

Des buses à pulsation pour une pulvérisation de précision en vigne

L'innovation technologique PWM offre de réelles perspectives pour le développement de pulvérisateurs précis et efficaces en cultures pérennes, comme en témoignent les récents essais de l'UMT EcoTech (IFV-Inrae).



Maude Lewis¹, Sébastien Codis², Xavier Ribeyrolles¹, Xavier Delpuech², Élodie Trinquier², Adrien Vergès¹ et Olivier Naud¹

¹Inrae - Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement. ²IFV - Institut français de la vigne et du vin.

Dans le cadre du projet ABA PIC (« Accélération du biocontrôle et des agroéquipements pour la protection intégrée des cultures », 2021-2022), l'Institut français de la vigne et du vin (IFV) et Inrae ont travaillé en collaboration avec les sociétés Optima Concept et Berthoud à la mise au point d'un pulvérisateur de précision. Cet outil

est conçu pour fonctionner à l'échelle de la parcelle en production, les facteurs influençant l'efficacité des produits de biocontrôle en lien avec leur mode d'application. Grâce à la technologie des buses à pulsation, il offre des perspectives prometteuses pour l'optimisation des traitements en cultures pérennes.



Traitement de début de végétation avec le prototype de pulvérisateur développé pour le projet ABA PIC.

Photo : IFV

Le pulvérisateur idéal

Un cahier des charges exigeant

Si nous devons le définir, quel serait le cahier des charges pour le pulvérisateur idéal du futur ? D'un point de vue technique, il devrait assurer une protection phytosanitaire optimale en maximisant la quantité de produit phytopharmaceutique déposée par unité de surface de végétation. Pour ce faire, il devrait assurer une répartition des dépôts de produit parfaitement homogène sur la végétation traitée. La qualité d'application devrait être robuste et maintenue, peu importe la vitesse d'avancement, laissant au producteur la possibilité de réduire les temps de chantier en conduisant l'appareil au maximum de ce que la topographie et l'état des parcelles lui permettent.

Le pulvérisateur du futur devrait per-

mettre une adaptation de la dose appliquée sur chacun des ceps de la parcelle en fonction des paramètres végétatifs mesurés localement, comme la surface de végétal à protéger. Il devrait, pour cela, être réactif mais également précis au niveau de la dose appliquée. Il faudrait également pouvoir couper automatiquement les buses en l'absence de végétation (s'il y a des manquants ou des trous dans le feuillage), et ouvrir/fermer automatiquement les tronçons en début et fin de rangs.

Dans la réalité...

Malgré les nombreuses annonces sur les avancées de l'agriculture de précision et ses promesses, il n'existe pas encore de matériels d'application permettant de répondre à ce cahier des charges en cultures pérennes.

En effet, les dispositifs de contrôle de

la majorité des appareils de traitement en cultures pérennes restent rudimentaires et d'une précision relative. La plupart des pulvérisateurs sont équipés de régulateurs à pression constante. L'agriculteur contrôle le volume de bouillie appliqué par hectare par le suivi de la pression dans le circuit qui est une valeur indirectement liée au volume par hectare appliqué. De plus, la lecture de la pression s'effectue le plus souvent grâce à un manomètre à aiguille situé sur le pulvérisateur à quelques mètres derrière la cabine, ce qui n'est pas pratique pour le conducteur.

Dans le meilleur des cas (moins de 10 % des pulvérisateurs en sont équipés), le pulvérisateur est équipé d'un dispositif de régulation électronique du débit pulvérisé de type DPA (débit proportionnel à l'avancement). Ce dis-

positif électronique régule le volume par hectare appliqué en fonction de la vitesse d'avancement sur la base d'une mesure qui peut être soit la mesure instantanée du débit pulvérisé, soit la mesure de la pression. Dans le cas des DPA régulant par le débit, la mesure du débit appliqué s'effectue au moyen d'un débitmètre intégré dans le circuit. Pour les dispositifs régulant en pression, l'utilisation d'un capteur de pression est nécessaire, en

conjonction avec la relation établissant la corrélation entre le débit pulvérisé et la pression dans le circuit. Il est crucial de calibrer préalablement cette relation pression/débit. Ces deux modes de régulation (débit ou pression) sont couramment utilisés dans les DPA déployés en viticulture, chaque constructeur ayant ses préférences. Les contrôleurs de pulvérisateurs, dans le cadre des inspections périodiques obligatoires, détectent fréquemment des anomalies, surtout dans le cas des DPA régulant par le débit. Avec l'utilisation de produits tels que le cuivre et le soufre (notamment le Nordox⁽¹⁾) en viticulture, les débitmètres présentent une durée de vie limitée et perdent rapidement en précision.

