



N° du projet : 1271

Titre du projet : *TechnoDoseViti : Modélisation expérimentale des dépôts de traitements phytosanitaires en fonction de l'architecture du végétal en viticulture. Applications à l'expression des doses et à la viticulture de précision.*

COMPTE RENDU FINAL DU PROJET TECHNODOSEVITI

Période du projet : 01/01/2018 - 31/12/2022

Date d'élaboration du compte rendu : 12/05/2022

Organisme chef de file : Institut Français de la Vigne et du Vin

Nom et organisme du chef de projet : CODIS Sébastien, Institut Français de la Vigne et du Vin

Site Internet sur lequel le projet communique à destination des publics cibles :

<https://technodoseviti.herokuapp.com/#/>

Résumé :

Les travaux conduits dans le cadre du projet Casdar RT 2017 TechnoDoseViti (2018-2021) (*“Modélisation expérimentale des dépôts de traitements phytosanitaires en fonction de l'architecture du végétal en viticulture et de la performance du pulvérisateur. Applications à l'expression des doses et à la viticulture de précision”*) ont permis d'identifier les descripteurs de la végétation nécessaires à prendre en compte conjointement pour prédire la distribution statistique des dépôts de produits phytosanitaires pulvérisés dans le 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 quantités 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. Les données ont également été utilisées pour ébaucher des abaques d'ajustement de doses à double entrée utilisables par les professionnels tenant compte à la fois des caractéristiques de la végétation (hauteur, épaisseur, espacement entre rang) et de la performance du pulvérisateur. Dans le cadre d'un financement complémentaire, un démonstrateur web a été réalisé : <https://technodoseviti.herokuapp.com/#/>

A – Compte rendu technique final synthétique

I – Le déroulement du projet

Rappel du contexte et du contenu du projet

La demande sociétale de réduction d'usage des PPP, le contexte de la directive européenne SUD (2009/128/CE) et du plan Ecophyto II en France conduisent à reconsidérer l'ensemble des processus de protection de la vigne. Parmi les questions posées, figure le mode d'expression des doses homologuées des PPP. La dose actuellement homologuée en cultures pérennes (viticulture, arboriculture) est une dose fixe définie par hectare cadastral 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 (SFT en ha de feuilles par hectare cadastral) sur une même parcelle peut varier de 1 à plus de 10 (Codis et al., 2019). À un même stade végétatif, en fonction 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). Cela conduit à des quantités de produits déposés par unité de surface sur le végétal très variables entre parcelles et au sein d'une même parcelle selon les typologies de vigne (modes de taille, conduite et palissage) (Pergher & Petris, 2008 ; Codis et al., 2018). Bien que la dose homologuée par hectare soit une dose maximale, aucune indication permettant de l'adapter n'est donnée aux viticulteurs. De ce fait, elle est considérée sur le terrain comme la dose d'emploi avec comme conséquence au plan juridique, en cas de recours contre la firme ou le distributeur, la pleine et entière responsabilité du viticulteur s'il n'a pas appliqué la pleine dose figurant sur l'étiquette du produit.

Pour répondre aux objectifs de réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires en viticulture, le projet CASDAR RT TechnoDoseViti n°1271 s'intéresse à l'adaptation des doses selon les caractéristiques de la végétation à traiter et les performances des pulvérisateurs afin de contribuer à la réduction de la dépendance de la filière viticole aux PPP. Porté par l'UMT Ecotech (IFV-INRAE-CTIFL) et la Chambre d'Agriculture de l'Hérault (CA34), le projet TechnoDoseViti vise à **développer un cadre cohérent pour analyser les gains de différentes solutions technologiques au regard de l'efficacité des matériels et des évolutions de l'expression de dose**. Il vise à répondre aux questions opérationnelles suivantes :

- Comment adapter la dose au développement et à l'architecture du végétal ?
- A quelle échelle spatiale est-il pertinent d'ajuster les doses (exploitation, adaptation inter-parcellaire, intra-parcellaire) et selon quels prérequis technologiques ?
- Quelles pourront être les économies d'intrants phytosanitaires ? Que peut-on attendre de la pulvérisation de précision ?

A partir de ces questions opérationnelles, et de l'hypothèse que la quantité de produit par surface de feuilles est une variable explicative majeure de la qualité de protection, plusieurs questions scientifiques ont pu être identifiées et ont guidé les travaux conduits dans le projet. Les premières questions sont instrumentales :

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

A supposer que l'on dispose de ces données de caractérisation, la question qui se pose vis-à-vis de l'objectif énoncé dans la problématique générale est d'utiliser ces données pour calculer des doses adaptées à une situation. La stratégie choisie s'est basée sur la modélisation statistique. Le questionnement scientifique associé peut s'exprimer ainsi :

- Quelles caractéristiques structurelles de la vigne mobiliser pour définir, à l'aide de modèles issus de données expérimentales, la dose en PPP à appliquer en fonction de la performance agro-environnementale de la technologie de pulvérisation utilisée ?

Les données collectées et analysées ont pu être interprétées au plan agronomique pour prendre des décisions basées sur les méthodes de modélisation proposées et identifier des scénarios technologiques pertinents pour la viticulture de demain. La dernière question à laquelle nous avons cherché à répondre peut-être formulée ainsi :

- Comment formaliser le cadre décisionnel de la pulvérisation de précision de manière à formuler des recommandations aux agro-équipementiers et utilisateurs de ces innovations ?

À partir de ces questions, nous pouvons formuler un objectif synthétique de ce projet :

Développer des modèles prédictifs des dépôts et de leur distribution statistique au sein de la végétation en fonction de la structure du couvert végétal (attributs et indicateurs végétatifs) en considérant des scénarios technologiques contrastés en termes de techniques d'application.

Ces modèles de prédiction ont servi :

- (1) à évaluer les conséquences opérationnelles, qui diffèrent suivant les conditions et les matériels d'application, des changements règlementaires liés à la nouvelle expression des doses basée sur le LWA (leaf wall area, exprimée en m²/ha de sol) ;
- (2) à construire des abaques d'adaptation des doses en fonction de la végétation à traiter et adaptées aux conditions du terrain qui pourraient à terme apparaître sur les étiquettes des produits ;
- (3) à évaluer l'intérêt du développement des techniques de pulvérisation de précision en viticulture et identifier des compromis technologiques permettant de guider les constructeurs dans la conception de leurs nouveaux modèles de pulvérisateurs

Le projet TechnoDoseViti s'articule autour de 3 actions dont les principaux résultats sont présentés dans le présent rapport :

1. **Action 1** : Modéliser la distribution des dépôts de produit phytosanitaire sur le végétal selon différentes méthodes de caractérisation du végétal et les performances du matériel ;
2. **Action 2** : Appliquer les modèles à l'expression des doses et au développement des technologies de pulvérisation de demain ;
3. **Action 3** : Transférer et diffuser les résultats du projet : faire connaître les possibilités de réduction de doses par l'adaptation à l'architecture du végétal et la pulvérisation de précision.

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

En s'appuyant sur les projets déjà conduits par l'UMT (projet CASDAR ArchiTechDoseViti 2014-2016 et projet Ecophyto LidarEcoDose 2017), cette première action visait à poursuivre la caractérisation de la distribution des dépôts de pulvérisation en fonction du type de pulvérisateur utilisé et des caractéristiques de la végétation traitée, afin de **constituer des modèles prédictifs des dépôts de produits sur la végétation**. Deux objectifs avaient été identifiés :

1. Constituer une base de données des références acquises et des fonctions de calculs pour alimenter les modèles. Cette base de données intègre deux éléments :
 - a. La caractérisation de la distribution des dépôts de pulvérisation sur la vigne ;
 - b. La caractérisation de l'évolution de la végétation par la mesure d'indicateurs végétatifs à l'aide de différentes méthodes.
2. Construire les modèles de prédiction des dépôts à partir du matériel utilisé et de l'architecture de la végétation prenant en compte plusieurs niveaux de complexité ;

Constitution d'une base de données des références acquises en vignes larges et vignes étroites pour alimenter les modèles de prédiction de la distribution des dépôts de produits phytosanitaires sur la végétation traitée.

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. Deux domaines viticoles avec des parcelles de cépages différents et de vigueur contrastée ont été choisis pour les essais menés 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 Chapitre 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 palissés, de type cordon Royat ou Guyot et un espace inter-rang de 2,5 m. En 2016, 2017 et 2020, les essais ont été réalisés à 4 dates. Deux techniques d'application ont été caractérisées par échantillonnage des dépôts de pulvérisation en 2016 et 2017 et une troisième technique d'applications a été caractérisée en 2020 :

- Une voûte pneumatique traitant tous les 4 rangs qui est un appareil peu performant mais représentatif du matériel et des pratiques majoritaires dans certains vignobles (2016-2017) ;
- Un pulvérisateur de type face par face avec descentes dans le rang qui est un appareil performant mais plus onéreux et moins maniable au vignoble (2016-2017) ;
- Une voûte pneumatique traitant tous les 2 rangs qui est un appareil peu performant mais qui, passé tous les 2 rangs, offre un compromis en rapidité et qualité de traitement (2020).

Ces trois techniques d'applications appareils ont été choisies car leur niveau de performance très contrasté permet d'encadrer les pratiques rencontrées sur le terrain.

Les données expérimentales utilisées pour la modélisation de la distribution des dépôts de pulvérisation dans 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 PULVETROIT) a été mobilisé pour financer la participation des chambres à l'accompagnement des essais sur le terrain (logistique et appui es équipes IFV et INRAE à la réalisation des mesures sur le terrain).

Deux configurations de techniques d'applications représentatives des pulvérisateurs utilisés en vignes étroites (face par face par le dessus et face par face avec descentes dans l'inter-rang) ont été caractérisées par échantillonnage des dépôts de pulvérisation en 2019 et 2021 sur ces deux vignobles.

