



HAL
open science

TechnodoseViti: Modélisation expérimentale pour la prédiction des dépôts de produits phytosanitaires au sein du couvert végétal en viticulture. Application à l'expression des doses et à la viticulture de précision

Sébastien Codis, Anice Cheraïet, Xavier Delpuech, Mathilde Carra, Xavier Ribeyrolles, Elodie Trinquier, Adrien Verges, Olivier Naud

► To cite this version:

Sébastien Codis, Anice Cheraïet, Xavier Delpuech, Mathilde Carra, Xavier Ribeyrolles, et al.. TechnodoseViti: Modélisation expérimentale pour la prédiction des dépôts de produits phytosanitaires au sein du couvert végétal en viticulture. Application à l'expression des doses et à la viticulture de précision. Innovations Agronomiques, 2023, 88, pp.31-46. 10.17180/ciag-2023-vol88-art03 . hal-04312690

HAL Id: hal-04312690

<https://hal.inrae.fr/hal-04312690>

Submitted on 28 Nov 2023

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

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



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

TechnodoseViti : Modélisation expérimentale pour la prédiction des dépôts de produits phytosanitaires au sein du couvert végétal en viticulture. Application à l'expression des doses et à la viticulture de précision.

**Codis Sébastien¹, Cheraïet Anice^{1,2}, Delpuech Xavier¹, Carra Mathilde², Ribeyrolles Xavier²,
Trinquier Elodie², Verges Adrien¹, Naud Olivier²**

1 IFV, Institut Français de la Vigne et du Vin, UMT Ecotech, Montpellier, France.

2 ITAP, INRAE, Montpellier SupAgro, Univ Montpellier, UMT Ecotech, Montpellier, France

Correspondance : sebastien.codis@vignevin.com

Résumé

Les travaux conduits dans le cadre du projet Casdar RT TechnoDoseViti (2018-2021) ont permis d'identifier les descripteurs de la végétation nécessaires à prendre en compte pour prédire la distribution statistique des dépôts de produits phytosanitaires pulvérisés au sein du couvert végétal (Cheraïet et al., 2021). Ce travail de modélisation expérimentale (Codis et al., 2018) a permis de construire, calibrer et valider des modèles multivariés permettant de prédire les différents déciles de quantité de dépôts surfaciques dans le couvert végétal en fonction de descripteurs de la végétation (hauteur, épaisseur et porosité du couvert végétal) mesurés à l'aide d'un capteur LiDAR 2D mobile permettant une reconstitution 3D de la végétation (Cheraïet et al., 2019 & 2020). Des modèles ont été développés et calés pour différents types de pulvérisateurs et différents contextes viticoles (vignes larges et vignes étroites). Les données ont été mobilisées pour comparer différents scénarios technologiques consistant en différentes stratégies de mécanisation des viticulteurs et différents niveaux de technologie des appareils afin d'évaluer quelle pourrait être la contribution des techniques d'application de précision en termes de réduction des intrants phytosanitaires. Dans le cadre du projet, un démonstrateur web a été réalisé : <https://technodoseviti.hdigitag.fr/>

Mots-clés : techniques d'application, protection des plantes, modélisation, dose, capteur.

Abstract: Experimental modeling of phytosanitary treatment deposits as a function of plant architecture in viticulture. Applications to dose expression and precision spraying.

Work carried out within the Casdar RT TechnoDoseViti project (2018-2021) identified the crop parameters needed to predict the statistical distribution of sprayed plant protection product deposits inside the vine canopy (Cheraïet et al., 2021). This experimental modeling work (Codis et al., 2018) built, calibrated, and validated multivariate models to predict different deciles of canopy surface deposition amounts based on vegetation descriptors (canopy height, thickness, and porosity) measured with a mobile 2D LiDAR sensor allowing for a 3D vegetation reconstruction (Cheraïet et al., 2019 & 2020). Models were developed and calibrated for different types of sprayers and different vine systems (wide and narrow vineyards). The data were mobilized to compare different technological scenarios consisting of different mechanization strategies of wine growers and different levels of spraying equipment technology in order to assess what could be the contribution of precision application techniques in terms of reduction of phytosanitary inputs. Within the framework of the project, a web demonstrator has been produced: <https://technodoseviti.hdigitag.fr/>

Keywords: application techniques, plant protection, modelling, dose, sensors

Introduction

La demande sociétale en faveur de la réduction de l'utilisation des produits phytopharmaceutiques (PPP) a été traduite ces dernières années par un ensemble de textes réglementaires au niveau national et européen qui définissent des objectifs très ambitieux pour le secteur agricole (directive SUD (2009/128/CE) en cours de révision, stratégie européenne Farm to Fork, plan Ecophyto II+, ...). Ces textes fixent des objectifs de réduction de 50 % des usages à l'échelle d'une décennie et conduisent à reconsidérer l'ensemble des processus de protection des cultures.

Parmi les questions posées, figure le mode d'expression des doses homologuées des produits phytosanitaires en cultures 3D. Aujourd'hui, en cultures pérennes, les doses sont exprimées sous la forme d'une quantité fixe (en Kg/ha ou L/ha) et indépendante des conditions d'application (quantité de végétation à traiter, mode de conduite, etc.). Pourtant, entre les premiers traitements et le stade de pleine végétation, la surface foliaire totale à traiter sur une même parcelle de vigne peut varier de 1 à plus de 10. En parallèle, à un même stade végétatif, en fonction des cépages, des modes de conduite et de la vigueur des parcelles, la surface à traiter peut varier dans un rapport de 1 à plus de 3 (Sinfort, 2012). Ainsi, dans la pratique, l'application de la dose homologuée conduit à des quantités de produits déposés par unité de surface sur le végétal très variables. Cette variabilité est d'autant plus grande quand on considère les différents matériels de pulvérisation utilisés au vignoble pour appliquer les produits. Bien que la dose homologuée par hectare soit une dose maximale, elle est considérée sur le terrain comme la dose d'emploi. En effet, au plan juridique, en cas de recours contre la firme ou le distributeur dans le cas d'un échec de protection, la pleine et entière responsabilité du viticulteur est engagée s'il n'a pas appliqué la pleine dose figurant sur l'étiquette du produit. Pourtant, une dose réduite prenant en compte les caractéristiques de la végétation et son stade de développement serait tout aussi efficace dans de nombreuses situations et contribuerait à limiter les risques d'impacts sur l'environnement (eau, sol, air) ainsi que d'exposition des agriculteurs et des riverains.

Le projet CASDAR RT TechnoDoseViti contribue aux objectifs de réduction de l'utilisation des PPP en viticulture en s'intéressant à l'adaptation des doses selon les caractéristiques de la végétation à traiter et les performances des pulvérisateurs. Porté par l'UMT Ecotech (IFV-INRAE-CTIFL) et la Chambre d'Agriculture de l'Hérault (CA34), le projet TechnoDoseViti portait l'ambition de développer un cadre d'analyse des marges de réduction d'intrants liées à la fois à l'évolution de l'expression des doses et à l'amélioration des techniques d'application. Le projet a adressé les questions opérationnelles suivantes : (i) Comment adapter la dose de PPP au développement et à l'architecture du végétal ? (ii) À quelle échelle spatiale est-il pertinent d'ajuster les doses (exploitation, adaptation inter-parcellaire, intra-parcellaire) et selon quels prérequis technologiques ? (iii) Quelles pourraient être les économies d'intrants phytosanitaires liées à l'évolution du mode d'expression des doses et à l'utilisation de pulvérisateurs performants ? (iv) Que peut-on attendre de la pulvérisation de précision ?

À partir de ces questions opérationnelles et de l'hypothèse que la quantité de produit par surface de feuilles est une variable explicative majeure de l'efficacité de la protection, plusieurs questions scientifiques ont été identifiées et ont guidé les travaux conduits dans le projet :

- Comment caractériser la structure du couvert végétal à traiter ?
- Comment caractériser la distribution statistique des dépôts de pulvérisation interceptés dans la végétation et à quelle échelle spatiale (feuille, cep, portion rang) ?