Les défauts du débit proportionnel à l'avancement

Indépendamment du mode de régulation, avec l'ensemble des pulvérisateurs actuels, toute variation du volume par hectare appliqué ou de la vitesse d'avancement entraîne une modification de la pression, proportionnelle au carré de la différence de volume par hectare ou au carré de la variation de vitesse. Ainsi, le passage d'un volume par hectare de 1 à 2 dans une parcelle se traduit par une augmentation de la pression d'un facteur 4, avec des conséquences sur la taille des gouttes et la qualité de la pulvérisation. Pour pallier les défauts du DPA, l'IFV et Inrae s'intéressent à des technologies alternatives qui permettraient de développer le pulvérisateur idéal tel que décrit précédemment.

Un pulvérisateur de précision pour étudier l'application des produits et le biocontrôle

L'IFV et Inrae ont collaboré dans le cadre du projet ABA PIC « Accélération du biocontrôle et des agroéquipements

pour la protection intégrée des cultures », financé dans le cadre du plan de relance en 2021 et 2022. Le troisième axe du projet ABA PIC avait pour objectif de développer de nouvelles méthodologies permettant d'identifier, au niveau de la parcelle en production, les facteurs influençant l'efficacité des produits de biocontrôle en lien avec leur mode d'application. Dans le cadre de ce projet, l'IFV et

Inrae s'étaient donné pour objectif de développer, en collaboration avec des industriels partenaires, des prototypes de pulvérisateurs de nouvelle génération.

Le cahier des charges était de pouvoir piloter automatiquement et très précisément, en tout endroit de la parcelle, la dose de produit appliquée par hectare, ainsi que la répartition du produit sur la plante.

L'expérimentation de précision à la ferme

Dans le prolongement d'APA PIC, une fois les pulvérisateurs prototypes construits et validés, l'objectif était ensuite de pouvoir conduire des essais biologiques basés sur l'application de différents produits de biocontrôle au vignoble selon le principe de l'expérimentation de précision à la ferme (ou OFPE pour « on-farm precision experimentation ») (Bullock *et al.*, 2020). Cette nouvelle manière d'expérimenter consiste à utiliser des technologies de contrôle intra-parcellaire pour réaliser des expérimentations automatisées au niveau d'une parcelle ou d'un domaine agricole. Le principe est le suivant :

- les parcelles sont découpées en unités spatiales élémentaires ;
 - sur chacune de ces unités élémentaires, des consignes de doses et de répartition de produit sont définies ;
 - une fois les modalités de l'expérimentation définies sur la ou les parcelles d'essai, leur mise en œuvre géolocalisée est gérée à chaque traitement automatiquement par le pulvérisateur.
- Avec le pulvérisateur développé dans ABA PIC, l'objectif est de pouvoir comparer l'effet de différents niveaux de

(1) Régulièrement identifié, lors des expérimentations, comme source de dysfonctionnement des débitmètres, qu'ils soient à hélice ou de technologie électromagnétique.

RÉSUMÉ

CONTEXTE La qualité d'application est un facteur essentiel pour la réussite de la protection phytosanitaire. Cet article présente les caractéristiques d'un nouveau pulvérisateur à commande numérique utilisant la technologie PWM (Pulse Width Modulation, ou buse à pulsation). Le système PWM permet de moduler le débit de chaque diffuseur grâce à la modification de la durée du cycle d'ouverture des buses (DutyCycle). Le débit pulvérisé au niveau de chaque buse peut varier de manière quasi instantanée dans une gamme de 1 à 4, à pression constante.

ÉTUDE L'UMT EcoTech (IFV-Inrae), Optima Concept et Supray Technologies ont collaboré depuis 2021 à la mise au point d'un prototype de pulvérisateur innovant permettant d'ajuster précisément, sur une grande plage et de manière très réactive, les doses de produits phytosanitaires au vignoble en fonction de cartes de préconisation.

RÉSULTATS Les résultats confirment l'intérêt du système PWM en viticulture pour contrôler les quantités de bouillie appliquées à une échelle spatiale fine. Cette technologie, désormais au point, ouvre des perspectives très prometteuses pour le développement d'une nouvelle génération de pulvérisateurs permettant une réduction significative des intrants phytosanitaires.

MOTS-CLÉS pulvérisation de précision, buses à pulsation, PWM, Écophyto.

