



HAL
open science

ArchiTechDoseViti - Optimisation agro-environnementale de la pulvérisation sur vigne en fonction de l'architecture de la végétation et du matériel d'application utilisé.

Sébastien Codis, Maxence Carra, A. Verges, Xavier Delpuech, V. de Rudnicki,
Olivier Naudot

► To cite this version:

Sébastien Codis, Maxence Carra, A. Verges, Xavier Delpuech, V. de Rudnicki, et al.. ArchiTechDoseViti - Optimisation agro-environnementale de la pulvérisation sur vigne en fonction de l'architecture de la végétation et du matériel d'application utilisé.. Innovations Agronomiques, 2019, 71, pp.157-164. 10.15454/8gl199 . hal-02174033

HAL Id: hal-02174033

<https://hal.science/hal-02174033>

Submitted on 4 Jul 2019

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

ArchiTechDoseViti - Optimisation agro-environnementale de la pulvérisation sur vigne en fonction de l'architecture de la végétation et du matériel d'application utilisé

Codis S.¹, Carra M.², Verges A.¹, Delpuech X.¹, de Rudnicki V.², Naud O.²

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

² ITAP, Irstea, Montpellier SupAgro, Univ Montpellier, UMT EcoTechViti, Montpellier, France

Correspondance : sebastien.codis@vignevin.com

Résumé

La mise en œuvre des concepts d'agriculture de précision et d'optimisation culturale en protection phytosanitaire de la vigne se heurte aujourd'hui à une difficulté : les quantités de produit reçues par unité de surface de végétal à protéger sont mal connues. Les doses sont homologuées à l'hectare cadastral et le ratio entre quantités émises et reçues dépend du matériel de pulvérisation et du stade de croissance du végétal cible. L'objectif du projet ArchiTechDoseViti était de connaître les relations végétal-matériel-dépôts de pulvérisation. Des méthodes d'échantillonnage des dépôts ont été développées sur le banc de vigne artificielle EvaSprayViti et au champ, et une instrumentation de caractérisation du végétal par capteur LiDAR 2D a été proposée. Les modèles empiriques développés sont une étape vers la modélisation prédictive des dépôts et une pulvérisation de précision. En tenant compte du développement de la plante cible dans le choix de la dose utilisée, les quantités d'intrants épandues au niveau de la filière pourraient être réduites de 20 à 30%.

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

Abstract: Agro-environmental optimization of spraying in vine according to canopy architecture and sprayer technology

The implementation of precision farming and cropping systems optimization concepts for plant protection in vine are currently facing a difficulty: the quantities of product received per unit area of plant to be protected are poorly known. Doses are registered per hectare of ground and the ratio between the quantities sprayed and received on the plant depends on sprayer performance and on crop growth stage. The objective of ArchiTechDoseViti project was to understand the plant-equipment-spray relationships. Methods for sampling of deposits and for plant characterization have been developed on the EvaSprayViti artificial vine bench and in the field. A sensing system based on a 2D LiDAR has been proposed. The empirical models developed are a step towards predictive modelling of deposits and precision spraying. By taking into account the growth of the plant to protect for choosing the dose rate, quantities of inputs for the vine crop in France may probably be reduced by 20 or 30%.

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

Introduction

La notion d'agriculture de précision a popularisé l'idée qu'il est possible d'optimiser l'efficacité des travaux mécanisés en agriculture, tant du point de vue des rendements, de la qualité, et des revenus associés, que du point de vue de l'impact environnemental, par une adaptation locale et agronomiquement raisonnée du travail réalisé. Toutefois l'accumulation d'informations sur les conditions

agronomiques de la culture, par des observations et des capteurs, permet d'envisager la modélisation prédictive de l'effet comparé de pratiques, afin d'optimiser les choix d'itinéraires.

Cependant la mise en œuvre de ces concepts d'optimisation culturale pour la protection phytosanitaire de la vigne se heurte à une difficulté majeure : les doses effectivement reçues par le végétal sont très variables et mal connues. En effet, les doses actuellement homologuées le sont à l'hectare cadastral. Or la surface de feuilles à protéger est très variable entre vignobles et évolue très fortement pendant une grande partie de la saison culturale. Il en résulte que pour un traitement à dose homologuée, la quantité de produit déposée par unité de surface de feuille est très variable. De plus l'efficacité de la pulvérisation, à savoir le ratio entre la quantité émise par le pulvérisateur et la quantité effectivement reçue par le végétal cible, est en règle générale assez mauvaise et dépend fortement du matériel utilisé et du stade de croissance du végétal.

Dans ce contexte, un objectif majeur de l'Unité Mixte Technologique EcotechViti est d'évaluer les marges de réduction de dose permises par les appareils les plus efficaces, selon les caractéristiques du végétal pour des matériels courants dans leur mode d'utilisation habituel. Cet objectif est une étape vers une modélisation prédictive et quantitative des dépôts effectifs pour toute situation de pulvérisation sur vigne palissée. En termes de contribution aux politiques publiques, les objectifs sont d'inciter à l'emploi et au développement de matériels de pulvérisation performants et d'envisager l'évolution du mode d'expression des doses (Codis, 2016).

Afin d'atteindre cet objectif, le projet ArchiTechDoseViti a été construit selon 4 axes :

- 1^{er} axe : en utilisant un banc d'essais représentatif d'une vigne, acquérir des données sur l'efficacité de divers pulvérisateurs, à 3 stades végétatifs et analyser la variabilité des dépôts effectifs sur la végétation.
- 2^{ème} axe : construire une modélisation des dépôts de produits phytosanitaires sur la végétation traitée à partir des données obtenues dans l'axe 1 et sur la base d'une sélection d'indicateurs végétatifs.
- 3^{ème} axe : développer une instrumentation compatible avec les indicateurs végétatifs identifiés comme pertinents dans l'axe 2 pour la prédiction des dépôts.
- 4^{ème} axe : valider la démarche en conditions réelles au vignoble selon différents scénarios d'utilisation

Les résultats du projet sont présentés succinctement dans cette communication selon ces 4 axes.

Le partenariat comprenait l'Institut Français de la Vigne et du Vin (IFV, chef de file), Irstea, Montpellier SupAgro, et les chambres d'agriculture de l'Aude, du Gard, de l'Hérault, et des Pyrénées-Orientales.

1. Variabilité des dépôts de produits par unité de surface de végétation en fonction du stade végétatif sur un banc d'essais « vigne artificielle » (Axe 1)

Entre 2012 et 2015, l'UMT a développé un banc d'essai destiné à mesurer en conditions contrôlées et répétables l'efficacité des pulvérisateurs. Ce banc d'essai baptisé EvaSprayViti est une vigne artificielle modulable composée de 4 rangs de végétation de 10 mètres de long permettant de simuler 3 stades de croissance de la végétation (Naud et al., 2014 ; Codis et al., 2015 ; Verges et al., 2015). La structure a été étudiée pour être représentative des caractéristiques d'une végétation standard de l'arc méditerranéen (2,5 mètres d'espacement entre rangs) en termes de hauteur, d'épaisseur et de LAI (Leaf Area Index, soit la surface de feuille à plat - un seul côté - rapportée à la surface de sol). Une vidéo présentant le dispositif est disponible sur le lien suivant : <https://www.youtube.com/watch?v=HGuQ93yLppA>.