À supposer que l'on dispose de ces méthodes de caractérisation, la question est ensuite de pouvoir mobiliser les données pour calculer des doses adaptées à une situation donnée. La stratégie choisie repose sur de la modélisation statistique. Le questionnement scientifique associé peut se résumer ainsi : quelles caractéristiques structurelles de la végétation faut-il mobiliser pour définir, à l'aide de modèles de prédiction des dépôts de produits issus de données expérimentales, la dose de produit à appliquer en fonction de la performance de la technologie de pulvérisation utilisée ? Les données collectées et

analysées dans le projet ont pu être interprétées au plan agronomique pour définir des abaques d'ajustement des doses selon différentes hypothèses de risques épidémiologiques et comparer différents scénarios technologiques pour la viticulture de demain.

1. Modéliser la distribution des dépôts de produit phytosanitaire sur le végétal selon différentes méthodes de caractérisation du végétal et les performances du matériel

1.1 Matériel et méthodes : estimation des dépôts de pulvérisation sur le végétal

Les vignes françaises se caractérisent par des modes de conduite spécifiques à chacune des régions viticoles. Au niveau de la pulvérisation, on distingue principalement deux contextes : les « vignes larges » caractérisées par un espacement entre rangs compris entre 1,8 m et 3 m et qui sont traitées avec un pulvérisateur trainé interligne. A contrario, les « vignes étroites » (10 % du vignoble français) disposent de rangs moins espacés, entre 0,9 et 1,4 m et les vignes sont traitées en utilisant des cellules de pulvérisation portées sur des tracteurs enjambeurs. Les données expérimentales utilisées pour la modélisation de la distribution des dépôts de pulvérisation dans le contexte des vignes larges ont été acquises en 2016 dans le cadre d'un projet antérieur (projet CASDAR RT ArchiTechDoseViti), en 2017 sur fonds propres et en 2020 dans le cadre du projet CASDAR RT Technodoseviti.

Domaines viticoles :

Deux domaines viticoles avec des parcelles de cépages différents et de vigueur contrastée ont été choisis pour les essais menés sur vignes larges en 2016, 2017 et 2020. Les essais de 2016 et 2020 ont été réalisés au Domaine Mas Piquet à Grabels près de Montpellier (Hérault, France), et ceux de 2017 au Domaine du Chapitre appartenant à l'Institut Agro et situé à Villeneuve les Maguelone (Hérault, France). Le système de conduite, la vigueur des parcelles et les cépages des deux domaines sont caractéristiques des vignobles du sud de la France. Les vignes ont un mode de conduite palissée, de type cordon Royat ou Guyot et disposent d'un inter-rang de 2,5 m de largeur. En 2016, 2017 et 2020, les essais ont été réalisés à 4 dates sur le cycle végétatif.

Les données expérimentales utilisées pour le contexte des « vignes étroites » ont été acquises en 2019 et 2021 en Côte d'Or et Saône et Loire dans le cadre d'essais réalisés en partenariat avec la Chambre d'Agriculture de Saône et Loire (CA71) et la Chambre d'Agriculture de Côte d'Or (CA21). Un financement Ecophyto (Projet Pulvétoit 2019-2021) a été mobilisé pour financer la participation des chambres à l'accompagnement des essais sur le terrain (logistique et appui des équipes IFV et INRAE à la réalisation des mesures sur le terrain).

Matériels d'application :

Deux techniques d'application en vignes larges ont été caractérisées par échantillonnage des dépôts de pulvérisation sur la végétation en 2016 et 2017 :

- Une voûte pneumatique (voûte Eco+ Arrière 800 litres, constructeur Calvet®, Lézignan Corbières) traitant tous les 4 rangs. L'utilisation des voûtes tous les 4 rangs est une technique d'application peu performante, car les rangs sont traités en uniface, mais permet de traiter rapidement le vignoble. Cette technique est représentative des pratiques majoritaires dans certains vignobles de l'arc méditerranéen.
- Un pulvérisateur de type face par face avec descentes dans le rang (Vectis Précijet 1000 litres, Tecnomat®, Épernay) traitant deux rangs par passage. Il s'agit d'un appareil performant, mais plus onéreux et moins maniable au vignoble (2016-2017).

Une troisième technique d'application en vignes larges a été caractérisée en 2020 :

- Une voûte pneumatique comme ci-dessus, mais traitant tous les 2 rangs : compromis en rapidité et qualité de traitement.

Ces trois techniques d'application ont été choisies car leur niveau de performance très contrasté permet d'encadrer les pratiques rencontrées sur le terrain. Les deux pulvérisateurs concernés ont été mis à disposition de l'UMT Ecotech par les constructeurs pour le projet TechnoDoseViti.

Deux techniques d'application représentatives des pulvérisateurs utilisés en vignes étroites ont été caractérisées par échantillonnage des dépôts de pulvérisation en 2019 et 2021 : un matériel en face par face par le dessus et un matériel en face par face avec descentes dans l'inter-rang.

Échantillonnage :

Une méthodologie d'échantillonnage des dépôts de pulvérisation sur la végétation a été développée de manière à mesurer la distribution des dépôts au sein du couvert végétal. Le principe consiste à pulvériser un traceur (E102) sur des collecteurs positionnés à différents endroits au sein de la végétation, puis à recueillir ces collecteurs et mesurer par spectrophotométrie la quantité de colorant recueillie par unité de surface. L'analyse individuelle des collecteurs permet d'avoir accès à la distribution des dépôts surfaciques sur le végétal. Le schéma d'échantillonnage des dépôts a légèrement différé entre les années 2016 et 2017-2020. En 2016, quatre ceps de vigne consécutifs ont été échantillonnés au sein d'une placette de 15 m de long choisie pour son homogénéité. Sur chaque cep échantillonné, des collecteurs en PVC de dimension 4*10 cm pliés en 2, et offrant donc une surface totale exposée de 40 cm², ont été positionnés et agrafés sur les feuilles à l'intérieur de la canopée selon un profil plan perpendiculaire à la rangée découpé selon une grille de cellules de 20 cm de haut et 10 cm de large. Entre 2017 et 2020, deux sections de 3 ceps consécutifs (appelées "trio de ceps") ont été échantillonnées au sein d'une placette de 15 m. Au sein de chaque trio, une grille régulière de collecteurs PVC de 40 cm² a été établie comme en 2016. Au total, près de 12 000 données unitaires de dépôt de pulvérisation ont été acquises et utilisées pour les travaux de modélisation. À titre d'exemple, la figure 1 présente la répartition des dépôts de pulvérisation au sein du feuillage pour deux des appareils étudiés en vigne large (voûte pneumatique traitant tous les 4 rangs et le pulvérisateur face par face) aux quatre stades végétatifs étudiés.

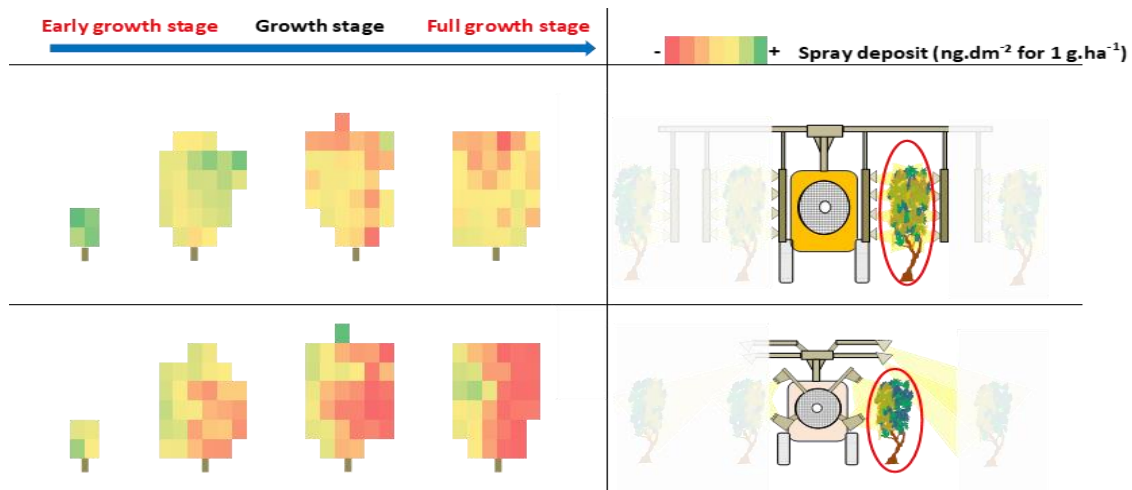


Figure 1 : Répartition des dépôts de pulvérisation (exprimés en ng/dm² pour 1 g/ha) au sein du feuillage pour quatre stades végétatifs et deux types de pulvérisateurs (appareil face par face en haut et voûte pneumatique en bas). L'échelle de couleur permet d'apprécier les parties du végétal avec un dépôt faible (rouge) ou élevé (vert).