FIG. 1 : Prototype de pulvérisateur développé dans le cadre du projet ABA PIC et basé sur la technologie de contrôle des buses PWM (dispositif baptisé SRP (Smart Regulation Pressure) par Optima Concept)



doses appliquées, mais également de pouvoir simuler différentes modalités d'application des produits de manière à les comparer (traitement unifacé, traitement face par face, traitement du bas vers le haut ciblant préférentiellement les faces inférieures des feuilles). Des comptages de maladie (mildiou ou oïdium selon le produit ou programme de protection testé) réguliers sur la campagne permettent de suivre l'évolution pour chacune des modalités de manière à identifier les facteurs d'efficacité de la protection.

Un nouveau pulvérisateur à commande numérique
Cahier des charges et prototype

L'IFV et Inrae ont travaillé, durant l'été 2021, à la définition d'un cahier des charges à destination des fabricants de pulvérisateurs pour la conception d'appareils répondant aux objectifs mentionnés ci-dessus. Ce cahier des charges contenait les éléments suivants :

- la possibilité de piloter chaque buse indépendamment ;
 - une étendue de la plage de variation des débits pulvérisés de 1 à 4 au niveau de chaque buse ;
 - une réactivité dans le changement des doses appliquées inférieure à une demi-seconde ;
 - une précision dans l'application des doses et des répartitions consignés à moins de 5 % près ;
 - une localisation dotée d'une précision inférieure au décimètre ;
 - la capacité à lire des cartes de consignes géolocalisées ;
 - et la possibilité d'un enregistrement géoréférencé de tous les paramètres d'application pour assurer une traçabilité des opérations sur les parcelles.
- En réponse au cahier des charges, la société Optima Concept (leader français en électronique et informatique embarqué pour la pulvérisation agricole) et Supray Technologies (bureau d'études de France Pulvé pour les cultures spécialisées) ont initié un rapprochement à l'automne 2021. Ces deux partenaires ont associé leurs bureaux d'études afin de fournir un prototype de pulvérisateur répondant au cahier des charges.

Le prototype a été livré en juillet 2022 sur le site Inrae de Montpellier (Figure 1). Développé sur la base d'un pulvérisateur WinAir Berthoud de configuration face par face de technologie jet porté, le prototype est équipé de quatre descentes permet-

FIG. 2 : Principe de fonctionnement des buses PWM

Trois exemples de valeurs de DutyCycle (10%, 50% et 90%) sont présentés sur le schéma (le débit figure en ordonnée et le temps figure en abscisse). Le débit moyen figure en trait pointillé.

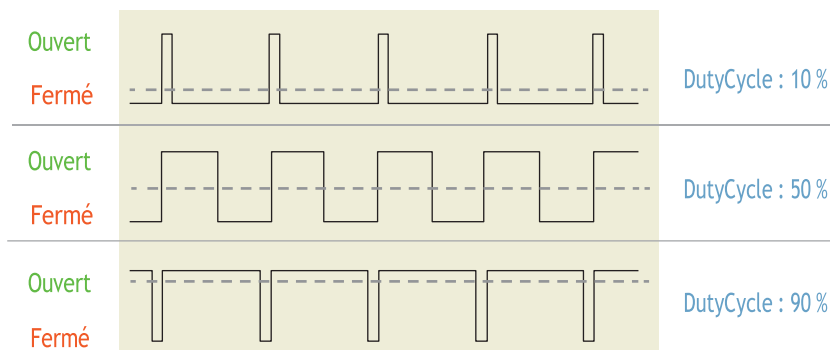
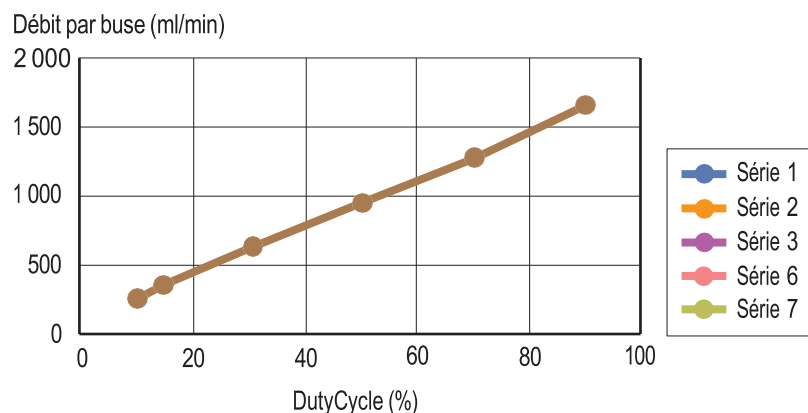