Les essais de différents pulvérisateurs conduits sur la vigne artificielle EvaSprayViti aux trois stades végétatifs simulés ont mis en évidence des **perspectives importantes d'ajustement des doses en fonction des caractéristiques morphologiques de la végétation ainsi que du pulvérisateur.**

La Figure 1 présente de manière synthétique les résultats des tests d'une quinzaine de pulvérisateurs appartenant à des typologies différentes (voûte, aéroconvecteur, face par face, ...) sur EvaSprayViti. Chaque mesure de qualité de pulvérisation est représentée par un point dans ce graphique. L'axe horizontal est relatif au dépôt de pulvérisation surfacique moyen obtenu sur l'ensemble du feuillage, normalisé vis-à-vis des quantités émises à l'hectare de sol. L'axe vertical représente le coefficient de variation (écart-type sur moyenne) des dépôts mesurés selon une répartition du feuillage en compartiments. On distingue 9 compartiments en milieu et en pleine végétation, en distinguant 3 niveaux de hauteur et 3 profondeurs (distance au pulvérisateur) dans le feuillage. En début de végétation, on ne distingue que 4 compartiments (4 profondeurs, pas de distinguo de hauteur).

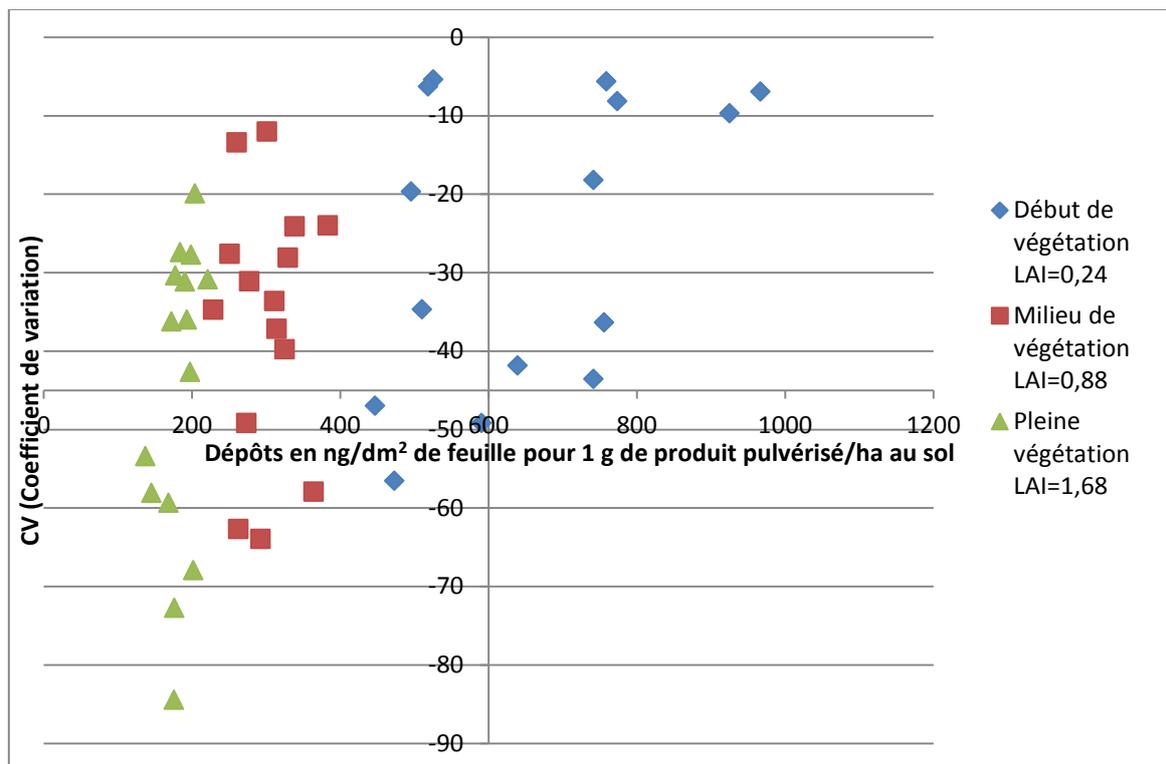


Figure 1 : Représentation synthétique des performances des différents matériels de pulvérisation selon 2 indicateurs. (Axe horizontal : quantité moyenne de dépôt de produit par unité de surface sur la végétation (en ng de produit par dm^2 de feuille pour 1 g de produit pulvérisé par ha de sol) ; Axe vertical : coefficient de variation des dépôts sur les différents compartiments de la végétation) mesurées à trois stades végétatifs contrastés de la vigne artificielle EvaSprayViti. Chaque point représente le test d'un pulvérisateur à un stade végétatif donné. Données issues du projet ArchiTechDoseViti.

Ainsi, pour chacun des 3 stades végétatifs étudiés, les pulvérisateurs performants sont représentés par les points en haut et à droite du graphique (dépôt élevé et homogénéité de sa répartition sur le végétal) tandis que les plus mauvaises performances sont représentées par les points situés vers le bas à gauche du graphique. Entre stades végétatifs, et compte tenu de l'unité utilisée, on observe l'effet de la dilution de la dose par hectare : la dose se répartit dans une surface de feuilles qui croît au fur et à mesure du développement de la vigne, ce qui implique une diminution du dépôt de pulvérisation. On constate sur ce graphique, qu'à partir d'une même dose pulvérisée par hectare cadastral de parcelle traitée, les quantités de dépôt de pulvérisation ainsi que l'homogénéité de ces dépôts au sein de la végétation sont extrêmement variables.

Deux facteurs expliquant cette variabilité peuvent être identifiés :

- Les caractéristiques architecturales de la végétation (surface de feuilles, ainsi que hauteur et épaisseur de végétation) ;
- Les performances de la technique de pulvérisation mise en œuvre.

L'ensemble des données obtenues sur la végétation artificielle du banc d'essai EvaSprayViti, constituent une base qui a nourri la réflexion mise en œuvre dans les 3 autres axes du projet développés ci-après.

Notons que la Figure 1 représente les dépôts de produits en fonction des stades végétatifs pour une vigne disposant d'une distance d'inter-rang fixe de 2,5 mètres alors qu'à l'échelle nationale, une forte variabilité des modes de conduite de la vigne existe. Les largeurs d'inter-rangs varient entre 1 et 3 mètres selon les vignobles. En prenant en compte l'ensemble des facteurs (modes de conduite de la parcelle, stade de développement végétatif, performances de la technique de pulvérisation), les essais ont permis de démontrer que les quantités de dépôts surfaciques obtenues pour l'application d'une même dose par hectare de parcelle traitée varient dans un rapport de 1 à plus de 10.