La description de la méthodologie développée pour la mesure de la distribution des dépôts de produit sur la végétation au champ a fait l'objet de plusieurs articles et publications durant la vie du projet. L'article de données (Codis et al., 2018C) est relatif à l'acquisition des données de 2016 en vignes larges. Cheraïet et al., 2022B présentent les éléments de validation de la méthode d'échantillonnage des dépôts sur les

collecteurs PVC en les comparant à la distribution mesurée de manière exhaustive directement sur les feuilles de vigne. Les mesures de dépôts conduites dans le contexte des vignes étroites ont été présentées à la conférence internationale d'horticulture (Cheraïet et al., 2022A). L'article de Cheraïet et al. (2021) présente les données expérimentales acquises en vignes larges en 2016 et 2017 ainsi que leur valorisation pour une modélisation prédictive des dépôts en fonction d'indicateurs végétatifs mesurés par capteur LiDAR.

1.2 Matériel et méthodes : mesure d'indicateurs végétatifs par LiDAR

La végétation soumise à la pulvérisation (voir section précédente) a été caractérisée de deux manières :

1. par des mesures manuelles : hauteur, épaisseur, stade phénologique, espacement entre-rang ;
2. par des mesures à haute résolution utilisant un LiDAR couplé à un système de géolocalisation par satellites GNSS RTK embarqué sur un tracteur.

La technologie LiDAR (pour *Light Detection And Ranging*) est une technologie de numérisation fondée sur le principe de la télémétrie. Il s'agit d'un système de télédétection actif qui permet de déterminer la position et la distance d'une cible par rapport à l'émetteur en mesurant le temps de propagation aller et retour du rayonnement lumineux émis par un laser. Le LiDAR génère des nuages de points représentant la vigne étudiée en 3D. À partir de ces nuages de points, différents types d'attributs végétatifs peuvent être estimés. Les premiers (hauteur, épaisseur, porosité) sont appelés « attributs primaires », car ils représentent des caractéristiques physiquement indépendantes. Les seconds sont des indicateurs végétatifs plus intégratifs (*Leaf Wall Area pour surface de haie foliaire*, qui dépend de la hauteur et de la largeur d'inter-rang, *Tree Row Volume*, le volume de végétation qui dépend de ces mêmes grandeurs et de l'épaisseur).

Pour estimer de manière robuste et automatisée les indicateurs végétatifs à partir des données issues du LiDAR, un algorithme nommé *Bayesian Point Cloud Classification* (BPCC) a été développé (Cheraïet et al., 2020B). Il consiste d'abord à appliquer une méthode de filtrage automatique pour éliminer les artefacts et les données non liées à la vigne, puis classifie et sépare la zone de la canopée des autres composantes de la vigne (tronc, végétation, fils de palissage) sans intervention interprétative de l'opérateur. À partir de ce prétraitement, une estimation de la hauteur, de la largeur et de la porosité du couvert végétal a été effectuée pour l'ensemble des unités d'échantillonnage.

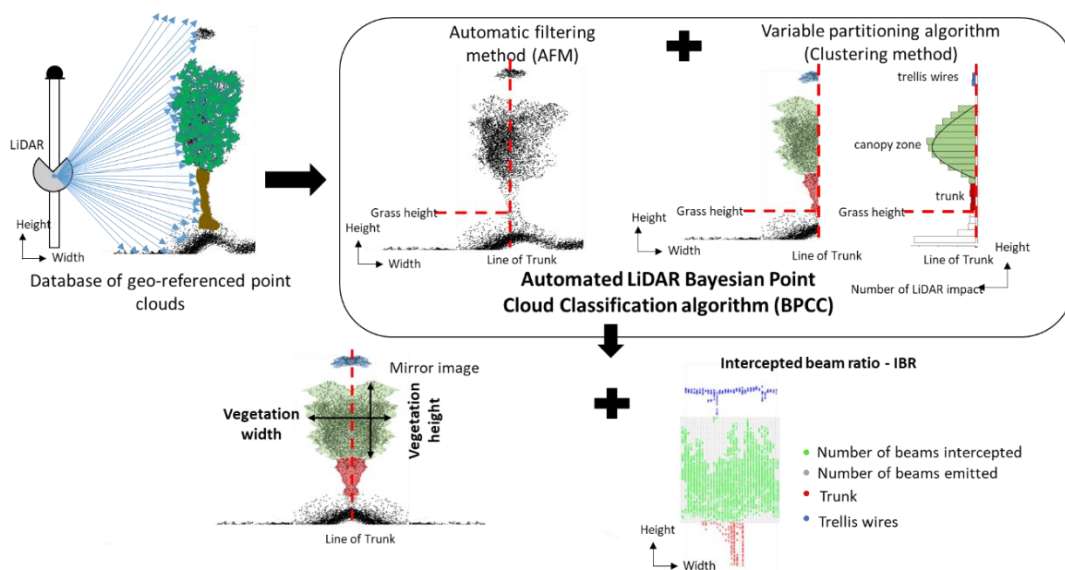


Figure 2 : Workflow illustrant les différentes étapes de prétraitement des nuages de points LiDAR permettant d'aboutir aux calculs de la hauteur, épaisseur et porosité du couvert végétal.

L'indicateur de porosité calculé correspond au taux de rayons laser interceptés sur la hauteur de végétation. Nous le désignons par l'acronyme TFI pour Taux de Faisceaux Interceptés. Cet indicateur correspond en pratique à l'inverse de la porosité mesurée dans le plan 2D de la végétation.

Les détails concernant les méthodes de calculs et de paramétrage de l'algorithme BPCC ont été publiés dans (Cheraïet et al., 2020). Cet article mobilise les données LiDAR et manuelles acquises en 2019 sur le domaine Mas Piquet. Dans le cadre du projet ABA PIC (*Accélération du Biocontrôle et des Agroéquipements pour la Protection Intégrée des Cultures, 2021-2022*) coordonné par l'ACTA, la chaîne de traitement automatisé des données LiDAR pour une parcelle entière est en cours d'informatisation. Ceci permettra d'automatiser la production de cartes du vignoble selon 3 indicateurs végétatifs d'intérêt (hauteur, épaisseur, porosité). L'unité spatiale de production de ces cartes (appelé ici « pixel ») représente 3 m sur un rang de vigne. Le démonstrateur TechnoDoseViti présenté en section 2.3 et développé en appui au projet par l'Institut Convergences #DigitAg présente de telles cartes.

1.3 Résultats : modèles de prédiction des dépôts en fonction du matériel utilisé et de la végétation

Des modèles statistiques multivariés permettant de prédire la distribution statistique des dépôts foliaires interceptés dans le couvert végétal en fonction des attributs primaires végétatifs (hauteur, épaisseur et porosité) ont été construits et calibrés à l'aide des données acquises en 2017, puis validés en utilisant les données acquises en 2016 pour le cas des vignes larges (Cheraïet et al., 2021). L'originalité de l'approche développée est double. Elle est premièrement d'avoir dépassé la prédiction d'un dépôt de produit moyen au sein de la végétation en s'intéressant à la prédiction des 9 déciles qui permettent ainsi d'accéder à la distribution complète des dépôts au sein du couvert végétal. Elle est ensuite d'avoir développé pour la première fois des modèles multivariés permettant de prédire chacun des déciles en fonction de la hauteur de la végétation, de son épaisseur et de la porosité mesurée avec le LiDAR. Les modèles précédents (Pergher et al., 2008, Llorens et al., 2011, Codis et al., 2019) étaient univariés et proposaient une prédiction du dépôt moyen dans la végétation en fonction d'indicateurs végétatifs agrégés, tels que le volume de végétation (TRV : Tree Row Volume) ou la surface de haie foliaire (LWA : Leaf Wall Area).

