de nouvelles variétés ; 6 ha de poirier dont 0,2 ha en bio ; 0,38 ha de cassissier dont 0,13 ha en bio et 0,02 ha de groseiller.

La Morinière est la plus grande station d'expérimentation fruitière en France depuis 30 ans. Deux grandes retenues d'eau subviennent aux besoins hydriques par goutte à goutte ou microjet. La Morinière est équipée de manière similaire aux exploitations du Val de Loire (verger recouvert de filet paragrelle, une base phytosanitaire, un laboratoire pour l'analyse des résultats...) afin d'avoir des résultats les plus facilement transposables à la réalité des arboriculteurs. Elle joue une place prépondérante dans la filière pomme et est au cœur des réseaux (Figure 2). Elle est gérée par l'iDfel, ayant pour but de promouvoir et d'accompagner la production fruitière et légumière en France, et reçoit des financements de producteurs privés.

La mission principale de la station est d'acquérir des références techniques en verger et en conservation, répondant aux attentes des producteurs et d'anticiper les évolutions de la filière. Ceci s'exprime à travers trois axes de travail : une qualité du produit pour le consommateur, des méthodes de production plus respectueuses de l'environnement et une maîtrise et réduction des coûts de production.

1.2 CULTURE DU POMMIER, QUELQUES GENERALITES

1.2.1 Les origines, de l'état sauvage à la domestication

Le pommier appartient à la famille des Rosacées, à la sous famille des Pomoïdées et au genre *Malus*. Le pommier, *Malus domestica*, originaire d'Asie du Sud-Ouest, fait partie des plus anciens arbres fruitiers. En effet, son fruit, la pomme est chargée de symboles, allant de fruit défendu jusqu'à la pomme de la discorde. Il a été introduit en Europe et en Afrique du Nord par les Grecs et les Romains qui ont participé à sa propagation (Giraud *et al.*, 2014). Le mot « pomme » vient du latin *pomum* qui signifie « fruit ».

Issu d'un pommier sauvage des montagnes du Kazakhstan, le pommier domestique s'est répandu le long de la route de la soie jusqu'en Europe. Sa diversité est en partie due aux échanges de gènes avec les pommiers sauvages des régions traversées. Selon certains, sa domestication provient du pommier sauvage *Malus sieversii*, originaire d'Asie centrale et de *Malus sylvestris* pour les variétés européennes (Cornille *et al.*, 2012).

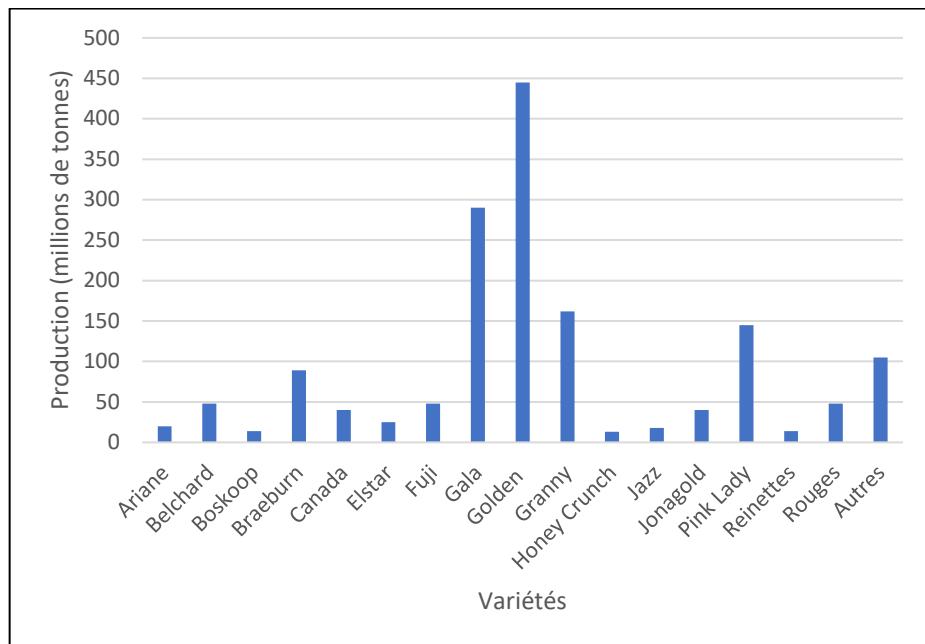


Figure 3 : Prévision de la récolte 2016 (La Pomme, 2017)

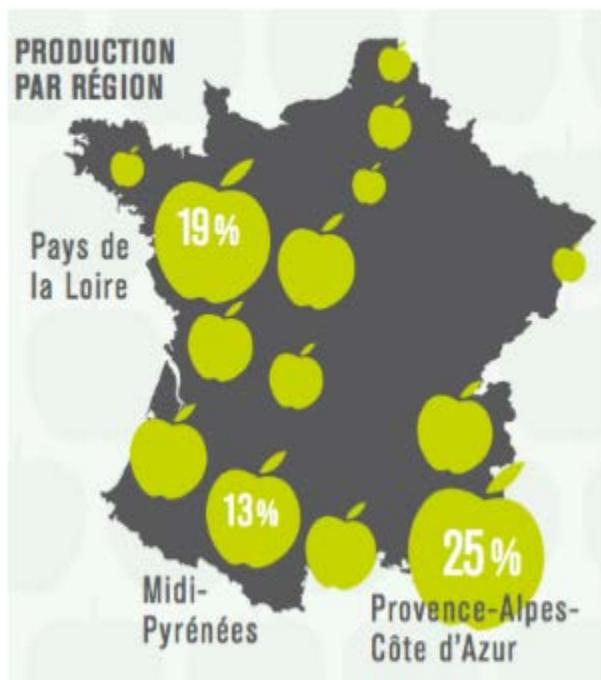


Figure 4 : Bassins de production français et les pourcentages associés (Consoglob, 2017)

1.2.2 Marché mondial, européen et français

De nos jours, 7500 variétés et cultivars de pommes sont connus. La pomme est l'un des fruits les plus consommés au monde après les agrumes et les bananes et elle est cultivée dans les pays tempérés des deux hémisphères.

La production mondiale est de 64 millions de tonnes, dont 12 en Europe et 1,5 pour la France. D'après les données de la FAO (Food and Agriculture Organization), la production mondiale a réalisé un véritable bond au cours des années 1990 du fait de l'explosion de la production chinoise ainsi qu'une hausse dans l'hémisphère nord. Les principaux pays producteurs sont la Chine (24 millions de tonnes par an), les Etats-Unis (5 millions de tonnes par an) et l'Europe des 25 (12 millions de tonnes par an). La France est le troisième pays exportateur mondial avec 630 000 tonnes par an, précédé par le Chili (740 000 tonnes par an) et la Chine (775 000 par an). L'Europe représente malgré tout la moitié des importations dont l'Allemagne est le premier pays importateur (700 000 tonnes par an), (Trillot *et al.*, 2002).

Malgré une baisse des surfaces nationales en pommier, en conséquence de la mise en œuvre du plan communautaire d'arrachage, visant à encourager l'investissement pour assurer un renouvellement régulier des espèces et des variétés afin de conserver une arboriculture de qualité, la production de pomme est en légère progression grâce à l'intensification des techniques de production sur une dizaine d'années.

Les différents types de climats et les terroirs de France permettent une production de pommes qualitative, quantitative et très diverse avec de nombreuses variétés. La Golden delicious est la première consommée et produite en Europe et en France (Figure 3). L'amélioration génétique par l'innovation variétale de pomme repose sur quatre axes principaux : la qualité des fruits, la conservation, la résistance aux bio-agresseurs ainsi que la recherche d'une architecture de l'arbre générant une régularité de production et une économie de main d'œuvre. C'est donc un objectif ambitieux ayant pour but de maintenir la part de marché existante, voire de l'augmenter, à partir d'une démarche basée sur la maîtrise qualitative et quantitative d'une variété avec ses qualités reconnues (Trillot *et al.*, 2002). D'autres variétés sont produites en grande quantité, comme la Gala, Granny Smith, Braeburn et Pink Lady.

Le bassin Rhône-Méditerranée est le premier bassin français avec 800 000 tonnes. La région PACA représente près de 65% des volumes produits dans cette zone. Le bassin Val de Loire vient en seconde position avec près de 600 000 tonnes (Figure 4). Le marché national s'élève à 700 millions d'euros. Malgré tout, les producteurs français font face à des difficultés notamment sur les coûts de production, les prix de vente, la législation phytosanitaire de plus en plus stricte ou encore les baisses des SAU.

1.2.3 Biologie et physiologie

Le pommier est un arbre hermaphrodite à feuilles caduques pouvant atteindre plus de 10 mètres et vivre plus de 100 ans, même si les arbres en verger sont généralement remplacés tous les 10-15 ans car leur fécondité commence à baisser.



Figure 5 : conduite en palmette (à gauche), en buisson (au milieu) et en drapeau (à droite) (Trillot *et al.*, 2002).



Figure 6 : conduite en solaxe (à gauche) et en mur fruitier (à droite) (Trillot *et al.*, 2002).

Durant l'hiver, les bourgeons foliaires et floraux sont couverts d'écailles brunes et sont en phase de dormance. À la remontée des températures, les bourgeons vont se développer grâce à la production de gibberellines, permettant la mobilisation des réserves métaboliques empêchant le retour de la dormance. Les feuilles de rosette commencent ensuite à se développer puis c'est le tour des feuilles de bourse. Par la suite elles se développent avec les fruits. Enfin la sénescence débute et l'arbre entre en dormance. Durant toutes ces phases, la croissance est liée à un ensemble de facteurs en interaction comme les pratiques culturelles, le sol, le porte greffe, la variété, le climat, la fertilisation ou encore le mode de conduite.

Afin de codifier les stades phénologiques des plantes cultivées, l'échelle décimale BBCH (Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie) a été créée (représentée par des chiffres et nombres, Annexe I) pour disposer d'un système uniforme afin de décrire le développement de l'ensemble des plantes cultivées et adventices. D'autres classifications phénologiques des végétaux existent chez les professionnels, comme l'échelle de Fleckinger (représentée avec des lettres, Annexe I).

1.2.4 Itinéraire technique

La conduite du verger correspond à la configuration donnée aux arbres. Elle prend en compte la structure du verger (quantité d'arbres/ha, distances intra et inter-rang, type de palissage, irrigation, fertilisation, traitements phytosanitaires...) ainsi que les interventions réalisées sur les arbres (taille, arcure, éclaircissement), (Mathieu et al., 2011).

La conduite de l'arbre doit répondre à trois objectifs : trouver un équilibre entre vigueur et fertilité, provoquer l'apparition d'organes fruitiers sur toute la longueur des charpentières au fur et à mesure de sa croissance, et engendrer la mise à fruits rapide des arbres (correspondant à l'entrée en production).

De nombreux types de conduite existent, dont les formes plus anciennes sont la conduite en buisson, palmette ou drapeau (Figure 5), mais les vergers de pommiers français sont majoritairement conduits en axe vertical, et de plus en plus en formes étroites comme c'est le cas en Val-de-Loire à travers le solaxe et le mur fruitier (Figure 6).

Le solaxe consiste à conduire l'arbre le plus librement possible selon son propre mode de ramification. Le but recherché est d'accélérer la mise à fruits et d'établir rapidement un équilibre entre la fructification et la croissance végétative. Le mur fruitier est le résultat de 15 années de recherche suite à de nombreux constats (pénurie de personnel, réduction du temps de travail, conditions de travail difficile, coût élevé de la main d'œuvre et mécanisation insuffisante) afin d'améliorer les performances du verger, à la fois sur le plan économique et sur le plan technique. Sur un verger classique, l'épaisseur est de 1,60m alors qu'elle est ramenée ici à 0,8m (soit réduite de moitié) et la taille est essentiellement mécanisée par rognage. Ce type de verger permet un meilleur accès à l'arbre (Masseron et al., 2002) permettant de diminuer les travaux manuels et les coûts de production en étant adaptés à la mécanisation.

Tableau I : Pratiques phytosanitaires en arboriculture en Val de Loire (d'après Agreste, 2016)

	Val de Loire	France
Tavelure	21,2	16,5
Oïdium	4,8	3,5
Autres maladies	4,1	2,6
Pucerons	5	3,5
Carpocapse	2,2	3,2
Autres ravageurs	2,6	2,2
Herbicides	2,5	1,8
Substances de croissance	2,3	1,8
Divers (rugosité, répulsifs...)	0,7	0,5
Totaux	45,4	35,6

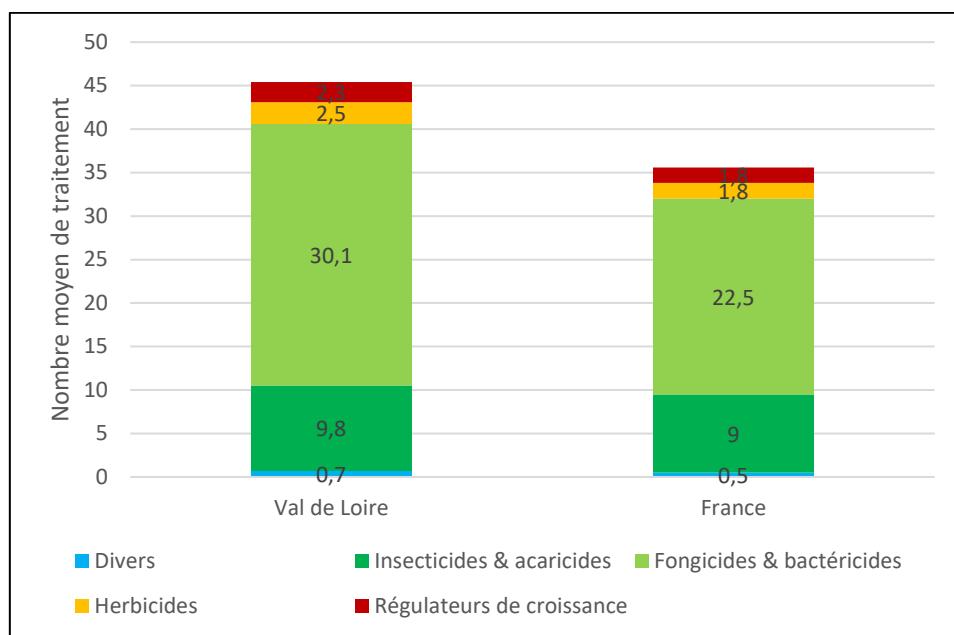


Figure 7 : Nombre moyen de traitement phytosanitaires en pommes de table 2016 (d'après Agreste, 2016)

1.3 MISE EN ŒUVRE DE LA PROTECTION PHYTOSANITAIRE

Afin que les arboriculteurs puissent écouler leur production, il est primordial que celle-ci n'ait aucun défaut. Cependant, le pommier fait face à une multitude de ravageurs et de maladies présents au cours de son cycle pouvant compromettre la qualité et la quantité. Le coût non négligeable pour un producteur concernant la protection (proche de 1500€/ha à l'année en verger conventionnel) est élevé mais se justifie par les dégâts potentiels pouvant engendrer un risque économique trop important. La distribution des ravageurs et maladies est fonction des régions (car ceux-ci sont grandement dépendants des conditions climatiques), avec des dégâts plus ou moins préjudiciables. Les principaux ravageurs rencontrés à La Morinière sont détaillés en Annexe II.

Chaque année, le ministère de l'agriculture et de l'alimentation publie les pratiques phytosanitaires en pomiculture. Le Val de Loire est un contexte favorable à la production de pommes de table et aux bioagresseurs. La pomme de table étant la première production fruitière régionale (250 000 à 300 000 tonnes selon les années), la connaissance des pratiques phytosanitaires appliquées aux vergers de pommiers constitue un enjeu important. Les vergers du Val de Loire bénéficient de conditions de production plutôt favorables. La pression des bioagresseurs (maladies et ravageurs) et les objectifs quantitatifs et qualitatifs de la filière concourent à la mise en œuvre d'itinéraires de production des vergers parmi les plus soutenus à l'échelle nationale. De nombreux arboriculteurs s'engagent dans la mise en œuvre des techniques préventives, prophylactiques et de biocontrôle.

En 2016, les vergers de pommiers étudiés par le ministère (environ 5600ha) ont reçu en moyenne 45 traitements phytosanitaires en 25 passages (deux produits utilisés lors d'un même passage correspondent à deux traitements) : 30 traitements contre les maladies fongiques et bactériennes, 10 contre les insectes et acariens ravageurs, 2,5 contre les adventices et 2,3 pour réguler la charge des arbres. Ce nombre de traitement varie en fonction de nombreux facteurs comme la pression parasitaire, l'exposition et le contexte pédo-topographique du verger, la sensibilité des variétés, le porte-greffe, les modes de production ainsi que les techniques autres que phytosanitaires. La tavelure est le champignon parasite qui mobilise toute l'attention. Sa lutte génère la majorité des traitements phytosanitaires, 21 en moyenne soit près de la moitié de l'ensemble (Tableau I, Figure 7).

L'utilisation d'intrants phytosanitaires afin de lutter et de gérer efficacement ces maladies fongiques et ravageurs nécessitent un matériel de pulvérisation adapté aux caractéristiques du verger en question. Il est donc indispensable de connaître et comprendre l'influence du matériel (buses et pulvérisateurs) sur l'efficacité des traitements.

Tableau II : Caractéristiques des grosses et petites gouttes (adapté de Dobson, 2001)

Taille des gouttelettes	Avantages	Inconvénients
Grosses	Impact aisément Dépôt sur la cible Faible évaporation	Dépôt surtout au sol (pollution et perte d'argent) Mauvaise répartition Peu de gouttelettes par litre Risque de dépôt et de ruissellement
Petites	Bonne pénétration Dépôt de qualité Bonne distribution Risque de phytotoxicité nul Moins de produit au sol	Faible impact Forte évaporation Dérive hors de la cible

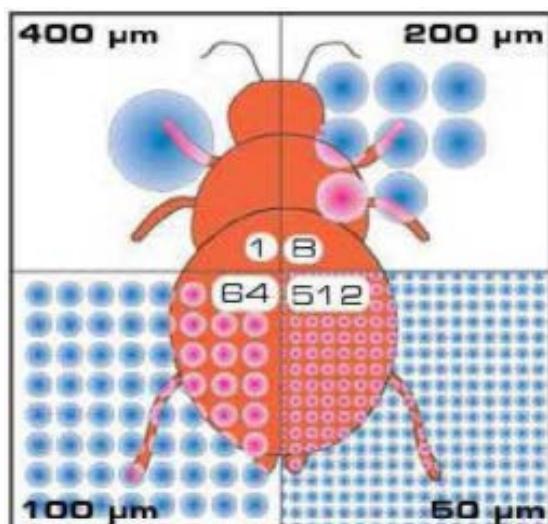


Figure 8 : Surface recouverte par plusieurs tailles de gouttelettes (ATV 49, 2015)

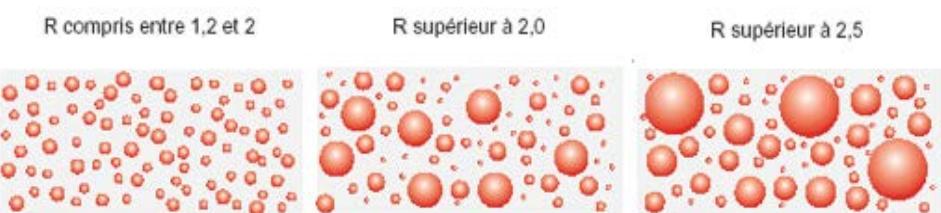


Figure 9 : Coefficient d'homogénéité du spectre de pulvérisation (Dobson, 2011)

1.4 QUALITE DE LA PULVERISATION

Un traitement phytosanitaire doit aboutir à une efficacité biologique satisfaisant l'agriculteur, et ceci dépendant de plusieurs facteurs : la performance, le produit utilisé, et le moment d'application selon le stade de la culture, du ravageur, de la maladie, de la nuisibilité, des conditions climatiques et de la qualité de l'application. Malgré ceci, lors de chaque traitement, une partie du produit ne touche pas la cible et a un impact sur l'environnement qu'il soit faible ou non ; c'est la dérive. Elle correspond au transport par voie aérienne de gouttelettes ou de vapeurs de pesticides hors de la zone ciblée par l'environnement. Pour faire face à celle-ci, il est important d'avoir une pulvérisation de qualité, avec une quantité suffisante de matière active pour lutter contre le problème rencontré, une répartition homogène dans la canopée et des pertes minimales pour l'environnement.

1.4.1 Evaluation de la qualité

La qualité se mesure conformément à la norme ISO 22522 :2007 relative au « mesure au champ de la répartition de la pulvérisation pour arbres et arbustes fruitiers ». Afin de déterminer la qualité de pulvérisation, des critères d'évaluations sont utilisés :

- **Densité et nombre d'impact par cm²** : elle diminue avec l'éloignement de la cible. Les feuilles les plus proches ont une densité d'impact supérieur par rapport à la face la plus éloignée. Pour un même volume d'eau par hectare, la surface couverte est différente en fonction de la taille des gouttelettes : une gouttelette de 400µm couvre moins de surface que 64 gouttelettes de 100µm (Figure 8). De plus, plus les gouttelettes sont fines, plus elles sont mobiles ; elles vont donc atteindre plus facilement des cibles difficiles.
- **Granulométrie** : lors d'une pulvérisation, le diamètre des gouttes varie et influence leur mobilité. Les grosses gouttelettes tombent beaucoup plus vite que les petites gouttelettes (Tableau II). Plusieurs indicateurs sont utilisés pour caractériser le spectre de pulvérisation, comme le DNM (Diamètre Numérique Médian) et le DVM (Diamètre Volumétrique Médian). Le premier correspond au diamètre séparant la population en deux classes de même effectif, et le second à la médiane des volumes des gouttes. Le rapport entre les valeurs du DVM et du DMN donne une mesure approximative de la largeur du spectre des gouttelettes : plus il est proche de 1 et plus les tailles des gouttelettes sont similaires, plus il est grand et plus la gamme de tailles des gouttelettes est étendue. (Figure 9).
- **Pourcentage de surface recouverte** : il dépend également de l'éloignement du pulvérisateur par rapport à la cible. Des gouttes plus fines permettent d'avoir une surface impactée en hausse et une économie de bouillie (Osaer *et al.*, 2004).



Figure 10 : Révélation de la fluorescéine en verger (Rubio, 2014)

1.4.2 Méthode de quantification d'un traitement en arboriculture

Lors d'un traitement phytosanitaire, le but est de distribuer de manière homogène la dose nécessaire et suffisante sur la cible. Quantifier un traitement en arboriculture est une tâche conséquente. Différentes méthodes peuvent être utilisées, à la fois quantitative et qualitative.

La méthode quantitative se fait par l'utilisation de collecteurs et de traceurs. Afin d'obtenir une bonne indication de la répartition de la pulvérisation, les collecteurs sont disposés dans les différentes zones de l'arbre. Ces zones représentent l'intérieur, l'extérieur et le centre de la canopée. La perte de produit par dérive est mesurée par des collecteurs posés au sol ou par des boîtes de Pétri. Ces moyens sont simples d'utilisation, à coût réduit, lavables et réutilisables. Lors des manipulations, le produit phytosanitaire est remplacé par différents traceurs. Ces derniers couramment utilisés sont d'origine naturelle comme la tartrazine ou de synthèse via des molécules fluorescentes comme la Brilliant Sulfaflavine (BSF) ou la fluorescéine, et nécessitent une analyse spectrophotométrique. Pour ces dernières, les tests se réalisent de nuit car elles ont la propriété d'être fluorescentes. De ce fait, il est possible de visualiser rapidement la qualité de la pulvérisation (Figure 10). Le choix du traceur repose sur des caractéristiques comme le prix, la dangerosité, la solubilité et la photosensibilité. Cette évaluation est basée sur le principe selon lequel la quantité de dépôt de traceur par unité de surface de collecteur est représentative de la qualité de la pulvérisation.