2. Modélisation expérimentale sur banc d'essai des dépôts de produits sur la végétation en fonction des caractéristiques architecturales du couvert (Axe 2)

L'objectif du deuxième axe du projet ArchiTechDoseViti était de définir des modèles permettant de prédire la dose effective à partir de la dose par hectare émise par le pulvérisateur, en fonction des caractéristiques de la végétation et du type de matériel. Nous définissons la dose effective comme la quantité de bouillie reçue par unité de surface d'organe à protéger. Elle est exprimée de façon normalisée, comme le ratio entre la quantité massique de produit déposé par unité de surface de feuilles et la quantité massique émise par hectare de surface au sol, en cohérence avec la littérature (Gil et al., 2011). Nous nous sommes donc intéressés d'une part aux quantités moyennes de dépôts surfaciques, et à leur prédiction, et d'autre part aux variations, au sein du rang, et selon la technologie de pulvérisation employée, de ces quantités moyennes.

Un travail visant à limiter le nombre d'expérimentations par la modélisation numérique de la forme de la distribution des dépôts au sein du couvert a été mené à partir d'expériences conduites sur le banc EvaSprayviti (Magnier et al., 2015). Cette modélisation numérique a consisté en premier lieu en la décomposition de l'expérimentation : étude du profil de dépôt unitaire de chacun des organes du pulvérisateur considéré séparément ; puis en second lieu en la recombinaison de ces profils pour obtenir une prédiction du profil réalisé par le pulvérisateur dans sa globalité. Cette technique de décomposition-recombinaison vise *in fine* à simuler l'impact d'un changement des caractéristiques du couvert végétal (hauteur, épaisseur) ou du réglage de l'appareil sur la quantité de produits déposés et sa répartition. Plusieurs indicateurs très présents dans la littérature pour la description du couvert végétal ont été testés de manière à évaluer leur capacité de prédiction des dépôts. Il s'agit des indicateurs végétatifs suivants :

- LWA (Leaf Wall Area) : surface de haie foliaire en m²/ha. Il correspond à la surface projetée des rangs de vigne sans compter les trous et en tenant compte des 2 faces des rangs. Cet indicateur dépend de la hauteur de feuillage et de l'espacement entre rang. Il se calcule de la manière suivante : $LWA \text{ (en m}^2/\text{ha)} = 2 \cdot \text{hauteur de feuillage(m)} / \text{espacement entre rangs(m)} \cdot 10000$. Il faut noter qu'au niveau européen, la décision a été prise en octobre 2016 que le LWA deviendrait à partir de 2020 le support de l'expression des doses pour les procédures d'homologation des produits et la mise en place des essais d'efficacité (EPPO, 2016)
- TRV (Tree Row Volume) : volume de haie foliaire en m³/ha. Il correspond au volume enveloppe de la végétation. Contrairement au LWA, cet indicateur prend en compte l'épaisseur du

feuillage. Il se calcule de la manière suivante : $TRV \text{ (en m}^3/\text{ha)} = \text{hauteur de feuillage (m)} \times \text{épaisseur du feuillage/espacement entre rangs(m)} \times 10000$.

Ces deux indicateurs basés sur des caractéristiques géométriques globales à l'échelle du rang ne prennent pas en compte les différences de densité foliaire. Nous nous sommes donc également intéressés à la SFT. Cette caractéristique est simple à déterminer sur la vigne artificielle mais présente l'inconvénient d'être difficile à évaluer au vignoble.

- SFT (Surface Foliaire Totale en m^2/ha) : le calcul littéral de la SFT suppose de mesurer la surface de chaque feuille présente sur une végétation. Cela implique une destruction de la plante, un temps de mesure assez important, et pour ces deux raisons, un échantillonnage en général spatialement limité. Il existe une méthode d'estimation non destructive mais qui est chronophage (2h à 2 personnes) et assez peu précise (environ 20%).

2.1 Méthode de décomposition-recomposition des profils de dépôt

Une étude de modélisation par décomposition–recomposition a été développée en s'appuyant sur une « voûte pneumatique 4 mains 4 canons » (modèle Eco+800 du constructeur Calvet) car c'est le type d'appareil le plus utilisé dans le contexte des vignes larges. La démarche d'expérimentation a consisté dans un premier temps à mesurer dans une section transverse du couvert (hauteur-profondeur) le profil de dépôts généré séparément par chacun des organes qui composent la voûte (pour un côté : main du haut, main du bas, canon haut et canon bas). L'échantillonnage a été fait à haute résolution, selon une matrice à 42 ou 84 « pixels » (7 ou 14 pixels sur la hauteur, 6 sur la largeur). La surface sensible pour un pixel selon la résolution à 42 pixels correspond à 4 feuilles de 10 cm x 10 cm. Le stade de pleine végétation de la vigne EvaSprayViti correspond à une canopée de 140 cm de haut et de 60 cm d'épaisseur. Le profil obtenu par cette décomposition de l'effet des organes a été appelé « signal unitaire ». L'objectif est ensuite de recomposer les effets des organes mis en œuvre afin de simuler la pulvérisation de l'appareil modélisé dans différentes configurations.

La validation de la méthode a consisté en la reconstitution de profils de dépôt global représentatifs du fonctionnement du pulvérisateur dans son ensemble pour n'importe quelle structure de végétation et pour les différents réglages de d'appareil (exemple passage tous les 2 rangs, 3 rangs ou 4 rangs qui sont des pratiques courantes) à partir des signaux unitaires auparavant déterminés. La reconstitution des profils nécessite de faire des hypothèses qui ont été étudiées puis validées sur le pulvérisateur étudié : additivité des signaux unitaires, translation du signal unitaire sur la hauteur, invariance de la partie du profil interceptée par troncature d'une partie de la hauteur ou de l'épaisseur du couvert.

Pour valider ces hypothèses, les dépôts simulés par la méthode de décomposition-recomposition ont été comparés avec des mesures directes, sur des configurations contrastées de végétation. La Figure 4 présente ces résultats et montre une bonne prédiction des quantités de dépôts moyennes par la méthode.

Il est à noter que la méthode de simulation par décomposition-recomposition, basée sur des hypothèses très simplificatrices des phénomènes, n'a été validée que pour la technologie de pulvérisateur pneumatique. La méthode n'est pas opérante pour des pulvérisateurs à jet porté, notamment du fait de la proximité des diffuseurs qui ne permet pas une additivité simple des « signaux unitaires » obtenus pour chaque buse.

Il est également utile de signaler que, lorsqu'on procède à des troncatures en hauteur ou en profondeur, à partir de la configuration « pleine végétation » de la vigne artificielle, la densité foliaire modélisée, au sens de la surface de feuille comprise dans un volume donné, reste constante. En d'autres termes, la SFT et le TRV sont dans le cas de la vigne artificielle EvaSprayViti directement proportionnels, ce qui est une simplification des situations que l'on peut rencontrer sur vigne réelle.