Les données comprennent les variables de végétation (dimensions mesurées manuellement et/ou données LiDAR) et les échantillonnages de dépôts réalisés de façon structuré dans la végétation pour chaque pulvérisateur à modéliser. Le tableau ci-après présente l'ensemble des acquisitions réalisées dans les contextes des vignes larges et étroites dans le cadre du projet :

Année	Région	Domaine	Nombre dates d'expérimentation	Nombre de parcelles	Nombre de placettes de 15m échantillonnées	Acquisitions			Techniques d'application
						Mesures manuelles	Mesures dépôts	LIDAR	
2016	Languedoc	Max 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	✓	✓	✗	face par face classique (jet porté) // face par face par-dessus (pneumatique)
2019	Saône et Loire	CA71	3	4	24	✓	✓	✗	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	✗	✗	✓	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)

*séries de mesures pas complètes avec soit l'absence de mesures de dépôts et/ou d'acquisitions LIDAR

Tableau 1 : Tableau récapitulatif de toutes les acquisitions réalisées et servant à la mise en place des modèles de prédiction des dépôts. Le champ « mesures manuelles » correspond aux mesures manuelles des paramètres de végétation alors que le champ « LiDAR » correspond aux mesures de la végétation réalisées à l'aide du capteur LiDAR.

Sur la base des éléments présentés dans le tableau ci-dessus, nous disposons de plusieurs bases de données :

Base de données dépôt – végétation :

- 1 BDD (**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 TFI)
- 1 BDD **Vigne large** 2020) : mesure des dépôts pour voûte 1rang/2 avec données manuelles de végétation + données LiDAR de végétation (e , h , TFI) (**Il manque à la fusionner avec BDD précédente**)
- 1 BDD **Vigne étroite** avec données 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 , TFI) mais incomplètes (Des problèmes techniques intervenus sur le Domaine Bouchard qui a prêté 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).

Base de données végétation : mesures LIDAR et manuelles :

- 2019 MAS PIQUET PARCELLES ENTIERES (5 parcelles du Domaine Mas Piquet ont été entièrement scannées à 7 dates différentes sur la saison)

A 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)

Caractérisation de la distribution des dépôts de pulvérisation

La méthodologie d'échantillonnage des dépôts de pulvérisation développée permet de connaître leur répartition au sein du feuillage (**Annexe n°1**). Le schéma d'échantillonnage des dépôts a légèrement différé entre les années 2016 et 2017-2020. En 2016, quatre segments de vigne (1 segment = 1 cep) consécutifs ont été échantillonnés au sein de chaque section de 15 m. Sur chaque segment de vigne, des collecteurs en polychlorure de vinyle (PVC) de 4 par 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 0,2 m de haut et 0,1 m de large. En 2017 et 2020, deux sous-sections de trois vignes (que l'on a appelé " trio ") ont été échantillonnées dans chaque section de 15 mètres. Au sein de chaque trio, une grille régulière des collecteurs PVC de 0,004 m² a été établie comme en 2016 ; cependant, à une densité plus faible

avec un espacement de 0,4 m verticalement et 0,1 m horizontalement. Chaque trio en 2017-2020 et chaque bloc de quatre vignes en 2016 seront appelés ci-après une " unité d'échantillonnage ". Au total, près de 12000 données unitaires de dépôt de pulvérisation ont été utilisées pour ces travaux de modélisation. Des résultats peuvent en être extraits facilement permettant des analyses descriptives rapides des données. Par exemple, la figure 1 présente la répartition des dépôts de pulvérisation au sein du feuillage pour deux des appareils étudiés (voûte pneumatique traitant tous les 4 rangs et un pulvérisateur de type face par face) et à quatre stades végétatifs.

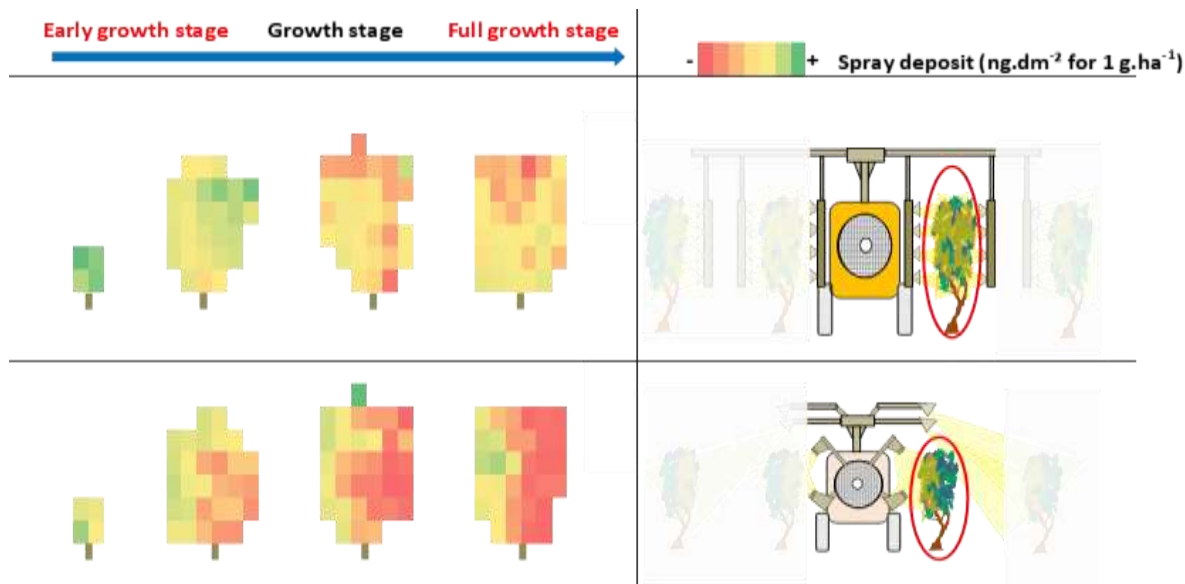


Figure 1 : Répartition des dépôts de pulvérisation (exprimé en ng/dm^2 pour 1 g/ha) au sein du feuillage pour quatre stades végétatifs et deux types de pulvérisateurs (appareil face par face en haut et voûte pneumatique en bas). L'échelle de couleur permet d'apprécier les parties du végétal avec un dépôt 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. Un article dans Data In Brief est relatif à l'acquisition des données. D'autres intègrent les moyens de leur valorisation pour la mise en place de modèles de prédiction des dépôts en fonction des indicateurs végétatifs mesurés avec le LIDAR 2D.

Protocole de mesure des dépôts sur vignes larges et vignes étroites : grille de placement, méthode placette/trios, nombre de collecteurs. Protocole et données de l'année 2016 (Mas Piquet, Hérault) présentés dans un data paper **Data In Brief** de 2018 :

Codis, S., Carra, M., Delpuech, X., Montegano, P., Nicod H., Ruelle, B Ribeyrolles X. , Savajols, B., X., Vergès, A., Naud, O., (2018). *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

Article sur la valorisation en vignes étroites des méthodes d'échantillonnage et de modélisation multivariée de prédiction de la distribution statistique des dépôts développer lors du projet PULVETROIT, soumis en mars 2022 à la conférence internationale d'horticulture (IHC 2022) (abstract accepté).

A. Cheraïet, O. Naud, S. Codis, P. Petitot, F. Bidaut, M. Liebart, J. Taylor. *Testing the suitability of a terrestrial 2D LiDAR scanner for 3D canopy characterization of narrow vineyards to optimize the spraying process of pesticides*.

Sur l'échantillonnage 2017 et la modélisation multivariée en vignes larges, voir plus loin l'article de 2021 dans Computers and Electronics in Agriculture.

Article sur la validation de méthodologie d'échantillonnage des dépôts (placement spatialement structuré de collecteurs artificiels) soumis en mars 2022 à la revue OENO One.

A. Cheraïet, O. Naud, M. Carra, S. Codis and J. Taylor (2022). *Evaluation of the distribution of intercepted spray deposits within a vine canopy from measurements on artificial targets and real leaves*. Expérimentation spécifique de 2018 au domaine du Chapitre.

Mémoire de thèse de Anice Cheraïet :

Cheraïet (2020). *Modélisation expérimentale et statistique des relations entre caractéristiques morphologiques de la vigne et dépôts de pulvérisation : application à l'agriculture de précision*. Présentée par Anice Cheraïet le 18 décembre 2020. Thèse sous la direction de James Taylor.

Caractérisation de l'évolution de la végétation par la mesure d'attributs et d'indicateurs végétatifs

En parallèle de ces mesures de dépôts de pulvérisation, la végétation étudiée 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 (Light Detection And Ranging) couplé à un GNSS RTK embarqué sur un tracteur. La technologie LiDAR est une technologie de numérisation fondée sur le principe de la télémétrie. Il s'agit d'un système de détection actif qui, par la mesure du temps de propagation aller et retour de rayonnement lumineux émis par un laser, permet de déterminer la position et la distance d'une cible par rapport à l'émetteur. Ce dispositif génère des nuages de points représentant la vigne étudiée en trois dimensions. A partir de ces nuages de points, sont estimés des attributs végétatifs que nous appelons « primaires » car présentant des caractéristiques physiquement indépendantes (hauteur, épaisseur, porosité) et des indicateurs végétatifs plus intégratifs (Leaf Wall Area qui dépend de la hauteur et de la largeur d'inter-rang, Tree Row Volume, qui dépend de ces mêmes grandeurs et de l'épaisseur).

Pour estimer de manière robuste et automatisée des attributs et indicateurs végétatifs, un algorithme nommé Bayesian Point Cloud Classification (BPCC) qui applique une méthode de filtrage automatique pour éliminer les artefacts et les données non liées à la vigne, puis classe et sépare la zone de la canopée des autres composantes de la vigne (tronc, végétation, fils de palissage) sans intervention interprétative de l'opérateur a été développée. A partir de ce prétraitement une estimation de la hauteur, la largeur et de la porosité du couvert végétal a été effectuée pour l'ensemble des unités d'échantillonnage.