Ces modèles statistiques multivariés développés en vignes larges pour deux types de pulvérisateurs à l'efficacité très contrastée (voûte pneumatique utilisée tous les 2 et 4 rangs, face par face à jet porté) ont été évalués en termes de qualité de prédiction et d'incertitude par rapport aux modèles univariés proposés précédemment (Codis et al., 2019) et basés sur l'indicateur végétatif (LWA) sur une saison de croissance complète. Les modèles de prédiction de la distribution des dépôts multivariés sont nettement plus précis que les modèles monovariés. Ils permettent de mettre en place des méthodes d'ajustement des doses sur l'ensemble du cycle végétatif et de prendre en compte des hypothèses épidémiologiques variées selon le pathosystème considéré.

Du fait de contraintes pratiques, météorologiques et budgétaires, il manque une ou deux saisons d'acquisition en vignes étroites combinant LiDAR et mesures de dépôts. Des données complémentaires seraient nécessaires en vignes étroites pour stabiliser les modèles de prédiction des dépôts et tester leur généralité pour les 2 types de pulvérisateurs qui ont été évalués (face par face par le dessus et face par face par descentes dans l'inter-rang). Les résultats acquis en vignes étroites ont néanmoins permis de comparer, pour un appareil de type face par face par descentes dans l'inter-rang, les modèles multivariés issus du projet avec une modélisation univariée classique basée sur le LWA. Comme pour les vignes larges, le gain qualitatif est très grand et une prédiction précise et opérationnelle devient possible (Cheraïet et al., 2022A, communication à IHC 2022).

1.4 Résultats : base de données des références acquises

Un des objectifs du projet était de constituer une base de données des références expérimentales acquises au vignoble ainsi que des fonctions de calculs pour alimenter les modèles. Cette base de données a été mise en place : l'ensemble des données acquises ont été rassemblées dans une base de données des différents sites. La base intègre à la fois les données liées à la caractérisation de la distribution des dépôts de pulvérisation sur la vigne et la caractérisation de l'évolution de la végétation par la mesure d'indicateurs végétatifs à l'aide des mesures manuelles et LiDAR.

Tableau 1 : Tableau récapitulatif de toutes les acquisitions réalisées et servant à la mise en place des modèles de prédiction des dépôts.

Année	Région	Domaine	Nombre de dates d'expérimentation	Nombre de parcelles	Nombre de placettes de 15 m échantillonnées	Mesures dépôts	Mesures manuelles de la végétation	Mesures LiDAR de la végétation	Techniques d'application
2016	Languedoc	Mas Piquet	4	4	32	✓	✓	✓	face par face (jet porté) // voûte pneumatique passage 1/4
2017	Languedoc	Chapitre	4	5	38	✓	✓	✓	face par face (jet porté) // voûte pneumatique passage 1/4
2019	Côte d'or	CA21	3	4	24	✓	✓	X	face par face classique (jet porté) // face par face par-dessus (pneumatique)
2019	Saône et Loire	CA71	3	4	24	✓	✓	X	face par face classique (jet porté) // face par face par-dessus (pneumatique)
2019	Champagne	CIVC	8	5	25	✓	✓	✓	face par face classique (jet porté) // face par face par-dessus (pneumatique)
2019	Languedoc	Mas Piquet	7	5	na	X	X	✓	- LiDAR parcelles entières-
2020	Languedoc	Mas Piquet	4	5-6	22	✓	✓	✓	voûte pneumatique passage 1/2
2021	Côte d'or	CA21	2	4	16	✓	✓	✓	face par face classique (jet porté) // face par face par-dessus (pneumatique)
2021 *	Saône et Loire	CA71	3	4	24	✓	✓	✓	face par face classique (jet porté) // face par face par-dessus (pneumatique)*
2021	Champagne	CIVC	5	4	9	✓	✓	✓	face par face classique (jet porté)

X : séries de mesures incomplètes avec soit l'absence de mesures de dépôts et/ou d'acquisitions LiDAR

Sur la base des éléments présentés dans le tableau ci-dessus, nous disposons d'un ensemble de tables de données :

Données dépôts – végétation :

1. Base de données vigne large 2016 et 2017 : mesure des dépôts pour 2 appareils (voûte 1rang/4 et face par face) avec données manuelles de végétation + données LiDAR de végétation (épaisseur e, hauteur h, porosité 2D)
2. Base de données vigne large 2020 : mesure des dépôts pour voûte 1rang/2 avec données manuelles de végétation + données LiDAR de végétation (e, h, porosité 2D)
3. Base de données vigne étroite 2019 : mesure des dépôts pour 2 appareils (face par face par le dessus et face par face dans l'interligne) (mesures manuelles seulement) et données 2021 (mesure des dépôts pour 2 appareils avec données manuelles de végétation + données LiDAR de végétation (e, h, porosité 2D), mais incomplètes (des problèmes techniques intervenus sur un domaine qui prêtait deux de ses pulvérisateurs en Côte d'Or ont eu pour effet de limiter le nombre d'acquisitions : 2 dates sur 3 seulement et 1 seul appareil pour la dernière date).

Données végétation sans dépôts (mesures LiDAR et manuelles) :

1. 2019 Mas Piquet parcelles entières (5 parcelles du Domaine Mas Piquet ont été entièrement scannées à 7 dates différentes sur la saison).

À noter que les données brutes de toutes les acquisitions effectuées depuis le début du projet sont disponibles. Celles-ci intègrent les nuages de points LiDAR et les données individuelles de dépôts mesurées pour chaque collecteur. Ces données brutes pourront être mobilisées pour la production de nouveaux indicateurs et/ou l'amélioration des méthodes (traitement des données et modèles).

2. Application des modèles à l'expression des doses et au développement des technologies de pulvérisation de demain

Les résultats en modélisation issus du projet ont été appliqués à deux problématiques, l'expression des doses et la pulvérisation de précision. Ces applications sont des résultats complémentaires du projet qui mettent en lumière l'intérêt d'une modélisation expérimentale précise du fonctionnement des pulvérisateurs.

2.1 Construire des abaques d'adaptation des doses simples et compréhensibles, destinés à apparaître sur les étiquettes des produits phytosanitaires en fonction du développement végétatif et de la densité de plantation

Dans la continuité de la démarche qui a été conduite à la fin des années 1990 par la CEB (Commission des Essais Biologiques) (Malet et al., 1998) et reprise en 2006 (CEB, 2006), le projet a permis de mobiliser les modèles de prédiction des dépôts présentés dans la section 1.3 pour ébaucher des abaques de transformation des doses fixes par hectare actuellement utilisées en doses ajustées aux conditions de l'application.

Ces grilles ont pour vocation, pour une gamme de distance d'inter-rang donnée, à affecter une valeur de pourcentage de dose/ha homologuée à appliquer en fonction de paramètres d'entrée que l'agriculteur pourra observer ou mesurer au champ (espacement entre rangs, hauteur de végétation, épaisseur de feuillage...) manuellement ou par l'utilisation d'un capteur comme le LiDAR.