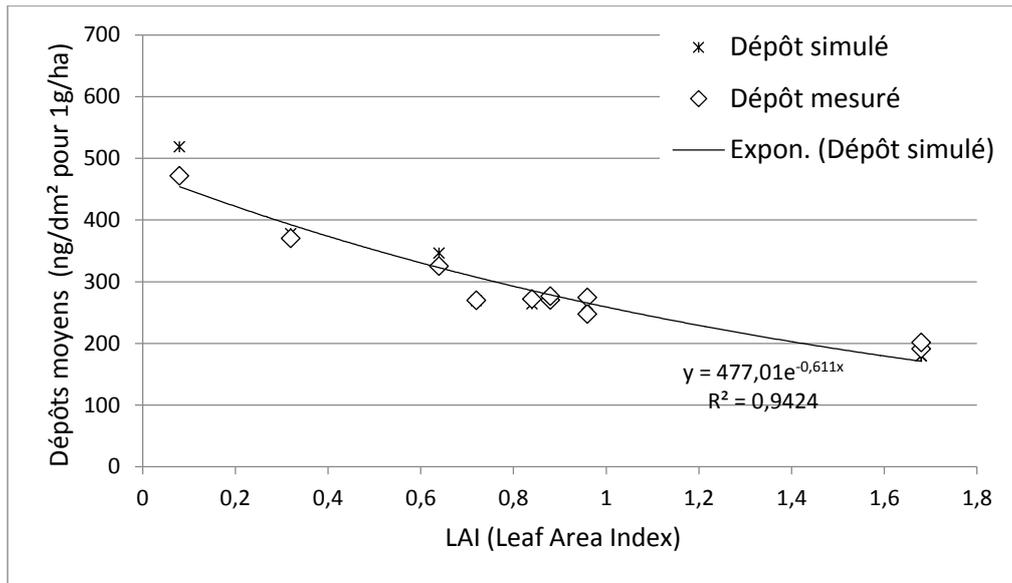


Figure 2 : Dépôts moyens simulés pour un pulvérisateur pneumatique utilisé en « 1 rang sur 2 » exprimé en fonction du LAI, comparés avec les mesures réelles sur des configurations de végétation très contrastées simulées avec le banc d'essai EvaSprayViti. Données issues du projet ArchiTechDoseViti.

2.2 Simulations d'une large gamme de végétations avec le banc EvaSprayViti

Le modèle décrit à la section 2.1 étant considéré comme validé, il a été exploité pour étudier les variations des doses efficaces permises par une voûte pneumatique utilisée tous les deux rangs en fonction du LWA. Les résultats sont présentés sur la Figure 3. La couleur de chaque point est représentative de différentes épaisseurs de végétation. L'influence de l'épaisseur sur le niveau de dépôt moyen est mise en évidence sur cette simulation.

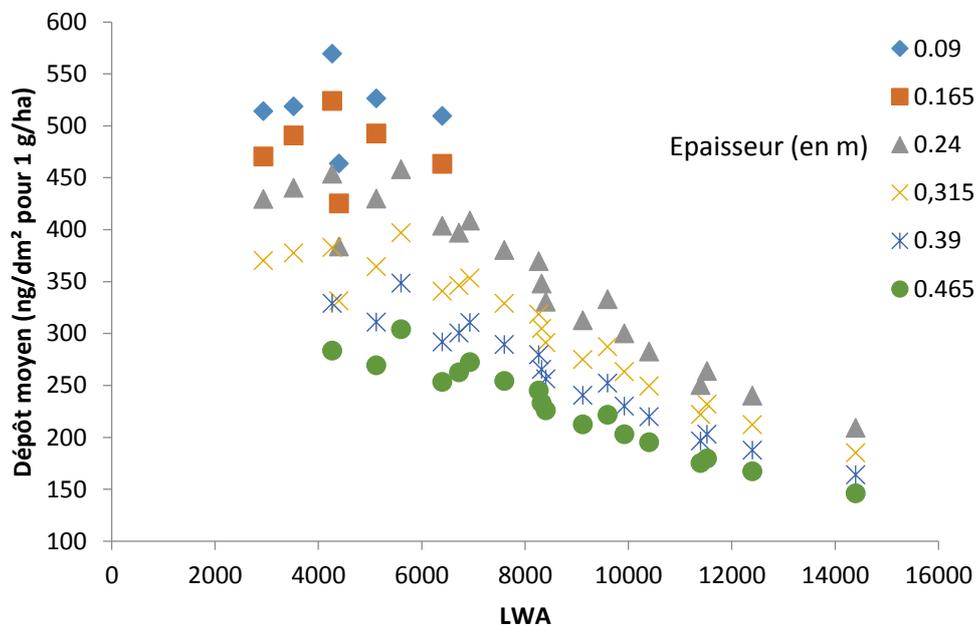


Figure 3 : Dépôt moyen simulé pour un pulvérisateur pneumatique utilisé en « 1 rang sur 2 » exprimé en fonction du LWA, pour 6 épaisseurs de végétation exprimées en mètre - chaque épaisseur est représentée par une couleur. Données issues du projet ArchiTechDoseViti.

Cette étude par simulation pose la question des limitations du LWA pour caractériser les doses effectives reçues. Le TRV est un indicateur *a priori* plus pertinent. Il est cependant à noter que des mesures ultérieures sur vignes réelles ont montré que, dans un vignoble donné, les TRV et LWA sont globalement bien corrélés. En revanche, la relation quantitative qui les lie est différente d'un vignoble à l'autre, ce qui rend nécessaire la mise en place de modèles de prévision des dépôts intégrant ces deux grandeurs. D'autre part, il semble utile dans les analyses de conserver les composantes du TRV (soit LWA et profondeur) plutôt qu'une valeur unique pour le décrire. La SFT permet de rendre compte de l'effet majeur de la dilution des doses de produit dans le couvert au fur et à mesure de la croissance du feuillage, mais elle est difficile à mesurer au vignoble et elle masque d'autres phénomènes dont pourrait rendre compte une approche géométrique complétée d'une prise en compte de la porosité. Le LiDAR étudié dans l'axe 3 du projet offre un potentiel important pour répondre à ces questions.

Au sein du projet, le travail de simulation par décomposition-recomposition et la modélisation statistique descriptive des dépôts selon les indicateurs végétatifs ont été complétés par une modélisation numérique de la forme du profil de dépôts qui a permis de faire des extrapolations lorsque la porosité du végétal est variable. D'autre part, dans l'hypothèse d'une automatisation future de pulvérisateurs pneumatiques, de premiers travaux méthodologiques ont été menés pour évaluer la conséquence du temps de réponse d'ouverture et fermeture de buses sur la capacité à adapter localement la pulvérisation (Saddem et al., 2017).

La base de connaissances représentée par les modèles et les données issus des travaux de cet axe représente un capital sur lequel s'appuient les travaux de validation et d'expérimentation au champ de l'axe 4.

3. Mise au point d'un capteur de végétation pour estimer les indicateurs végétatifs en vigne réelle (Axe 3)

L'objectif de l'axe 3 du projet ArchiTechDoseViti était d'identifier un capteur permettant de calculer des indicateurs végétatifs (surfaces, volumes, densité...) pertinents pour la prédiction de la dose effective.