Les méthodes qualitatives évaluent la répartition verticale de la pulvérisation et permettent d'estimer une hétérogénéité potentielle de la distribution du traceur. Ces méthodes peuvent être complétées avec une méthode quantitative par utilisation de logiciel d'analyse d'image. C'est une technique simple de forte précision mais elle est exigeante en matériels et en moyens d'analyse. Ce système permet d'analyser les différents impacts des gouttelettes recueillis par des collecteurs. Seulement, l'impact mesuré par le capteur d'image ne correspond pas à la taille réelle de la gouttelette lorsqu'elle percute le collecteur car il y a eu un éclatement lors de la percussion. De plus, les plus petits impacts ne sont pas toujours détectables.

D'autres méthodes préliminaires existent, comme l'outil Quali'Drop, encore à l'état d'étude et par un test aux papiers hydrosensibles où l'impact de la pulvérisation est visualisé par des différentes gouttes de calcaire et d'eau pour le premier cas et simplement d'eau pour le second. Ces deux outils seront détaillés dans la partie 2.2.1.

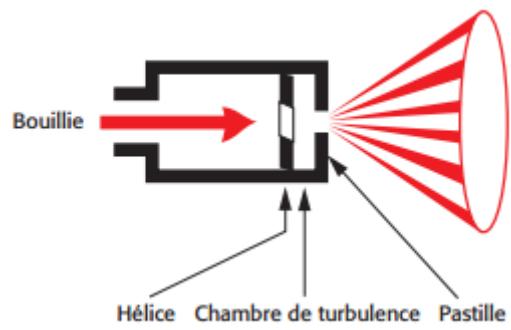


Figure 11 : Principe de pulvérisation a jet projeté (Heinzle, 2007)

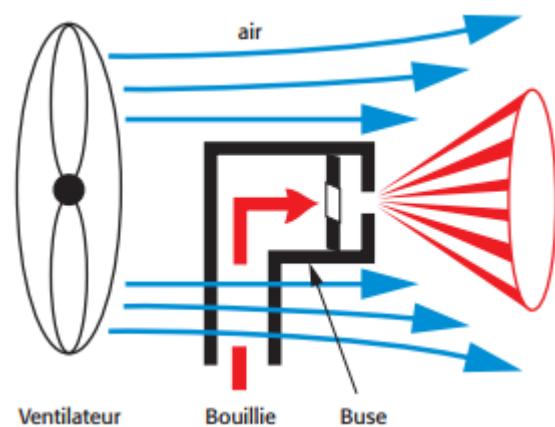


Figure 12 : Principe de pulvérisation à jet porté (Heinzle, 2007)

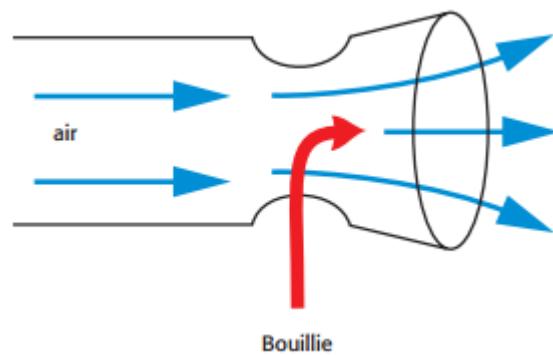


Figure 13 : Principe de pulvérisation pneumatique (Heinzle, 2007)

1.5 MATERIEL DE PULVERISATION EN FRUITS A PEPINS

1.5.1 Pulvérisateurs

La réussite d'une application phytosanitaire se traduit par une répartition homogène de produit à traiter sur l'ensemble de la surface foliaire (comprenant la face supérieure et inférieure de la feuille), sans pulvériser inutilement d'autre partie extérieure de ce volume (Osaer *et al.*, 2004). La pulvérisation doit répondre à 3 enjeux : une efficacité maximale ; une préservation de la qualité du sol, de l'eau, de l'air et des milieux naturels ; et une sécurité des opérateurs.

Avec des évolutions rapides et des développements technologiques et techniques de plus en plus poussés, et surtout les nécessités de production ; prenant en compte les évolutions des pratiques culturelles ; de nombreux appareils pour pulvériser sont disponibles sur le marché :

- Pulvérisateur à **jet projeté** (Figure 11) : la bouillie est mise sous pression par une pompe et la division des fines gouttelettes est obtenue par détente de la veine de liquide lors du passage dans une buse. C'est le pulvérisateur le plus ancien. Le terme jet projeté est utilisé car c'est la pression qui permet aux gouttes d'atteindre leurs cibles. Il se révèle limité en matière de pénétration de la végétation.
- Pulvérisateur à **jet porté** (Figure 12) : pour pallier le défaut de pénétration du précédent, ce pulvérisateur a été créé. Son fonctionnement est basé sur une fragmentation de la bouillie sous pression (8-15 bars) à travers des buses calibrées. Il est également constitué d'une puissante turbine généralement hélicoïdale (90% des appareils en Val de Loire) et quelques fois centrifuge créant un flux d'air pour transporter les gouttelettes jusqu'aux cibles. Ce flux d'air peut être centrifuge (l'air est aspiré parallèlement à l'axe de rotation et propulsé par force centrifuge perpendiculairement à ce même axe) ou tangentiel (l'air est aspiré et refoulé perpendiculairement à l'axe de rotation). La vitesse d'air varie entre 50 et 200 km.h⁻¹. Ceci permet aussi un brassage du feuillage ce qui maximise et homogénéise la répartition du produit.
- Pulvérisateur **pneumatique** (Figure 13) : le fractionnement de la bouillie est obtenu ici grâce à un flux d'air à forte pression percutant une veine de liquide. La pression de l'air est proportionnelle à sa vitesse. L'air remplit 3 fonctions : le brassage de feuillage, le fractionnement des gouttelettes très fines et leur transport jusqu'au végétal. Le débit nécessaire doit être assez élevé pour assurer le transport des gouttelettes sur l'ensemble de la végétation. A contrario des deux précédents, ce type de pulvérisateur permet d'obtenir un spectre de gouttes plus fin et plus homogène.

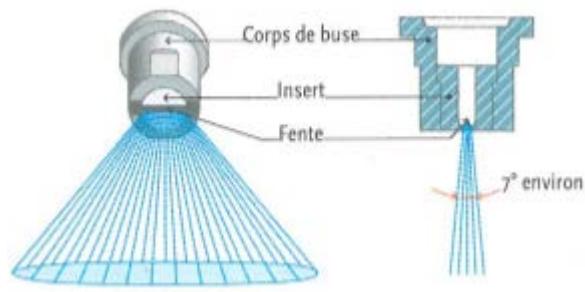


Figure 14 : Mode de fonctionnement d'une buse à fentes (Osaer *et al.*, 2004)

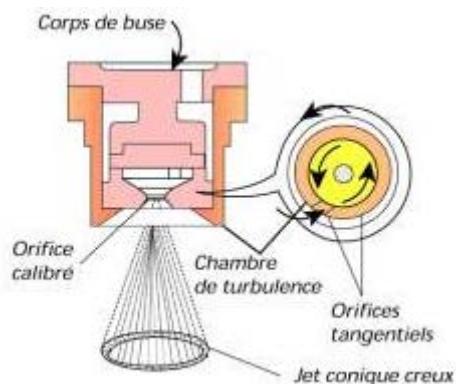


Figure 15 : Mode de fonctionnement d'une buse à turbulence (Osaer *et al.*, 2004)

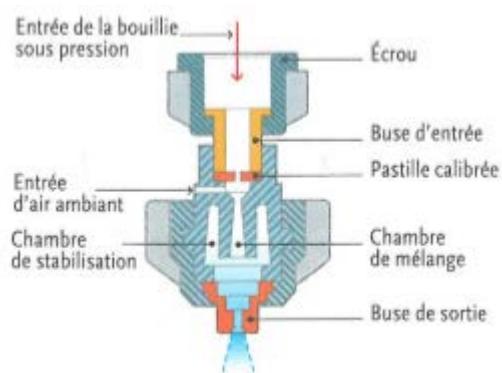


Figure 16 : Mode de fonctionnement d'une fente à injection d'air (Osaer *et al.*, 2004)

1.5.2 Buses

La buse fragmente un liquide en gouttelette. Il n'existe pas de buse universelle qui convienne à tous les types et conditions d'application. Une buse détermine un débit, un angle, une répartition homogène sur une rampe, un spectre de gouttes, une distribution sur la cible et une classification en dérive. Le choix du type de buse conditionne donc la maîtrise de la dérive. La contrôler est fondamental non seulement d'un point de vue réglementaire, mais aussi pour assurer un dépôt maximal de bouillie sur la cible. Selon l'utilisation et le spectre de pulvérisation attendu, 3 types de buses peuvent être utilisées :

- Buse à **fentes** (Figure 14) : buse à fente classique produisant un jet « pinceau », plat. Leur utilisation est adaptée pour tous types de traitements dans une large plage de volume/ha, dont l'angle de pulvérisation peut être variable suivant le type de la buse utilisé (45 à 110°). Cette buse est peu utilisée en arboriculture.
- Buse à **turbulence** (Figure 15) : buse ayant pour but de créer des gouttes avec une bonne capacité de pénétration. En contrepartie, elle est plus sensible à la dérive (car une goutte trop fine dérive plus facilement et se dessèche vite). Elle est constituée de 2 parties : l'hélice provoquant la turbulence du liquide (mouvement rotatif) et de la pastille, lieu de sortie du jet conique creux. Le jet forme des gouttelettes, dont 45% d'entre elles auront des diamètres compris entre 30 et 100µm. L'angle de cette buse varie de 60 à 80°.
- Buse à **injection** d'air (Figure 16) : le principe de fonctionnement de cette buse est un appel d'air par effet Venturi. La bouillie se charge en air et la taille des gouttes augmente, les rendant moins sensibles à la dérive (Osaer *et al.*, 2004). L'angle de cette buse varie également de 60 à 80°.

1.6 FACTEURS INFLUENÇANT LA PULVERISATION

La bouillie appliquée lors d'un traitement se divise en deux parties : la fraction efficace (se déposant sur la cible) et la fraction gaspillée (n'atteignant pas la cible et se perdant dans l'environnement et l'atmosphère). Il est donc primordial de comprendre les facteurs et phénomènes régissant la distribution et la répartition de la bouillie.

1.6.1 Conditions environnementales

Plusieurs paramètres peuvent influencer la qualité de pulvérisation et donc l'efficacité :

- **Vent** : plus il est fort, plus les gouttes sont transportées loin. Il est préconisé de ne pas traiter par vent fort afin de favoriser le contact entre les gouttes et la cible tout en limitant la dérive. La réglementation interdit tout traitement au-delà de 19 km.h⁻¹. A titre d'exemple, à 7 km.h⁻¹, les gouttes de taille inférieure à 130 microns n'arriveront pas sur la cible et à 19 km.h⁻¹, celles de moins de 200 microns.

$$TRV = \frac{(hauteur\ canopée + largeur\ végétation + 10000)}{distance\ entre\ les\ rangs}$$

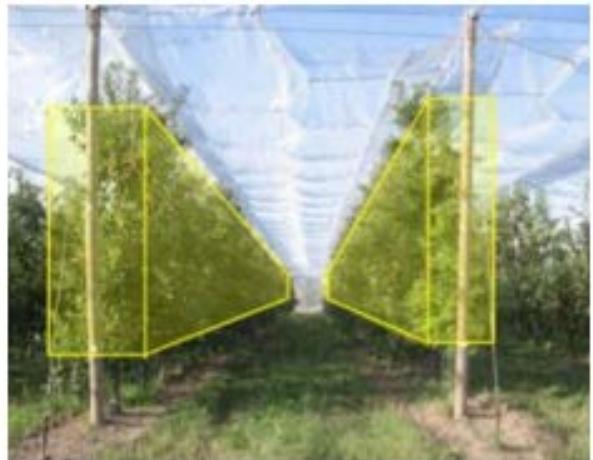


Figure 17 : Méthode de calcul et principe du TRV exprimé en m³/ha (Cross et Walklate, 2008)

$$LWA = \frac{(2 * hauteur\ canopée + 10000)}{distance\ entre\ les\ rangs}$$



Figure 18 : Méthode de calcul et principe du LWA exprimé en m²/ha (Cross et Walklate, 2008)

- **Humidité relative** : elle conditionne l'évaporation des gouttes. Plus elle est petite, plus l'évaporation est rapide.
- **Pluviométrie** : elle peut entraîner des pertes de produit par lessivage et ruissellement.
- **Température** : elle influence la réceptivité de la culture : lorsqu'elle augmente, la transpiration accélère la circulation de la sève mais lors de fortes températures, le processus est freiné par des fermetures de stomates. Lorsque la température s'élève, la vitesse de dessiccation est importante minimisant le taux de produit atteint.

1.6.2 Stade végétatif et structure

Quelle que soit la forme donnée à un arbre fruitier comme le pommier, celui-ci subit une série d'évolutions physiologiques qui se renouvellent chaque année. En effet, dès le premier stade végétatif caractéristique du bourgeon d'hiver, l'arbre va se développer au fur et à mesure de la saison, en haussant sa surface foliaire et son volume de végétation. Malgré le fait que la structure du pommier varie selon de nombreux paramètres comme la variété, le mode de conduite, l'âge, le stade végétatif ainsi que la densité de plantation, les traitements se font de manière homogène durant l'ensemble de la saison. Les traitements ne sont donc pas adaptés au stade végétatif et à la structure des arbres fruitiers. Il paraît donc intéressant de trouver des indicateurs capables de définir ces données au cours d'une saison de production.

1.7 CARACTERISATION DE LA SURFACE FOLIAIRE DES ARBRES

Afin d'établir des caractéristiques physiques des arbres, deux indicateurs simples comme la mesure du volume de la végétation (Tree Row Volume) ou la surface de haie foliaire (Leaf Wall Area) peuvent être utilisés.

1.7.1 TRV

Il a été développé dès les années 1970 aux Etats-Unis pour optimiser la pulvérisation sur les fruits à pépins, puis fut repris en Suisse dans les années 2000 pour la même raison en ajoutant les fruits à noyaux. Il permet de déterminer le volume du feuillage. Le calcul du TRV s'obtient en assimilant la canopée à un parallélépipède en connaissant la hauteur, la largeur du rang et la distance inter-rang (Figure 17).

1.7.2 LWA

Cet autre indicateur permet de déterminer la surface foliaire totale (SFT) en prenant en compte la hauteur des arbres et la distance inter-rang (Figure 18). Il permet d'exprimer la dose de produit en l ou kg/m² de surface foliaire (Toews et Friessleben, 2012). Cette méthode suscite un nouvel intérêt depuis que l'industrie agro-chimique européenne souhaite harmoniser l'expression de la dose avec cet indicateur. Ces deux outils négligent cependant la densité de la canopée, et s'appuient sur des mesures manuelles.

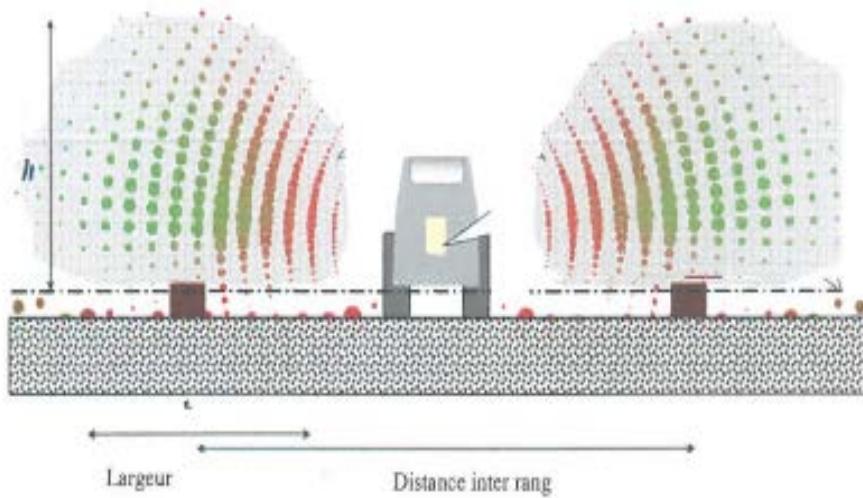


Figure 19 : Lidar monté sur un tracteur, et principe de fonctionnement (Lothion, 2017 ; Cross et Wal-kate, 2008)

Légende : Les zones grisées représentent le volume foliaire et les bulles la répartition et la densité de la canopée.

Ces deux indicateurs, simples d'approches et facilement transposables, ont été utilisé au cours d'études précédentes pour établir un seuil haut national pour le pommier, prenant en compte les pommes à couteaux et les pommes à cidre. Ces références, en lien avec la typologie des vergers selon les régions ont permis de mettre en place une référence haute de plein verger en France pour une adaptation des doses.

1.7.3 Spectre lumineux

La première technique utilisable est celle du Lidar (Light / laser detection and ranging, Figure 19). Ce matériel vient d'un projet vigne mis en place il y a quelques années. Il agit comme un radar de sondage atmosphérique fonctionnant avec les ondes optiques émises par laser. Cette méthode de télédétection utilise la lumière sous forme de laser pulsé pour mesurer les distances à la Terre. Ces impulsions, combinées à d'autres données enregistrées par ce système, génèrent des informations tridimensionnelles précises sur la forme et les caractéristiques d'une zone (Cadden, 2017). Ce système permet d'examiner les environnements naturels et artificiels avec précision, justesse et flexibilité, quelles que soient les conditions météorologiques (poussière, pluie ou brouillard).

Le fonctionnement de celui-ci est assez simple. Il déclenche des impulsions rapides de lumière laser à une surface, jusqu'à 150 000 impulsions par seconde (Mallet, 2010). Un capteur mesure le temps qu'il faut pour que chaque impulsion rebondisse. La lumière se déplace à une vitesse constante et connue afin que le Lidar puisse calculer la distance entre la cible et lui-même avec une grande précision. Par des répétitions rapides, il construit une « carte » complexe de la surface qu'il mesure (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2017).

La seconde méthode consiste à mesurer la quantité de lumière disponible au cœur de la végétation, après le passage du flux lumineux au travers de la canopée. Ce dernier est inversement proportionnel à la surface de la végétation ou Leaf Area Index (LAI). Cet indice peut être mesuré par des mesures directes au champ : les feuilles sont coupées et la surface est déterminée soit par pesée soit par prise d'image avec un planimètre optiques ; ou par des mesures indirectes en mesurant l'énergie lumineuse incidente sous les feuilles (Bahrouni, 2010). De telles mesures sont simples et rapides mais nécessitent un matériel spécifique.

1.8 EXPRESSION ET METHODES D'UTILISATION DES INTRANTS PHYSANITAIRES

1.8.1 Mode d'expression de la dose

Le contexte réglementaire actuel et notamment la mise en œuvre du plan Ecophyto amènent à reconstruire l'ensemble des processus de protection des plantes. Parmi les problèmes soulevés, le mode d'expression des doses en culture pérennes révèle de nombreuses disparités à l'échelle européenne.

Historiquement, dans les dossiers d'homologation d'autorisation de mise sur le marché, la dose du produit phytosanitaire pour les traitements des parties aériennes en arboriculture était exprimée en kg ou l de produit / hl de bouillie, sous-entendu appliquée jusqu'au point de ruissellement. Mais dans la pratique, avec l'évolution du matériel et les traitements à volume réduit, les producteurs multiplient la dose/hl par 10 (sur une base d'un volume de bouillie de 1000 l/ha) puis appliquent cette dose unique sur tous les ha cadastraux quel que soit le volume de bouillie appliquée (250 à 1000 l/ha). Cette pratique revient à une dose/ha cadastral fixe que les homologations ont défini depuis quelques années comme une dose maximum applicable. Actuellement, il y a surtout des produits homologués en dose/ha.

A l'échelle européenne, les modes d'expression de la dose utilisée en arboriculture varient mais un certain nombre de pays disposent déjà d'un mode d'expression de la dose tenant compte du stade végétatif : l'Allemagne, l'Autriche dans la zone Centre et tous les pays de la Zone Nord (soit la Finlande, le Danemark, la Suède) avec une dose exprimée selon la hauteur de la canopée, la Belgique avec une dose exprimée pour 10 000 m² de LWA, et la Suisse avec une dose pour 10 000 m³ de TRV. Avec un mode d'expression de ce type, quel que soit l'indicateur, la dose appliquée évolue au cours de la saison avec le développement végétatif des arbres : les doses sont réduites sur de jeunes vergers ou en début de saison sans pour autant que l'efficacité des produits soit moindre.

L'harmonisation de tous ces modes d'expression de la dose à l'échelle européenne est fortement souhaitable. Au niveau français, l'adoption d'un mode d'expression de la dose tenant compte du développement du végétal permettrait de répondre de manière concrète aux objectifs du plan Ecophyto. Au niveau européen, une unité commune d'expression de la dose faciliterait la régulation des usages et pourrait également faciliter l'adoption de politiques communes en termes d'évaluation de l'efficacité des risques liées aux usages des produits phytosanitaires, de simplifier les procédures d'homologation et d'avoir une gestion logique des risques résiduels.

1.8.2 Moyens d'adaptation en Europe

De nombreux moyens d'adaptations ont vu le jour durant les dernières décennies au sein de l'Europe. Il existe par exemple l'outil Optidose, qui est le premier outil d'adaptation destiné à la vigne depuis le milieu des années 90, sur le territoire français. Il a pour but de moduler les doses de fongicides selon le stade végétatif en prenant en compte les notions de TRV et la pression de la maladie. Il existe également un modèle anglais développé en 2006 sur le pommier, PACE (Pesticide dose rate Adjustment to the Crop Environment, PACE, 2017) où le volume de bouillie à pulvériser se fait selon la surface foliaire, les performances du pulvérisateur et des conditions météorologiques. Enfin un modèle espagnol, Dosafrut (determination del volume de caldo en tratamientos fitosanitarios de plantaciones frutales), résultant de 30 ans d'études et de précédents modèles, permet d'ajuster le volume de bouillie/ha à la végétation et selon les facteurs influençant l'efficacité au cours d'une application.

Dans le but d'harmoniser tous ces modèles, en octobre 2016 s'est tenu le 1 er colloque sur l'harmonisation du mode d'expression de la dose dans le cadre de l'évaluation zonale des produits phytosanitaires LOTHION Richard | La pulvérisation, un levier pour réduire l'utilisation des produits phytosanitaires en arboriculture

en cultures « hautes ». Il réunissait les agences d'évaluation européenne (dont l'ANSES pour la France), les firmes phytosanitaires (European Crop Protection Association), les sociétés réalisant des essais efficacité et les instituts techniques concernés. Un consensus a pu être trouvé entre les différents pays et il a été acté que l'évaluation zonale des produits se ferait selon un seul mode d'expression de la dose pour les fruits à pépins, la viticulture et les légumes sous abris se développant en hauteur : ce mode d'expression est le LWA, déjà adopté dans les pays de la Zone Nord et dans certains pays de la zone Centre.