Le principe sur lequel repose la construction des abaques est le suivant. Chaque situation, à savoir un pulvérisateur aux caractéristiques connues utilisé sur une parcelle aux caractéristiques connues, permet de prédire une distribution de dépôts sur le végétal grâce à un modèle développé selon la méthodologie décrite en section 1. Cette distribution est comparée à une distribution de référence considérée par hypothèse comme suffisante pour protéger la plante. Dans l'approche que nous avons proposée, la réduction de doses préconisée est celle qui permet de maintenir la distribution des dépôts au-dessus de la distribution de référence pour les zones de la végétation les moins couvertes. Ces parties du végétal moins bien protégées sont représentées ici par les 5 premiers déciles de la distribution prédite. Le choix de la distribution de dépôt de référence permet de paramétrer le niveau de risque. Pour simplifier le raisonnement, une distribution de référence unique pour toute la saison de croissance est considérée ici. Cette distribution peut être choisie en fonction d'une pratique connue jugée satisfaisante. Du plus risqué au moins risqué, plusieurs distributions de référence ont été envisagées pour les vignes larges : la distribution réalisée par une voûte pneumatique utilisée 1 rang sur 2 en pleine végétation, la distribution réalisée par un pulvérisateur face par face à jet porté en pleine végétation, et la distribution réalisée par une voûte pneumatique utilisée 1 rang sur 2 au stade floraison.

La Figure 3 présente les différentes étapes permettant de calculer un coefficient de dose à appliquer en % de la dose homologuée. Dans cet exemple, la distribution de référence correspond à celle fournie par un pulvérisateur face par face en pleine végétation (espacement entre rangs de 2,5 m, hauteur de

végétation 1,5 m et épaisseur 0,85 m), et le cas étudié est une vigne d'espacement similaire avec une hauteur de 0,8 m et une épaisseur de 0,5 m pulvérisée avec le même appareil. La distribution modélisée est d'abord comparée à la distribution de référence. Puis des préconisations de doses en pourcentage de la pleine dose sont calculées pour chaque décile i de dépôt considéré par l'expression suivante :

$$\%dose_i = \frac{décile\ i_{ref}}{décile\ i_{prédit}}$$

Afin de garantir la distribution de référence, le maximum des coefficients de dose à appliquer (exprimés en % de la dose homologuée) obtenu pour les 5 premiers déciles est choisi pour la dose à appliquer, à savoir :

$$\%dose = Max_{1 \leq i \leq 5} \%dose_i$$

N. B. : les distributions prédites comme de référence sont ici normalisées en nanogrammes de produit par dm^2 de surface foliaire pour un gramme de produit épandu à l'hectare.

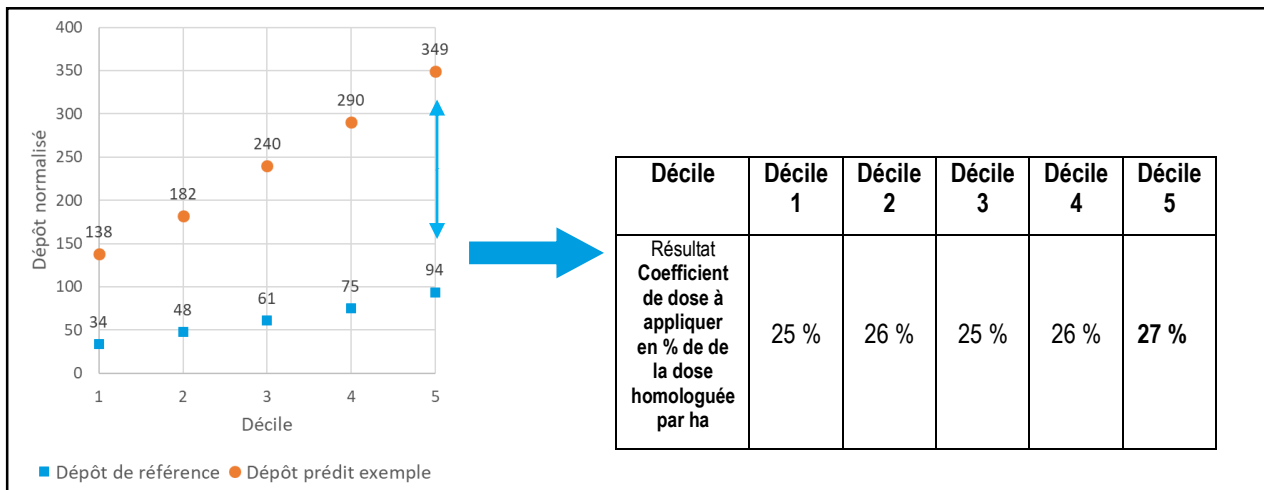


Figure 3 : Mise en œuvre de la méthodologie permettant la définition des abaques d'ajustement des doses en fonction du pulvérisateur et des caractéristiques de la végétation à traiter.

Il est à noter que pour cette application de la modélisation à des abaques d'ajustement des doses, on considère des modèles de prédiction utilisant les seules variables hauteur et épaisseur du couvert (sans la porosité). Selon la Figure 3, en considérant que la distribution obtenue par un matériel performant en pleine végétation est suffisante pour protéger la vigne au stade considéré, qui correspond ici à un début de floraison, on obtient une forte réduction potentielle de dose. En déclinant cette approche sans considération de sensibilité particulière du pathosystème à un stade de croissance donné, avec donc une distribution de référence constante, il est ainsi possible de formuler des tables théoriques d'adaptation de doses sur la base des seuls paramètres géométriques d'inter-rang, d'épaisseur et de hauteur du couvert. Ceci est résumé dans les 2 tableaux de la figure 4 relatifs aux 2 types d'appareils (pulvérisateur face par face à jet porté et voûte pneumatique utilisée tous les 4 rangs) qui ont servi de support à la construction des modèles dans le contexte des vignes larges. La valeur dans chaque case des abaques indique la valeur de pourcentage de la dose homologuée à apporter pour assurer la distribution de référence sur le couvert végétal en fonction de ses dimensions. Les valeurs sont bornées par 100 % correspondant à l'application de la pleine dose homologuée.

En appliquant ce tableau pour une campagne de traitement classique dans le vignoble languedocien, l'économie de produits phytosanitaires (sans perte d'efficacité théorique sur le traitement dans le cadre des hypothèses formulées) peut être évaluée. Avec le pulvérisateur peu efficace, à savoir la voûte pneumatique utilisée tous les 4 rangs, l'application de la pleine dose homologuée est recommandée dès

que la végétation atteint une hauteur de 80 cm, et pour des hauteurs de végétation supérieures à 90 cm, l'application de la dose homologuée n'est plus suffisante pour assurer la distribution de dépôt de référence. Pour le face par face en revanche, l'économie potentielle de produit phytosanitaire est conséquente. Le gradient indiqué dans les abaques met en évidence les marges importantes liées à la prise en compte des caractéristiques du végétal et de la technique d'application pour l'ajustement des doses d'intrants.

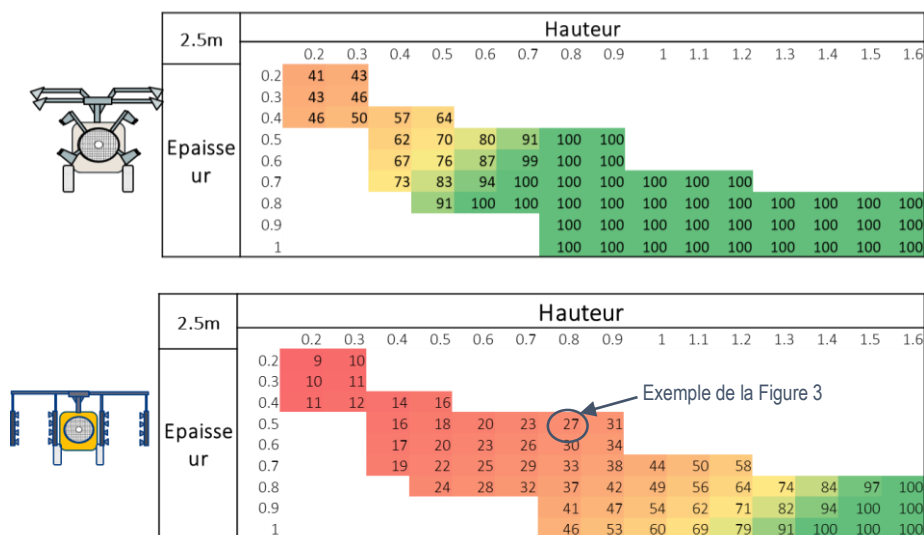


Figure 4 : Abaque d'adaptation des doses de produits phytosanitaires (exprimées en % de la dose homologuée) tenant compte de l'espacement entre rang, de la hauteur, de l'épaisseur de végétation et de la technique d'application basé sur l'étude de la distribution des dépôts de pulvérisation (voûte pneumatique utilisée tous les 4 rangs par passage en haut et face par face en bas). La distribution de dépôts de référence considérée pour la réalisation de ces abaques correspond à l'utilisation d'un appareil face par face sur une pleine végétation à 2.5 mètres d'inter-rang.