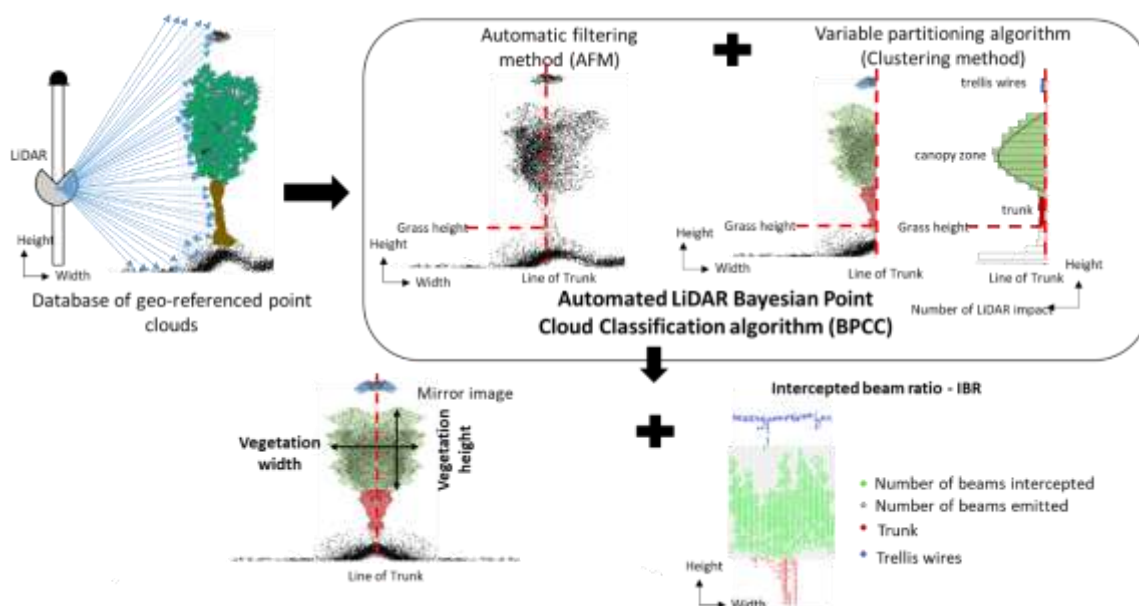


Figure 2 : Workflow illustrant les différentes étapes de prétraitement des nuages de points LiDAR permettant d'aboutir aux calculs de la hauteur, épaisseur et porosité du couvert végétal.

Les données acquises (mesures de dépôts de pulvérisation et relevés d'attributs et d'indicateurs végétatifs à partir d'acquisitions manuels et LiDAR) dans le cadre de ce projet et précédemment (projet LidarEcoDose) ont été rassemblées dans une base de données multi-sites, robuste et fonctionnelle pour l'analyse de données. Au total, 126 unités de végétation ont été échantillonnées. Cette base de données a permis de construire, calibrer et évaluer les modèles de prédiction de la distribution statistique des dépôts de produit phytosanitaire sur le végétal.

Les détails concernant les méthodes de calculs et de paramétrisation de l'algorithme BPC sont donnés dans l'article suivant :

Méthode de traitement des nuages de points LIDAR pour le calcul d'indicateurs végétatifs présentée dans la revue Biosystems Engineering. Cet article mobilise les données LiDAR et manuelles de 2019 à Mas Piquet
Cheraïet A., Naud O., Carra M., Codis S., Lebeau F., Taylor J. (2020). 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.

Construction des modèles de prédiction des dépôts à partir du matériel utilisé, de l'architecture de la végétation et le raisonnement d'ajustement de la dose

Des modèles statistiques multivariés permettant de prédire la distribution des dépôts foliaires interceptés en fonction des attributs primaires végétatifs (hauteur, épaisseur et densité) ont été construits, calibrés à l'aide des données acquises en 2017, et validés par rapport aux données acquises en 2016 pour le cas des vignes larges. Ces modèles statistiques multivariés ont été évalués en termes de qualité de prédiction et d'incertitude par rapport aux modèles univariés proposés précédemment, basés sur l'indicateur végétatif (LWA) (projet CASDAR ArchiTechDoseViti (2013-2016)) sur une saison de croissance complète.

Article sur la mise en place des démarches de modalisation des quantités moyennes de dépôts de produit sur la végétation en fonction d'indicateurs végétatifs mesurés manuellement et à partir d'un capteur LIDAR. Article publié dans la revue Innovations Agronomiques de l'INRAE.
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.

Un article publié dans la revue *Computers and Electronics in Agriculture* présente les méthodes développées pour la prédiction des distributions de dépôts en fonction de la végétation d'une part, et du pulvérisateur utilisé d'autre part. L'originalité de ce travail est d'avoir développé des modèles multivariés permettant de prédire chacun des 9 déciles de dépôts en fonction de la hauteur de la végétation, de son épaisseur et de la porosité mesurée avec le LiDAR :

Méthode de modélisation multivariés de la distribution des dépôts en fonction de paramètres végétatifs issus du LiDAR
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

Des **modèles de prédiction de la distribution des dépôts en vignes larges et vignes étroites** avec différents appareils sont disponibles sur la base des données manuelles de végétation en entrée mais également des données LiDAR. Les modèles multivariés sont bien plus précis que les modèles monovariés. Avec ces derniers, il est possible de réaliser des comparaisons et de réaliser des méthodes de gestion de dose plutôt conservatives compte-tenu des erreurs prédictives locales. Avec les modèles multivariés, et en prenant en compte les distributions au lieu de valeurs moyennes, une prédiction opérationnelle pour gérer les doses avec précision est obtenue.



Important : A noter qu'il manque une ou deux saisons d'acquisition en vignes étroites : durant la première saison d'expérimentation, (2019), nous n'avions pas le LIDAR en vignes étroites ce qui ne nous a pas permis de constituer les modèles de prédiction des dépôts en fonction des données Lidar de la végétation. En 2021, deuxième saison, la météorologie difficile du début de campagne (gel sur la plupart des parcelles) ainsi que des problèmes techniques sur les pulvérisateurs servant de support aux expérimentations n'a pas permis d'acquérir une série complète de données. Ainsi, des données complémentaires sont nécessaires en vignes étroites pour stabiliser les modèles et tester leur généralité pour les 2 types de pulvérisateurs qui ont été évalués (face par face par le dessus et face par face dans l'inter rang). Les résultats acquis en vignes étroites sont en train d'être mis en forme pour une communication écrite dans le colloque « *International Symposium on Mechanization, Precision Horticulture, and Robotics: Precision and Digital Horticulture in Field Environments* » qui se déroulera sur Angers en août 2022.

Cheraiet A., Naud O., Codis S., Petitot P., Bidaut, F., Liebart M., Lebeau F., Taylor J. (2022) 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 International Symposium on Mechanization, Precision Horticulture, and Robotics: Precision and Digital Horticulture in Field Environments, Angers France (Résumé accepté)

Action 2 : Appliquer les modèles à l'expression des doses et au développement des technologies de pulvérisation de demain

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 développés dans l'action 1 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, d'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 du capteur LiDAR

Le principe sur lequel repose la construction des abaques est le suivant : chaque situation (1 pulvérisateur utilisé sur 1 parcelle aux caractéristiques données) permet de calculer une distribution de dépôts prédite sur le végétal. Cette distribution est comparée à une distribution de référence considérée par hypothèse comme suffisante pour protéger la plante. 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. Les 5 premiers déciles correspondant aux parties du végétal les moins bien protégées sont considérés dans l'approche proposée.

Plusieurs hypothèses alternatives ont été formulées pour fixer une distribution de dépôt de référence qui donnerait satisfaction d'un point de vue de la protection phytosanitaire, selon différents niveaux de risques :

- Voûte pneumatique utilisée 1 rang sur 2 en pleine végétation
 - Pulvérisateur Face par Face à jet porté en pleine végétation
 - Voûte pneumatique utilisée 1 rang sur 2 au stade floraison
- *
risque
↑
-

A partir de cette distribution de référence, des préconisations de doses à appliquer sont formulées en utilisant les modèles de prédiction précédemment construits. Par exemple, en prenant comme distribution de référence la performance d'un pulvérisateur face par face en pleine végétation (hauteur de végétation 1,5m et épaisseur 0,83m), la Figure 3 présente les différentes étapes permettant de calculer un coefficient de dose à appliquer (en % de la dose homologuée) pour une vigne avec un espacement entre rang de 2.5m, une hauteur de 0.8m et une épaisseur de 0.5m. La distribution modélisée est d'abord comparée à la distribution de référence. Puis, des

préconisations de doses (en pourcentage de la pleine dose) peuvent être déduites et ce, pour chaque décile de dépôt considéré par l'expression suivante :

$$\%Dose = \frac{\text{décile } \text{Dépot}_{\text{stade réf}}}{\text{décile } \text{Dépot}_{\text{modélisé}}} \times 1g \cdot ha^{-1} \times 100$$

Afin de garantir la distribution de référence pour chacun des 5 premiers déciles, le maximum des coefficients de dose proposé est enfin calculé.