1.9 PRESENTATION DU PROJET

Avec la mise en place du plan Ecophyto à la suite du Grenelle de l'environnement en 2008, l'ensemble des acteurs du monde agricole a pour objectif de réduire de 50% l'utilisation des intrants phytosanitaires. En octobre 2015, cet objectif a été renouvelé avec une échéance en deux temps. D'une part, d'ici 2020, une réduction de 25% est envisagée, en popularisant et en optimisant les techniques disponibles. D'autre part, à l'horizon 2025, une diminution de 50% grâce à la baisse des IFT est attendue, notamment par des changements profonds de systèmes de production, des filières, des exigences des consommateurs et des avancées technologiques (Ecophyto, 2015).

Depuis quelques décennies, malgré la mise en œuvre des moyens alternatifs et/ou complémentaires à l'utilisation des produits phytosanitaires de synthèse, ceux-ci ne permettent pas de s'affranchir de l'application par pulvérisation de produits phytosanitaires. Avec cette pulvérisation, l'arboriculteur est constamment confronté à plusieurs problématiques : le problème des riverains et la proximité des parcelles et des habitations, la pollution de l'air et des eaux, la détection de molécules « non autorisées » dans le cadre des plans de contrôles résidus et la sécurité des applicateurs et des employés.

Face à ces constatations et à une forte demande des professionnels se retrouvant souvent dans des impasses techniques, une réflexion globale portant sur l'application des produits phytosanitaires s'est engagée en lien avec les partenaires publics et privés. Dans cette optique, le projet national Pulvarbo a été lancé en 2015, développé par le CTIFL (Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes) et financé par l'ONEMA (Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques) via Ecophyto (taxes prélevées lors de l'achat des produits phytosanitaires). Le but est de créer à terme un outil d'aide à la décision, permettant d'adapter les doses en arboriculture en fonction de la végétation ; le tout, en optimisant la qualité de la pulvérisation grâce aux réglages du matériel.

Ce projet s'exprime à travers trois objectifs. Le premier consiste à tester les outils déjà existants, de caractériser la végétation des vergers français, à définir les règles de décision permettant de moduler les doses, à les sécuriser puis à les simplifier de manière à les rendre facilement applicables. Le second vise à identifier les combinaisons de matériel permettant de réaliser les meilleures pulvérisations en termes de qualité d'application et de limitations des pertes environnementales. Et le dernier consiste à réfléchir à une combinaison des deux précédents pour une adaptation des doses en grande parcelle.

Tableau III : Caractéristiques des parcelles étudiées pour les indicateurs de surface foliaire

Parcelle	Ligne	Espèce	Variété	Conduite	Date de plantation	Distance entre rangs	Distance sur le rang
2	5	Pommier	Golden	Mur fruitier axe	2008	3,3	1
2	16	Pommier	Golden	Mur fruitier biaxe	2008	3,3	1,25
21	2	Pommier	Ariane	Axe	2009	4	1



Figure 20 : Test aux papiers hydrosensibles avec le pulvérisateur de référence (Lothion, 2017)



Figure 21 : Quali'drop avec le pulvérisateur opti-ajust (Lothion, 2017)

PARTIE II : MATERIEL & METHODES

2.1 ESTIMATION DE LA SURFACE FOLIAIRE DES ARBRES

L'estimation se fait par l'aide des indicateurs (TRV et LWA). Les mesures de la hauteur, ainsi que de la largeur de la canopée sont réalisées sur 10 arbres une fois par mois (à intervalle régulier) afin de déterminer leurs évolutions. Ces mesures sont effectuées à l'aide d'un mètre fixé sur un manche en bois. Les mesures sont prises du point le plus bas de la végétation au point le plus haut de la canopée. Concernant les arbres en axe, les mesures horizontales sont prises à mi-hauteur, et les arbres sont considérés comme forme de triangle. L'organisme de recherche IRSTEA est chargé de l'imagerie avec le lidar. Les données sont récupérées afin d'être exploitées et comparées aux estimateurs. Les parcelles étudiées sont présentées dans le tableau III. Les trois parcelles correspondent à trois types de conduites différentes afin de voir l'effet de celles-ci sur la détermination des volumes foliaires selon les indicateurs étudiés, que ceux-ci soient déterminés de manière manuelle ou par l'aide de laser.

2.2 ESTIMATION DE LA QUALITE DE PULVERISATION

2.2.1 Tests préalables

Plusieurs tests peuvent être réalisés au préalable afin de vérifier l'homogénéité d'un traitement.

Afin d'optimiser la répartition verticale de la pulvérisation, des papiers hydrosensibles sont utilisables. Ces derniers, de couleur jaune se colorent en bleu dès qu'ils entrent en contact avec de l'eau. Les papiers sont attachés de part et d'autre d'une planche tous les 50 cm, puis celle-ci est disposée entre deux arbres au sein d'un rang. L'appareil pulvérise (Figure 20) de chaque côté pour vérifier si le recouvrement est homogène ou non. Ces papiers sont ensuite placés sur des planches de papier (Annexe III) correspondantes aux deux côtés de pulvérisation. Le papier hydrosensible permet de vérifier que l'on se situe dans la bonne fourchette d'impacts et que la taille des gouttes est homogène, ni trop grosse, ni trop petite.

Un outil complémentaire, Quali'Drop permet également d'estimer la répartition verticale de la pulvérisation (Figure 21). Ce dispositif se compose d'un kit comportant des plaques noires à monter sur un support rigide. La pulvérisation d'un mélange d'eau et d'argile blanche ou de talc sur les plaques permet de visualiser les impacts des gouttelettes. Ceci permet de détecter les défauts de pulvérisation et facilite le contrôle du réglage en renouvelant l'opération autant de fois que nécessaire (Syngenta, 2017).

D'autres tests peuvent également être réalisés, comme la vitesse d'avancement du tracteur (en déterminant le temps mis par le tracteur et son pulvérisateur pour faire une distance précise) ainsi que l'optimisation du flux d'air (pour des pulvérisateurs à ventilation axiale pour éviter le déséquilibre du flux d'air entre les deux côtés, par l'aide de rubalise fixé aux portes-buses) afin que ceux-ci soient homogène.



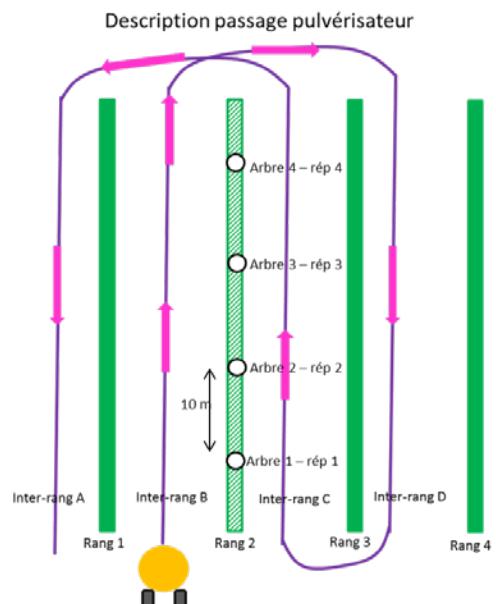


Figure 22 : Passages du pulvérisateur tous les rangs et un rang sur deux

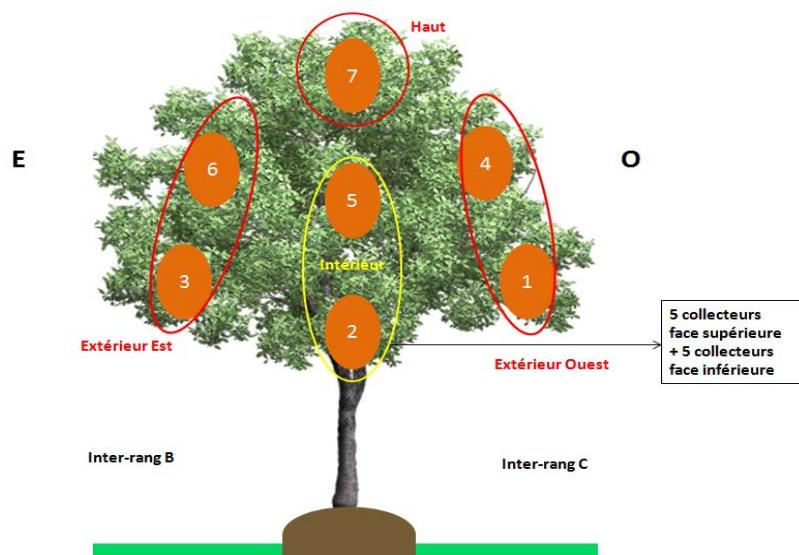


Figure 23 : Dispositions des papiers collecteurs au sein de la canopée



Figure 24 : Collecteurs PVC disposés sur feuilles et sol (Lothion, 2017)

Les réglages de l'atomiseur sont réajustés en fonction de la satisfaction des résultats obtenus (type de buses, positionnement des buses, régime de prise de force...), jusqu'à ce qu'ils soient satisfaisants.

2.2.2 Test à la tartrazine

Les essais ont été réalisés à la Station d'Expérimentation fruitière La Morinière à Saint Epain (37). 4 demi-rangs sont utilisés par modalité, correspondant à une surface de 0,08 ha, soit 2 rangs pulvérisés sur 25. Concernant la végétation, cela correspond au demi inter-rang B traité de chaque côté, puis uniquement sur le côté droit dans le demi inter-rang D, de chaque côté sur le demi inter-rang C et uniquement du côté gauche sur le demi inter-rang A. Le passage choisi permet d'obtenir une pulvérisation issue des deux côtés de l'appareil (Figure 22). Sur le rang en question, le 2, quatre arbres espacés de plusieurs mètres sont déterminés et constituent une répétition. Les différentes modalités sont testées au cours de la saison avec des réglages choisis correspondant à ceux utilisés pour traiter couramment. Les dépôts sont quantifiés sur le rang 2 en prenant en compte les dépôts issus du passage du pulvérisateur des deux côtés A et B, ainsi que ceux issus de la dérive lors des passages dans les inter-rangs A et D.

Sur les arbres en question, la canopée est divisée en 7 zones d'échantillonnage. Au sein de chacune d'elle, 10 collecteurs (feuilles de PVC opaque blanc de format 4cm × 5cm) sont positionnés (5 sur la face supérieure des feuilles et 5 sur la face inférieure des mêmes feuilles, Figure 23). Pour une modalité testée, 280 sont posés (10 collecteurs × 7 zones × 4 répétitions). Les zones 2 et 5 sont proches du tronc, les zones 1 et 4 côté extérieur ouest de l'arbre, les zones 3 et 6 côté extérieur est de l'arbre et la zone 7 de part et d'autre de la cime. Les mêmes collecteurs (Figure 24) sont disposés au sol au niveau des mêmes arbres sur des planchettes. Pour une modalité testée, 100 collecteurs sont déposés au sol.

Une solution d'eau et de tartrazine est préparée pour toutes les modalités, correspondant à la solution mère dont 25 ml est prélevé dans la cuve du pulvérisateur avant et après l'essai, soit 50 ml. La tartrazine est utilisée en raison de sa traçabilité dans l'eau et de sa stabilité vis-à-vis de la lumière. Ce volume sera utilisé pour réaliser une gamme étalon.

Suite aux pulvérisations, les collecteurs sont récupérés par zone et par face. Ceux d'une même zone et d'une même face sont réunis pour ne former qu'un échantillon (5 pour la face supérieure d'une même zone dans un même pot et 5 pour la face inférieure d'une même zone dans un autre). Au sol, les collecteurs sont récupérés de la même manière (10 collecteurs d'une même zone dans un même pot). Dans chaque pot, 20 ml d'eau sont ajoutés et les flacons sont agités pour remettre en solution le traceur disposé sur les collecteurs. Sachant que ce colorant est photostable, les lots sont stockés et seront analysés ultérieurement pour une analyse d'absorbance.

La concentration en tartrazine des échantillons est liée à son absorbance à 425 nm. A partir de la solution mère (5g.L^{-1}), la gamme étalon est préparée afin d'obtenir les concentrations suivantes : 1 ; 0,75 ; 0,5 ;

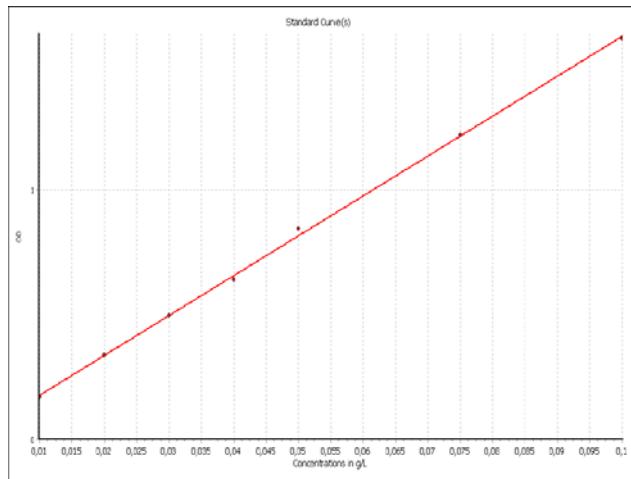


Figure 25 : Courbe étalon (Lothion, 2017)

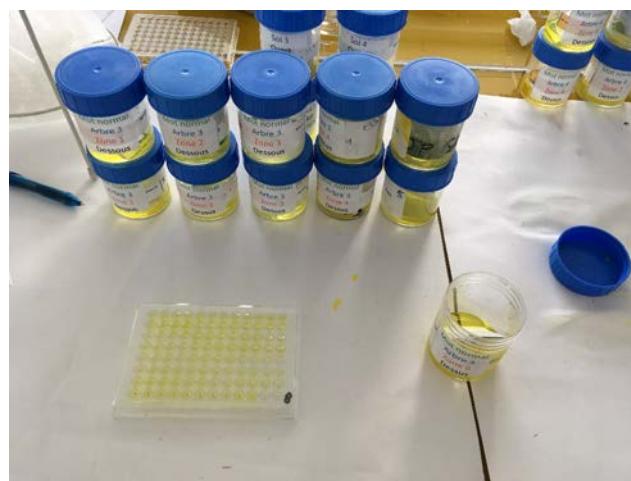


Figure 26 : Plaque pour spectrophotomètre (Lothion, 2017)

Tableau IV : Modalités étudiées en juin pour la qualité de pulvérisation

Modalités	Pulvérisa-teur	Volume hectare théorique (L/ha)	Type de passage	Pression (bar)	Réglage prise de force (tour/min)	Buses
Référence	Berthoud	400	Tous les rangs	16	540	ATR
S 21 ATR	S 21	400	Tous les rangs	10	540	ATR
S 21 TVI	S 21	400	Tous les rangs	10	540	ATR + TVI en haut
OA	Opti-Ajust	250	Tous les rangs	1,5	460	

Légende : Berthoud : pulvérisateur de type jet porté à pulvérisation axiale ; S21 : pulvérisateur de type jet porté à pulvérisation pneumatique, OA : pulvérisateur de type pneumatique ; TVI (Turbulence Venturi Iso) : buse à injection d'air ; ATR (Alumine Turbulence Rodée) : buse à turbulence

0,25 ; 0,1 ; 0,075 ; 0,05 ; 0,04 ; 0,03 ; 0,02 ; 0,01 et 0,005 g.L⁻¹. Une courbe représentant l'absorbance mesurée selon la concentration en tartrazine est représentée (Figure 25). L'équation obtenue est de type $y = ax + b$ où x étant la concentration en colorant, y l'absorbance mesurée. La concentration est calculée pour l'ensemble des échantillons (sol et feuilles) en connaissant leur absorbance. Pour chaque échantillon, 2 dépôts de 150µL (Figure 26) sont réalisés et une moyenne des deux est déterminée. Un « blanc » est disposé sur la microplaquette et renseigné dans le programme informatique du spectrophotomètre.

L'équation suivante permet de calculer le volume intercepté : **V capté** = (concentration évaluée × VH₂O) / (concentration solution mère)

où : V capté = volume de produit déposé par le collecteur ; VH₂O = volume d'eau utilisé pour diluer le dépôt ; concentration mère pulvérisée = concentration initiale de la solution ; concentration évaluée = concentration mesurée de l'échantillon

A partir de la surface des 5 ou 10 collecteurs constituant un échantillon, le volume de produit capté est ramené à un **volume capté par unité de surface (µL.cm⁻²)** : volume capté (µl) / (nombre de collecteurs x 20 (cm²))

Volume total capté par la végétation : (moyenne des 14 échantillons (µl/cm²) x LWA) = L/ha

100

Détermination du volume perdu au sol : moyenne des échantillons au sol (µl/cm²) x 100 = L/ha.

Volume hectare utilisé : V(L) / (1,5/25) (ha) ; V : volume utilisé lors du test de pulvérisation, 1,5 : nombre de rangs pulvérisés, 25 : nombre total de rangs de 100 m sur la parcelle.

Détermination du volume perdu dans l'air : volume hectare - volume végétation - volume sol.

Masse traceur capté en µg/cm² : [évaluée] x V capté.

Quantité réelle de tartrazine en g/ha : [tartrazine réelle] (g/L) x volume appliqué (L/ha)

Masse traceur capté en µg/cm² pour 1 g traceur / ha : Masse traceur (µg/cm²) x quantité tartrazine réelle (g/ha).

Masse traceur capté en ng/cm² pour 1 g traceur / ha :

Masse de traceur capté (µg/cm² pour 1 g traceur/ha x 1000).

0,01

La qualité de pulvérisation sera testée à 4 dates avec des modalités différentes. Uniquement les modalités de juin seront présentées dans ce rapport (Tableau IV) et l'ensemble des modalités Référence sur ces 4 dates (mois d'avril, mai, juin et juillet), avec les mêmes réglages, où seul le facteur végétation varie.

Tableau V : Caractéristiques de la parcelle d'essai Pulvarbo

Variété	Porte-greffe	Année de plantation	Distance plantation (inter-rang × inter-arbre)	Irrigation	Filet paragrèle
Gala	Emla	2014	4 × 1m	Goutte à goutte	Oui

Tableau VI : Modalités étudiées

Modalités	Calcul de la dose
TNT	
Référence	Dose homologuée × surface parcellaire
BBCH	Cf : Tableau V
LWA	(Dose homologuée × LWA mesuré × surface parcellaire) / LWA max
TRV	(Dose homologuée × TRV mesuré × surface parcellaire) / TRV max

Légende : LWA max = 17000m² de haie foliaire/ha (méthode ECPA), TRV max = 10000m³ de haie foliaire (évalué à la Morinière). Un volume supplémentaire est ajouté et pris en compte dans le calcul, pour qu'une certaine quantité de bouillie demeure dans la cuve et garde la pompe du pulvérisateur amortie

Tableau VII : Moyen permettant de calculer la dose pour la modalité BBCH

Hauteur traitée (m)	Stade BBCH < 69			Stade BBCH > 69		
	Largeur canopée en m			Largeur canopée en m		
	0,5 à 1,5	1,5 à 2,5	≥ 2,5	0,5 à 1,5	1,5 à 2,5	≥ 2,5
< 2,5	40	50		60	70	
2,5 à 3,2	70	80	100	80	90	100
3,2 à 4,2	80	90	100	90	100	100
≥ 4,2		90	100	90	100	100

Classe de verger moyen pour le stade BBCH < 69

Classe de verger moyen pour le stade BBCH > 69

$$IFT = \frac{dose appliquée \times surface traitée}{dose homologuée du produit \times surface de la parcelle}$$

Figure 27 : Formule permettant de déterminer l'indice de traitement

2.3 TEST D'ADAPTATION DES DOSES EN GRANDE PARCELLE

2.3.1 Dispositif expérimental et modalités étudiées

L'essai se déroule également à la station expérimentale de La Morinière sur une jeune parcelle plantée en 2014 et a pour objectif de déterminer si une adaptation des doses d'intrants phytosanitaires au volume foliaire des arbres permet de garder une protection équivalente à un traitement à pleine dose toute la saison. Le verger de pommier est conduit en solaxe sur la variété Gala avec le porte greffe Emla, et est équipé de filet paragrèle (Tableau V). La parcelle expérimentale est de 7880m² comportant 1 bloc par modalité de 4 lignes de 50 à 100m (Annexe IV). Afin de bien démarquer chaque modalité et d'avoir le moins d'impact d'une modalité à l'autre, un rang de pollinisateur (de variété Jérôme) est disposé entre chacune d'elle. Les modalités étudiées sont exprimées dans le tableau VI. La modalité BBCH correspond à une dose ajustée en fonction des paramètres hauteur traitée de canopée et largeur de canopée. Elle est décrite par le tableau VII, avec une dose exprimée en % de la dose pleine (100%).

Afin d'estimer la diminution potentielle de l'utilisation de produits phytosanitaires, l'IFT peut être déterminé (Figure 27). Celui-ci permet de juger la diminution de la quantité de produits.

L'ensemble des manipulations sont faites avec un pulvérisateur à jet porté dont le volume de référence est de 400L.ha⁻¹, avec une vitesse d'avancement de 5,6 km.h⁻¹ et un réglage de prise de force à 540 tr.min⁻¹ (soit les réglages couramment utilisés par les arboriculteurs).

Seul le facteur dose est étudié au cours de cet essai. Celles-ci ont évolué au cours de la saison, en même temps que la végétation et sont fonction du produit utilisé. Uniquement les insecticides et les fongicides sont concernés dans cet essai, les éclaircissants, régulateurs de croissance et engrains sont appliqués à pleine dose.

2.3.2 Efficacité biologique

Des observations régulières (une fois par mois) ont lieu sur les lignes centrales des modalités avec 4 blocs par modalité afin de vérifier l'infestation de chacune. Ces observations sont faites, d'après les méthodes CEB (commission des essais biologiques) sur pousses (4×50) et sur fruits (4×150) par modalité. Elles ont pour but de vérifier l'absence ou la présence de dégâts causés par la tavelure, l'oïdium, le carpocapse, les tordeuses, les punaises et les pucerons. Les fruits récoltés seront mis en conservation courant septembre et subiront aussi des observations mais celles-ci seront ultérieures au stage. La partie conservation n'est pas abordée dans ce rapport.

2.3.3 Traitements des données

L'analyse des données est réalisée avec le logiciel Statbox 7.5. Des ANOVA sont réalisées suivi d'un test de Newman Kuels au seuil de 5%. L'objectif de ce test sera de montrer l'existence de différences significatives entre les moyennes. Afin de réaliser ces tests, il est nécessaire de valider le modèle de l'étude, c'est-à-dire de vérifier l'indépendance des variables, de vérifier que les variables quantitatives étudiées suivent une loi normale et enfin de vérifier l'homoscédasticité des variances. Ces tests permettent de vérifier que les données sont bien exploitables. Pour cela, un test de Shapiro et un test de Bartlett seront effectués.