La réflexion technologique et l'analyse bibliographique ont conduit au choix de la technologie LiDAR (voir par ex Rosell et al., 2012), et plus particulièrement d'un LiDAR à balayage suivant un axe de rotation que nous appellerons LiDAR 2D (Bastianelli et al., 2017). Monté sur un tracteur ou autre équipement agricole mobile et couplé à un outil de géo-référencement (GPS), il permet d'établir un nuage de points 3D représentatif d'un couvert végétal. En cohérence avec l'analyse menée dans la section précédente, mais en cherchant à tirer parti de la résolution offerte par le capteur, des variantes haute résolution des indicateurs LWA et TRV ont été mises en place, et testées sur le banc EvaSprayViti ainsi que sur vigne réelle, dans un domaine proche de Montpellier (Mas Piquet à Grabels).

3.1 Instrument de mesure LiDAR utilisé

Le LiDAR 2D mis en œuvre était le modèle LMS100 de la société Sick. Il a été couplé avec un GPS à travers une centrale d'acquisition. L'étendue angulaire de scan du LiDAR est de 270°. La fréquence d'acquisition a été réglée à 50Hz, ce qui, avec une vitesse de 1,4-1,5 m/s (5 ou 5,3 km/h), donne un scan angulaire complet tous les 3cm d'avancement. La résolution angulaire du scan était de 0.5°. Un logiciel de traitement des données a été développé sous MATLAB. Le principe de la mesure est décrit Figure 4.

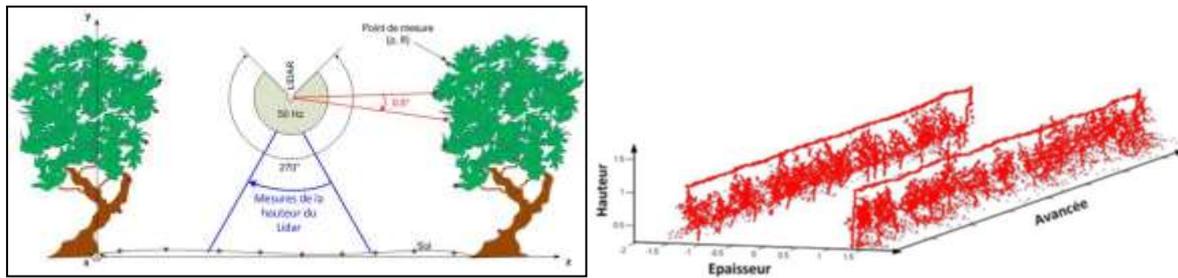


Figure 4 : Scan de la végétation avec le LiDAR LMS100 (à gauche) et nuage de points obtenu (à droite).

3.2 Indicateurs végétatifs géométriques basés sur le LiDAR

À partir des nuages de points obtenus, différents indicateurs des caractéristiques de la vigne ont été calculés : hauteur, épaisseur, volume de végétation (Bastianelli et al., 2017). L'indicateur LWApTs conçu pendant le projet s'est avéré particulièrement intéressant. Variante à haute résolution du LWA, obtenu en affectant à chaque point intercepté par la végétation une surface élémentaire (Figure 5), il rend compte de façon synthétique de la croissance de la vigne. Une autre interprétation haute résolution du LWA a été proposée dans Del-Moral Martinez et al (2015).

3.3 Un indicateur probabiliste : le TAI

Le « Tree Area Index » (TAI), est un indicateur résultant d'une approche probabiliste proposé pour la première fois par Walklate (2002) en verger puis repris et adapté à la vigne par Arno et al. (2013). Le TAI est un indicateur sans dimension couplant les notions de surface de végétation par surface cultivée et de probabilité de transmission au travers de cette végétation des faisceaux émis par le capteur Lidar. C'est un indicateur robuste qui présente l'avantage de prendre en compte dans son calcul les notions de surface, de densité et d'espace occupé par la végétation. Sa formule est la suivante :

$$TAI_{\Delta x} = -\frac{\Delta\theta}{2 \cdot D_{ir}} \sum_{k=0}^K \sum_{j=0}^J \rho_j \cdot \delta_{k,j} \cdot \ln \left(1 - \frac{\Delta n_{k,j}}{n_{k,j}} \right)$$

Avec : $\Delta n_{k,j}$ le nombre d'interceptions du rayon laser dans la maille (ρ_j , θ_k), ρ_j désignant la distance au point d'émission et θ_k l'angle; $n_{k,j}$ le nombre de faisceaux laser qui atteignent la maille ou passent à travers ; $\delta_{k,j}$ est un coefficient prenant la valeur 0 si $(\Delta n_{k,j} / n_{k,j}) < 0.01$, 1 sinon.

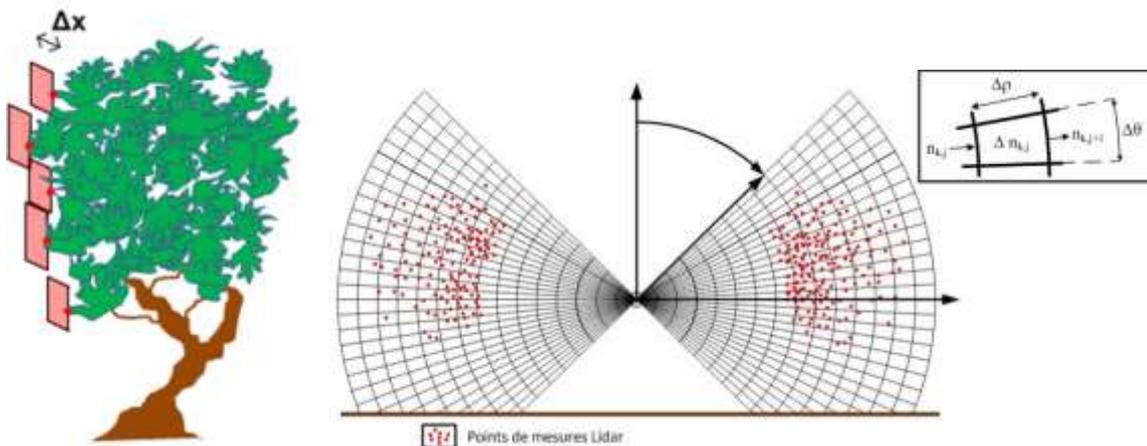


Figure 5 : Principe du LWApTs (à gauche) et maillage pour le calcul du TAI, Tree Area Index (à droite).

3.4 Des indicateurs représentatifs de l'évolution de la végétation

Pour valider le système de mesures et les méthodes de traitement développés, une étude de répétabilité a été menée sur banc EvaSprayViti et sur vigne réelle, qui a conclu à la qualité du dispositif (coefficient de variation de l'ordre de quelques %).