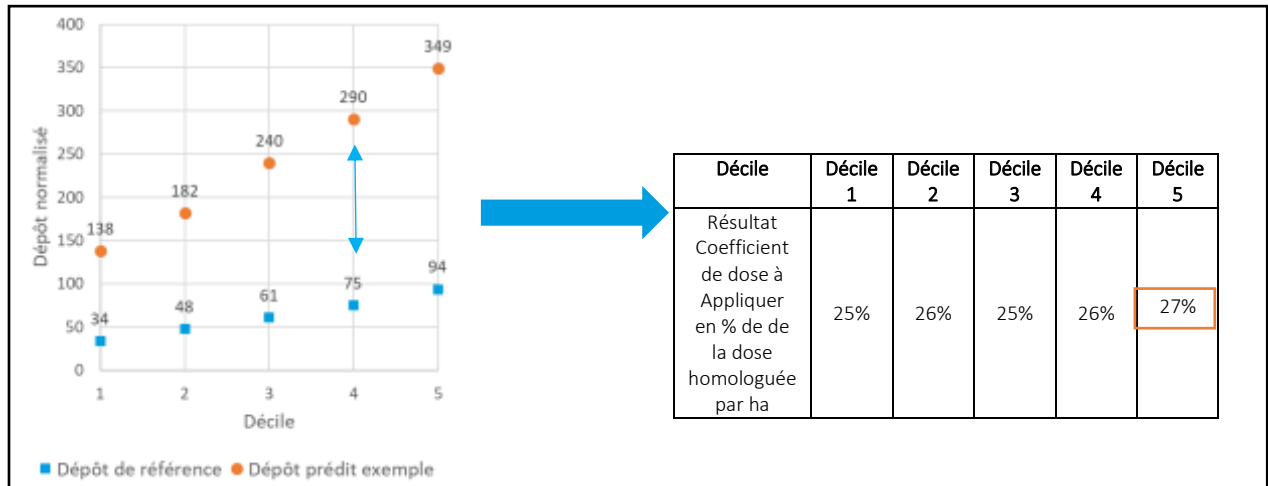


Figure 3 : Mise en œuvre de la méthodologie permettant la définition des abaques d'ajustement des doses en fonction du pulvérisateur et des caractéristiques de la végétation à traiter. Le cas présenté est celui d'une vigne d'espacement entre rangs de 2.5m, une hauteur de 0.8m et une épaisseur de 0.5m traitée par un face par face sur la base des distributions avec l'hypothèse de distribution de référence : face par face à jet porté en pleine végétation.

Dans 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 (ici, les paramètres correspondent au début de floraison), on obtient une forte réduction potentielle de dose (un peu plus du quart de dose).

En déclinant cette approche sans considération de sensibilité particulière du pathosystème à un stade de croissance donné, il est alors possible de formuler des tables théoriques d'adaptation de doses sur la base des seuls paramètres géométriques inter-rang, épaisseur et hauteur du couvert. Ceci est résumé dans la figure suivante pour les 2 types d'appareils qui ont servi de support à la construction des modèles dans le contexte des vignes larges dans l'action 1.

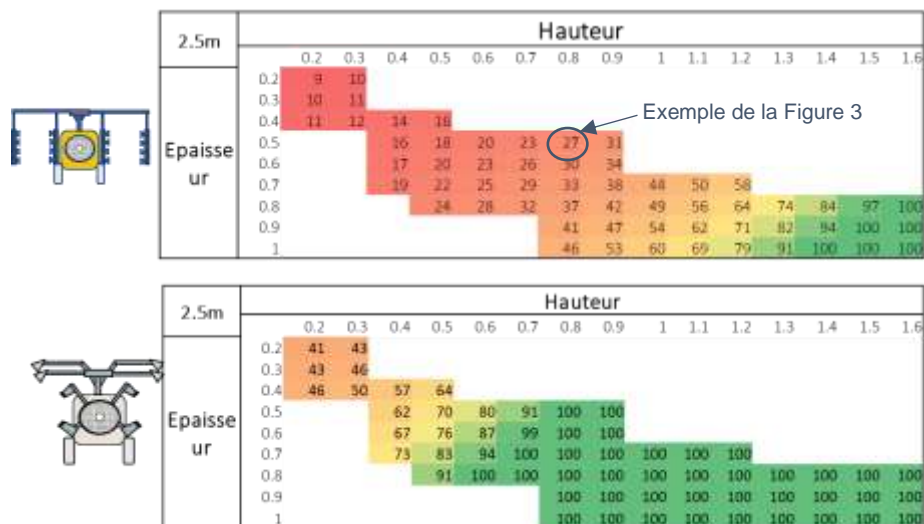


Figure 4 : Abaque d'adaptation des doses de produits phytosanitaires tenant compte de l'espacement entre rang, de la hauteur, de l'épaisseur de végétation et de la technique d'application basée sur l'étude de la distribution des

dépôts de pulvérisation. La distribution de dépôts de référence correspond à l'utilisation d'un pulvérisateur face par face sur une pleine végétation à 2.5 mètres d'inter-rang.

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, pourrait ensuite être évaluée.

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

Dans cette tâche, les modèles établis dans l'action 1 ont permis d'établir un cadre conceptuel permettant :

- d'évaluer les économies d'intrants phytosanitaires à différentes échelles (parcelle, exploitation, éventuellement plus large) en fonction de différents scénarios technologiques,
- de caractériser les potentialités de nouvelles solutions de pulvérisation de précision en terme de réduction des intrants phytosanitaires
- de définir des critères d'évaluation permettant de comparer les résultats et intégrant une approche de gestion de risque épidémiologique (quantités d'intrants économisées, coût, ...) ?

Présentation générique du cadre d'évaluation

Le Domaine du Mas Piquet (Hérault, France) qui a servi à établir les modèles de prédiction des dépôts en vignes larges a également été utilisé comme support d'étude du cadre d'évaluation développé dans le projet et la thèse d'Anice Cheraïet. En 2019, durant la saison végétative, la végétation de trois parcelles du domaine (*Aglae*, *Franquet* et *Terre Blanche*) a été scannée avec le LiDAR 2D à trois dates (T1 : 24 avril, T2 : 28 mai, T3 : 22 juillet) entre le stade quatre à cinq feuilles étalées (stade 13) et le stade fermeture de la grappe (stade 77). Sur l'ensemble des trois parcelles, la largeur de l'inter-rang était de 2,5 m et l'espacement entre ceps de vigne sur le rang était de 1 m.

Définition des scénarios technologiques

Dans cette étude, les scénarios technologiques sont établis et définis par une combinaison de 4 paramètres : i) une manière de caractériser la végétation (mesures manuelles ou mesures par LiDAR), (ii) une unité d'expression de la dose (dose par hectare, fixe, dose LWA, dose abaque), (iii) une échelle spatiale de décision de la dose (dose définie au niveau du domaine viticole, de chaque parcelle ou en intra-parcellaire sur chacune des unités spatiales), (iv) une typologie de pulvérisation (voûte pneumatique passée tous les 4 rangs, voûte pneumatique passée tous les 2 rangs ou pulvérisateur face par face).

Parmi tous les scénarios technologiques envisageables, quatre ont été retenus afin d'illustrer la démarche en mettant l'accent sur l'effet de la modification de l'échelle spatiale de décision de la dose (tableau 2 page suivante).

Scénario 1 : Scénario de référence très répandu sur les vignobles de l'arc méditerranéen. Un modèle de pulvérisateur type voûte pneumatique utilisée tous les 4 rangs appliquant la pleine dose homologuée durant toute la saison de végétation à l'échelle du domaine. Ce scénario est représentatif des pratiques actuelles en vignes larges : un matériel peu performant est utilisé pour appliquer, toute la saison, une seule et même dose sur toutes les parcelles du domaine. La dose appliquée à l'hectare est la dose homologuée inscrite sur l'étiquette du produit.

Scénario 2 : pulvérisateur face par face avec une échelle spatiale de décision de la dose au niveau du domaine. Dans ce scénario, un pulvérisateur performant applique la même dose/ha sur toutes les parcelles du domaine. La dose appliquée à chaque date de traitement est adaptée en fonction des caractéristiques de la végétation mesurée au moment du traitement sur le domaine dans une approche garantissant que tout le domaine reçoit une dose suffisante. Plus précisément, une dose préconisée idéale est calculée grâce aux modèles de prédiction

pour chaque unité spatiale (pixel 3 m) et la valeur du 95^{ème} centile de la distribution des doses préconisées par unité spatiale au niveau de l'ensemble du domaine est appliquée pour toutes les parcelles du domaine.

Scénario 3 : un pulvérisateur face par face avec une échelle spatiale de décision de la dose au niveau de chaque parcelle. Dans ce scénario, un 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 par unité spatiale pour chacune des parcelles.

Scénario 4 : un pulvérisateur face par face en rupture technologique avec une échelle d'ajustement de la dose au niveau de chaque unité spatiale de 3m. Dans ce scénario, la notion de rupture technologique fait référence à la technologie VRA pour « variable rate application » ou technologie d'application à taux variable. Nous faisons l'hypothèse que le pulvérisateur face par face présente la particularité de pouvoir adapter instantanément la dose à appliquer à une échelle intra-parcellaire en fonction d'une carte de préconisation générée à partir de mesures issues d'un LiDAR. Nous faisons l'hypothèse que ce pulvérisateur permet d'adapter la dose appliquée à la résolution d'une unité spatiale (pixel 3 m).

Scénarios technologiques	Mesure mobilisée	Expression et gestion de la dose	Echelle spatiale d'application de la dose	Typologie du pulvérisateur
1	na	Pleine dose homologuée	Domaine	Voûte passage 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

Tableau 2 : Présentation des scénarios technologiques considérés

Les scénarios technologiques ont été comparés 2 à 2 dans une logique de progression de la précision afin d'illustrer le potentiel de ce cadre d'évaluation :

1. **Scénario 1 vs scénario 2** : on quantifie ici le gain lié à un changement de matériel d'application (passage d'une voûte à un pulvérisateur face par face) et à une évolution de la dose au cours de la saison (passage de la pleine dose homologuée à une dose adaptée à la végétation à traiter au niveau du domaine, pour chaque période de traitement phytosanitaire).
2. **Scénario 2 vs scénario 3** : on quantifie ici le gain lié à une prise de décision de la dose à l'échelle parcellaire plutôt qu'à l'échelle du domaine.
3. **Scénario 3 vs scénario 4** : enfin, l'évaluation de l'apport de technologies en rupture peut également être conduite en comparant une prise de décision de la dose à l'échelle intra parcellaire plutôt qu'à l'échelle de la parcelle.