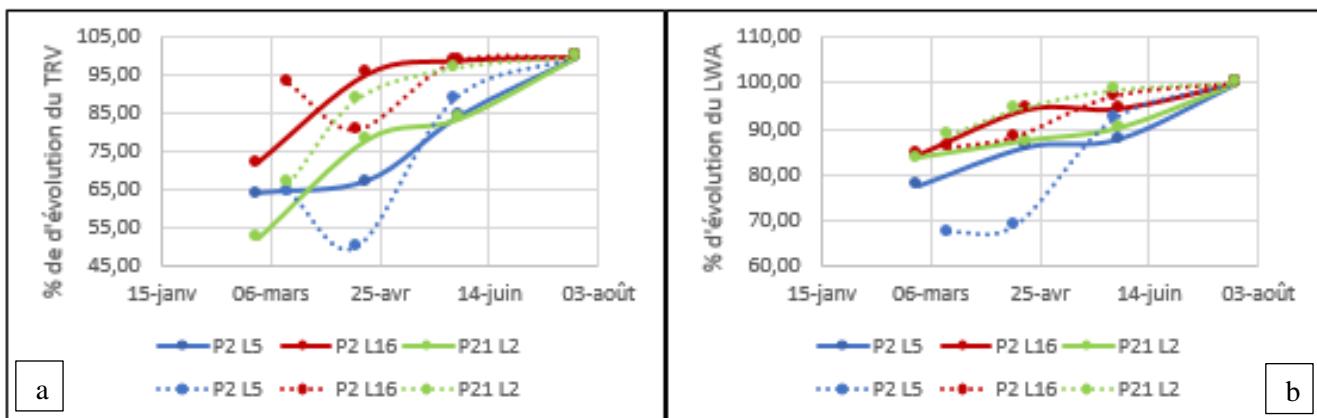


Figure 28 : Pourcentage d'évolution de l'indicateur TRV (a) et du LWA (b)

Légende : Les traits continus correspondent aux données Lidar et ceux en pointillés correspondent aux données manuelles ; P = parcelle et L = ligne. La fin de végétation est considérée aux alentours du 24 juillet (stade BBCH 77) représenté par le 100%.

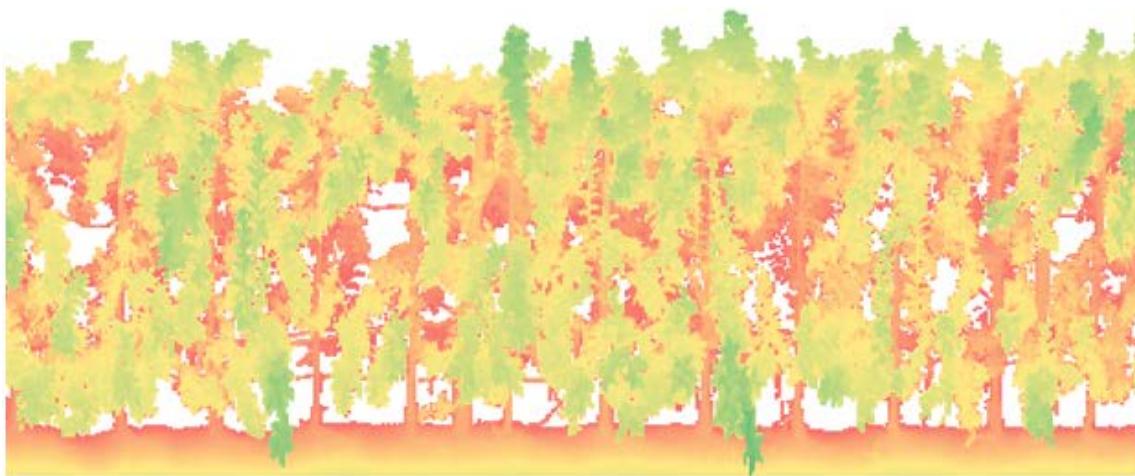


Figure 29 : Représentation de la parcelle 21 ligne 2 conduite en axe d'après les données Lidar (Hudebine, 2017)

PARTIE III : RESULTATS

3.1. ESTIMATION DE LA SURFACE FOLIAIRE DES ARBRES

3.1.1 TRV

D'après les mesures manuelles, les parcelles 2 ligne 5, conduite en mur fruitier axe et la 21, conduite en axe, présentent les plus fortes évolutions. Leur volume de végétation a haussé de 36 et 33%, contrairement à la dernière parcelle n'ayant subi que 7% d'augmentation de végétation, conduite en mur fruitier biaxe. Ces variations sont confirmées par les mesures via le laser, qui prédisent une évolution de végétation de respectivement 36, 47, et 28%. Les mesures « Lidar » diffèrent donc quelques fois des mesures manuelles. Avec ces dernières, quelques points (par exemple ceux correspondants aux mesures de mi-avril) estiment un développement en baisse de l'arbre en pleine saison. Ces mesures s'expliquent par la taille d'été réalisée quelques temps avant le passage du Lidar. La parcelle 21 ne subit pas cette baisse car elle n'a pas été taillée durant cette période (Figure 28a).

3.1.2. LWA

De nouveau, la parcelle en mur fruitier axe subit la plus forte évolution de végétation d'après cet indicateur. En effet le LWA hausse de 32% d'après les mesures manuelles et de 22% d'après le Lidar. Les deux autres parcelles étudiées subissent une évolution moindre, dont les valeurs manuelles et laser diffèrent très légèrement ; respectivement 14 et 16% pour la P2L16 et 11 et 16% pour la P21L2 (Figure 28b). Comme avec l'indicateur précédent, les données laser et manuelles diffèrent fortement à certaines dates mais celles-ci s'atténuent au cours de la saison.

3.1.3 Indicateurs combinés

D'après les figures ci-dessus, on observe que l'évolution selon l'indicateur TRV est plus importante que celle avec le second indicateur. En effet, sur les 3 parcelles étudiées, l'évolution moyenne du TRV est de 26% contre 19% pour le LWA (24% contre 16% pour l'ensemble des parcelles étudiées sur site, soit 9 au total).

Sur 35 mesures établies à quatre dates différentes avec une fréquence d'un mois depuis fin-février début-mars, où ces mesures correspondent à la moyenne de 10 mesures (soit 350 mesures), les mesures manuelles s'avèrent supérieures à celles via le Lidar dans 88% des cas (respectivement 94% avec le TRV et 88% avec le LWA). Le lidar, tracté par le tracteur avec un avancement moyen de 5km/h relève des données qui sont exprimées en coordonnées polaires à partir du capteur, puis reconvertis en référentiel cartésien (x, y et z correspondant à la distance, la hauteur et la porosité, Figure 29). Celui-ci est capable de relever la porosité, mais ce facteur n'est pas pris en compte pour ne pas biaiser les comparaisons.



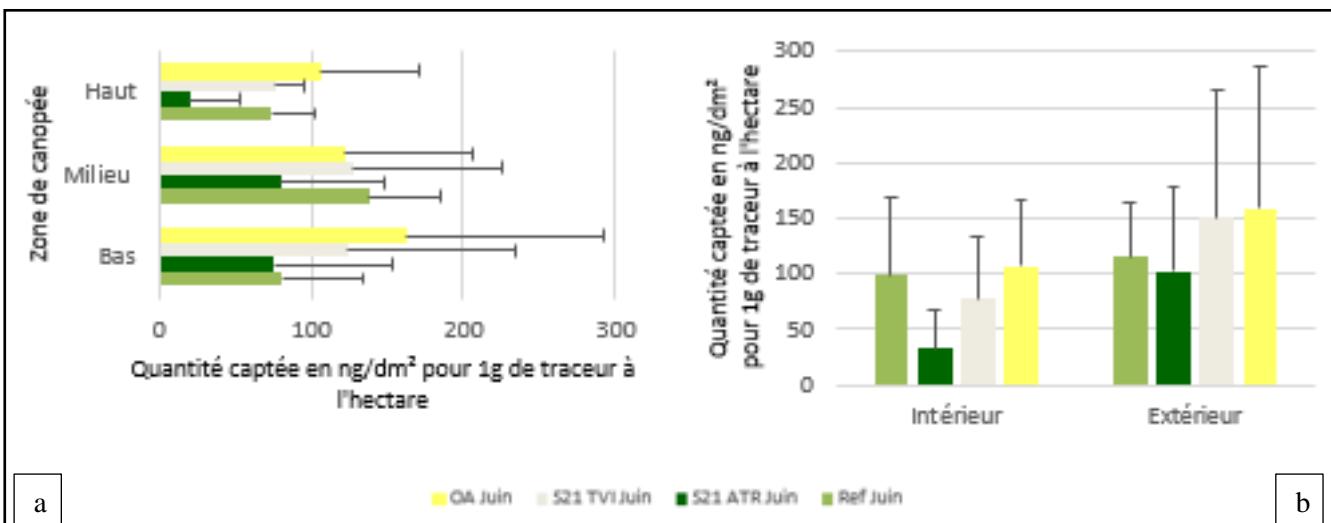


Figure 30 : Quantité de tartrazine captée par la végétation, selon la zone de canopée (a) et selon l'intérieur ou l'extérieur de l'arbre (b) avec les 3 pulvérisateurs en juin.

Légende : haut : zone 7 ; milieu = zones 4, 5 et 6 ; bas = zones 1, 2 et 3 ; intérieur = zones 2 et 5 ; extérieur = zones 1, 3, 4 et 6

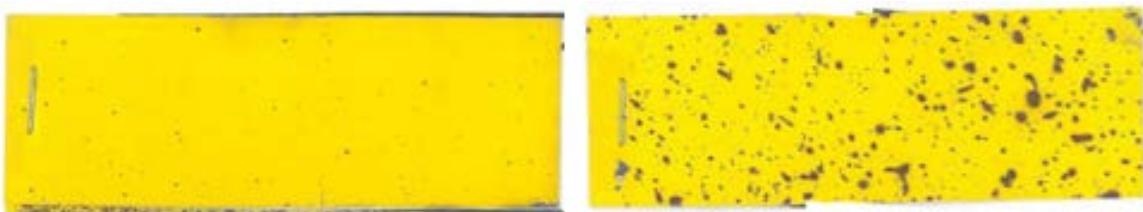


Figure 31 : Papiers hydrosensibles du pulvériseur équipé de buses ATR à gauche et de buses TVI en haut de la rampe à droite.

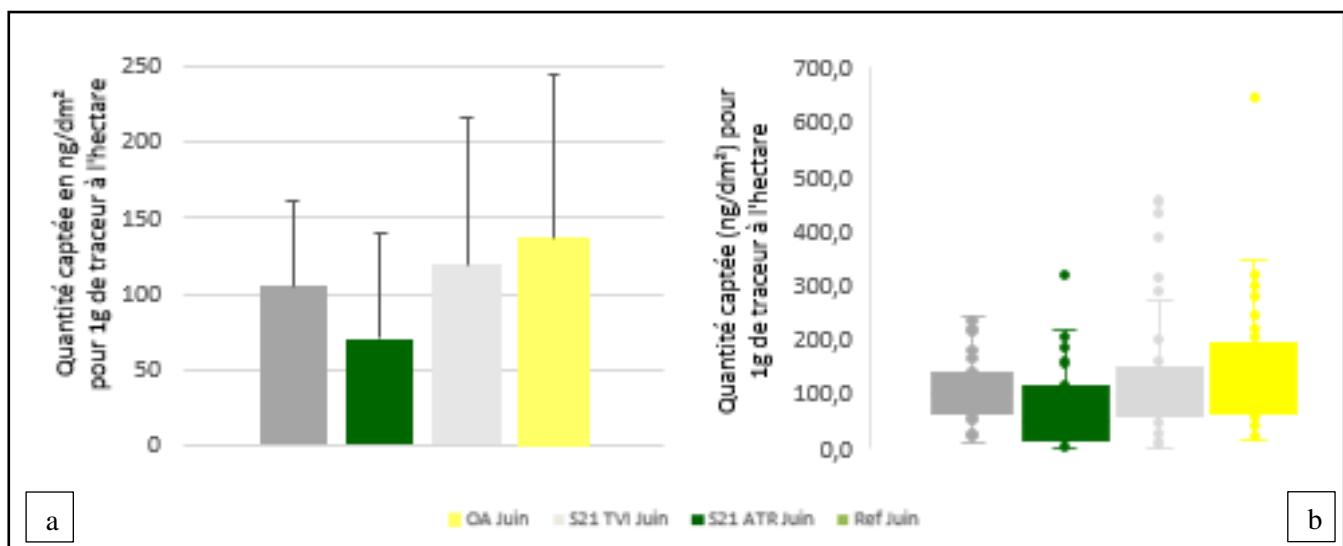


Figure 32 : Quantité totale de tartrazine captée par la végétation (a) et boîte à moustache correspondantes (b)

3.2 TEST DE QUALITE DE PULVERISATION

3.2.1 Influence du type de pulvérisateur et de ses réglages

Les conditions météorologiques durant l'essai sont détaillées dans l'annexe VI. La figure 30a présente la quantité de traceur interceptée par les arbres en fonction des modalités et de la hauteur de la végétation. Le pulvérisateur Berthoud pulvérise davantage de solution au milieu de l'arbre (p-value : 0,018) que dans le haut et dans le bas (138 contre 81 et 74 ng/dm² pour 1g de traceur à l'hectare). Il y a une hausse de 44% de quantité de produit déposé au milieu par rapport aux deux autres étages. Le pulvérisateur équipé que de buses ATR présente des quantités similaires en bas et au milieu de l'arbre (75 et 80 ng/dm²) mais une très faible quantité en haut (20 ng/dm²), mais ces différences ne sont pas significatives. Cette faible quantité équivaut à une baisse de 74% par rapport aux deux autres zones de canopée. Le pulvérisateur S21 équipé de buses TVI uniquement en haut de la rampe réagit de la même façon mais avec des quantités différentes. Les valeurs correspondantes aux zones du bas et du milieu sont similaires (124 et 127 ng/dm²), seule celle du haut diffère (77 ng/dm²), correspondant à la zone ciblée par les buses TVI. De nouveau, aucune différence significative n'est relevée. Pour le pulvérisateur opti-ajust, plus la zone de canopée est haute, plus la quantité diminue, malgré le fait qu'aucune différence significative ne soit présente (161, 121 et 106 ng/dm²). En regardant par étage foliaire, aucune différence significative n'est présente mais des tendances sont observées. En bas, l'opti-ajust et le S21 équipé de buses TVI en haut de la rampe dépose plus de solution que le S21 équipé de buses ATR sur la totalité de la rampe et la référence. Au milieu et en haut de la canopée, les pulvérisateurs déposent des quantités similaires, sauf celui équipé que des buses ATR qui en dépose en moindre quantité. Des différences de quantité sont notables pour les deux pulvérisateurs S21 dans les étages foliaires « bas » et « milieu » alors que ceux-ci sont équipés de la même manière, uniquement des buses ATR ; celles-ci étant les mêmes au cours des manipulations.

L'utilisation du pulvérisateur S21, avec un changement de buses en haut de la rampe provoque de fortes variations en haut de l'arbre. La figure 31 montre la densité et la taille des gouttes perçus par le haut des arbres avec ce réglage. Le haut de l'arbre perçoit nettement plus de gouttes avec les buses TVI.

La deuxième partie de la figure (30b), met en évidence les différences entre l'intérieur et l'extérieur de la canopée. Pour l'ensemble des modalités, le dépôt est supérieur à l'extérieur, mais seule la modalité équipée de buses TVI en haut de la rampe présente des différences significatives (p-value : 0,036). Lorsque l'on se spécifie à l'extérieur, les pulvérisateurs opti-ajust et le S21 avec des buses TVI sont à l'origine de meilleurs dépôts mais ceci n'est pas confirmé par les statistiques. A l'intérieur, l'opti-ajust et la référence pulvérissent davantage (p-value : 0,022), devant celui équipé de buses TVI en haut de la rampe et celui équipé de buses ATR sur la totalité de la rampe, qui en pulvérise en très faible quantité.

Concernant la quantité déposée totale (Figure 32a), les pulvérisateurs opti-ajust (136 ng/dm²) et S21 buses TVI en haut (118 ng/dm²) déposent plus de produit que les deux autres (p-value : 0,017). Le Berthoud dépose moins de solution (104 ng/dm²) mais ne diffère pas statiquement des précédents, ni de

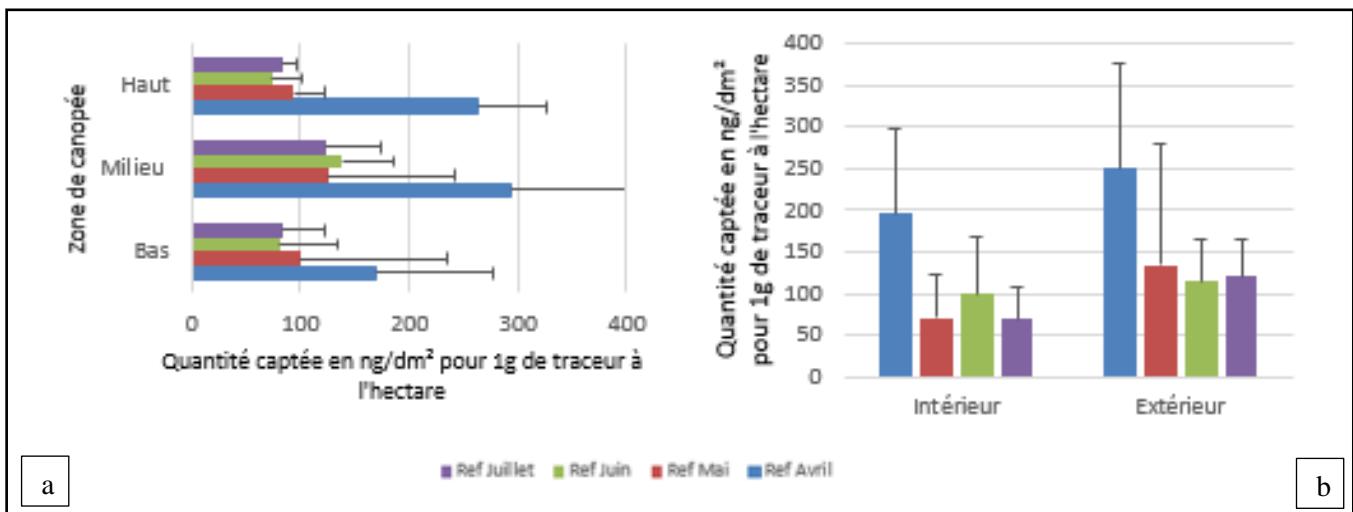


Figure 33 : Quantité de tartrazine captée par la végétation, selon la zone de canopée (a) et selon l'intérieur ou l'extérieur de l'arbre (b) avec le pulvérisateur Berthoud à 4 dates

Légende : haut : zone 7 ; milieu = zones 4, 5 et 6 ; bas = zones 1, 2 et 3 ; intérieur = zones 2 et 5 ; extérieur = zones 1, 3, 4 et 6

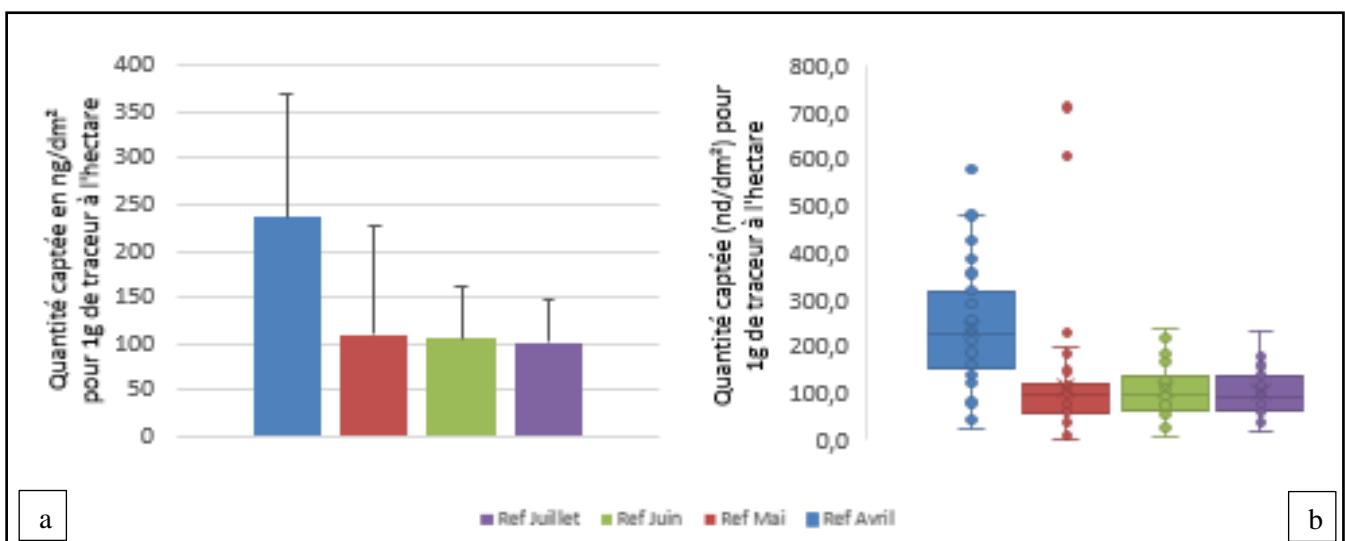


Figure 34 : Quantité totale de tartrazine captée par la végétation (a) et boîtes à moustaches correspondantes (b)

celui en déposant le moins, le S21 avec les buses ATR (70 ng/dm²). Par ces figures, le pulvérisateur opti-ajust permettrait la meilleure pulvérisation. La deuxième partie de la figure (b), représentant les boîtes à moustaches de chaque modalité, permet de visualiser plusieurs paramètres de distribution de la variable. Elles informent également sur la variabilité des valeurs. La modalité opti-ajust présente une forte dispersion des données, avec un minimum de 11 et un maximum de 345 ng/dm². En effet, plus la dispersion des données est grande et plus la boîte à moustache sera étendue. Elle présente une donnée excessivement élevée de 645 ng/dm². La modalité S21 équipé de buses TVI en haut de la rampe à une distribution allant de 0,8 à 269 ng/dm² avec des valeurs hautes allant jusqu'à 453 ng/dm². Ce même pulvérisateur avec uniquement des buses ATR présente une distribution similaire (de 0 à 215 avec une valeur haute de 316ng/dm²). Enfin la modalité référence, ne présente pas de donnée excessivement élevée, avec une distribution de 6,4 à 239 ng/dm² pour 1g de traceur à l'hectare.

3.2.2 Influence du stade végétatif du pommier

Les mêmes paramètres ont été étudiés avec le même pulvérisateur (Berthoud) sous 4 dates différentes afin de voir l'évolution au cours de la saison et donc de voir l'impact du stade de végétation du pommier sur les quantités déposées. Pour les zones de canopée (figure 33a), de nouveau, la zone présentant le plus de dépôt est celle du milieu, avec une hausse de 40% en moyenne.

D'après la figure 33b, les mêmes observations que précédemment sont mises en évidence. En effet, il y a toujours plus de dépôt à l'extérieur de l'arbre, mais uniquement la modalité de juillet présente des différences significatives (p-value : 0,07). Que ce soit à l'intérieur ou à l'extérieur, la référence avril diffère nettement (p-value : 0,01 pour l'intérieur et de 0,04 pour l'extérieur).

Les quantités d'avril pour ces deux paramètres peuvent doubler par rapport aux autres dates où ces dernières présentent des quantités similaires. Ces observations sont confirmées par la quantité totale de traceur captée (Figure 34a). Le détail des tests statistiques est précisé dans l'annexe VII. La référence avril (où le stade de développement est le plus faible) pour chaque étage foliaire présente des quantités doublées comparées aux autres dates. Les boîtes à moustache (figure 34b) confirment ceci. La modalité d'avril présente la plus forte variabilité de données (21,5 à 480 avec une valeur haute de 577ng/dm²). Les autres modalités suivent les mêmes variations (avec des données s'échelonnant jusqu'à 229, 238 et 277ng/dm² pour respectivement les modalités mai, juin et juillet), à l'exception des valeurs élevées de la référence mai allant jusqu'à 711ng/dm² pour 1g de traceur à l'hectare. Les dépôts de colorant sont très hétérogènes lors de la modalité avril. Plus la saison avance, plus les dépôts sont de faibles quantités et plus ils deviennent homogènes.