La technologie LiDAR apparait comme pertinente et robuste pour rendre compte de la SFT dans les études d'efficacité de la pulvérisation au vignoble, notamment grâce au TAI qui permet d'en estimer les variations au vignoble (Arno, 2013). En effet, si, sur banc d'essai, la surface foliaire est connue, l'estimation de cette grandeur est délicate au vignoble par les méthodes classiques.

La Figure 6 montre en exemple l'évolution des indicateurs TAI et LWApTs sur une parcelle hétérogène, en moyenne sur une série d'inter-rangs.

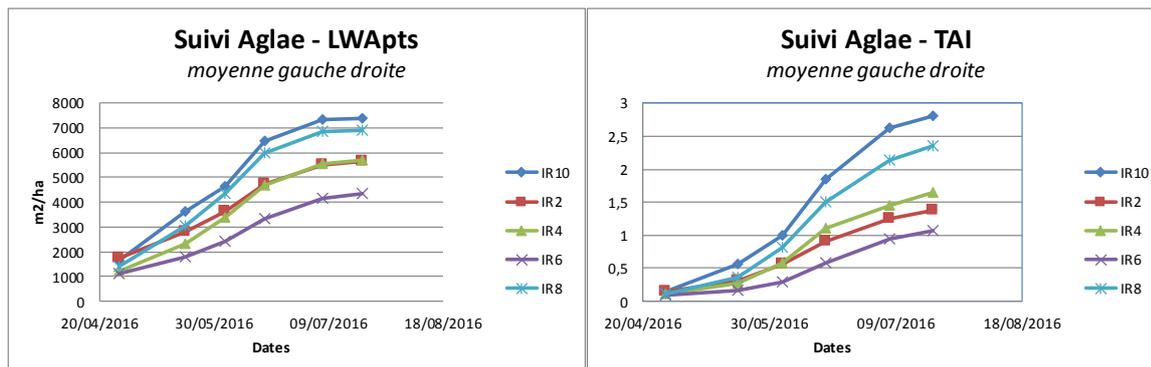


Figure 6 : Évolution des indicateurs Lidar LWApTs et TAI au cours de la période végétative. Mesure effectuées sur différents inter-rangs (IR) de la parcelle. Données issues du projet ArchiTechDoseViti.

4. Modélisation des dépôts de pulvérisation au champ en fonction des caractéristiques du végétal et du matériel (Axe 4)

Faisant suite aux travaux menés dans les axes 1 à 3, les partenaires du projet ont engagé en 2015 et 2016 une série d'expérimentations au champ visant à valider ces premiers acquis et à mieux préciser les liens entre les dépôts et les caractéristiques de la végétation à traiter. Ces essais ont consisté pour la campagne 2016 à mesurer les dépôts de produits pour deux pulvérisateurs aux performances contrastées sur 5 parcelles de vigueur différentes au sein d'un même vignoble (domaine du Mas Piquet près de Montpellier), à 4 dates sur le cycle végétatif (Codis et al, 2018), et pour 4 ceps par modalité. L'échantillonnage a été organisé suivant un maillage transversal du couvert : un collecteur tous les 10 cm dans le sens de l'épaisseur et tous les 20 cm selon la hauteur. Les collecteurs ont été analysés individuellement.

Dans ce volet du projet, les indicateurs végétatifs ont été mesurés au champ selon 2 principes : mesure manuelle de la hauteur du feuillage (d'où LWA à distance inter-rangs connue), épaisseur du feuillage (d'où TRV connaissant le LWA), surface foliaire totale ; mesures à partir du signal à haute résolution d'un capteur LiDAR d'indicateurs végétatifs pertinents pour la prédiction des dépôts.

4.1 Modélisation des dépôts de pulvérisation en fonction d'indicateurs végétatifs mesurés manuellement

Les expérimentations ont permis de mettre en évidence une bonne corrélation entre les dépôts moyens sur le végétal et le TRV mesuré manuellement pour les deux technologies de pulvérisation qui ont été testées avec des R^2 supérieurs à 0,89 sur le lot de parcelles étudié. Dans le contexte du vignoble qui a servi de support à ces essais, nous observons également des $R^2 > 0,86$ pour la relation entre les dépôts

surfaciques moyens et le LWA manuel (Figure 7). Il faut noter comme indiqué plus haut que sur un vignoble donné, le LWA et le TRV peuvent être bien corrélés sachant que la relation entre ces grandeurs sera différente d'un vignoble à l'autre.

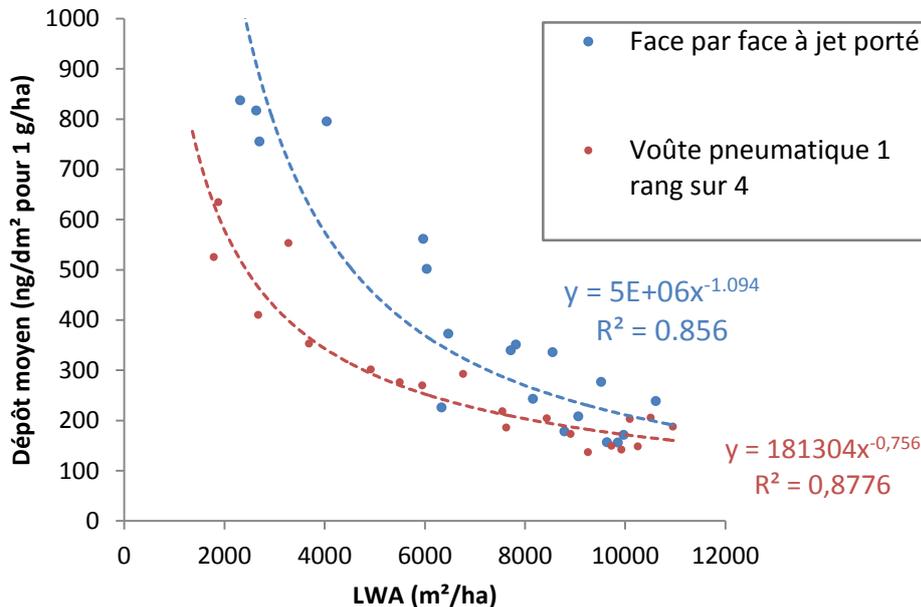


Figure 7 : Dépôt moyen (ng/dm² pour 1g/ha) en fonction du LWA mesuré manuellement. Campagne 2016. Chaque point représente une parcelle à une date d'étude pour une modalité de pulvérisation. Données issues du projet ArchiTechDoseViti.

4.2 Modélisation des dépôts de pulvérisation en fonction d'indicateurs issus d'un capteur à haute résolution

Deux indicateurs végétatifs calculés à partir des mesures LiDAR, le TAI et le LWApts ont pu être corrélés avec une bonne précision aux mesures de dépôts de pulvérisation (Figure 8, voir également Bastianelli et al., 2017 ; Bastianelli et al., 2018). Du fait de la capacité qu'offre le capteur LIDAR à scanner la totalité d'une parcelle, les modèles de prédiction des dépôts basés sur ces indicateurs pourront à terme être mobilisés pour réaliser de la modulation de dose à l'échelle intra-parcellaire, ouvrant ainsi des perspectives en viticulture de précision dans le contexte du développement du numérique.