2.2 Identifier des scénarios technologiques de pulvérisation de précision en viticulture et évaluer leurs performances en termes d'économie de produits phytosanitaires

Les modèles de prédiction des distributions présentés dans la section précédente ont permis d'établir un cadre d'analyse permettant d'évaluer les économies d'intrants phytosanitaires en fonction de différents scénarios technologiques. La présentation complète de cette démarche est présentée dans le chapitre 6 (p.191 à p.214) du mémoire de thèse d'Anice Cheraïet (Cheraïet, 2020).

Le Domaine Mas Piquet (Hérault, France) qui a servi à établir les modèles de prédiction des dépôts en vignes larges a également été utilisé comme support pour la mise en place du cadre d'évaluation des scénarios technologiques. En 2019, durant la saison végétative, la végétation de trois parcelles du domaine (*Aglae*, *Franquet* et *Terre Blanche*) a été scannée avec le LiDAR à de multiples reprises et nous considérerons trois dates (T1 : 24/04, T2 : 28/05, T3 : 22/07) entre le stade quatre à cinq feuilles étalées et le stade fermeture de la grappe.

Différents scénarios technologiques ont ensuite été considérés. Un « scénario technologique » est défini par une combinaison de 4 paramètres : i) une manière de caractériser la végétation (mesures manuelles ou mesures LiDAR), (ii) une unité d'expression et de choix de la dose (dose homologuée, dose LWA, dose abaque...), (iii) une échelle spatiale de décision de la dose (dose définie et appliquée au niveau du domaine viticole, de chaque parcelle ou en intra-parcellaire sur chacune des unités spatiales), (iv) une

technique d'application (voûte pneumatique utilisée tous les 4 rangs, tous les 2 rangs ou pulvérisateur face par face...). Parmi tous les scénarios technologiques envisageables, 4 ont été retenus afin d'illustrer la démarche en mettant l'accent sur l'effet de la modification de l'échelle spatiale de décision des doses appliquées (scénarios récapitulés dans le tableau 2).

Scénario 1 : Une voûte pneumatique utilisée tous les 4 rangs applique la dose homologuée durant toute la saison à l'échelle du domaine. Ce scénario est représentatif des pratiques actuelles dans les vignobles de l'arc méditerranéen. Un matériel peu performant est utilisé pour appliquer, toute la saison, une seule et même dose sur toutes les parcelles du domaine.

Scénario 2 : Pulvérisateur face par face et décision de la dose à l'échelle du domaine. Le pulvérisateur, performant, applique la même dose sur toutes les parcelles du domaine. La dose appliquée à chaque traitement est adaptée en fonction des caractéristiques de la végétation, mesurées au moment du traitement sur le domaine, dans une approche garantissant que tout le domaine reçoit une dose suffisante. Plus précisément, à chaque traitement, une dose préconisée idéale est calculée grâce aux modèles de prédiction pour chaque unité spatiale élémentaire (3 m de rang) et la valeur du 95^{ème} centile de la distribution des doses préconisées pour chaque unité spatiale au niveau de l'ensemble du domaine est appliquée pour toutes les parcelles du domaine.

Scénario 3 : Pulvérisateur face par face et décision de la dose à l'échelle de la parcelle. Le pulvérisateur, performant, applique une dose différente sur chaque parcelle. La dose appliquée sur chaque parcelle est adaptée aux caractéristiques de la végétation, selon une règle d'ajustement qui prend en compte la valeur du 95^{ème} centile de la distribution des doses préconisées au niveau de l'ensemble des unités spatiales de la parcelle considérée.

Scénario 4 : Pulvérisateur face par face en « rupture technologique » (n'existe pas aujourd'hui) et ajustement de la dose pour chaque unité spatiale de 3 m (ce qui est optimiste). La rupture technologique fait référence aux technologies d'application à taux variable avec l'hypothèse d'une très forte réactivité. Dans le calcul, nous faisons l'hypothèse que le pulvérisateur peut adapter instantanément la dose en fonction d'une carte de préconisation générée à partir de mesures issues d'un LiDAR élaborée avec une résolution spatiale de 3 m.

Tableau 2 : Présentation des scénarios technologiques considérés.

Scénario technologique	Mesures de la végétation	Expression et gestion de la dose	Échelle spatiale d'ajustement de la dose	Type de pulvérisateur
1	Na.	Dose homologuée	Pas d'ajustement	Voûte pneumatique 1 rang sur 4
2	LiDAR	Règle d'ajustement	Domaine	Face par face
3	LiDAR	Règle d'ajustement	Parcelle	Face par face
4	LiDAR	Règle d'ajustement	Intra-parcellaire	Face par face en rupture technologique

Les 4 scénarios technologiques ont été comparés dans une logique de progression de la précision. Le passage du scénario 1 au scénario 2 quantifie le gain lié à un changement de matériel d'application et à une évolution de la dose au cours de la saison. Le passage du scénario 2 au scénario 3 quantifie le gain lié à une prise de décision de la dose à l'échelle parcellaire plutôt qu'à l'échelle du domaine. Le passage du scénario 3 au scénario 4 évalue l'apport de technologies en forte rupture, avec une prise de décision de la dose à l'échelle intra parcellaire.

Les modèles multivariés de prédiction de la distribution des dépôts ont été appliqués sur les 3 parcelles dont la végétation a été préalablement scannée par le LiDAR aux 3 dates. L'application des modèles

multivariés à chaque date et sur chaque parcelle fournit des cartes de distribution des dépôts sur chaque unité spatiale (3 m). Ces distributions de dépôts sont alors comparées à des distributions de dépôts de référence permettant de prendre en compte différentes hypothèses de niveaux de risque en termes d'efficacité du traitement phytosanitaire. Pour cette étude-ci, deux hypothèses de niveau de risque ont été proposées. Pour l'hypothèse de niveau de risque « inférieur » (respectivement « supérieur »), nous considérons comme référence la distribution de dépôt de produit obtenue en appliquant la dose homologuée avec le pulvérisateur le plus performant (face par face) (respectivement le moins performant (voûte utilisée tous les 4 rangs)) sur une végétation pleinement développée. À partir de ces distributions de référence, des préconisations de doses à appliquer sont formulées en utilisant les modèles de prédiction multivariés. Pour chaque unité spatiale, la distribution des dépôts prédite est d'abord comparée à la distribution de référence. Les préconisations de doses à appliquer (en % de la dose homologuée) permettant d'assurer la distribution de référence considérée pour tous les déciles sont calculées, d'une façon analogue à la façon présentée en section 2.1. Des cartes de préconisation de dose à appliquer (en % de la dose homologuée) sont alors calculées. Ces cartes peuvent être interprétées et analysées afin de comparer les scénarios technologiques.

Critère d'évaluation des scénarios technologiques : Les scénarios technologiques de pulvérisation ont été évalués dans cet article uniquement selon le pourcentage de dose à appliquer (exprimé en % de la dose homologuée) à chaque date. Ce pourcentage correspond à la valeur du 95^{ème} centile de la distribution des doses préconisées à l'échelle du domaine ou de la parcelle, respectivement pour les scénarios 2 et 3. Pour le scénario 4, le pourcentage de la dose homologuée qui est appliqué sur une parcelle est égal à la moyenne des pourcentages préconisés pour chaque unité spatiale dans la parcelle. L'équipe de l'UMT ECOTECH rédige actuellement une extension de ces recherches avec un nombre plus important de scénarios, et un ensemble de critères d'évaluation de la protection dont la quantité d'intrants à utiliser, mais également « la fréquence » et « l'intensité » du « défaut de protection ». La fréquence de défaut de protection serait définie par le % d'unités spatiales ne recevant pas la distribution de dépôts de référence avec la règle d'ajustement de la dose considérée. L'intensité du défaut de protection correspondrait à la moyenne des déficits de doses qu'il manque à appliquer sur les unités spatiales insuffisamment couvertes pour atteindre le niveau de dépôt de référence, exprimée en % de la dose homologuée.