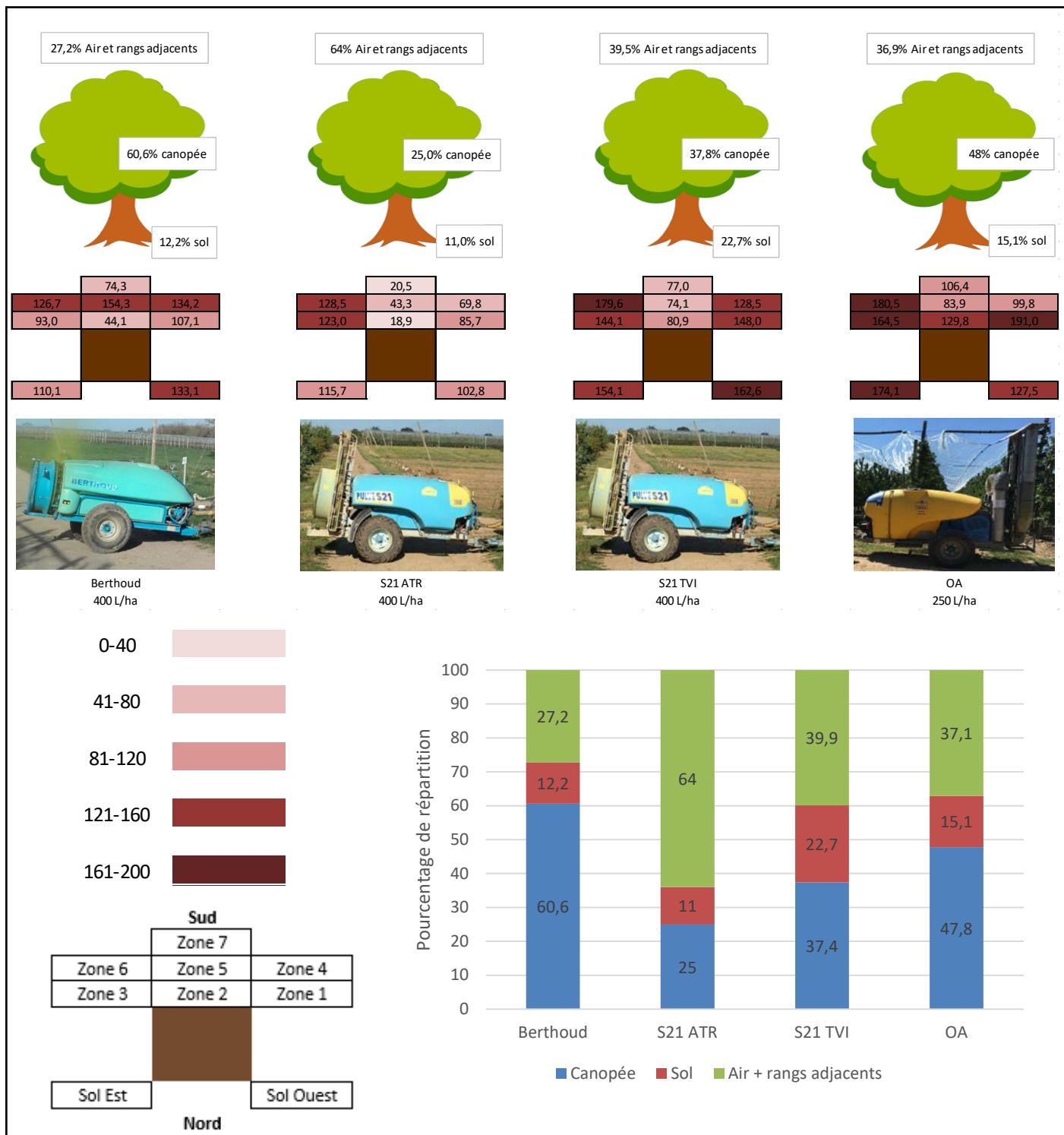


Figure 35 : Résultats obtenus pour l'essai tartrazine avec les pourcentages de répartition entre les 3 aires (canopée, air, sol) du volume pulvérisé, le détail du volume capté au sein des zones de la canopée et du sol (en ng/dm² pour 1g de traceur à l'hectare) en fonction du pulvérisateur et du litrage hectare utilisé.

Légende : Berthoud = pulvérisateur référence ; S21 ATR = pulvérisateur S21 équipé de buses ATR sur la totalité de la rampe ; S21 TVI = pulvérisateur équipé de buses TVI en haut de la rampe et de buses ATR sur le reste de la rampe ; OA = pulvérisateur opti-ajust. Les couleurs indiquent les classes de quantité de pulvérisation ; plus la couleur est foncée, plus la quantité déposée est importante

La figure 35 présente un schéma récapitulatif des résultats de l'essai pour les modalités de juin, avec les pourcentages de répartition entre les 3 aires (canopée, air, sol) et la répartition de la quantité de traceur par zone au sein de la végétation (en ng/dm² pour 1g de traceur à l'hectare), en fonction des modalités.

Le pulvérisateur de référence (Berthoud) a pulvérisé 60,6% du volume dans la végétation, 12,2% au sol et 27,2% dans l'air et les rangs adjacents, pour un volume hectare de 400L/ha. Le pulvérisateur S21 équipé de buse ATR avec le même volume hectare effectif a déposé 25% dans la canopée, 11% au sol et 64% dans l'air et les rangs adjacents. Il dépose donc moitié moins de produit dans l'arbre mais nettement plus en dehors de la canopée. Ce même pulvérisateur équipé de buses TVI dépose plus de produit dans l'arbre que celui équipé de buses ATR (37,8 contre 25%), plus au sol (22,7 contre 11%) et par conséquent moins dans l'air et les rangs adjacents (39,5%). Le type de buse impacte donc le pourcentage de dépôt et la dérive. Enfin, la modalité opti-ajust dépose 48% de son volume dans l'arbre, 36,9% dans l'air et les rangs à proximité et 15,1% au sol.

En globalité, les résultats montrent que les modalités référence (Berthoud) et le pulvérisateur pneumatique opti-ajust ont la pulvérisation la plus homogène, ce qui est remarqué avec les valeurs présentes dans la canopée. La référence dépose de manière homogène le traceur que ce soit à l'est et à l'ouest, mais plus dans le haut des arbres, alors que les autres pulvérisateurs déposent plus de produit du côté est.

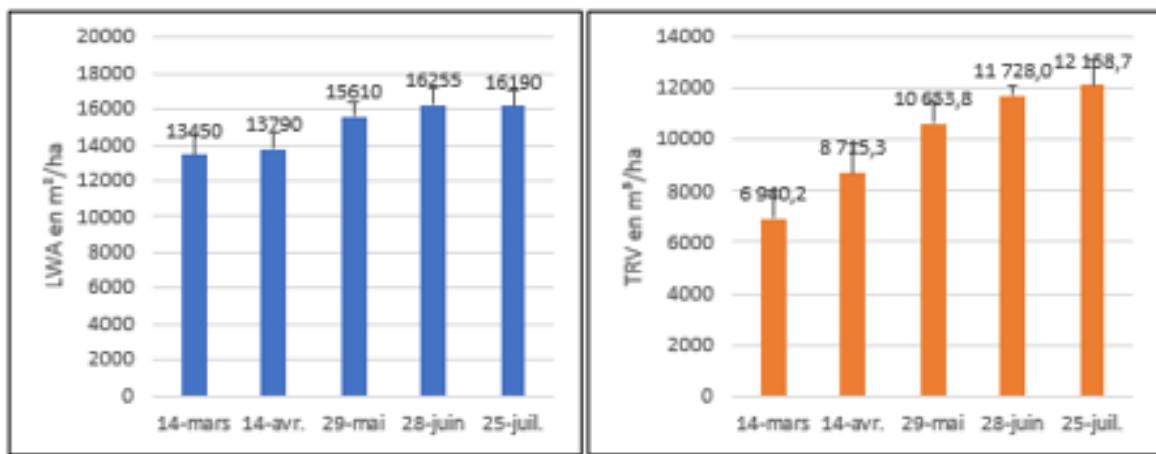


Figure 36 : Evolution de la surface foliaire (en bleu) et du volume foliaire (en orange) pour la parcelle subissant l'adaptation des doses

Tableau VIII : Nombre de produits utilisés au cours de la saison en fonction des cibles

Période	Cibles	Action	Nombre de produits utilisés
Début de saison Du 20/03 au 14/04	Tavelure	Fongicide	4
	Oïdium		2
	Pucerons	Insecticide	1
Milieu de saison Du 15/04 au 17/05	Tavelure	Fongicide	9
	Oïdium		2
	Pucerons	Insecticide	1
Fin de saison Du 18/05 au 15/08	Tavelure	Fongicide	3
	Carpocapse	Insecticide	3
Saison Du 20/03 au 15/08	Tavelure	Fongicide	16
	Oïdium		4
	Carpocapse	Insecticide	3
	Pucerons		2

Légende : Certains produits présentent une double efficacité (plusieurs cibles)

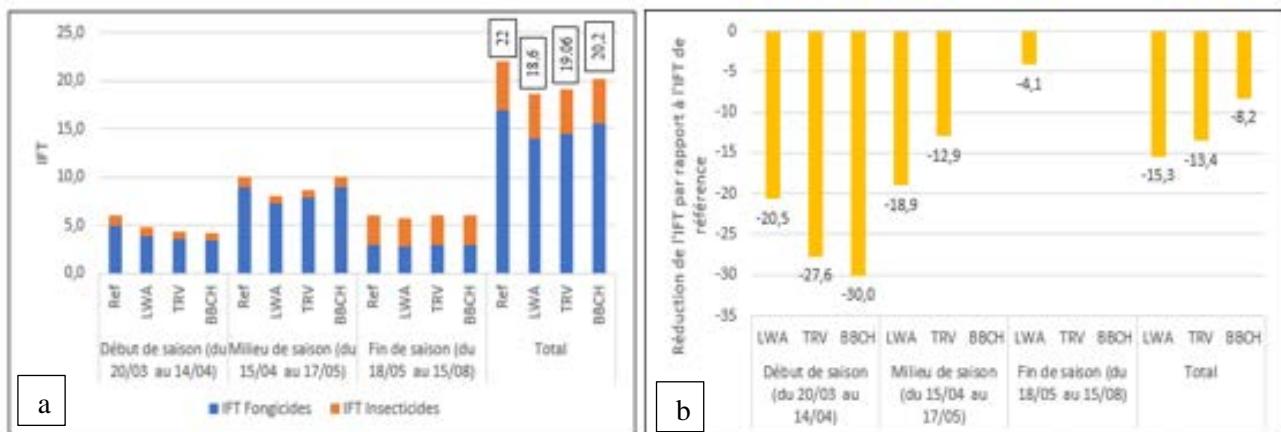


Figure 37 : Indice de fréquence de traitement (a) et sa réduction (b) selon les modalités

3.3 ADAPTATION DES DOSES EN GRANDE PARCELLE

Sur la parcelle Pulvarbo, la végétation mesurée au cours de la saison en tenant compte du LWA montre une évolution de 17% et une évolution de 43% pour le TRV de mi-mars à fin juillet considéré comme la fin de développement (Figure 36). Ces mesures, accompagnées du BBCH, ont été intégrée au calcul de dosage adapté utilisé.

3.3.1 Pression phytosanitaire

Sur la saison, 22 traitements ont été réalisés en 17 applications car certains produits ont été mélangés afin de limiter les passages de tracteur lorsque les combinaisons étaient possibles. Chaque traitement a été appliqué dans de bonnes conditions (cf 1.6).

L'adaptation des doses a commencé le 20 mars et s'est terminé le 7 juillet, jour où les doses utilisées pour l'ensemble des modalités étaient similaires. La première adaptation à être stoppée fut celle du BBCH le 14 avril, suivie du TRV le 2 juin et le LWA le 7 juillet. Après cette date, tout l'essai est traité à même dose, sauf le témoin non traité.

Le calendrier de traitement des produits subissant l'adaptation de doses et leurs caractéristiques est détaillé dans l'annexe V. Au cours de cette adaptation, trois périodes ont été définies afin d'estimer à quel moment les réductions d'utilisation des produits sont les plus probables : le début de saison (du 20/03 au 14/04), le milieu de saison (du 15/04 au 17/05) et la fin de saison (du 18/05 au 15/08). Le tableau VIII montre les principales cibles traitées au cours de la saison. La majorité des traitements ont été antitavelure (64%), et cela représente la maladie la plus traitée dans chaque période de la saison. Une grande diversité de produit a été utilisée afin de respecter le nombre d'application de chaque produit mais aussi de limiter les risques d'apparition de résistance.

La figure 37a montre les résultats obtenus concernant les IFT au cours de la saison. Ceux-ci diffèrent d'une modalité à une autre. L'adaptation des doses a permis à chaque modalité de réduire ses IFT insecticides et fongicides par rapport à la référence. L'économie principale s'est faite sur les fongicides qui représentent près de 75% de chaque modalité. Les principales réductions ont lieu en début de saison quelle que soit la modalité alors que les traitements sur cette période ne représentent que 27% des totaux. En effet, l'adaptation BBCH prévoit une réduction de 30% contre 27,6 et 20,5 pour le TRV et le LWA. Ces réductions vont s'atténuer au cours de la saison voire s'arrêter définitivement suite aux fins d'adaptation. En milieu de saison, la modalité LWA prédit une diminution de 18,9% contre 12,9% pour le TRV ; et en fin de saison seul le LWA prédit une réduction de 4,1%. Sur l'ensemble de la saison, c'est la modalité LWA qui procure la meilleure réduction. Tout IFT confondu, l'adaptation des doses a permis de réduire de 3,4 ; 2,9 et 1,8 l'IFT des modalités LWA, TRV et BBCH par rapport à la référence. En pourcentage (sans herbicides et éclaircissants), cette réduction est de 15,3 ; 13,4 et 8,2 pour respectivement les mêmes modalités (Figure 37b).

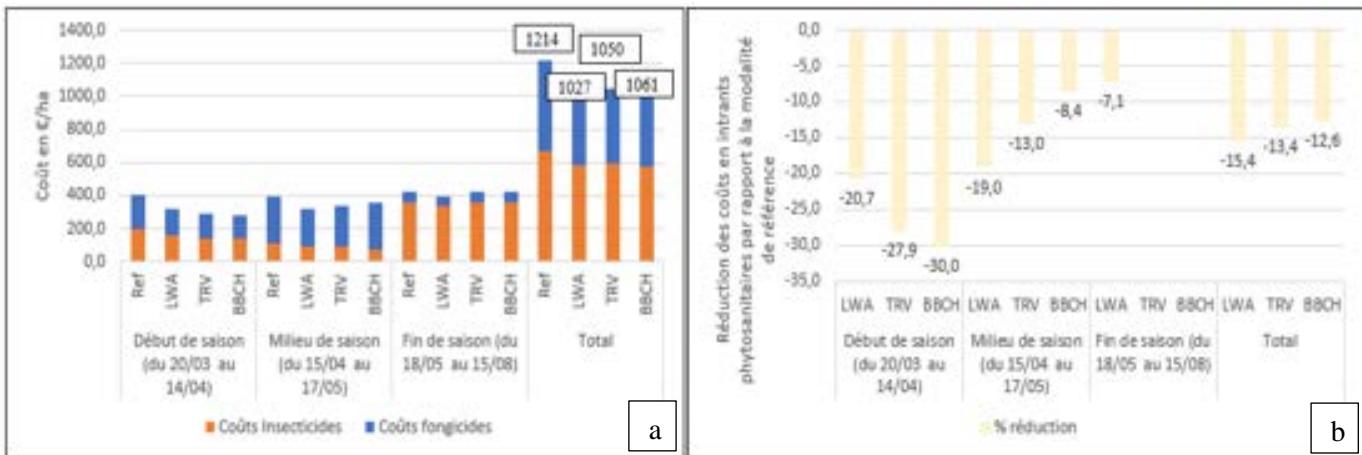


Figure 38 : Coût des intrants phytosanitaires (a) et leurs réductions (b)

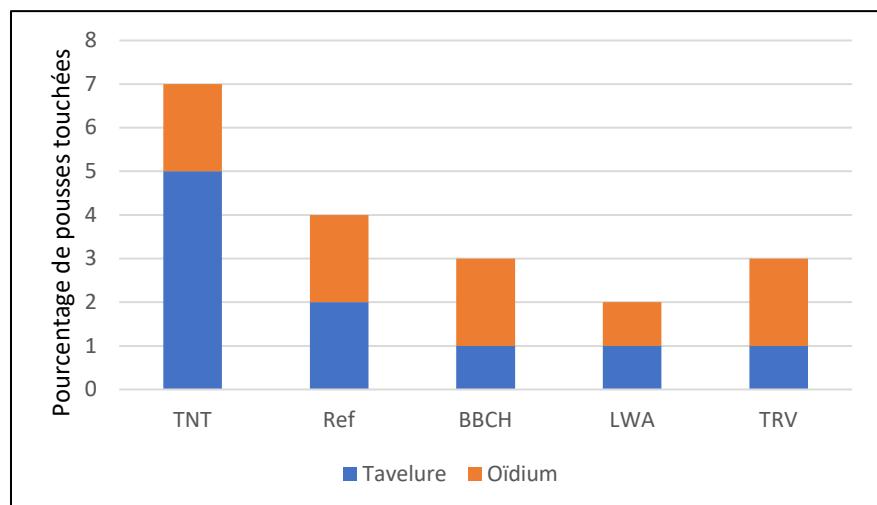


Figure 39 : Pourcentage de pousses touchées par une maladie ou un ravageur en fonction des adaptations de dose le 10 juillet

3.3.2 Coût de la protection phytosanitaire

L'ensemble des données qui suivent néglige les coûts en lien avec le matériel, chauffeur, temps de préparation et autres mais prend en compte uniquement le prix des produits. La figure 38a montre le coût des intrants au cours de la saison. De nouveau, l'adaptation des doses a permis de réduire ce coût par rapport à la référence, et ceci principalement en début de saison et en milieu de saison (figure 38b). Au cours de ces périodes, le LWA engendre des réductions de 20,7 et 19%, suivi du TRV avec 27,9 et 13%, et enfin le BBCH avec 30 et 8,4%. Seule la modalité LWA permet des réductions en fin de saison conformément à la réduction des IFT décrite ci-dessus. Sur la saison complète, la modalité LWA engendre la meilleure baisse des coûts suivie du TRV et du BBCH (15,4% contre 13,4 et 12,6). Malgré cela, cette modalité ne permet pas la meilleure adaptation sur chaque période.

3.3.3 Efficacité biologique

Suite à trois observations effectuées au cours de la saison (9 mai, 2 juin et 10 juillet), aucune différence statistique notable ne s'observe (annexe VII). Malgré ceci, des tendances apparaissent au cours de ces notations. La figure 39 montre les résultats obtenus sur les pousses en fonction des modalités le 10 juillet. De faibles tendances se dégagent de cette notation. Le témoin non traité présente les plus forts pourcentages d'attaques (7%), devant la modalité référence subissant les traitements couramment utilisés par les arboriculteurs (4%). Les modalités BBCH et TRV présentent 3% d'attaques, suivi par la modalité LWA présentant le plus faible taux d'attaque (2%). En outre, toutes les modalités voient leur pourcentage de pousses touchées augmenter entre les notations, mais les différences obtenues ne sont pas modifiées. Entre les deux maladies observées durant cet essai, l'oïdium se retrouve en plus forte présence dans l'ensemble des modalités ; uniquement le témoin non traité est plus touché par la tavelure.

PARTIE IV : DISCUSSION

4.1 CARACTERISATION DE LA SURFACE FOLIAIRE DES ARBRES

L'utilisation d'indicateurs a pour but d'harmoniser l'expression des doses et de caractériser l'évolution de la surface foliaire par des moyens de calculs et de détermination compréhensibles et simplistes pour tous. En outre, indiquer la surface à traiter permet d'obtenir la quantité exacte de produit à utiliser.

Les données manuelles permettent d'estimer le volume foliaire des arbres. Elles se font par une dizaine de mesures réalisées de manière aléatoire en mesurant la largeur et la hauteur des arbres. Celles-ci suffisent pour apprécier de manière fiable le volume foliaire à traiter (Viret et *al.*, 2007). Il a été montré que de mesurer 20 arbres manuellement provoquait 5% d'erreur alors que d'en mesurer 10 en provoquait 7%. En réduisant par deux le temps de travail, le pourcentage d'erreur n'augmente guère, ce qui est acceptable pour les arboriculteurs. De plus, avec 10 arbres mesurés, la précision du LWA est de 5,1 contre 14% du TRV (Verpong, 2017). Ces données ont été faites durant l'ensemble de la saison avec un intervalle d'un mois, ce qui est en adéquation avec les courbes d'évolution de la végétation. Il est donc primordial de déterminer ces indicateurs plusieurs fois au cours de la saison.

Les indicateurs montrent une hausse du volume foliaire au cours de la saison pour l'ensemble des modalités. La surface foliaire des arbres diffère cependant selon la variété, la conduite et le porte greffe. Par conséquent, la détermination de la dose devrait être différente pour chaque typologie de parcelle, impactant les indicateurs et donc les réglages des pulvérisateurs (Toews et Friessleben., 2012). D'autres paramètres comme la taille de l'inter rang et la hauteur de la canopée sont prépondérants et ne doivent pas être négligés car ils peuvent impacter ces indicateurs. En effet, un changement de 10 cm de l'un d'entre eux entraîne une hausse du LWA de 3 à 5% (Toews R.Friessleben., 2012). L'évolution de la surface foliaire de l'ordre de 20 à 30% dans les essais effectués à La Morinière justifie ainsi l'adaptation des doses des intrants phytosanitaires.

L'indicateur TRV subit un pourcentage d'augmentation plus important sur l'ensemble des modalités étudiées par rapport au LWA. Il permettrait une meilleure modulation de la dose. Il semblerait logique que l'homologation des produits phytosanitaires d'après cet indicateur soit plus adéquate car il permet plus d'amplitude de réduction de dose. En Suisse, là où le TRV est fréquemment utilisé depuis des décennies, une étude menée de 2005 à 2009 sur vigne a permis une réduction de dose de 20% tout en gardant une efficacité biologique équivalente (Viret *et al.*, 2010).

La configuration des modalités étudiées, en plantation serrée (haie fruitière) ne joue pas en faveur du LWA. En effet, plus la densité de plantation augmente, plus le LWA hausse alors que le TRV va avoir tendance à se réduire, et inversement. Le mur fruitier ne permet donc pas une adaptation de dose selon le LWA mais plus d'après le TRV.