Sur les parcelles étudiées et conformément aux résultats préliminaires obtenus sur la vigne artificielle, le dépôt de pulvérisation moyen mesuré est près de 4 fois plus important lors de la première date de mesure (début de végétation) que lors de la dernière (pleine végétation), quelle que soit la technique de pulvérisation considérée. La mise en place de modèles de prédiction des dépôts offre donc d'importantes perspectives pour l'optimisation des quantités d'intrants utilisées, notamment en début de campagne.

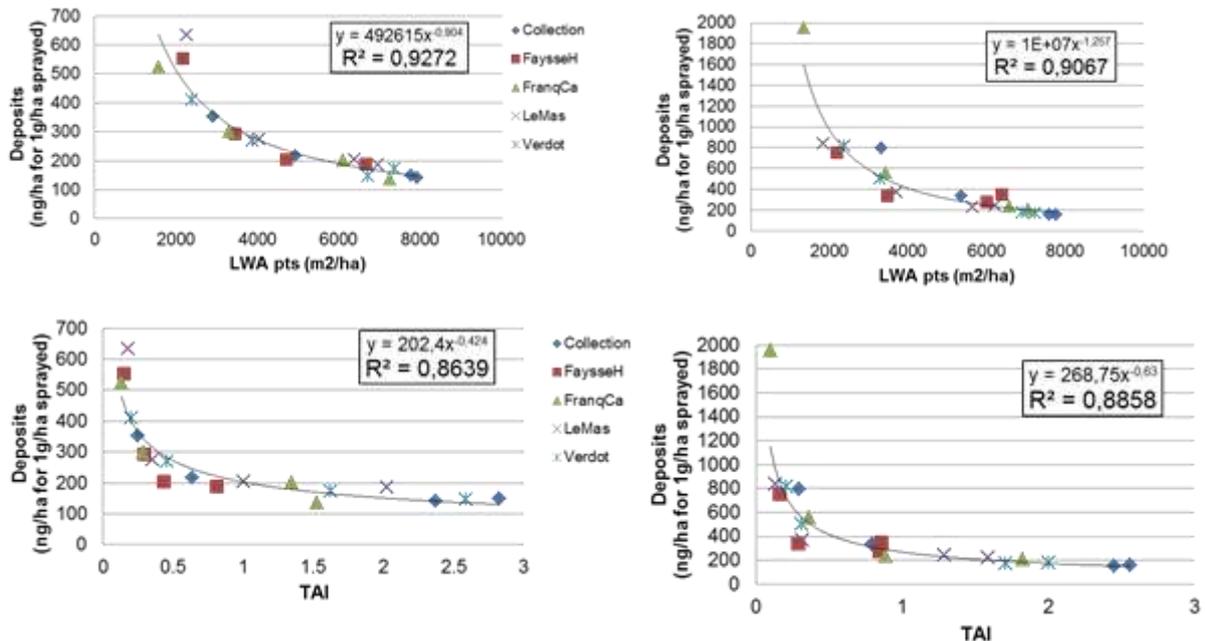


Figure 8 : Évolution du dépôt moyen en fonction des indicateurs végétatifs (LWApts et TAI) mesurés avec un Lidar LMS100 - Comparaison des dépôts de pulvérisation moyens obtenus avec la voûte pneumatique (à gauche) et avec le face par face à jet porté (à droite). Bastianelli, 2017.

4.3 Vers une pulvérisation de précision en viticulture

Ainsi, avec des indicateurs issus de mesures manuelles et avec des indicateurs issus de mesures Lidar, des corrélations peuvent être mises en évidence entre le dépôt de pulvérisation moyen et l'indicateur. Ces relations permettent d'identifier de nombreuses situations où les doses pourraient être modulées à la baisse par rapport à une dose fixe par hectare tout au long de la saison. À partir de ces premiers modèles, des préconisations de doses pourraient être formulées sur la base de l'analyse des dépôts surfaciques moyens sur le végétal cible.

Les mesures obtenues dans ces essais ont également permis d'étudier l'hétérogénéité des dépôts de pulvérisation en fonction de la position spatiale du collecteur au sein du couvert végétal. L'analyse des données montre que le dépôt moyen recouvre une hétérogénéité des dépôts parfois importante qui est susceptible d'avoir une influence importante sur le niveau de protection phytosanitaire. Les mesures réalisées dans ce projet démontrent notamment qu'en pleine végétation les deux techniques de pulvérisation étudiées peuvent, selon les réglages, se différencier assez peu selon le dépôt de pulvérisation moyen tout en présentant des caractéristiques qui différencient les appareils en ce qui concerne l'homogénéité des dépôts au sein du couvert. Afin de prendre en compte l'hétérogénéité des dépôts de pulvérisation dans le raisonnement des modulations de dose, une démarche d'analyse fine de la distribution a été initiée dans le cadre du projet. Cette analyse permet de prendre en compte l'existence de zones peu traitées pour construire une démarche sécurisée de préconisations de doses. Ce développement se poursuit dans le projet CASDAR TechnoDoseViti (2018-2020).

L'avantage du capteur Lidar par rapport aux mesures manuelles est qu'il réalise des mesures de façon homogène et sur de grandes surfaces (rang complet, parcelle entière, exploitation ...). Avec l'aide des données GPS acquises lors de chacune des mesures, les indicateurs Lidar peuvent être représentés spatialement. Cette représentation permet d'étudier leur variabilité intra-parcellaire. Elle est illustrée Figure 9.



Figure 9 : Évolution spatiale et temporelle du LWAp (m^2/ha , mesure LiDAR) au cours de la saison. Données issues du projet ArchiTechDoseViti.

Conclusion

Les recherches conduites dans le cadre de ce projet ont contribué à développer de nouveaux modes d'échantillonnage des dépôts sur la végétation, en conditions contrôlées sur une vigne artificielle, ainsi qu'au vignoble en conditions réelles. Ceci a permis d'analyser la distribution des dépôts de produit au sein du couvert végétal et de relier les quantités de produits déposés par unité de surface sur le végétal aux caractéristiques de la végétation traitée et du pulvérisateur utilisé. Pour caractériser la végétation, les indicateurs végétatifs classiquement utilisés dans la recherche en protection phytosanitaire des plantes pérennes que sont le LWA (Leaf Wall Area, surface de haie foliaire), le TRV (Tree Row Volume, volume de canopée), et le LAI (Leaf Area Index) ont été évalués. Un développement technologique basé sur l'emploi d'un LiDAR 2D a permis de développer une variante haute résolution du LWA, ainsi que la mise en œuvre du TAI (Tree Area Index). Ces deux indicateurs permettent de mettre en évidence à la fois les évolutions dans le temps et des différences entre parcelles ainsi qu'au sein des parcelles.