Analyse des scénarios technologiques : Les figures 5 et 6 montrent l'évolution du pourcentage de dose homologuée à appliquer pour assurer la distribution de dépôt de référence sur la végétation au cours de la saison de végétation (T1, T2, T3) pour les scénarios technologiques 2, 3 et 4. La figure 5 est relative à une hypothèse de niveau de risque supérieur (respectivement inférieur pour la figure 6). Pour le scénario 1 (trait plein de couleur noire), la pleine dose homologuée (niveau 100 %) est appliquée aux trois dates. Dès la seconde date, la dose homologuée (borne supérieure réglementaire) ne suffit plus à assurer la distribution de dépôt de référence sur la végétation (cf. premier tableau de la Figure 4), du fait de la mauvaise efficacité du pulvérisateur. Pour le scénario 2 (trait en pointillé rouge), le pourcentage de la dose homologuée à appliquer correspond à la valeur du 95^{ème} centile de la distribution des doses préconisées pour l'ensemble des unités spatiales (3 m) du domaine. Pour le scénario 3 (croix bleue), la dose à appliquer correspond à la valeur du 95^{ème} centile de la distribution des doses préconisées pour l'ensemble des unités spatiales de chaque parcelle (Aglae, Franquet, Terre blanche). Pour le scénario 4 (point vert), le pourcentage de dose homologuée indiqué correspond à la moyenne par parcelle des pourcentages de dose de chaque unité spatiale.

En considérant un pourcentage global de réduction de dose par scénario, évalué ici pour simplifier comme une moyenne des 9 situations d'un scénario (3 dates, 3 dates), on peut comparer les 4 scénarios deux à deux. Avec le niveau de risque supérieur, le passage du scénario 1 à 2 permettrait une économie supérieure à 40 % de produit phytosanitaire par rapport à l'application de la pleine dose/ha alors que le passage du scénario 2 à 3 permettrait une économie supplémentaire de 4,6 %. Enfin le passage du scénario 3 à 4 permettrait une économie de produit de près de 10 % supplémentaire. La capacité

d'objectiver les conséquences de différents scénarios technologiques, en matière de réduction d'intrants et également avec des indicateurs qui traduisent les marges de sécurité au niveau de la qualité de protection phytosanitaire, pourra être mobilisée au service de l'identification des stratégies de mécanisation qui représentent les meilleurs compromis dans un cadre technico-économique et réglementaire donné.

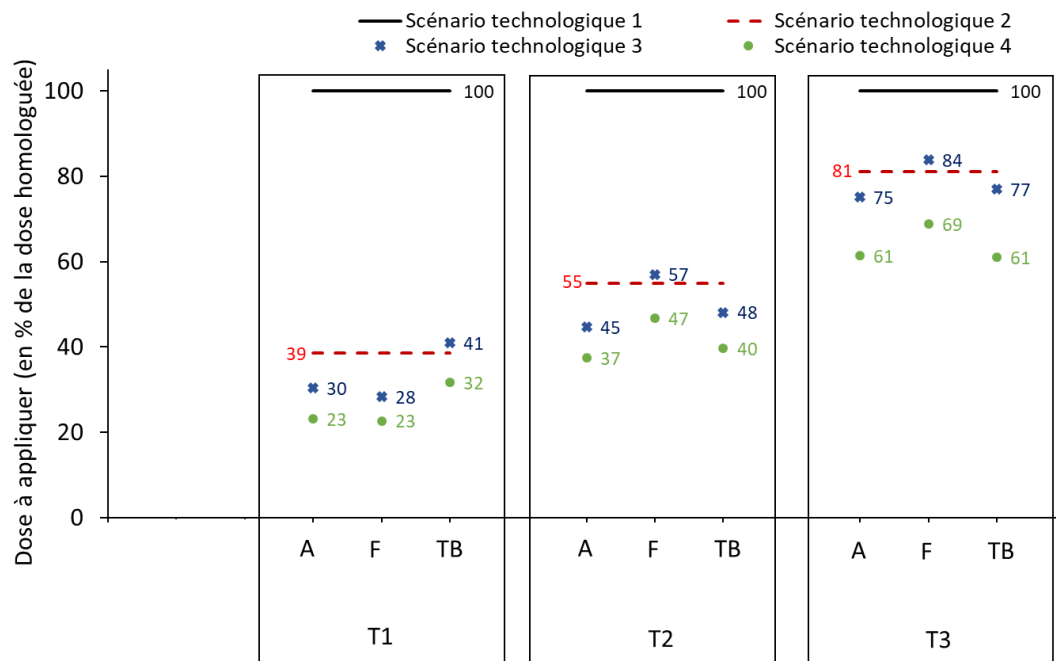


Figure 5 : Évolution du % de la dose homologuée à appliquer au cours de la saison de végétation pour les 4 scénarios technologiques évalués (hypothèse de niveau de risque de protection phytosanitaire supérieur). Les annotations A, F et TB correspondent respectivement aux parcelles Aglae, Franquet et Terre Blanche.

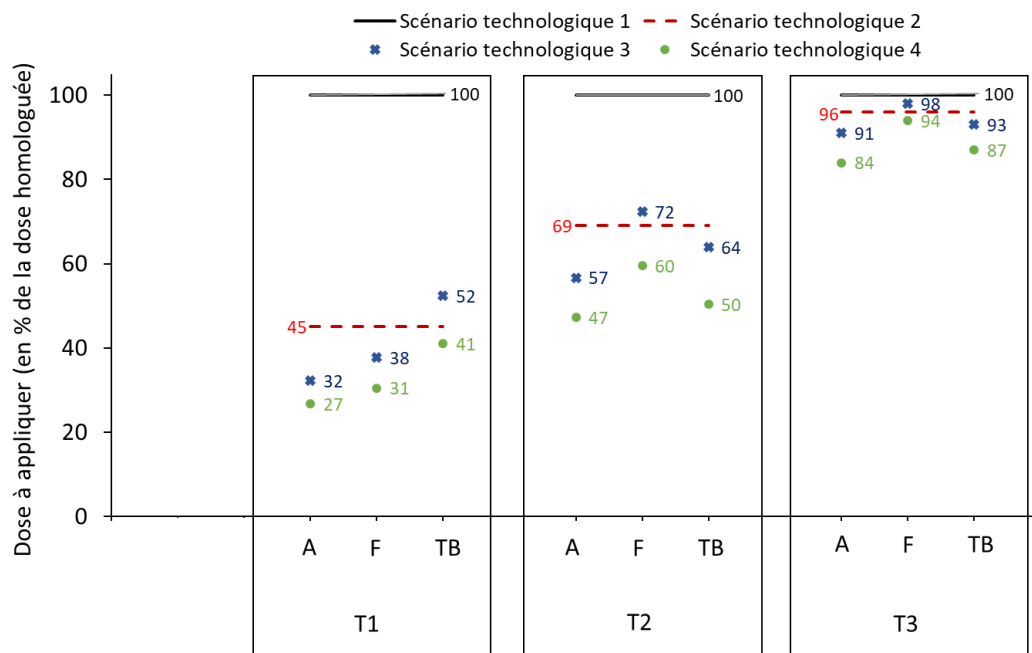


Figure 6 : Évolution du % de la dose homologuée à appliquer au cours de la saison de végétation pour les 4 scénarios technologiques évalués (hypothèse de niveau de risque de protection phytosanitaire inférieur). Les annotations A, F et TB correspondent respectivement aux parcelles Aglae, Franquet et Terre Blanche.