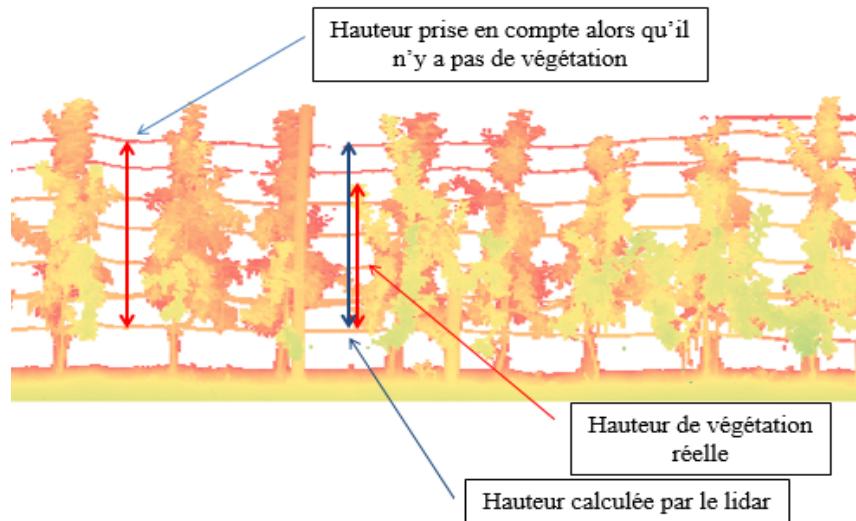


Figure 40 : Problème rencontré en verger par l'utilisation du lidar (IRSTEA, 2017)

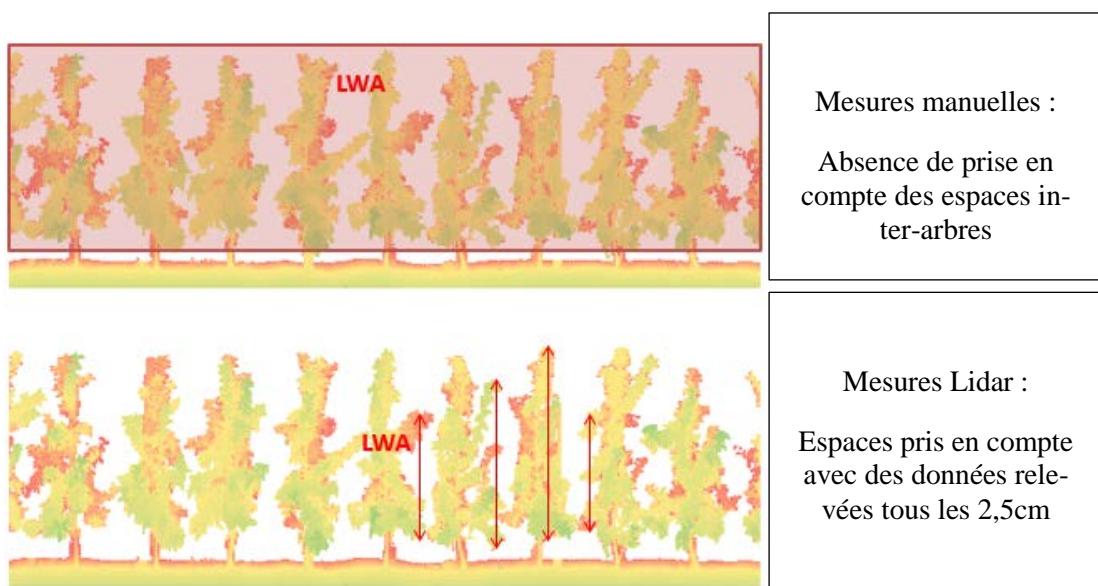


Figure 41 : Différences d'interprétation des données manuelles et lidar pour le LWA (Hudebine, 2017)

Cependant, le LWA a été choisi par l'ECPA pour l'harmonisation des doses, malgré le fait qu'il soit aussi moins adapté pour les configurations en gobelet des fruits à noyaux et pour les productions cidri-coles dont les surfaces foliaires sont plus importantes que les pommes de tables. La méthode choisie ici fixe un LWA max de 17000m²/ha alors qu'en début de saison les pommiers à cidre ont déjà 16000m²/ha (pour l'exemple d'un arbre de hauteur de 4,5m et un inter-rang de 5,3m). Cette valeur maximale est définie à partir du 95^{ème} percentile de l'ensemble des données de végétation collectées dans les vergers l'année précédente. La méthode est donc rapidement dépassée pour ces arbres. Ce résultat est aussi confirmé pour les vergers de pommes de tables âgés et volumineux, rendant cette méthode inadaptée pour des vieux vergers.

La porosité n'étant pas prise en compte par les mesures manuelles, il semble nécessaire de mettre au point un outil de mesure plus précis comme le lidar. Celui-ci s'avère efficace pour de nombreuses raisons. En effet les données récoltées font preuve d'une extrême précision et la densité d'échantillonnage est forte, améliorant les résultats. La bonne précision du lidar (allant de quelques mm à quelques dizaines de centimètres) ainsi que sa transportabilité jouent en faveur de son utilisation. Cependant, celle-ci présente quelques inconvénients. Sur jeunes vergers, les espaces entre arbres font chuter la hauteur moyenne (donc le LWA), car celle-ci est calculée à partir des valeurs prises tous les 2,5cm environ selon la vitesse d'avancement du tracteur (Figure 40). L'ensemble des données relevées nécessite des ressources importantes pour le traitement de données, l'absence d'interface logiciel en temps réel ainsi que le coût proche de 15000€(comprenant la totalité du matériel : table d'acquisition, GPS, modem et lidar) sont des freins à son développement. Les mesures ne sont pas fiables pour les grands volumes comme c'est le cas pour les noyers. Pour ces derniers, dès que la végétation commence à se développer, les feuilles masquent la présence d'autres feuilles derrière elles et les arbres se recoupent au-dessus du rang. Le signal laser est intercepté et n'atteint pas les parties hautes. Le résultat est donc biaisé car le LWA chute au cours de la saison.

Les mesures manuelles des deux indicateurs surestiment le volume et la surface foliaire car les arbres sont rapprochés et les branches sont imbriqués dans l'arbre à proximité. Par ailleurs, les mesures manuelles ne prennent pas en compte les espaces inter arbres, ce que fait le lidar (Figure 41).

La création de modèles comme des outils d'aide à la décision (OAD) basés sur des données agronomiques permettant une adaptation des doses allant dans le sens de la diminution des intrants phytosanitaire assurerait une arboriculture de précision avec une bonne qualité de protection. Malgré l'emploi de ces modèles voulant être simpliste, la création de modèles adéquats à chaque habitudes culturales et espèces (mode de conduite, âge, époque de l'année, variété...) paraît assez difficile à mettre en œuvre.



Tableau IX : Caractéristiques des buses (d'après JCM Technologies, 2017 et Afidol, 2017)

	ATR	TVI
Taille moyenne des gouttes	110 microns	600 microns
Risque de dérive	Gouttelettes plus sensibles, les parties basses sont plus couvertes	Gouttelettes plus grosses et plus lourdes dérivant peu voire pas atteignant facilement les feuilles hautes
Couverture de la frondaison	Brouillard très fin permettant une couverture régulière	Espace entre les gouttes large à la vue de la taille des gouttes supérieure
Risque de ruissellement	Limité lors de conditions d'utilisation normales	
Atteindre les branches hautes	Canopée difficilement atteinte par les gouttes fines	Canopée atteinte en grande partie
Homologué ZNT	Non	Oui
Prix moyen (€)	4,5	11

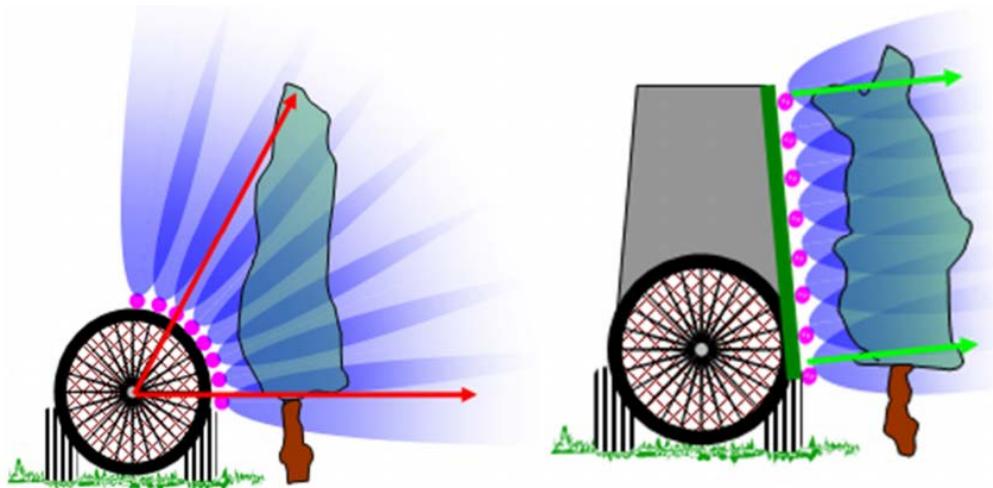


Figure 42 : Effet du type de pulvérisateur à ventilation axiale et tangentielle sur la dérive (Triloff et Bodenseeobst, 2014)

4.2. QUALITE DE PULVERISATION

Le réglage des pulvérisateurs est complexe et joue un rôle prépondérant pour garder une bonne efficacité biologique. Plusieurs paramètres doivent être considérés dans le réglage du pulvérisateur comme le débit et la pression des jets, la vitesse d'avancement et la vitesse de la turbine. Lorsque le flux d'air est trop important, cela peut provoquer une hausse des gouttes sensibles à la dérive et une réduction de 20% du dépôt sur les feuilles (Triloff *et al.*, 2012). Dans le cas inverse, une hausse de dépôt se produit à proximité du ventilateur.

4.2.1 Jet porté, pulvérisation axiale

Le pulvérisateur de référence, Berthoud vendu à 15000€HT (hors taxe), présente un pourcentage élevé de captation de produit par l'arbre au cours de la modalité étudiée (60,6%), le reste étant perdu dans l'air, le sol ou les rangs adjacents. Au cours de cette période, l'utilisation de ce pulvérisateur semble donc très intéressante. Cependant en début de végétation, son utilisation avec les mêmes réglages semble nettement moins intéressante (39,5% de quantité de produit déposée dans les arbres). En effet en début de saison lors des premiers stades de développement, le nombre de tours par minutes et la ventilation trop élevés engendrent une forte dérive passant à travers la végétation. Par cette dérive, les rangs adjacents vont recevoir une partie de la dose appliquée sur les autres rangs expliquant la forte quantité de produit retrouvée lors des manipulations d'avril. Ce facteur s'atténue au cours de la saison. Plus la végétation est dense, moins le produit traverse les arbres et atteint les rangs adjacents (Bourgoin, 2014). Le jet porté à pulvérisation axiale est souvent déséquilibré dans le flux d'air, or la bonne répartition de la ventilation est cruciale car c'est le vecteur de transport de gouttelettes dans la structure. Une augmentation de la vitesse de ventilation afin d'atteindre le haut de la canopée sur un pulvérisateur à flux radial entraîne nécessairement une dérive plus importante dans la zone médiane de la végétation. A l'inverse, les pulvérisateurs tangentiels permettent d'avoir un flux d'air et des vitesses de ventilation homogènes sur toute la hauteur de la canopée, à condition que la tour soit de même hauteur que la haie fruitière (Figure 42, Triloff et Bodenseeobst, 2014).

La structure de l'arbre joue un rôle important sur ce phénomène. Elle influence la relation entre le volume à pulvériser et le dépôt obtenu, et peut faire varier la quantité de dépôt, jusqu'à 7 fois (Walklate *et al.*, 2008). En saison plus tardive, le phénomène inverse peut avoir lieu. Au cours de cette même étude, les auteurs ont montré qu'uniquement 26% des arbres avaient reçu un volume répondant à l'homologation, alors que 74% avaient reçu des volumes 2 à 6 fois inférieurs. Cette même étude a montré que la densité de la canopée et la hauteur de la végétation étaient les principaux responsables des variations de dépôts, d'où l'importance d'avoir des outils capables de bien déterminer ces paramètres.

En début de saison, son utilisation avec les réglages utilisés ne semble pas intéressante. Les arboriculteurs peuvent adapter leurs pratiques en ne traitant qu'un rang sur deux ou en diminuant la vitesse de rotation de la prise de force afin de diminuer la vitesse de ventilation, ce qui engendre une baisse de

consommation de carburant et une diminution de la dérive. Ces modifications impacteront la pénétration de la bouillie à travers la végétation qui sera plus difficile. Lorsque la végétation est plus élevée, le pourcentage de volume capté augmente, démontrant l'intérêt à diminuer la dose en début de saison.

4.2.2 Jet porté, pulvérisation tangentielle

Le pulvérisateur S21, vendu à 15000€HT, est reconnu comme étant un pulvérisateur limitant la dérive. Au cours des essais, il fut le pulvérisateur le moins efficace. En effet, son utilisation avec les deux types de buses (ATR et TVI) a induit une dérive de respectivement 75 et 62,6%, contre 40% pour la référence et 52% pour l'opti-ajust. Cette différence se retrouve principalement dans la zone haute et à l'intérieur de la canopée. Les buses classiques ATR (petites gouttes), ne permettent pas de couvrir de manière homogène les feuilles du haut lorsque le feuillage est éloigné du pulvérisateur car le moindre souffle d'air augmente le risque de dérive, tandis que les buses TVI (homologué ZNT et anti dérive) produisent de grosses gouttelettes remplies d'air limitant la dérive, éclatant en fines gouttelettes au contact des feuilles. Ces deux buses agissent donc de manière différente au sein de l'arbre et ont une cible différente. Leurs caractéristiques sont détaillées dans le tableau IX.

La météo au cours de la manipulation est un facteur prépondérant impactant cette qualité de pulvérisation. Le vent mesuré (4,4 km/h avec un vent maximal de 7,2km/h) avec les buses ATR sur la totalité de la rampe, est considéré comme fort, impactant la propagation des gouttes à faible poids en haut de l'arbre. Le vent plus fort avec les buses TVI (5,3 avec un vent maximal de 10,4km/h) impacte moins la pulvérisation par le poids des gouttes plus élevé. Cependant, les buses TVI entraînent une couverture nettement plus mauvaise que celle des buses ATR. Ces dernières peuvent entraîner des pertes de plus de 50% de la pulvérisation appliquée. Dans les vergers de pomme, les pertes sur le sol peuvent aller de 2 à 39%, et les pertes de dérive de 23 à 45% (Jamar *et al.*, 2010).

D'après une étude menée sur vigne, les buses ATR entraînent moins de dépôt en haut de l'arbre car les gouttes produites de faible diamètre sont très sensibles à la dérive, mais entraînent un fort dépôt au milieu. En effet, les gouttes étant facilement transportables par le vent, la dérive des autres rangs adjacents impacte les quantités du rang observé (Verpont, 2017). Les buses jouent un rôle prépondérant dans la réussite d'un traitement phytosanitaire. Elles représentent moins d'1% du prix total du matériel de production et constituent une des pièces les plus importantes. En effet, elles déterminent la performance d'un pulvérisateur peuvent influencer l'efficacité biologique du produit appliqué. Elles ont pour but de garantir la meilleure répartition de la bouillie ainsi qu'un minimum de perte de produit dans l'environnement (Osaer *et al.*, 2004). Le mélange des buses au sein d'une rampe (ATR en bas et au milieu, et TVI en haut) serait une solution afin de réduire la dérive. En effet, cela permettrait d'obtenir de petites gouttes et des grosses dans les deux premiers étages, et uniquement des grosses en haut de l'arbre. Le bas et le milieu reçoivent les petites gouttes émises par les buses ATR et les grosses émises par les TVI en haut de l'arbre qui vont chuter par gravité. Le haut de l'arbre reçoit uniquement les grosses gouttes par les buses TVI.



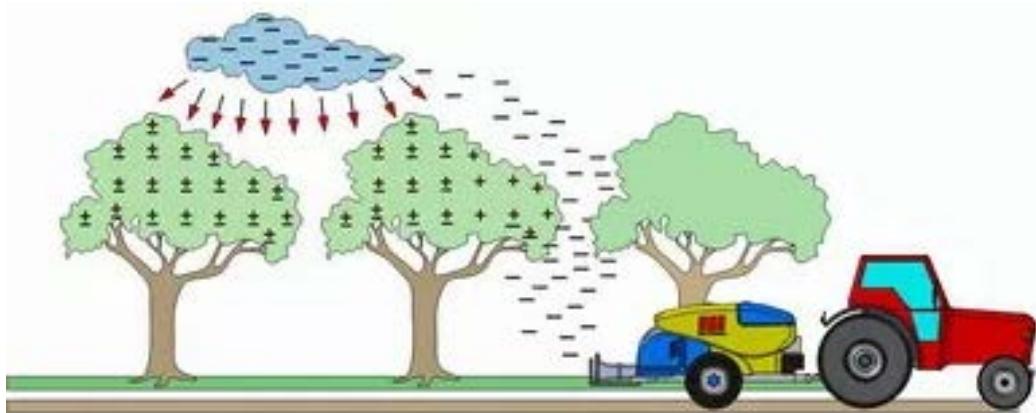


Figure 43 : Schéma représentant le fonctionnement du système d'électro statisme (<http://www.martignani.com/fr/dispositif-electrostatique-martignani>)

Utiliser ces buses en haut de l'arbre permettrait de réduire la dérive, car le nuage de petites gouttes en haut de l'arbre amène la plus grosse dérive, les grosses gouttes étant moins sensibles.

Les pulvérisateurs jet porté à pulvérisation axiale et tangentielle représentent 92% des traitements en verger en France (GIP Pulvén, 2017), car ils permettent de traiter à haut volume. Cependant quelques contraintes freinent leurs utilisations. Ils se limitent à 400l/ha et plus avec une tranche de vitesse classique comprise entre 5 et 7 km/h. Il est malgré tout possible de les utiliser à plus bas litrage hectare en augmentant la vitesse mais ces pratiques sont peu utilisées. Ils entraînent également une couverture hétérogène dans la partie haute de la canopée. Un mouvement trop conséquent des feuilles les plus proches du ventilateur peut entraîner une dérive à travers le végétal (Marucco *et al.*, 2008). De plus, plus les vitesses de ventilation sont élevées, plus le risque de dérive est élevé.

4.2.3 Pulvérisation pneumatique

L'opti-ajust, vendu à 23000€HT est également reconnu comme limitant la dérive.

Au cours des essais, l'opti-ajust a montré un réel intérêt. Il présente une bonne répartition de la pulvérisation au sein de l'arbre. Il semblerait être le plus adapté au verger grâce à la capacité de la colonne d'air produite de transporter les gouttes. D'après des études internes à la société productrice Chabas, ce pulvérisateur afficherait une réduction d'au moins 66% de la dérive par rapport à la pulvérisation de référence. Ce résultat est loin des différents résultats obtenus cette année avec ce pulvérisateur, malgré le fait qu'il réduise quand même la dérive mais avec un pourcentage nettement plus faible. En effet, la méthode d'estimation de la dérive est différente. Ce pourcentage est basé sur l'utilisation de boîte de pétri pour récupérer les dépôts au sol par sédimentation (Norme ISO NF 22866 mesure de la dérive au champ, alors qu'à La Morinière, la méthode est basée sur l'utilisation de collecteurs. Cette dernière méthode permettant d'estimer la dérive est médiocre. En effet elle est dépendante de l'estimation du LWA : sur différentes dates de manipulation, ce facteur d'estimation est moyennement fiable par les mesures manuelles.

Ce résultat mis en avant par la société est donc à regarder avec du recul. Il affiche malgré tout de nombreux avantages par rapport aux autres pulvérisateurs. En effet, la pulvérisation est davantage localisée, la rampe est réglable en hauteur et les nuisances sonores sont réduites. Sa capacité à travailler à faible volume hectare (250l/ha) permettrait d'économiser les produits phytosanitaires. La possibilité d'adapter l'application durant les différents stades végétatifs, en évitant la dérive par les sorties orientables pouvant fonctionner indépendamment, ainsi que la bonne captation du produit par les arbres au cours des traitements, font de lui un pulvérisateur de qualité qui tend à prendre de l'ampleur sur le marché national.

Afin de palier le faible poids des gouttes favorisant la dérive, l'opti-ajust peut être équipé d'une option d'électro-statisme (Figure 43). Cette option, proche de 2000€ permet de charger électro négativement les gouttes pour qu'elles soient attirées par le végétal naturellement électropositif. Cette dernière permettrait de contrôler en partie la dérive en augmentant son efficience et l'efficacité biologique (Kacprzyk

et Lewandowski, 2011). Tester l'efficacité de cette option s'avère difficile sachant que les collecteurs ne sont pas électropositifs.

Il serait intéressant également de poursuivre ces recherches en étudiant différent volume hectare. En effet le volume choisi par l'arboriculteur va impacter les quantités de dépôts. Pour différents volumes hectares, le volume atteignant le végétal varie. Une étude menée en 2002 a montré qu'avec deux volumes (500 et 1000l/ha), le volume atteignant le végétal passait de 80 à 65% (Balsari *et al.*, 2002). Adapter le volume hectare selon la densité de la canopée est une autre adaptation possible. En début de saison, un volume de 300l/ha permettrait d'obtenir un dépôt de meilleure qualité, alors qu'en milieu et en fin de saison, un volume plus conséquent allant de 500 à 1000l/ha serait plus adéquate.

4.3. ADAPTATION DES DOSES

En arboriculture, l'adaptation des doses selon des indicateurs est novatrice. Cet essai se déroule sur la même parcelle durant la totalité du projet (5 ans).

Ces adaptations ont été faites avec un pulvérisateur jet porté, utilisé dans des conditions de référence telles que définies au comité de pilotage Pulvarbo (buses ouvertes, prise de force de 540 tours/minutes et une vitesse d'avancement de 5-6km/h). Ce pulvérisateur, Berthoud, a été choisi car il représente la grande majorité du matériel de pulvérisation en arboriculture. Son utilisation en tant que référence au sein de l'essai est donc plus représentatif des arboriculteurs nationaux, et permettrait une adaptation rapide chez les producteurs. Cependant, les traitements réalisés avec le Berthoud ne permettent pas de garantir une homogénéité des dépôts au sein de l'arbre. En effet, toutes ses buses sont ATR et ne sont pas ajustées proportionnellement à la hauteur des arbres. Il serait préférable d'utiliser un pulvérisateur avec des buses adéquates, ayant suivi les différents réglages vus au cours de ce rapport.

Au cours de la totalité de l'essai, les notations sur pousses ou sur fruits ont donné de très faibles taux d'attaques, ne fournissant pas de résultats exploitables. La modalité LWA semble malgré tout moins touchée que la modalité TRV et la BBCH même si les différences ne sont pas significatives. Cela semble réfuter les conclusions avancées auparavant, comme quoi la modalité TRV permettrait une meilleure adaptation avec une aussi bonne efficacité biologique. Il paraît facile de penser que plus la dose augmente et/ou respecte les doses préconisées, moins la modalité serait touchée. Cependant, la faible surface du témoin non traité ne permet pas de comparer équitablement les pourcentages d'attaques avec les autres modalités. Cet essai va être reconduit dans les années à venir afin de vérifier l'état sanitaire de la parcelle et le maintien ou non des tendances ou différences entre modalités. Le taux de fruit touché augmente entre les trois notations pour toutes les modalités (non présenté ici). Cela s'explique par l'arrêt de l'utilisation d'insecticides afin d'éviter les résidus sur fruits. Des insecticides bio ont été utilisés afin de pallier ce problème potentiel. La faible taille du TNT ainsi que la faible pression parasitaire et phytosanitaires expliquent l'absence de nombreux dégâts.