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 (pixel 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 l'étude, deux hypothèses de niveaux de risque intitulées « inférieur » et « supérieur » ont été proposées :

- **Pour l'hypothèse de niveau de risque « inférieur »**, 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) sur une végétation pleinement développée.
- **Pour l'hypothèse de niveau de risque « supérieur »**, nous considérons comme référence la distribution de dépôt de produit obtenue en appliquant la dose homologuée avec le pulvérisateur 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 (pixel 3 m), la distribution des dépôts prédite est d'abord comparée à la distribution de référence. Puis, des préconisations de doses à appliquer (en % de la dose homologuée) permettant d'assurer pour tous les déciles la distribution de référence considérée sont calculées.

La comparaison entre la distribution des dépôts prédite par les modèles multivariés et les « distributions de dépôt de référence » permet ainsi d’obtenir des cartes de préconisation de dose à appliquer (en % de la dose homologuée) pour assurer le dépôt de référence. Ces cartes peuvent ensuite être interprétées et analysées afin de comparer les scénarios technologiques.

Critère d’évaluation des scénarios technologiques

Les scénarios technologiques de pulvérisation ont été évalués pour chaque date selon l’échelle spatiale de décision de la dose du scénario considéré à partir d’un critère agronomique, le pourcentage de dose à appliquer (exprimé en % de la dose homologuée) qui 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 globalement appliqué sur une parcelle est égal à la moyenne des pourcentages préconisés pour chaque unité spatiale dans la parcelle

Analyse des scénarios technologiques

Les figures 5 et 6 montrent l’évolution du pourcentage de la dose homologuée à appliquer pour assurer le dépôt de référence sur la végétation au cours de la saison de végétation (T1, T2, T3) pour les quatre scénarios technologiques évalués.

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 noir), la pleine dose homologuée (niveau 100%) a été appliquée aux trois dates. Pour le scénario 2 (trait en pointillé rouge), la dose à appliquer (ou plus exactement son pourcentage) correspond à la valeur du 95^{ème} centile de la distribution des doses préconisées à l’échelle 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 à l’échelle de chaque parcelle (Aglae, Franquet, Terre blanche). Pour le scénario 4 (point vert), le pourcentage de dose homologuée évalué correspond à la moyenne à l’échelle de chaque parcelle des pourcentages de dose pour chaque unité. À partir de cette analyse globale, plusieurs comparaisons permettant d’illustrer le potentiel de ce cadre d’évaluation de scénarios technologiques ont été réalisées.

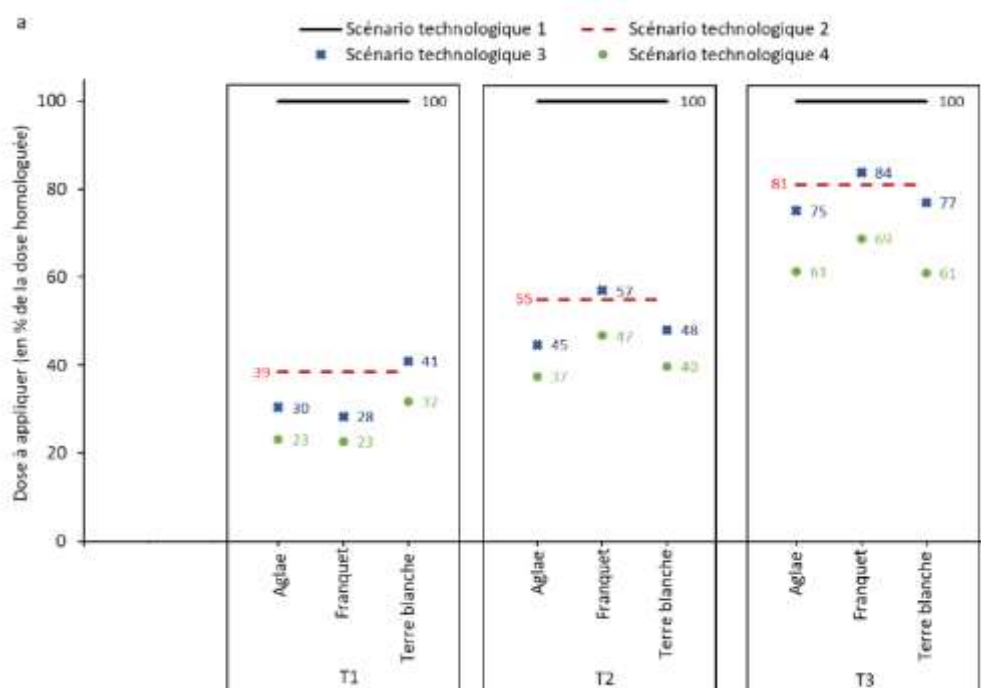


Figure 5 : Evolution du pourcentage de la dose homologuée à appliquer au cours de la saison de végétation pour les quatre scénarios technologiques évalués en considérant l’hypothèse de niveau de risque de protection phytosanitaires supérieur.

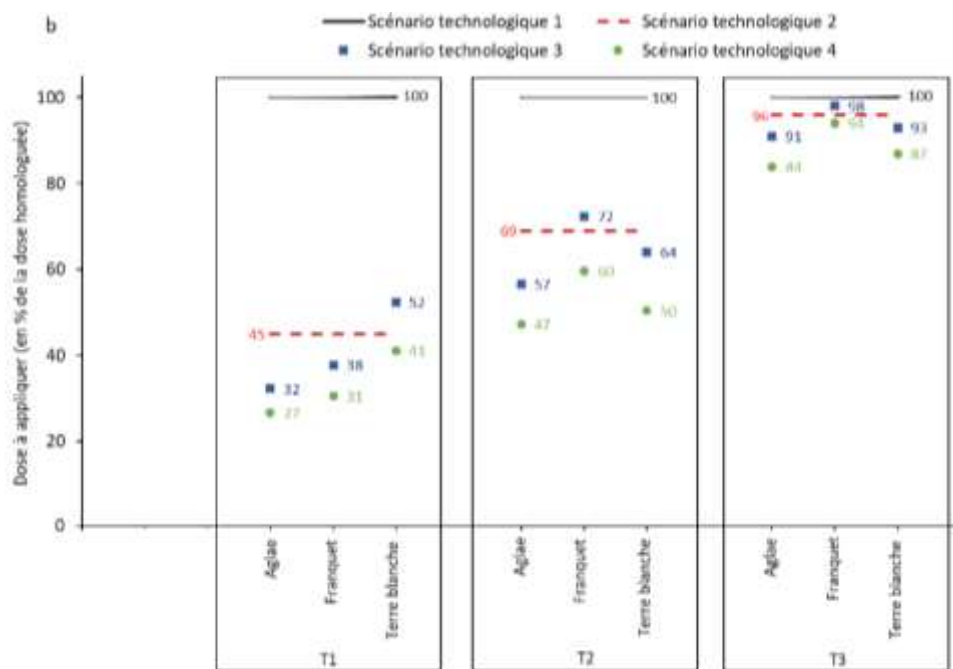


Figure 6 : Evolution du pourcentage de la dose homologuée à appliquer au cours de la saison de végétation pour les quatre scénarios technologiques évalués en considérant l'hypothèse de niveau de risque de protection phytosanitaire inférieur.

Pour le scénario 1, la dose homologuée a été appliquée, ce qui conduit à appliquer 100 % de la dose homologuée à l'échelle de la parcelle quelle que soit l'hypothèse de niveau de risque (supérieur ou inférieur), c'est-à-dire que les cartes sont identiques pour les deux niveaux de risque de la protection phytosanitaire.

Pour les scénarios 2 et 3, la dose à appliquer correspond à la valeur du 95^{ème} centile de la distribution des doses préconisées respectivement à l'échelle du domaine et de la parcelle.

Pour le scénario 4, la dose à appliquer est adaptée à la résolution d'une unité spatiale (pixel 3 m).

Résultats : Evolution du pourcentage de la dose homologuée à appliquer au cours de la saison de végétation pour les 4 scénarios technologiques évalués en considérant deux hypothèses de niveaux de risques de protection phytosanitaire

Comparaison des scénarios technologiques deux à deux en termes de % de réduction de la dose homologuée en considérant la moyenne des réductions de doses pour les 3 parcelles et les 3 dates considérées. Les pourcentages de réduction de doses indiqués sont exprimés relativement à la dose homologuée et ont été calculés à partir de la moyenne des 3 parcelles et des 3 dates.

Modalités comparées	Critères évalués	Pourcentage de réduction de la dose homologuée	
		niveau de risque supérieur	niveau de risque inférieur
Passage du scénario 1 au scénario 2	changement de matériel d'application + évolution de la dose au cours de la saison	41,5 %	30 %
Passage du scénario 2 au scénario 3	changement d'échelle spatiale de décision de la dose (du domaine à la parcelle)	46,1 %	33,6 %
Passage du scénario 3 au scénario 4	changement d'échelle spatiale de décision de la dose (de la parcelle en intra-parcellaire)	56 %	42,1 %

Tableau 3 : Présentation des réductions de doses permise par le passage d'un scénario à un autre pour les deux niveaux de risques considérés. Ces réductions de doses sont exprimées par rapport à l'application de la pleine dose/ha. On pourra ainsi lire que pour le niveau de risque supérieur, le passage du scénario 1 à 2 permettrait une économie de 58,5% de produit phytosanitaire par rapport à l'application de la pleine dose/ha, alors que le passage

du scenario 2 à 3 permettrait une économie supplémentaire de 4,6%. Enfin le passage du scenario 3 à 4 permettrait une économie de produit de près de 10% supplémentaire.