Un démonstrateur a été développé dans le cadre du projet pour illustrer la mise en œuvre du cadre conceptuel d'analyse des scénarios technologiques : <https://technodoseviti.hdigitag.fr/> Muni d'une interface graphique et cartographique, il permet de comparer 3 scénarios technologiques : voûte pneumatique utilisée tous les 4 rangs, face par face et panneaux récupérateurs. La visualisation cartographique permet de comparer deux situations : par exemple, l'application de deux scénarios différents pour une même parcelle, l'application d'un même scénario pour deux parcelles différentes, ou l'application d'un même scénario à deux stades différents d'une même parcelle.

Conclusion

Les travaux conduits par l'UMT ECOTECH dans le cadre du projet Casdar RT TechnoDoseViti (2018-2021) en partenariat IFV-INRAE ont permis de développer de nouvelles méthodes de prédiction de la distribution statistique des dépôts de produits phytosanitaires au sein du couvert végétal en fonction de descripteurs de la végétation (hauteur, épaisseur et porosité du couvert végétal) mesurés soit manuellement, soit à l'aide d'un capteur LiDAR 2D. Des modèles de prédiction des dépôts ont été développés et calés pour différents types de pulvérisateurs et différents contextes viticoles (vignes larges et vignes étroites). Les données ont été mobilisées pour comparer différents scénarios technologiques consistant en différentes stratégies de mécanisation des viticulteurs et différents niveaux de technologie des appareils afin d'évaluer quelle pourrait être la contribution des techniques d'application de précision en termes de réduction des intrants phytosanitaires. Ces données et méthodes peuvent également être mobilisées pour réfléchir aux évolutions possibles de l'expression des doses. De façon plus prospective, une représentation précise de la dose effectivement déposée dans le végétal, avec sa distribution et sa répartition en 3 dimensions ouvre la voie à une nouvelle façon d'appréhender la protection des cultures, en étudiant plus fonctionnellement la relation de la dose mobilisable par un organe à son efficacité pour tout type de produit, conventionnel comme de biocontrôle, et en intégrant dans la réflexion agronomique le matériel utilisé, ce qui est encore trop peu fait aujourd'hui.

Remerciements

Le projet TechnoDoseViti a été réalisé grâce au concours financier du ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire (dispositif CASDAR Recherche Technologique). Le projet a également bénéficié d'un support financier de la part de l'OFB dans le cadre du plan Ecophyto. La thèse de Anice Cheraïet a bénéficié d'un co-financement de la part de l'Institut de convergence #DigitAg. Nos remerciements aux constructeurs Tecnomatix et Calvet pour la mise à disposition des matériels de pulvérisation supports de cette étude. Le développement du démonstrateur TechnoDoseViti a bénéficié de l'appui du service informatique de l'INRAE grâce à un financement complémentaire de #DigitAg.

Références bibliographiques

- Bastianelli M., de Rudnicki V., Codis S., Naud O., 2018. Assessing models from LiDAR based vegetation indicators for predicting spraying deposit amounts in a set of vine estates in France, in *International Advances in Pesticide Application, Aspects of Applied Biology* 137:375-384, Brighton, UK, Jan 9-11.
- Carra M., Codis S., Lienard A., Naud O., 2018. Experimental modelling of spraying deposit according to vine canopy architecture to design scenarios for dose expression and adjustment. AAB-Dose Expression Workshop on 6-7 November 2018 at the Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain
- CEB 2006. Groupe de travail "Expression des doses" Compte rendu Réunion du 13 décembre 2006.
- Cheraïet A., Delpuech X., Carra M., Andres J., Lienard A., Codis S., Vergès A., Naud O., 2019. Evaluer au vignoble des capteurs et des solutions numériques innovantes pour diminuer et gérer les intrants phytosanitaires. 49ème congrès du Groupe Français de Recherche sur les Pesticides, 21-24 mai 2019, Montpellier, France.
- Cheraïet A., 2020A. Modélisation expérimentale et statistique des relations entre caractéristiques morphologiques de la vigne et dépôts de pulvérisation : application à l'agriculture de précision. Mémoire de thèse présenté par Anice Cheraïet le 18 décembre 2020, Institut Agro Montpellier.
- Cheraïet A., Naud O., Carra M., Codis S., Lebeau F., Taylor J., 2020B. An algorithm to automate the filtering and classifying of 2D LiDAR data for site-specific estimations of canopy height and width in vineyards. *Biosystems Engineering* 200: 450-465.
- Cheraïet A., Naud O., Carra M., Codis S., Lebeau F., Taylor J., 2021. Predicting the site-specific distribution of agrochemical spray deposition in vineyards at multiple phenological stages using 2D LiDAR-based primary canopy attributes. *Computers and Electronics in Agriculture* 189 (2021) 106402.
- Cheraïet A., Naud O., Codis S., Petitot P., Bidaut F., Liebart M., Taylor J., 2022A. Testing the suitability of a terrestrial 2D LiDAR scanner for 3D canopy characterization of narrow vineyards to optimize the spraying process of pesticides. IHC 2022 Int. Symposium on Mechanization, Precision Horticulture, and Robotics: Precision and Digital Horticulture in Field Environments, Angers, France.
- Cheraïet A., Naud O., Carra M., Codis S., Taylor T., 2022B. Evaluation of the distribution of intercepted spray deposits within a vine canopy from measurements on artificial targets and real leaves. *Oeno One* by IVES (International Viticulture and Oenology Society) DOI: <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2022.56.4.5414>
- Codis S., Carra M., Delpuech X., Montegano P., Ruelle B., Savajols B., Ribeyrolles X., 2017. Towards a new model of dose expression in viticulture: Presentation of an experimental approach based on deposition measurement to test the relevance of different scenarios. *SuproFruit* 2017.
- Codis S., Ruelle B., Carra M., Montegano P., Ribeyrolles X., Naud O., Douzals JP., Delpuech X., Verges A., 2018A. Le mode d'expression des doses en viticulture, un facteur clé pour une optimisation des quantités de produits phytosanitaires appliquées - AFPP - colloque sur les techniques d'application de produits de protection des plantes - Lyon - 13 et 14 mars 2018.
- Codis S., Douzals J-P., Verges A., Carra M., Ribeyrolles R., Bonicel JF, Lienard A., Delpuech X., 2018B. Importance of sprayer performance for dose adjustment and plant protection security: The tools allowing to classify sprayers according to safety margins for dose adjustment AAB-Dose Expression Workshop on 6-7 November 2018 at the Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain.
- Codis S., Carra M., Delpuech X., Montegano P., Nicod H., Ruelle B., Ribeyrolles X., Savajols B., Vergès A., Naud O., 2018C. Dataset of spray deposit distribution in vine canopy for two contrasted performance sprayers during a vegetative cycle associated with crop indicators LWA and TRV. *Data in Brief* 18 2018 415-421.
- Codis S., Carra M., Verges A., Delpuech X., de Rudnicki V., Naud O., 2019. Optimisation agro-environnementale de la pulvérisation sur vigne en fonction de l'architecture de la végétation et du matériel d'application utilisé (ArchiTechDoseViti), *Innovations Agronomiques*, INRA, 71 (2019), pp.151-164.
- Malet J., Bourgouin B., Breniaux D., Monnet Y., Orts R., Vernet C., 1998. Expression des doses d'emploi des produits phytopharmaceutiques - A.N.P.P./C.E.B.

Mironet V., Codis S., Carra M., Verpont F., 2018. First steps from a French methodological working group to facilitate LWA dose expression implementation in France. Aspects of Applied Biology. AAB-Dose Expression Workshop on 6-7 November 2018 at the Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain.

Llorens J., Gil E., Llop J., & Escolà, A., 2011. Ultrasonic and LiDAR sensors for electronic canopy characterization in vineyards: Advances to improve pesticide application methods. *Sensors*, 11(2), 2177-2194.

Pergher G., & Petris R., 2008. Pesticide dose adjustment in vineyard spraying and potential for dose reduction. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*.

Sinfort C., 2012. Connaissances actuelles et marges de progrès pour optimiser la pulvérisation. *Revue Française D'oenologie* pp. 419–421.



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

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

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