Tableau X : Impacts des indicateurs sur l'IFT et les coûts

	% de baisse d'IFT	% de baisse de coût
LWA	15,3	15,4
TRV	13,4	13,4
BBCH	8,2	12,6

Cette adaptation des doses selon les indicateurs a permis de réduire les IFT et donc les coûts à l'hectare. Sur la saison, les trois quarts des traitements ont été des fongicides, les risques d'infections par les maladies fongiques telles que la tavelure sont liés aux précipitations printanières et sont donc très fréquentes. En effet, la tavelure peut se développer durant toute la saison et représente donc la maladie la plus traitée dans cet essai et au niveau national, alors qu'un ravageur comme le carpocapse va être traité uniquement lors des pics de vol. Les contaminations pluvieuses étant plus nombreux que les pics de génération expliquent la plus forte utilisation de fongicide. De plus, au cours de la floraison, les insecticides ne sont pas utilisés afin de ne pas impacter les polliniseurs et donc la production. L'utilisation de ces derniers se fait principalement en fin de saison (mi-mai jusqu'à la récolte) car cette période est la plus sensible à l'attaque de ravageurs, peu retrouvé dans cet essai.

Les principales économies se sont faites en début de saison sans que l'efficacité biologique ne soit impactée. Il est important de ne pas négliger que l'essai se déroule sur une jeune parcelle et donc avec une forte porosité. En effet, une demi-dose appliquée sur jeune verger correspond à une pleine dose sur arbres âgés, cette pratique étant couramment effectuée par les arboriculteurs. Une diminution sur jeunes arbres semble donc facilement envisageable. Avec un pourcentage de développement et donc de végétation faible en jeune verger, d'autres pratiques sont réalisables comme des traitements un rang sur deux ; de traiter à demi dose en gardant la même concentration ou de fermer les buses du haut. En effet, en ouvrant et en fermant les buses, la pulvérisation peut être facilement adaptée à différentes tailles d'arbres. En moyenne, la dose peut être réduite de 100 à 50% en raison de la taille de l'arbre, de la densité et de la phase de croissance que ce soit avant ou après la floraison (Bjusgstad, 2014).

La modalité LWA présente la meilleure adaptation devant le TRV et le BBCH. En effet, cette adaptation s'est terminée plus tard que les autres. La modalité TRV fait face à un biais établi dès le début de l'essai. En effet, le TRV max établi ne correspond pas totalement au verger de La Morinière, celui-ci de 15000m³ est atteint très rapidement expliquant l'arrêt précoce de cette modalité. En 2014, une adaptation par l'indicateur TRV a permis de réduire de 23% le coût des intrants phytosanitaires en comparaison à la pratique producteur actuelle, ce qui montre l'intérêt pour cet indicateur (Verpont, 2014).

La méthode choisie par l'ECPA, d'adapter les doses selon l'indicateur LWA, serait le bon choix car celui-ci permet les meilleures économies (Tableau IX). En outre, peu importe l'indicateur choisi, ils représentent tous une avancée dans la réduction de l'usage des intrants phytosanitaires. Les résultats obtenus permettent seulement de visualiser des tendances, seule la notation des fruits à la récolte ainsi que les notations après leur conservation permettraient de donner des résultats finaux, absents dans ce rapport.

Il serait intéressant de poursuivre les coûts par l'indicateur économique calculant le bénéfice/ha de chaque modalité afin de compléter le coût de protection à l'hectare, la valeur commerciale des fruits récoltés, de tester différents volumes hectares, et d'adapter les volumes pour les combiner si cela s'avère efficace avec l'adaptation des doses.



L'adaptation des doses est un moyen pouvant être envisagé dans les situations à moindre risque en termes de pression de maladies ou de ravageurs. Celle-ci doit être effectuée de manière intelligente. Adapter les doses durant le plus gros pic de tavelure de l'année ne s'avèrerait pas aussi efficace qu'un traitement pleine dose. En outre, adapter les produits tels que les unisites, inhibiteurs de la biosynthèse des stérols (IBS) et de la succinate déshydrogénase (SDHI) pourrait se révéler dangereux à la vue du risque des résistances.

Cette adaptation est une étape indispensable à la réflexion du verger de demain. Privilégier des variétés tolérantes ou peu sensibles aux maladies ainsi que de favoriser les insectes utiles en verger est un levier important en faveur de la réduction des traitements.



PARTIE V : CONCLUSION & PERSPECTIVES

5.1 CONCLUSION

La pulvérisation existe depuis des décennies, mais l'importance de cette technique n'est apparue en Europe qu'au moment de la prise de conscience (fin des années 80), de l'impact de l'agriculture sur l'environnement et la santé humaine. Des essais sont actuellement menés partout en Europe afin d'harmoniser l'homologation et la réglementation des produits dans tous les pays. L'adaptation des doses dans l'essai suivi a permis de démontrer le rôle important des estimations des indicateurs par le biais de méthodes manuelles ou électroniques. Ces estimations sont un maillon essentiel de la chaîne ; en effet le moindre facteur biaisé va impacter l'adaptation des doses. L'adaptation selon le LWA ou le TRV permettra sans doute un compromis entre réduction d'IFT et contrôle des bioagresseurs. Cette adaptation en fonction de la surface foliaire paraît indispensable sur le plan agronomique afin d'assurer une bonne protection en évitant le sous et le surdosage, et représente déjà une avancée dans la réduction des produits phytosanitaires. Plusieurs outils ont déjà été utilisés par les producteurs en Europe et même règlementés en Angleterre et en Suisse. Cependant ils font preuve d'une forte complexité. Il est primordial de prendre du recul sur quelques années avant de proposer un outil optimisé. La réduction des intrants engendrée par ces outils peut varier de 20 à 50%. Cette réduction amène des gains économiques non négligeable à l'échelle d'une exploitation.

Les tests préliminaires et le réglage des pulvérisateurs sont également indispensables car ils permettent de bien connaître le pulvérisateur en question et de le modifier lorsque des problèmes sont rencontrés. Ils ont pour objectifs d'optimiser l'utilisation des ressources et de réduire les impacts environnementaux. C'est pourquoi il est conseillé d'effectuer des contrôles régulièrement, malheureusement les producteurs ne prennent pas de temps pour cela et y attachent peu d'importance. Ces réglages, à adapter au cours de la saison selon le stade végétatif de la culture, permettent d'obtenir une pulvérisation de qualité garantissant une bonne efficacité biologique et un respect de l'environnement en limitant la dérive au maximum. Chaque réglage du pulvérisateur est fondamental. Les buses, représentant une partie infime du prix (de 4 à 11€ pour respectivement les buses ATR et TVI), sont des éléments clés pour une bonne qualité de pulvérisation. Ces deux types de buses, provoquant des petites et grosses gouttes ont tous les deux des points positifs et négatifs. Les gouttes de faible poids sont intéressantes car elles permettent de recouvrir un maximum la cible et de bien pénétrer la végétation. Lorsque les conditions météorologiques (particulièrement le vent) sont bonnes ou que la vitesse de ventilation est suffisante, combiner ces buses, les ATR en bas de rampe et les TVI en haut de la rampe, reste cependant la meilleure utilisation dans les essais en question. Malgré le fait que le pulvérisateur jet porté à pulvérisation axiale s'avère efficace, l'utilisation de pulvérisateur pneumatique l'est encore plus. Combiner ces deux au cours de la saison

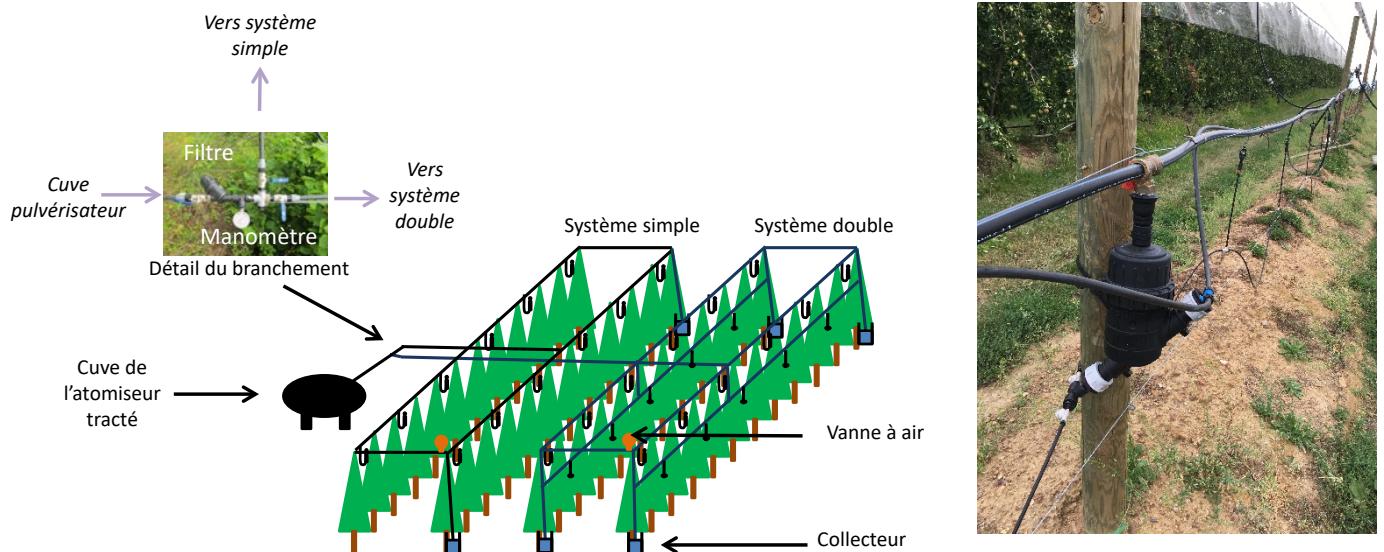


Figure 44 : Schéma et photo du dispositif de pulvérisation sur frondaison (Agnello et Landers, 2017)



Figure 45 : Endothérapie végétale sur palmier (<https://www.tirogaverd.com/fr/pack-endotherapie-sos-palm.html>)



Figure 46 : Bâche anti-pluie (Lothion, 2017)

s'avèrera une solution adéquate pour limiter la dérive lorsque cela est possible à la vue du prix élevé des pulvérisateurs.

De nombreuses pratiques permettent également d'adapter les doses et donc de réaliser des économies, celles-ci étant dépendantes de la structure de l'arbre et du stade de développement. L'interaction entre la dose, l'arbre, l'équipement et l'opérateur lui-même sont des facteurs clés afin d'assurer une application appropriée d'étalonnage et de pulvérisation.

Le monde agricole espère une grosse marge de progrès des techniques de réduction des doses tout en conservant une bonne efficacité biologique. Malgré tout, on peut se demander si un arboriculteur est prêt à consacrer un prix plus conséquent pour un pulvérisateur « intelligent ». Avec des restrictions de plus en plus strictes, que ce soit à l'échelle mondiale, européenne ou nationale, visant d'ici quelques années à interdire certains pulvérisateurs engendrant un renouvellement de matériel agricole spécialisé, des aides seront indispensables afin d'aider chaque producteur à respecter les lois en vigueur.

5.2 PERSPECTIVES

Suite aux problèmes rencontrés par l'utilisation de pulvérisateurs lors de traitement en arboriculture, de nouvelles techniques alternatives à l'utilisation classique et/ou performantes en termes de précision sont à l'étude. C'est le cas de l'aspersion sur frondaison (Figure 44). Ce système permettrait d'appliquer les produits rapidement au moment le plus judicieux, de réduire la compaction des sols, le temps d'application, les nuisances sonores vis-à-vis des riverains ainsi que la main d'œuvre. En effet, ce système se passe totalement de pulvérisateurs. Le projet Pulvifix a été mis en place en 2014 dans le but de créer un système de pulvérisation fixe sur frondaison, qui serait transposable dans un verger, tout en étant abordable, simple d'entretien, en réduisant la dérive et avec une bonne qualité de pulvérisation tout en gardant une bonne efficacité biologique.

D'autres techniques peuvent être envisagées, comme l'endothérapie végétale (Figure 45) ou l'utilisation de bâches anti pluie (Figure 46). La première consiste à traiter les arbres afin de lutter contre des bioagresseurs ou pour corriger des déficiences nutritionnelles en injectant dans le tronc des intrants phytosanitaires, des fertilisants ou des éliciteurs (Acimovic *et al.*, 2013). Elle permet une persistance prolongée d'action du traitement, une réduction des doses ainsi qu'une possibilité de traiter les arbres de grande taille ou en zones urbaines étant peu accessibles aux techniques courantes de pulvérisation. La seconde a pour but de protéger les pommiers contre la tavelure et de réduire les intrants. Toutefois, lorsque l'on diminue un traitement contre un ravageur ou une maladie, d'autres sont favorisés. D'autres problèmes sont rencontrés, comme une baisse de calibre et de colorations des fruits, et des modifications des pousses selon le type de bâche et la variété de pommier. La bâche anti-pluie est un moyen permettant de réduire l'usage des traitements phytosanitaires, mais il reste beaucoup de travail.



BIBLIOGRAPHIE

Articles scientifiques et revues

Acimovic S.G, Zeng Q, McGhee G.C, Sunding G.W., (2013). Control of the blight (*Erwinia amylovora*) with the trunk injection of the maximum seasonally allowed of SAR inducers and antibiotics in apple trees. *Phytopathology*, vol 103, n°2, p.3.

Agnello A., Landers A., (2017). In-canopy fixed spraying system for high-density apple orchards. Department of Entomology. New york state agricultural experiment station Geneva, 34 p.

Agreste (2016). Pays de la Loire : un contexte favorable à la production de pommes de table et aux bioagresseurs. 6 p.

ATV 49 (2015). Fiche technique viticole : Pulvérisation. Association technique viticole. 11 p.

Bahrouni H., (2010). Caractérisation de l'efficacité technique des systèmes de pulvérisation et des pertes de pesticides appliqués aux cultures basses dans les régions méditerranéennes : cas de la Tunisie. Doctorat en Génie des procédés, SupAgro, Montpellier, 139 p.

Balsari P, Marucco P, Oggero G., (2002). Spray application in Italian apple orchard: target coverage, ground losses and drift. American Society of Agricultural and Biological Engineers.

Berrah A., (2011). Etude sur les pesticides. Master 2 en toxicologie appliquée, Université de Tébessa, Algérie, pp 100-102

Bjugstad N., (2014). Adapted dose of pesticides in vegetables and orchards by simple means. In : Proceedings International Conference of Agricultural Engineering, Zurich, 06-10.07.2014, 8 p.

Bourgoin B., (2014). Raisonner la dose par hectare : un enjeu à la taille du volume de végétation. *L'Arboriculture fruitière*, 683 : 28-29.

Celen I.H., Ann S., Durgut M.R., (2008). The Effect of the Air Blast Sprayer Speed on the Chemical Distribution in Vineyard. *Pakistant Journal of Biological Sciences*, 11 : 1472-1476.

Cornille A., Gladieux P., Smulders M.J., Roldán-Ruiz I., Laurens F., Le Cam B., Nersesyan A., Clavel J., Olonova M., Feugey L., Gabrielyan I., Zhang XG., Tenaillon MI., Giraud T., (2012). New Insight into the History of Domesticated Apple: Secondary Contribution of the European Wild Apple to the Genome of Cultivated Varieties. *Plogenetic*, 8 : 5-13.

Cross J.V., Walklate, P. J., (2008). The UK PACE scheme for adjusting the dose to suit apple crops. Agricultural Engineering International : CIGR Journal, 10 p.

LOTHION Richard | La pulvérisation, un levier pour réduire l'utilisation des produits phytosanitaires en arboriculture



Giraud H., Cornille A., Giraud T., (2014). Les pérégrinations du pommier domestique. *Pour la Science*, 439 : 36-41.

Giraud M, Orts R., (2006). Protection intégrée pommier-poirier. Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes, 336 p.

Heinzle Y., (2007). Pulvérisation en viticulture durable ; pulvérisateurs : choix du matériel et réglages. Institut français de la Vigne, Itinéraire n°16, 15 p.

Hudebine Y., (2017). Colloque projet Pulvarbo, IRSTEA

Jamar L., Mostade O., Huyghebaert B., Pigeon O., Lateur M., (2010). Comparative performance of recycling tunnel and conventional sprayers using standard and drift-mitigating nozzles in dwarf apple orchards. *Crop protection*, Elsevier, 29 : 561-566.

Kacprzyk R., Lewandowski M. (2011). Post-dispersion electrification of droplets in a system with pneumatic atomization. *Journal of Physics : Conference Series*. 301 : 1-4 .

Marucco P., Tamagnone M., Balsari P., (2008). Study of Air Velocity Adjustment to Maximise Spray Deposition in Peach Orchards. Agricultural Engineering International, the CIGR Journal. 13 p.

Masseron A., Roche L., Barrau J., (2002). Pommier, le mur fruitier. Centre Technique interprofessionnel des fruits et légumes, pp 24-32 et 58-61.

Mathieu V, Lavoisier C., Ferré G., (2011). L'éclaircissement du pommier. Centre Technique interprofessionnel des fruits et légumes, pp 18-20.

Osaer A., Grataud J., Cammal P., Cavalier R., Hennion B., Gleizer B., Orts R., (2004). Matériel au verger : guide. Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes, Paris, 286 p.

Toews R.B., Friessleben R., (2012). Dose Rate Expression – Need for Harmonization and Consequences of the Leaf Wall Area Approach. *Aspects of applied biology*, 114 : 335-340.

Trillot M., Masseron A., Mathieu V., Bergougnoux F., Hutin C., Lespinasse Y., (2002). Pommier. Centre Technique interprofessionnel des fruits et légumes, pp 199-203.

Triloff P., Lind K., Knoll M., Kliesinger S., (2012). Low loss spray application : the scientific basis. 4th European Workshop on standardized procedures for the inspection of sprayers, Lana (South Tyrol), 8 p.

LOTHION Richard | La pulvérisation, un levier pour réduire l'utilisation des produits phytosanitaires en arboriculture

Triloff P., Bodenseeobst M., (2014). A concept for more efficiency and safety in top fruit crop protection. Interpoma, Bozen. 29p

Verpong F., (2014). Expression des doses et outils d'optimisation : état des lieux au niveau européen. Rencontres phytosanitaires Fruits à pépins, Ctifl, 22 p.

Verpong F., (2014). Optimisation de la pulvérisation en arboriculture fruitière. Projet Pulvarbo, 15p.

Verpong F., (2017). Réunion Pulvarbo. Ctifl, centre de Lanxade à Prigonrieux.

Viret O., Siegfried W., Bloesch B., Taillens J. & Mittaz C., 2007. Dosage des fongicides adaptés à la surface foliaire : résultats en 2006. Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic. 39 (1), 65–68.

Viret O., Dubuis P.H., Bloesch B., Fabre A.L., Dupuis D., (2010). Dosage des fongicides adapté à la surface foliaire en viticulture : efficacité de la lutte. Revue Suisse *Viticulture, Arboriculture, Horticulture*, 42 : 226-233.

Walklate, P.J, Cross, J.V, Harris, A.L, Richardson, G.M., 2008. Results of the UK PACE project on orchard spraying. Aspects Appl. Biol. 84 : 403-410

Sites internet

AFIDOL (2017). Appliquer une barrière minérale contre la moche de l’olive, essais sur les buses à turbulence. Disponible sur http://afidol.org/wp-content/uploads/2016/04/Appliquer_une_barriere_minerale_essais_buses.pdf (Consulté le 4 août 2017).

Cadden (2017). Disponible sur <https://www.cadden.fr/> (Consulté le 16 avril 2017).

Consoglob (2017). Production de pomme en France. Disponible sur <http://www.planetoscope.com/fruits-legumes/391-production-de-pommes-en-france.html> (Consulté le 12 avril 2017).

Dobson H.M. (2001). Directives sur le Criquet pèlerin. Disponible sur <http://www.fao.org/docrep/007/y1800f/d/y1800fd07.htm> (Consulté le 17 avril 2017).

Ecophyto (2015). Contexte du plan ECOPHYTO II. Disponible sur http://agriculture.gouv.fr/sites/mnagri/files/151022_ecophyto.pdf (Consulté le 8 août 2017).

GIP Pulvé (2017). Le contrôle des pulvérisateurs. Disponible sur <http://www.gippulves.fr/> (Consulté le 22 juin 2017).

JMC technologie (2017). Buses de pulvérisation. Disponible sur <https://www.jcm-technologie.com/51-buses> (Consulté le 4 août 2017).

La pomme (2017). Association nationale Pommes Poires. Disponible sur <http://www.lapomme.org> (Consulté le 13 avril 2017).

Mallet C., (2010). LIDAR aéroportés topographiques & bathymétriques. Disponible sur https://www.umr-cnrm.fr/ecoile_lidar/IMG/pdf/Mallet-Topo_Bathy_Veget.pdf (Consulté le 2 août 2017).

National Oceanic and Atmospheric Administration (2017). What is Lidar ? Disponible sur <http://ocean-service.noaa.gov/facts/lidar.html> (Consulté le 12 avril 2017).

PACE (2017). Pesticide dose rate Adjustment to the Crop Environment. Disponible sur <http://www.pjwrc.co.uk/> (Consulté le 17 avril 2017).

Rubio L., (2014). Quels progrès pour l’efficacité des traitements ? Disponible sur <http://www.arboriculture-fruitiere.com/content/quels-progres-pour-lefficacite-des-traitements> (Consulté le 8 août 2017).

Syngenta (2017). Quali’Drop, un outil qui facilite le réglage des pulvérisateurs. Disponible sur <https://www.syngenta.fr/agriculture-durable/bonnes-pratiques-agricoles/article/qualidrop-facilite-le-reglage-des-pulverisateurs> (Consulté le 18 mai 2017).