La présentation complète de la démarche de comparaison des scenarios technologiques est présentée dans le chapitre 6 (p.191→ 214) du mémoire de thèse d'Anice Cheraiet joint à ce dossier : Cheraiet (2020). *Modélisation expérimentale et statistique des relations entre caractéristiques morphologiques de la vigne et dépôts de pulvérisation : application à l'agriculture de précision*. Présentée par Anice Cheraiet le 18 décembre 2020 Sous la direction de James Taylor.

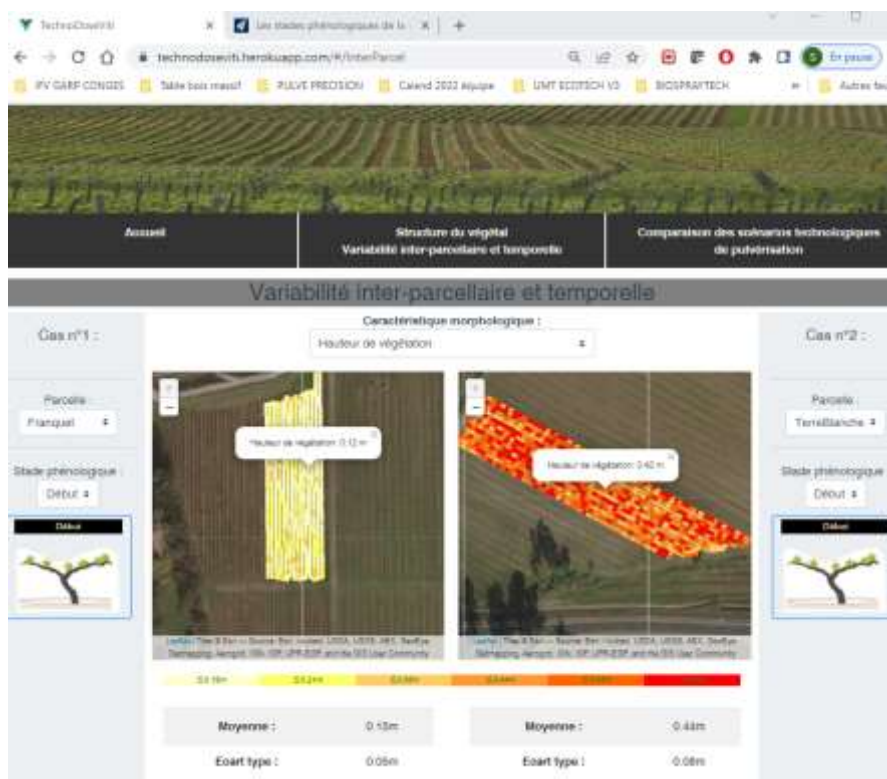
Démonstrateur TECHNODOSEVITI

Une partie des éléments relatifs ce sujet est également disponible sur le démonstrateur TECHNODOSEVITI qui a été développé pour illustrer la mise en œuvre du cadre conceptuel d'analyse sur la comparaison de 3 scenarios technologiques : Voûte ¼, face par face et panneaux récupérateurs.

Lien : <https://technodoseviti.herokuapp.com/>

Le démonstrateur se compose de deux onglets :

1. L'onglet « **Structure du végétal : variabilité inter-parcellaire et temporelle** » permet de visualiser et de comparer les attributs végétatifs primaires (hauteur de végétation (m), épaisseur de végétation (m), densité de végétation (%)) ainsi que la surface de haie foliaire (analogue au Leaf Wall Area en $m^2 \cdot ha^{-1}$) mesurés à l'aide du LiDAR entre deux parcelles différentes à une même date ou sur une même parcelle à différentes dates. La résolution spatiale est de trois mètres. Un exemple de cartes illustrant la variabilité spatiale de la densité de végétation observée entre deux parcelles à différentes dates sont présentées ci-après.



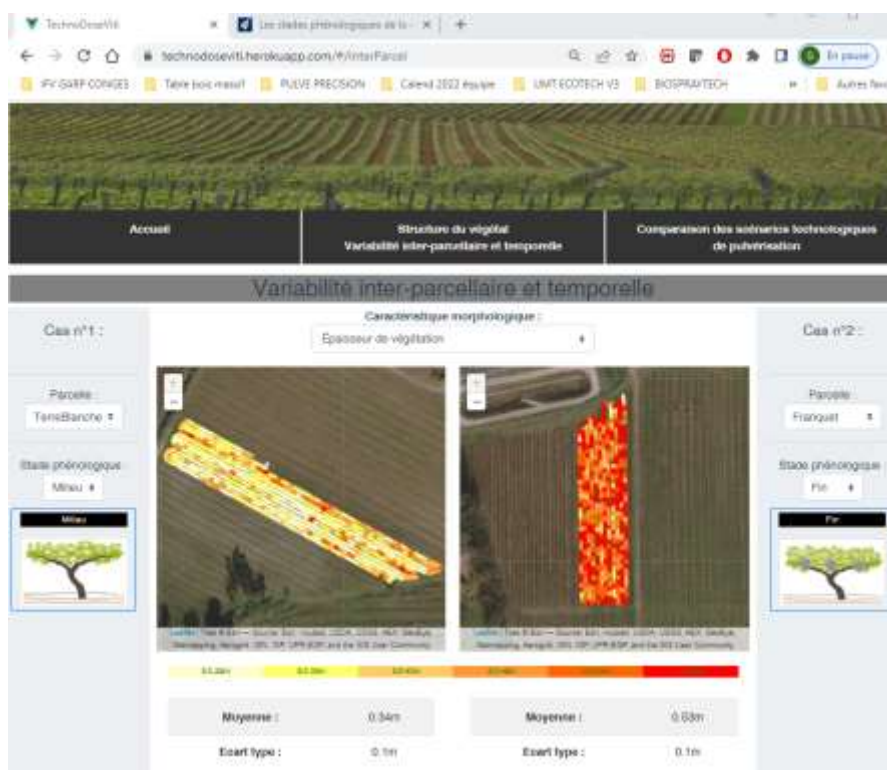


Figure 7 et 8 : 1^{er} onglet du démonstrateur permettant de comparer les paramètres végétatifs (hauteur, épaisseur, densité) sur 3 parcelles à 3 stades végétatifs. Ces paramètres végétatifs sont issus de mesures LiDAR.

2. L'onglet « **Comparaison des scénarios technologiques** » permet de choisir deux scénarios différents et de comparer par une visualisation graphique les doses à appliquer pour assurer, pour chacun des 2 scénarios, le niveau de dépôts de produit de référence choisi. Les doses à appliquer sont exprimées en pourcentage de la dose homologuée. Les deux niveaux de risque en termes de protection phytosanitaire présentés précédemment dans l'analyse des scénarios sont proposés et sont à choisir dès l'ouverture de l'onglet.

Un exemple de cartes permettant de visualiser la variabilité spatiale et de comparer les doses de produits phytosanitaires en considérant un changement de technologie de pulvérisation (passage d'une voûte pneumatique utilisée en passage 1 rang sur 4 à un appareil en jet porté en face par face) au stade de milieu végétation est présenté ci-après (Figure 9). Pour chaque unité spatiale de 3m, la carte représente le % de dose à appliquer pour assurer sur la plante le niveau de risque considéré ce qui équivaut à un dépôt de référence considéré.

Pour l'hypothèse de niveau de risque dit « sécurisée » (respectivement « risquée »), nous considérons comme distribution de référence le dépôt de produit obtenu en appliquant la dose homologuée avec le pulvérisateur le plus performant (face par face) (respectivement le moins performant, la voûte pneumatique utilisée tous les 4 rangs) sur une végétation pleinement développée. A l'inverse,

En choisissant l'hypothèse de niveau de risque « sécurisée », on remarque que pour le matériel le moins performant (voûte utilisée tous les 4 rangs), il faudrait appliquer dès le stade de milieu de végétation sur la parcelle Franquet 139% de la dose homologuée. Dans les mêmes conditions, il suffit d'apporter 59% de la dose homologuée avec l'appareil face par face pour obtenir le même niveau de dépôt sur le végétal. A noter que dans le démonstrateur, nous avons fait le choix de ne pas borner le % de dose homologuée à 100% qui correspond à la limite maximale réglementaire. Ce choix permet de comparer les situations entre elles.

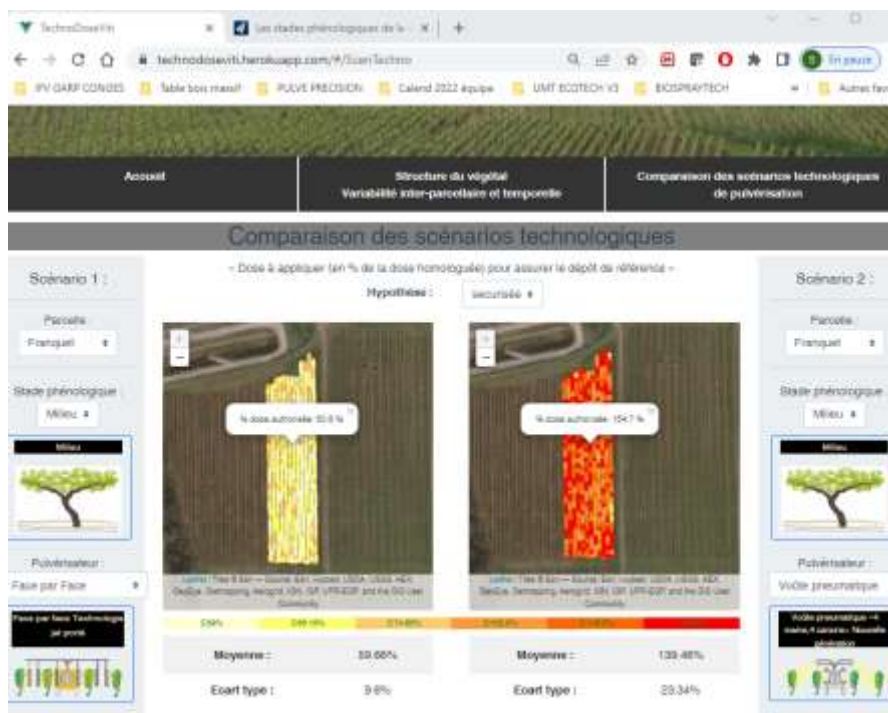


Figure 9 : Second onglet du démonstrateur TECHNODOSEVITI permettant de comparer les pourcentages de réduction des doses à appliquer sur chacune des parcelles pour assurer la distribution de dépôts de référence sur la vigne. Cet onglet permet de comparer les 3 scénarios technologiques (voûte pneumatique utilisées tous les 4 rangs, face par face et panneaux récupérateurs) aux 3 stades végétatifs sur les 3 parcelles.