L'ensemble de ces méthodes et données construit les bases d'une approche prédictive des doses effectives qui pourraient être le support d'un raisonnement d'adaptation des doses en fonction des caractéristiques du couvert végétal, selon une approche d'agriculture de précision. D'ores et déjà, il est possible de comparer les dépôts obtenus sur un même végétal avec des pulvérisateurs différents, et de tenir compte de l'efficacité du pulvérisateur, si elle est suffisante, pour réduire les doses pulvérisées.

Ce travail trouve une prolongation sur la période 2018-2020 dans le cadre du projet CASDAR RT TechnoDoseViti n°1721 intitulé « *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* ». Dans ce nouveau projet, le travail de modélisation prédictive des dépôts est poursuivi dans une approche à plusieurs échelles et en intégrant simultanément plusieurs indicateurs de synthèse issus des mesures Lidar. Pour assurer plusieurs voies de transfert, des scénarios de pulvérisation de précision mettant en œuvre des mesures piéton au champ sont également évalués.

Dans le cadre des politiques publiques de réduction d'intrants, les données recueillies dans le cadre du projet montrent qu'un « mode d'emploi » (étiquetage) des produits phytosanitaires plus précis tenant compte du développement de la plante cible permettrait aux applicateurs de réduire les quantités épandues, probablement de 20 à 30% (Codis et al., 2017). Le projet consistera ensuite à utiliser les données et les modèles pour construire des abaques d'adaptation des doses aux caractéristiques du

végétal. Ces abaques devront être simples et utilisables au plan opérationnel tout en prenant en compte la variabilité des vignobles français (vignes larges et vignes étroites). Ces abaques pourraient permettre, pour une gamme de distance d'inter-rang donnée, d'affecter une valeur de dose en fonction du stade végétatif, et/ou d'autres indicateurs. Différentes propositions qui se différencient par leur complexité en termes de nombre de paramètres végétatifs en entrée de l'abaque (espacement entre rangs, hauteur de végétation, épaisseur de feuillage, ...) seront étudiées. À terme, ces abaques pourraient figurer sur les nouvelles étiquettes des produits phytosanitaires. Une réflexion sur le cahier des charges sera menée en lien avec les différentes instances concernées (ANSES, DGAL, ...) au sein du groupe de travail sur l'expression des doses des produits phytosanitaires en cultures 3D nouvellement créé au sein de la CEB (Commission des Essais Biologiques) de Vegephyl (ex. AFPP) (Mironet et al., 2018). En parallèle, dans le projet TechnoDoseViti, un cadre conceptuel sera développé pour évaluer l'intérêt du développement de techniques de pulvérisation de précision associées à une agriculture numérique intensive en données. Différents scénarios technologiques seront comparés dans une perspective d'agriculture durable et parcimonieuse en intrants.

Remerciements

Merci aux participants au projet (IFV : Adrien Vergès, Fanny Chauchard, Sébastien Codis, Xavier Delpuech, Blandine Savajols. IRSTEA : Matthieu Bastianelli, Mathilde Carra, Xavier Ribeyrolles, Vincent de Rudnicki, Jessica Magnier, Patrick Montegano, Olivier Naud, Bernadette Ruelle, Harry Chaudat, Paul Cazenave. CA34 : Christophe Auvergne. CA30 : Renaud Cavalier. CA66 : Julien Thierry, CA11 : Julien Lion) avec une mention particulière pour les auteurs du rapport final du projet d'où sont tirés les résultats présentés dans cette communication.

Références bibliographiques

Arno J., Escola A., Valles J. M., Llorens J., Sanz R., Masip J., Palacin J., Rosell-Polo J. R., 2013. Leaf area index estimation in vineyards using a ground-based LiDAR scanner. *Precision Agriculture*, 14(3), 290-306.

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.

Bastianelli M., de Rudnicki V., Codis S., Ribeyrolles X., Naud O., 2017. Two vegetation indicators from 2D ground Lidar scanner compared for predicting spraying deposits on grapevine. *EFITA WCCA 2017*, Montpellier, France, July 2-6.

Codis S., Carra M., Delpuech X., Montegano P., Nicod H., Ruelle B., Ribeyrolles X., Savajols B., 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

Codis S., Vergès A., Carra M., Delpuech X., Ruelle B., Savajols B., Montegano P., 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; 14th Workshop on Spray Application Techniques in Fruit Growing, Hasselt, Limburg, Belgium, from May 10 -12 May 2017

Codis S., 2016. Stakes for a new model of dose expression in viticulture: advantages and points to be taken into consideration. In *Workshop EPPO on Harmonized Dose Expression for the Zonal Evaluation of Plant Protection Products in High Growing Crops*, Vienna.

Codis S., Vergès A., Ruelle B., Hebrard O., Magnier J., Montegano P., Ribeyrolles X., 2015. *EvaSprayViti : Une vigne artificielle pour l'optimisation agro-environnementale de la pulvérisation en viticulture*. *Innovations Agronomiques* 46, pp. 27–37.

del-Moral-Martinez I., Arno J., Escola A., Sanz R., Masip-Vilalta J., Company-Messa J., Rosell-Polo J.R., 2015. Georeferenced scanning system to estimate the leaf wall area in tree crops. *Sensors Basel* 15, 8382-8405.

EPPO, 2016. Conclusions and recommendations plenary session Workshop on harmonized dose expression for the zonal evaluation of plant protection products in high growing crops. Vienne.

Gil E., Llorens J., Landers A., Llop J., Giralt L., 2011. Field validation of DOSAVINA, a decision support system to determine the optimal volume rate for pesticide application in vineyards. *European Journal of Agronomy* 35(1):33-46.

Magnier J., Naud O., Codis S., Vergès A., Ruelle B., 2015. New approach for pesticides doses ajustement with regards to vegetation structure and sprayers based on predictive modeling. Giesco (Groupe international d'Experts en Systèmes Viticoles pour la COopération), Gruissan, France.

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. Workshop Dose Expression Workshop on 6-7 November 2018 at the Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain*

Naud O., Verges A., Hebrard O., Codis S., Douzals J.P., Ruelle B., 2014. Comparative assessment of agro-environmental performance of vineyard sprayers using a physical full scale model of a vineyard row. In *AgEng 2014*, 7 p.

Rosell J.R., Sanz R., 2012. A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities. *Computers and Electronics in Agriculture* 81 124–141.

Saddem R., Naud O., Cazenave P., Godary-Dejean K., Crestani D., 2017 Precision spraying: from map to sprayer control using model-checking. *Journal of Agricultural Informatics* 8(3):1-10.

Verges A., Codis S., Bonicel J.-F., Diouloufet G., Douzals J.-P., Magnier J., Montegano P., Ribeyrolles X., Ruelle B., 2015. Sprayers' classification according to their performance in terms of spray deposition quality. *SuproFruit 2015 - 13th Workshop on Spray Application in Fruit Growing - Lac de Constance - juillet 2015*.

Walklate P.J., Cross J.V., Richardson G.M., Murray R.A., D.E., 2002. Information technology and the human interface: Comparison of different spray volume deposition models using LiDAR measurements of apple orchards. *Biosystems Engineering* 82, pp. 253–267.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

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* », la date de sa publication, et son URL)