Annexes

Annexe I : Principaux stades phénologiques du pommier



Source : Bayer

Annexe II : Ravageurs et maladies rencontrés au verger de La Morinière (2017)

Tavelure



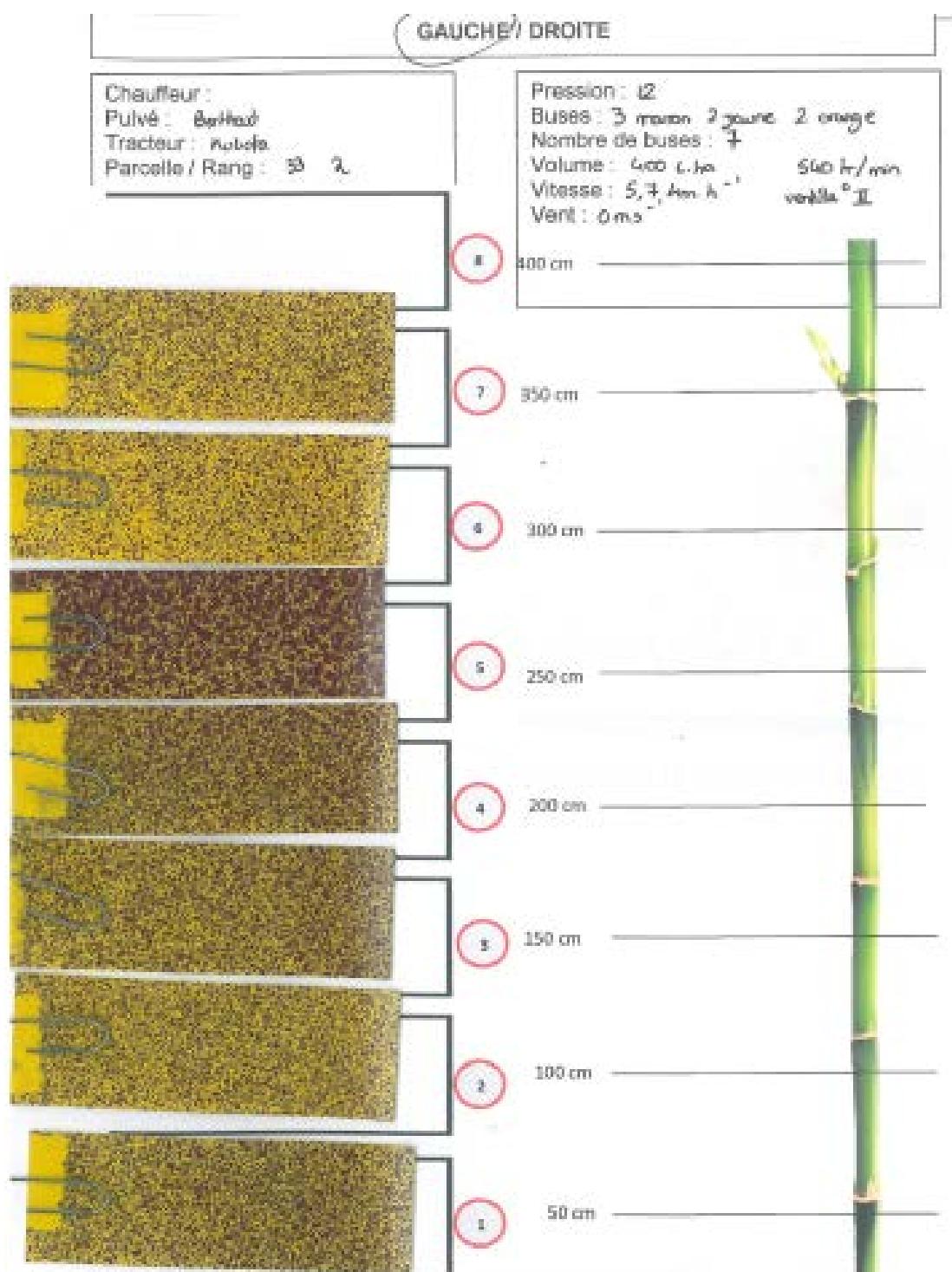
La maladie fongique la plus importante sur pommier est la tavelure qui représente une menace permanente. Celle-ci est causée par le pathogène ascomycète *Venturia inaequalis*, provoquant des symptômes sur feuilles, fleurs, pédoncule, limbe et sur fruits. Afin de lutter contre cet agent pathogène, la lutte peut se faire via des mesures prophylactiques ou de la lutte chimique. La lutte a pour but d'éviter toute infection primaire depuis le stade sensible C3 (Annexe I) jusqu'à la projection d'ascospores (fin mai-juin). A cette date, si le verger est indemne, la protection s'arrête ; autrement les traitements se poursuivent jusqu'à la récolte. Réduire le risque permet de limiter les conséquences d'un échec de protection au printemps, d'alléger la protection phytosanitaire et de réduire la quantité d'ascospores exposées aux fongicides et donc contribuer à retarder l'apparition de résistance. Les mesures prophylactiques consistent à broyer des feuilles mortes du sol, ou de bloquer la formation des pseudothèces ou ascospores en apportant des antagonistes microbiens ou de l'urée. Ce broyage favorise la décomposition de la matière organique et donc celle du champignon. Les pseudothèces se formant initialement en début d'année, vont être rapidement dégradés par l'action des micro-organismes du sol et donc empêcher leur maturation en impactant l'inoculum primaire. Concernant la lutte chimique, elle se fait selon plusieurs spécialités (de contacts, à base d'ANP, de triazoles ou de strobilurines) (Giraud et Orts, 2006).

Oïdium



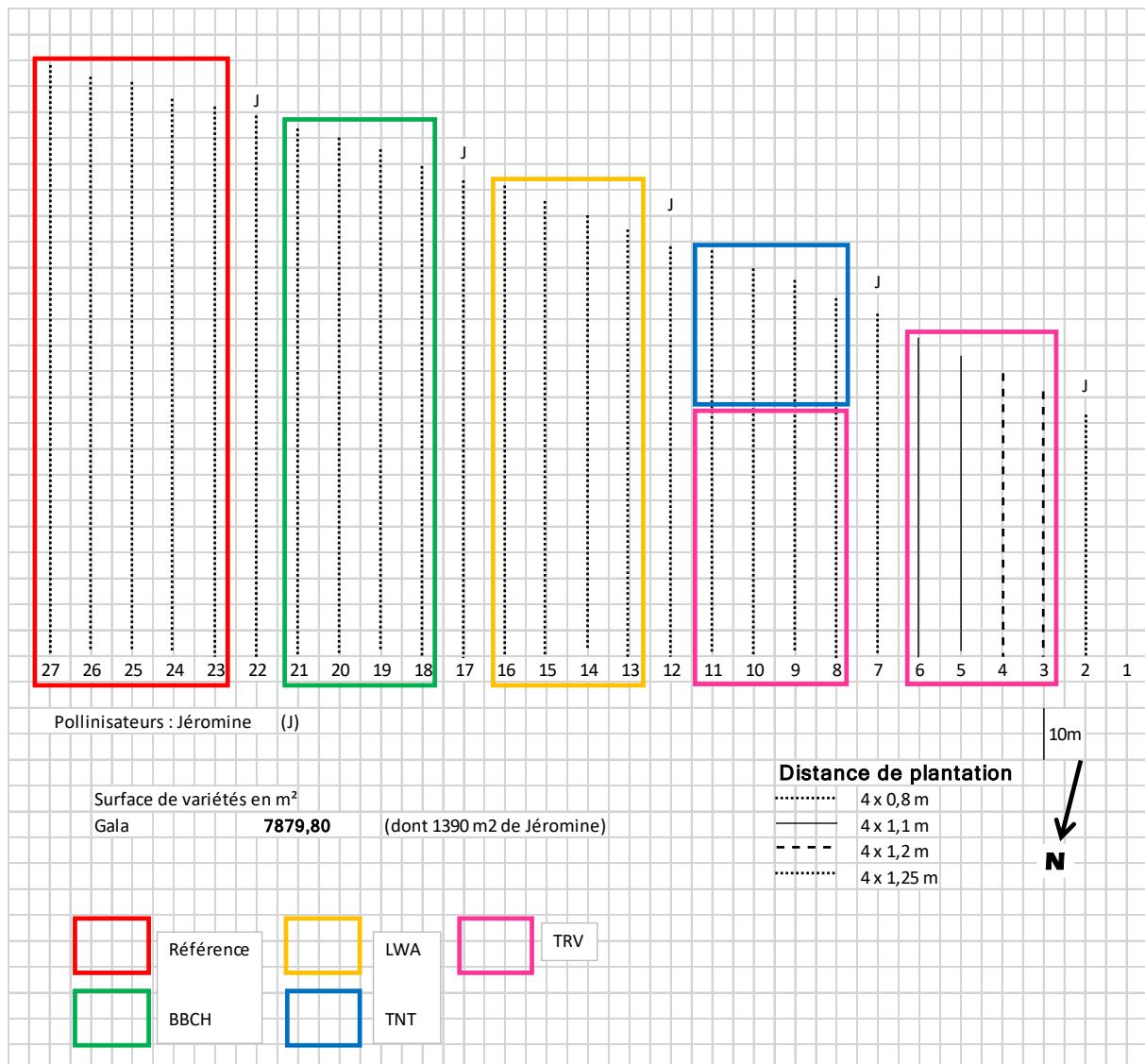
Cette maladie, provoquée par *Podosphaera leucotricha* est assez grave et fréquente chez le pommier. Il s'agit d'un parasite biotrophe obligatoire, de la classe des Ascomycètes. Celui-ci hiverne sous forme de spores et de fragments mycéliens dans les bourgeons. Ces formes hivernantes entrent en activité dès l'éclatement des bourgeons correspondant à la contamination primaire. Une fois les conidioides formées suite à leur production par les attaques primaires, elles sont dispersées par le vent, correspondant à la contamination secondaire. Les symptômes peuvent toucher les fruits, feuilles ; inflorescences, pousses et rameaux en provoquant un feutrage mycélien gris blanchâtre. La présence d'oïdium perturbe la photosynthèse et peut entraîner une baisse importante de rendement. La qualité des fruits peut aussi être affectée. De nouveau la stratégie de lutte se fait via des mesures prophylactiques en éliminant les pousses oïdiées lors de la taille d'hiver et l'éclaircissement. La lutte anti oïdium se gère conjointement à la lutte contre la tavelure, par des IBS (inhibiteur de la biosynthèse des stérols) ou du soufre (Giraud et Orts, 2006).

Annexe III : Test aux papiers hydrosensibles pour le pulvérisateur Berthoud



Légende : papier sensible de couleur jaune qui vire au bleu au contact à l'eau (La Morinière)

Annexe IV : Plan parcellaire Pulvarbo



Source : La Morinière

Annexe V : Calendrier de traitement des produits subissant l'adaptation de doses et leurs caractéristiques

Nom	Famille	Entreprise Marque déposée	Matière active	Dose homologuée	Cible(s)
Brocellian	Strobilurines	Bayer CropScience	Captane + Trifloxystrobine	1,87 kg/ha	Oïdium, Tavelure
Chorus	Anilino-pyrimidines	Syngenta	Cyprodinil	2,5 l/ha	Tavelure
Cûvrol		Caarhmo		4,2 kg/ha	Tavelure
Delan Pro	Quinone	BASF	Dithianon	2,5 l/ha	Suie, Crottes de mouche, Tavelure
Flint	Oximinoacétates	Bayer CropScience	Trifloxystrobine	0,15kg/ha	Oïdium, Tavelure
Greman	Triazoles	Phyteurop	Tetraconazole	0,25 l/ha	Oïdium
Gringo	Anilino-pyrimidines	Bayer CropScience	Dithianon	1,2 l/ha	Tavelure
Luna Experience	Pyramides	Bayer CropScience	Fluopyram	0,75 l/ha	Tavelure, Oïdium, Conservation
Merpan	Phtalimide	ADAMA	Captane	1,9 kg/hl	Botrytis de l'œil, Feuillage, Tavelure
Ordoval	Dithiocarbamate	COMPO Expert	Thiram	2,5 kg/ha	Suie, Crottes de mouche, Tavelure
Sercadis	Pyrazole-carboxamides	Bayer CropScience	Fluxapyroxad	0,3 l/ha	Tavelure, Oïdium, Stress
Sigma	Phtalimide	Aysta LifeSciences	Captane	0,18 kg/l	Botrytis de l'œil, Feuillage, Tavelure
Syllit	Guanidine	Agriphar	Dodine	0,169 l/ha	Tavelure
Vivacuivre		Vivagro		0,4kg/l	Tavelure
Affirm	Avermectines	Syngenta	Emanectine	2kg/ha	Carpocapse
Coragen	Anthranilic diamide	DuPont	Chlorantraniliprole	0,0175 /l	Carpocapse, Mineuses, Tordeuses
Delfin	Insecticide biologique	Certis Europe	Bacillus thuringiensis var. kurstaki	0,08 kg/l	Carpocapse, Tordeuses, Zeuzère
Supreme	Chloronicotinile	Certis Europe	Acétamiprid	0,025 kg/l	Carpocapse, Charançon, Mineuses, Pucerons
Teppki	Pyridinecarboxamide	Belchim Crop Protection	Flonicamide	0,014 kg/l	

Légende : les cellules noires correspondent à des produits utilisés comme fongicides mais ils ne sont pas vendus en tant que tel.

Date	Produit	Dose commerciale (kg ou L/ha)	Ref	LWA	TRV	IFT Ref	IFT LWA	IFT TRV	IFT BBCH
20-mars	Gringo	1,2	0,37	13450	6940	1,00	0,79	0,69	0,70
24-mars	Syllit	1,69	0,52			1,00	0,79	0,69	0,70
28-mars	Teppeki	0,14	0,04			1,00	0,79	0,69	0,70
29-mars	Delan pro	2,5	0,77			1,00	0,79	0,69	0,70
10-avr	Gremen	0,25	0,08			1,00	0,79	0,69	0,70
14-avr	Luna experience	0,75	0,23	13790	8715	1,00	0,81	0,87	0,70
24-avr	Suprême	0,25	0,14			1,00	0,81	0,87	1,00
	Ordoval	2,5	1,4			1,00	0,81	0,87	1,00
	Sercadis	0,25	0,14			1,00	0,81	0,87	1,00
28-avr	Chorus	0,45	0,25			1,00	0,81	0,87	1,00
	Ordoval	2,5	1,4			1,00	0,81	0,87	1,00
02-mai	Syllit	1,69	0,95			1,00	0,81	0,87	1,00
05-mai	Brocelian	1,87	1,05			1,00	0,81	0,87	1,00
09-mai	Sigma	1,8	1,01			1,00	0,81	0,87	1,00
17-mai	Merpan	1,87	1,05			1,00	0,81	0,87	1,00
	Chorus	0,45	0,25			1,00	0,81	0,87	1,00
02-juin	Delan	0,5	0,35	15610	10653	1,00	0,92	1,00	1,00
07-juin	Coragen	0,75	0,52			1,00	0,92	1,00	1,00
26-juin	Cuivrol	0,9	0,63			1,00	0,92	1,00	1,00
07-juil	Vivacuivre	0,9	0,63	16255	11727	1,00	1,00	1,00	1,00
	Delfin	0,75	0,52			1,00	1,00	1,00	1,00
02-août	Affirm	2				1,00	1,00	1,00	1,00
						22,00	18,63	19,06	20,20

Fin BBCH

Fin TRV

Fin LWA

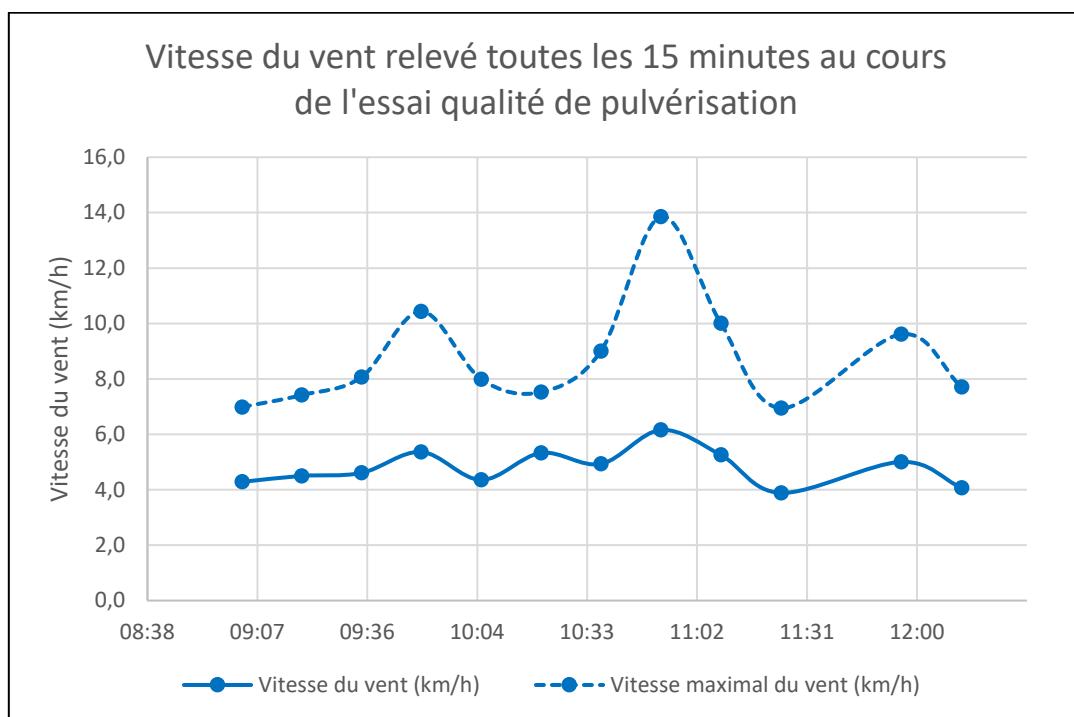
Légende : les nuances de jaune correspondent au début-milieu-fin de saison ; les cellules bleues correspondent aux fongicides et les cellules orange aux insecticides. Chaque fin d'adaptation est précisée par les cellules surlignés en jaune dans la dernière colonne de droite

Source : E-phy, ACTA phytosanitaire

Annexe VI : Données météorologiques durant l'essai qualité de pulvérisation

Date	Pulvérisateurs	Heure	HR %	Pluviométrie (mm)	T°C air (°C)	Vitesse du vent (km/h)	Vitesse maximal du vent (km/h)
04-juil-17	ATR	09:03	83	0	19,00	4,28	6,98
		09:18	79	0	19,90	4,50	7,42
		09:34	77	0	20,90	4,61	8,06
	TVI	09:50	76	0	21,60	5,36	10,44
		10:05	73	0	22,30	4,36	7,99
		10:21	67	0	22,90	5,33	7,52
	Ref	10:37	65	0	23,50	4,93	9,00
		10:52	65	0	23,80	6,16	13,86
		11:08	63	0	24,10	5,26	10,01
	OA	11:24	66	0	24,40	3,89	6,95
		11:55	60	0	25,10	5,00	9,61
		12:11	60	0	25,20	4,07	7,70

Légende : le dégradé de couleur orange correspond aux heures de passages des pulvérisateurs : 9h10 : S21 équipé de buses ATR sur toute la longueur de la rampe ; 9h50 : S21 équipé de buses TVI sur le haut de la rampe ; 10h15 : pulvérisateur référence (Berthoud) et 11h50 : opti-ajust



Source : La Morinière, station météo Agriscope

Annexe VII : Tests statistiques utilisés pour la qualité de pulvérisation

1. Comparaison référence (Berthoud) à plusieurs dates

Répartition dans les zones de la canopée

Avril		Mai		Juin		Juillet	
Haut (263,4)		Haut (93,8)		Haut (74,3)	b	Haut (82,9)	b
Milieu (294)	NS	Milieu (123,7)	NS	Milieu (138,4)	a	Milieu (123,8)	a
Bas (170,4)		Bas (99,)		Bas (81,4)	b	Bas (83,7)	b

Haut		Milieu		Bas	
Juillet (82,9)	b	Juillet (123,8)	b	Juillet (83,7)	b
Juin (74,3)	b	Juin (138,4)	b	Juin (81,4)	b
Mai (93,8)	b	Mai (123,7)	b	Mai (99,5)	b
Avril (263,4)	a	Avril (294)	a	Avril (170,4)	a

Répartition intérieur/extérieur de la canopée

Avril		Mai		Juin		Juillet	
Intérieur (196,3)		Intérieur (70,8)		Intérieur (99,2)		Intérieur (69,7)	b
Extérieur (250,2)	NS	Extérieur (133,5)	NS	Extérieur (115,2)	NS	Extérieur (120,7)	a

Intérieur		Extérieur	
Avril (196,3)	a	Avril (250,2)	a
Mai (70,8)	b	Mai (133,5)	b
Juin (99,2)	b	Juin (115,2)	b
Juillet (69,7)	b	Juillet (120,7)	b

Quantité totale

Avril (236,7)	a
Mai (109,9)	b
Juin (104,8)	b
Juillet (100,7)	b

2. Comparaison modalités Juin

Répartition dans les zones de la canopée

Référence		S21 ATR		S21 TVI		OA	
Haut (74,3)	b	Haut (20,5)		Haut (77,0)		Haut (106,4)	
Milieu (138,4)	a	Milieu (80,6)	NS	Milieu (127,4)	NS	Milieu (121,4)	
Bas (81,4)	b	Bas (75,9)		Bas (124,3)		Bas (161,8)	NS

Haut		Milieu		Bas	
Référence (74,3)		Référence (138,4)		Référence (81,4)	
S21 ATR (20,5)	NS	S21 ATR (80,6)	NS	S21 ATR (75,9)	NS
S21 TVI (77,0)		S21 TVI (127,4)		S21 TVI (124,3)	
OA (106,4)		OA (121,4)		OA (161,8)	

Répartition intérieur/extérieur de la canopée

Référence		S21 ATR		S21 TVI		OA	
Intérieur (99,2)	NS	Intérieur (31,1)	NS	Intérieur (77,5)	b	Intérieur (106,9)	
Extérieur (115,2)		Extérieur (101,8)		Extérieur (150,1)	a	Extérieur (159,0)	NS

Intérieur		Extérieur	
Référence (99,2)	a	Référence (115,2)	NS
S21 ATR (31,1)	b	S21 ATR (101,8)	
S21 TVI (77,5)	ab	S21 TVI (150,1)	
OA (106,9)	a	OA (159)	

Quantité totale

Référence (104,8)	ab
S21 ATR (70,0)	b
S21 TVI (118,9)	a
OA (136,6)	a

3. Adaptation des doses

Témoin non traité	NS
Référence	
BBCH	
TRV	
LWA	

  	Diplôme / Mention : Master 2 ProTeV Spécialité : Production et Technologie du Végétal (ProTeV) Parcours : Productions Végétales Spécialisés Option : Produits phytosanitaires, réglementation et méthodes alternatives
Auteur(s) : LOTHION Richard	Organisme d'accueil : La Morinière
Date de naissance : 10 septembre 1993	Adresse : La Morinière – 37800 – Saint-Epain
Nb pages : 37	Annexe(s) : 7
Année de soutenance : 2017	Maître de stage : LE BERRE Fanny
Titre français : La pulvérisation, un levier pour réduire l'utilisation des produits phytosanitaires en arboriculture ?	
Titre anglais : Is the spraying a good lever to reduce the use of pesticides in arboriculture?	
<p>Résumé : La prise de conscience des dangers sanitaires et environnementaux des produits phytosanitaires engendre une pression sociétale et politique importante sur le monde agricole. Avec le lancement du plan Ecophyto en 2008, la réduction des intrants phytosanitaires est très suivie et fait face à de nombreuses impasses. L'objectif du projet Pulvarbo est de créer un modèle permettant d'adapter la dose de produits en fonction de la végétation à traiter et des réglages du matériel tout en réduisant la dérive. Les premiers résultats semblent montrer l'intérêt de l'adaptation selon le LWA puisque l'IFT réduit de 15% tout en gardant la même efficacité biologique. L'utilisation de matériel électronique comme le Lidar permet de déterminer au mieux cet indicateur au cours de la saison. Le principal levier pour réduire les intrants est le réglage des pulvérisateurs. La pulvérisation pneumatique est la plus homogène au sein de l'arbre par rapport à la référence, toutes zones confondues avec de bons réglages préalables. Cependant, cette dernière s'avère très efficace lorsque la végétation de l'arbre présente un stade de développement élevé. Les résultats obtenus sont prometteurs pour la suite du projet et la mise en place d'outils d'aides à la décision permettant une arboriculture de précision avec une bonne qualité de pulvérisation.</p>	
<p>Abstract : The awareness of health hazard and environmental threat caused by pesticides generate an important societal and political pressure on the agriculture sector. With the start of the Ecophyto 2008 plan, the reduction of plant protection product is a complex issue from more than one standpoint. The goal of the Pulvarbo project is to create a model allowing to adapt the product dose according to the vegetation to be sprayed and with the adjustment of equipment while reducing the drift. The first results show the interest of the adjustment according to the LWA because the treatment frequency index (TFI) reduces by 15% while keeping the same biological efficiency. The use of an electronic equipment called the Lidar allows to determine at best this index during the season. The main lever to reduce inputs is a fine adjustment of sprayers. With good adjustments, pneumatic spraying is the most homogeneous within the tree compared to the standard, all areas combined. However, the latter turns out to be effective when the tree presents a high vegetation stage of development. Results are promising for the continuation of the project and for the implementation of Decision Support Instrument allowing an arboriculture of precision with a good spraying quality.</p>	
Mots-clés : pulvérisation, réglage, réduction, produit phytosanitaire, dérive, modèle Key Words : spraying, adjustment, reduction, plant protection product, drift , model	