Action 3 : Transférer et diffuser les résultats du projet : faire connaître les possibilités de réduction de doses par l’adaptation à l’architecture du végétal et la pulvérisation de précision

L’action 3 est relative au transfert des résultats au travers des valorisations à la fois scientifiques et professionnelles. Il s’est également agit de communiquer les résultats du projet aux autorités règlementaires et institutionnelles parties prenantes sur le sujet de l’expression des doses.

Les détails sur la valorisation scientifique et technique sont donnés dans le chapitre IV de ce rapport – Valorisation des travaux achevés et à venir.

II – Les modalités de suivi du projet

• **Modalités de pilotage :**

- Comités de pilotage

Deux comités de pilotage ont été organisés durant la durée du projet :

- Le premier COPIL s’est déroulé à mi-parcours le 29 novembre 2019 ;
- Le second COPIL s’est déroulé à la fin du projet le 10 février 2022 pour dresser le bilan et les perspectives à l’issue du projet avec l’ensemble des partenaires.

Les compte-rendus de ces deux comités de pilotage ainsi que les supports Powerpoint qui ont guidé les présentations et discussions sont joints en **Annexe 2 et 3**.

Un **rapport technique intermédiaire** a été produit en février 2020. Il est également joint en annexe (**Annexe 4**)

- Autres modalités de pilotage

Les équipes INRAE et IFV associées à la réalisation du projet travaillent ensemble et sont localisées toutes les deux sur le site de INRAE Montpellier Lavalette dans le cadre de l'Unité Mixte Technologique ECOTECH. Les relations avec le troisième partenaire (la chambre d'Agriculture de l'Hérault) sont très fréquentes dans le cadre de ce projet mais au-delà dans le cadre de différents projets de développement et de communication, la participation au dispositif PERFORMANCE PULVÉ® (<http://www.performancepulve.fr/>) et au groupe régional des conseillers agro-équipement.

Les essais conduits dans le contexte des vignes étroites ont été réalisés en partenariat avec le CIVC en Champagne, et avec les Chambres d'agriculture de Saône et Loire (CA71) et de Côte d'Or (CA21) en Bourgogne sur les campagnes 2019 et 2021. Les échanges avec ces partenaires sont très fréquents dans le cadre de ce projet mais également au travers leur participation au titre d'experts à la commission technique du dispositif PERFORMANCE PULVÉ®.

III – Perspectives

- Apport du projet aux objectifs du plan Ecophyto II+ de réduction de l'usage et des risques liés aux produits phytopharmaceutiques

Ce projet contribue à la meilleure compréhension des liens entre les quantités de produits phytosanitaires pulvérisés à l'hectare base du système d'expression des doses et les quantités de produits effectivement déposées sur le végétal, c'est à dire la part de produit participant à la protection phytosanitaire. En allant jusqu'à la prédiction de la distribution des dépôts sur les organes à protéger en fonction de la structure du végétal à protéger d'une part et du pulvérisateur d'autre part, ce travail ouvre la voie à la nécessaire meilleure compréhension des facteurs et des déterminants de l'efficacité des produits phytosanitaires, en particulier les produits de biocontrôle en identifiant les conditions d'application qui permettent d'utiliser au mieux les produits. Dans l'objectif de réduire significativement les quantités de produits phytosanitaires utilisées, ces connaissances seront également essentielles pour le développement mais surtout le déploiement de nouvelles techniques de pulvérisation de précision permettant d'adapter les doses au plus juste à l'échelle inter et intra-parcellaire en fonction des caractéristiques locales de la végétation et du pulvérisateur utilisé.

- Les points forts et les points faibles du projet

Un des facteurs de réussite de l'utilisation d'itinéraires à bas niveau d'intrants va notamment être la précision avec laquelle les produits sont appliqués et répartis sur le végétal à traiter. Cela demande de pouvoir caractériser les situations pour les évaluer, les comparer et identifier via l'évaluation biologique au champ les déterminants de l'efficacité des solutions phytosanitaires. Le projet TechnoDoseViti a permis de développer les briques qui permettront de répondre à ces questions.

Parmi les points forts de de projet sur l'action 1, on peut citer le fait qu'il s'agit de la première démarche au niveau international qui propose des prédictions de la distribution des dépôts et pas seulement des dépôts moyens en fonction de combinaisons d'indicateurs décrivant la végétation. Ces modèles tiennent également compte pour la première fois dans la littérature du type de pulvérisateurs utilisés.

A noter que nous avons mis en place une modalisation multivariée basée sur une combinaison de paramètres végétatifs que sont la hauteur, l'épaisseur et la densité de feuillage alors que la littérature fait état de modèles de prédiction des moyennes de dépôts en fonction d'indicateurs végétatifs agrégés comme le sont le TRV (Tree Row Volume ou volume de végétation) et la LWA (Leaf Wall Area ou surface de haie foliaire).

Parmi les autres points forts, on peut citer la généralité des méthodes ainsi que du cadre conceptuel développé permettant de comparer des scénarios technologiques. Faut de temps, le projet n'a pas permis de tester et d'appliquer le cadre conceptuel sur un nombre important de situations ce qui permettrait de mieux valoriser ce travail et l'approche, notamment au niveau du potentiel offert par les techniques de pulvérisation de précision quant à leur contribution potentielle à la transition agro-écologique. Nous envisageons de poursuivre ce travail

dans le cadre du 3^{ème} cycle de l'UMT ECOTECH pour lequel un dossier de renouvellement va être déposé le 20 mai prochain.

Parmi les points faibles, on pourrait également citer le besoin de valider au niveau biologique les hypothèses sur lesquelles nous avons basées les règles d'ajustement des doses. Ces règles seront testées dans le cadre d'essais biologiques au sein de projets à venir dans le cycle 3 de l'UMT ECOTECH et qui sont présentées dans le chapitre relatif aux suites envisagées.

- Les difficultés rencontrées

Deux évènements, le premier climatique, le second lié à la situation sanitaire due à la COVID19 et le confinement mis en place au printemps 2020 ont perturbé le déroulement du programme expérimental. En 2018, la halle pulvé de Montpellier, bâtiment de 2000m² abritant tous les outils (pulvérisateurs, matériel d'expérimentations laboratoire) s'est effondrée suite à un épisode de neige privant toute l'équipe de ses moyens d'expérimentations. Suite à cet évènement, le projet initialement prévu pour 3 ans (2018-2020) a fait l'objet d'une prolongation d'un an par avenant.



En 2020, le confinement nous a contraint à annuler les acquisitions de données dans le contexte des vignes étroites prévues dans le projet PULVETROIT. La mise en place de l'avenant a permis de limiter l'impact liés à évènements.

- Les suites envisagées

Les connaissances acquises dans le cadre de ce projet CASDAR vont être valorisées au travers de 2 projets conduits par l'UMT.

Le premier projet dénommé **BioSprayTech** s'inscrit dans le cadre de la contribution de l'IFV au projet inter filière cordonné par l'ACTA et intitulé : ABAPIC (2021-2022) « *Accélération du Biocontrôle et des Agroéquipements pour la Protection Intégrée des Cultures* ». Ce projet structurant pour l'UMT ECOTECH est prévu pour les 5 prochaines années (2022-2026). Seule la première année (2022) est financée dans le cadre du plan de Relance.

Le projet BioSprayTech s'appuie sur la modélisation prédictive des dépôts développées dans le projet CASDAR TechnoDoseViti et vise à terme à développer les éléments décisionnels du raisonnement agronomique pour le déploiement de la pulvérisation de précision en viticulture. Il s'agit également de tirer profit des dernières technologies de pulvérisation de précision pour développer et éprouver de nouvelles méthodes d'évaluation de l'efficacité des produits de biocontrôle au vignoble permettant d'identifier les déterminants de leur efficacité au champ et définir par rétroaction le cahier des charges pour une pulvérisation optimisée et adaptée aux produits de biocontrôle. Les nouvelles technologies de précision (chaines associant capteurs, modélisation et prédiction des dépôts, actionneurs numériques de contrôle intra-parcellaire) permettront de mettre en place de nouveaux plans d'expérience automatisés, pour l'évaluation et la hiérarchisation des facteurs influant sur l'efficacité des produits. Ces expérimentations seront conduites selon le principe de « *On-Farm Precision Experimentation* » (Bullock & al, 2020) qui peut être défini comme l'utilisation des technologies de contrôle intra-parcellaire (Variable Rate Application) pour réaliser des expérimentations automatisées au niveau du domaine agricole. Une

fois les modalités de l'expérimentation choisies, leur mise en œuvre géolocalisée est gérée automatiquement par les outils ce qui permet de concilier production et expérimentation de grande ampleur à l'échelle du domaine viticole, objectifs qui étaient auparavant difficilement compatibles. Le contrôle et la traçabilité des opérations réalisées deviennent alors partie intégrante de la démarche d'évaluation qui doit comprendre l'évaluation biologique de l'efficacité à prévenir et traiter le risque épidémique en relation avec la distribution et répartition des dépôts dans la canopée. Pour mener à bien ce programme, deux partenariats avec des bureaux d'étude de constructeurs de pulvérisateurs ont été développés en 2022 :

1. Constructeur 1 : Bureau d'étude la société PELLENC (basée à Pertuis, 84).PELLENC fournit au printemps 2022 à l'UMT ECOTECH un premier prototype de pulvérisateur à commande numérique n°1
2. Constructeur 2 : SUPRAY TECHNOLOGIES Bureau d'étude de la gamme cultures spécialisées de l'agro-équipementier EXEL (basé sur Epernay, 51) qui regroupe les marques de pulvérisateurs : Berthoud, Tecnomat, Hardi et Nicolas.
3. Equipementier 3 : Bureau d'étude de la société AGROSYSTEM (<https://www.agrosystem.fr>) (basée à Ruiz, 62) spécialisée dans le développement de solutions et systèmes électroniques embarqués pour l'agriculture.

SUPRAY TECHNOLOGIES et AGROSYSTEM ont initié à l'automne 2021 un rapprochement autour du développement de la pulvérisation de précision grâce à notre initiative et fournissent à l'UMT ECOTECH au printemps 2022 un second prototype de pulvérisateur à commande numérique.

Le second projet intitulé **Cannophy** (2022-2024) et lauréat de l'AAP CASDAR RT 2021 par l'UMT EcoTech et l'unité TSCF (technologies et systèmes d'information pour les agrosystèmes) de INRAE de Clermont Ferrand valorise et amplifie les acquis sur les mesures LIDAR. Le projet **Cannophy** consiste à mettre en place des mesures de type phénotypage physique pour la caractérisation spatiale et temporelle de la végétation. Ces mesures seront mobilisables par les viticulteurs et agro-équipementiers pour le développement des démarches de viticulture de précision dont la pulvérisation. Ce phénotypage physique sera basé sur le capteur LiDAR, embarqué sur les matériels ou robots viticoles et permettra d'accéder à la géométrie, à la porosité et à une morphologie détaillée du couvert palissé ainsi qu'à une estimation générique de la Surface Foliaire Totale. Dans la mesure où le LiDAR est également utile à la navigation des robots en viticulture, une des idées importantes du projet est d'explorer la convergence technologique entre mesure agronomique et navigation robotique par un même capteur. Le projet fournira une chaîne prototype d'acquisition et de traitement continue (à chaque passage d'engins ou de robots lors des opérations culturales) et automatisée du phénotypage physique intégrant calcul numérique, transfert vers le cloud et interface d'interrogation des données par le viticulteur. Le développement sera basé sur des bibliothèques open source. Ce référentiel permettra de fournir des lignes directrices à la filière pour le développement par les acteurs industriels des éléments d'une telle chaîne d'acquisition.

- Les modalités envisagées pour pouvoir analyser l'impact du projet sur les différents publics cibles à court et moyen terme

L'impact du projet TechnoDoseViti et de ceux qui seront conduits dans son prolongement (Cannophy et Biospraytech) ces prochaines années en s'appuyant sur les acquis pourra être analysé au travers des développements technologiques qui verront le jour dans le domaine du phénotypage de la végétation basé sur le LIDAR mais également de l'appropriation des éléments décisionnels développés dans le projet par les constructeurs de pulvérisateurs qui souhaitent développer des technologies de pulvérisation de précision où la dose appliquée localement est adaptée à la végétation à traiter et à l'efficacité du pulvérisateur.

Une autre manière d'apprécier l'impact du projet serait la prise en compte à moyen terme des abaques d'expression des doses développés sur les étiquettes des produits phytosanitaires pour optimiser les doses en fonction du contexte du traitement (végétation et efficacité du pulvérisateur) et plus généralement l'évolution du mode d'expression des doses actuel vers une nouvelle expression plus cohérente. Cela constitue une marge de manœuvre importante qui a été très (trop) peu mobilisée jusqu'à présent pour atteindre les objectifs du plan ECOPHYTO.

IV – Valorisation des travaux achevés et à venir

Publications scientifiques

- Publications scientifiques parues

Protocole utilisé en vignes larges et vignes étroites pour la mesure de la distribution des dépôts sur la végétation : grille de placement, méthode placette/trios, nombre de collecteurs. Protocole et données de l'année 2016 (Mas Piquet, Hérault) présentés dans un article de données **Data In Brief** de 2018 :

Codis, S., Carra, M., Delpuech, X., Montegano, P., Nicod H., Ruelle, B Ribeyrolles X. , Savajols, B., X., Vergès, A., Naud, O., (2018). *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*

Méthode de traitement des nuages de points LIDAR pour le calcul d'indicateurs végétatifs pertinents pour le pilotage de la pulvérisation. Article paru dans la revue **Biosystems Engineering**. Cet article mobilise notamment les données LiDAR et manuelles acquises en 2019 sur le domaine Mas Piquet.

Cheraïet A., Naud O., Carra M., Codis S., Lebeau F., Taylor J. (2020). *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.*

Article sur la mise en place des démarches de modalisation des quantités moyennes de dépôts de produit sur la végétation en fonction d'indicateurs végétatifs mesurés manuellement et à partir d'un capteur LIDAR. Article publié dans la revue Innovations Agronomiques de l'INRAE.

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.*

Présentation de la méthode de modélisation multivariée de la distribution des dépôts de produits phytosanitaires en fonction de paramètres végétatifs issus du LiDAR. Cet article a été publié dans la revue **Computers and Electronics in Agriculture.**

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., Carra, M., Lienard, A., Codis, S., Vergès, A., Delpuech, X., & Naud, O. (2019). *Investigation on LiDAR-based indicators for predicting agrochemical deposition within a vine field. In Precision agriculture'19 (pp. 253-267). Wageningen Academic Publishers.*

- Publications scientifiques à paraître

Développement de modèles multivariés de prédiction de la distribution statistique des dépôts en fonction des données LiDAR dans le contexte des vignes étroites. Cet article valorise les données acquises dans le cadre du projet PULVETROIT. Cet article a été soumis à la conférence internationale d'horticulture (IHC 2022) (abstract accepté).

A. Cheraïet, O. Naud, S. Codis, P. Petitot, F. Bidaut, M. Liebart, J. Taylor. *Testing the suitability of a terrestrial 2D LiDAR scanner for 3D canopy characterization of narrow vineyards to optimize the spraying process of pesticides.*

Article sur la validation de la méthodologie de la mesure de la distribution des dépôts de produits au sein de la végétation basée sur l'utilisation de cibles artificielles placées dans le couvert végétal (placement spatialement structuré de collecteurs). Cet article a été soumis le 21 janvier 2022 à la revue OENO One. <https://oeno-one.eu/>

A. Cheraïet, O. Naud, M. Carra, S. Codis and J. Taylor (2022). *Evaluation of the distribution of intercepted spray deposits within a vine canopy from measurements on artificial targets and real leaves.*

Colloques

- Participations passées à des colloques

SUPROFUIT 2017 : colloque bisannuel de référence au niveau européen sur les avancées scientifiques et techniques sur les techniques d'application

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.

Workshop européen sur l'expression des doses en cultures pérennes 2018

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

Codis S., Douzals J-P, Verges A., Carra M., Ribeyrolles R. , Bonicel JF, Lienard A. Delpuech A. (2018) 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

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

Colloque de la CIETAP (Commission interprofessionnelle d'étude des techniques d'application de produits phytosanitaires) 2018

Codis S., Ruelle B., Carra M., Montegano P., Ribeyrolles X., Naud O., Douzals JP., Delpuech X., Verges A. (2018) 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

Colloque "International Advances in Pesticide Application" 2018 colloque bisannuel de référence au niveau mondial sur les avancées scientifiques et techniques sur les techniques d'application

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.

Conférence européenne sur l'agriculture de précision 2019

Cheraïet, A., Carra, M., Lienard, A., Codis, S., Vergès, A., Delpuech, X., Naud, O. (2019). Investigation on LiDAR based indicators for predicting agrochemical deposition within a vine field. The 12th European Conference on Precision Agriculture, 8-11 juillet 2019, Montpellier, France.

Colloque GFP (Groupe Français de Recherche sur les Pesticides) 2019

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.

Thèses

- Thèses passées

[4] **Mémoire de thèse de Anice Cheraïet (janvier 2018-décembre 2020):**

Cheraïet (2020). Modélisation expérimentale et statistique des relations entre caractéristiques morphologiques de la vigne et dépôts de pulvérisation : application à l'agriculture de précision. Présentée par Anice CHERAIET Le 18 décembre 2020 Sous la direction de James TAYLOR

- Méthodologies produites

Les membres du projet (Sébastien Codis, IFV), Mathilde Carra (INRAE) ainsi que Florence Verpont (CTIFL et co-animatrice de l'UMT ECOTECH) ont été rapporteurs du nouveau document technique (DT28, 2021) de la CEB relatif aux « **Recommandations pour l'utilisation de l'unité de dose LWA en cultures hautes (Leaf Wall Area : surface de haie foliaire)** ». Ce document élaboré dans un cadre interprofessionnel a pour objectif de guider les firmes phytosanitaires dans la mise en œuvre de la nouvelle expression des doses décidée au niveau européen pour être le support des essais mise en place des essais d'efficacité des produits dans le cadre de leur homologation.



Annexes :

- *Annexe 1* : Protocole de mesure des dépôts au champ.
- *Annexe 2* : COPIL TECHNODOSEVITI n°1 du 29 novembre 2019
- *Annexe 3* : COPIL TECHNODOSEVITI n°2 du 10 février 2022
- *Annexe 4* : Rapport intermédiaire du projet de février 2020.

Littérature externe à l'équipe citée dans le document :

CEB (2006). Groupe de travail "Expression des doses" Compte rendu Réunion du 13 décembre 2006.

Malet, J., Bourgouin, B., Breniaux, D., Monnet, Y., Orts, R., and Vernet, C. (1998). Expression des doses d'emploi des produits phytopharmaceutiques - A.N.P.P./C.E.B.

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

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