FIG. 3 : Courbes de calibration de la buse AD90°ISO 04 établies à 4 bar sur deux descentes de l'appareil (le pulvérisateur en dispose de quatre au total)

La calibration de la buse AD90°ISO 04 a été réalisée sur les rampes situées à droite de l'appareil (DI, DE) et pour différentes hauteurs de buses ouvertes (deux, trois et quatre hauteurs de buses ouvertes). Ces courbes sont identiques.



tant de traiter deux rangs de vigne. Chaque descente dispose de quatre hauteurs de buses, soit seize buses au total sur l'appareil. Le pulvérisateur est équipé de la solution de contrôle des buses SRP (Smart Regulation Pressure) développée par la société Optima Concept. Cette solution est basée sur la technologie PWM (acronyme anglais pour « Pulse Width Modulation » ou modulation de largeur d'impulsion en français). Le circuit de pulvérisation a été adapté par les deux partenaires industriels afin de réussir l'intégration de la solution PWM.

PWM ou modulation de largeur d'impulsion

La technologie de contrôle des buses PWM est basée sur le principe d'un temps d'ouverture des buses modulable

permettant de faire varier le débit. Au niveau de chaque diffuseur, un porte-buse spécial intégrant un solénoïde remplace le porte-buse classique. La buse, elle, reste classique. La fréquence de fonctionnement (ici 15 Hz) détermine le nombre de cycles d'ouverture et de fermeture par seconde. À chaque cycle, une valeur de DutyCycle (DC, en %) paramétrable permet de modifier le débit. Le DutyCycle correspond au pourcentage de temps durant lequel la buse est ouverte. Le DutyCycle est augmenté ou diminué automatiquement selon le débit souhaité (Figure 2). Le prototype de pulvérisateur, conçu dans le cadre du projet ABA PIC, est équipé d'une console (modèle Xenius) développée par Optima Concept permettant de lire des cartes de préconisation au format *shapefile*. Il est

FIG. 4 : Évaluation de la précision de l'application des volumes par hectare consignes en utilisant une carte contenant sept polygones

Une valeur consigne de volume/ha est attribuée à chaque buse (AD90°02 et AD90°04) au sein de chacun des sept polygones.



également équipé d'un GPS RTK⁽²⁾ permettant d'avoir une précision au centimètre près et d'un modem 4G pour la réception des corrections. Pour les besoins de l'étude et pour des questions de stabilité du signal, nous utilisons la correction RTK de chez Teria⁽³⁾.

Le suivi en temps réel et l'enregistrement des paramètres d'application du pulvérisateur sont possibles grâce à la présence d'un capteur de pression et de quatre débitmètres électromagnétiques positionnés sur chacune des descentes de l'appareil. Un enregistrement géoréférencé des débits instantanés et de la pression à fréquence de 10 Hz permet de contrôler la précision dans l'application des volumes/ha consignes.

Calibration du pulvérisateur prototype Optima Supray Faire varier la durée du cycle d'ouverture des buses

Le dispositif SRP d'Optima Concept intègre la fonction DPAE (débit proportionnel à l'avancement électronique) au niveau de chacune des seize buses équipant l'appareil. Il permet de maintenir un volume/ha consigne au niveau de chacune des buses pour différentes vitesses d'avancement. Pour répondre à la valeur du volume/ha consigne, le débit pulvérisé par chaque buse est piloté indépendamment au niveau du porte-buse PWM grâce à la modification du DutyCycle.

Le circuit du pulvérisateur a été adapté de telle sorte que la modification des débits s'effectue à pression constante. En effet, la réussite de l'intégration de

la technologie PWM dans le circuit de pulvérisation est conditionnée au maintien d'une pression constante, quel que soit le nombre de hauteurs de buses ou de tronçons ouverts, et pour une large gamme de calibres et de modèles de buses utilisés. C'est le cas sur le prototype. Même avec l'utilisation de buses de calibre 04, la variation de pression dans le circuit est limitée à 0,2 bars, quels que soient le nombre de descentes, le nombre de buses ouvertes et la valeur de DC appliquée au niveau des buses.

Différents types de buses ont été testées pour des calibres de buses, allant du 01 orange au 04 rouge (code ISO) : buses à fente classique (XR80°, Teejet), buses à fente à injection d'air (IDK90°, Lechler) et buses à fente à chambre de décompression (AD90°, Lechler).

Des courbes de calibration débit/DutyCycle

Pour réguler le volume/ha au niveau de chaque type de buse, des courbes de calibration sont nécessaires. Ces courbes de calibration relient la valeur de débit pulvérisé par la buse (exprimée en ml/min) à la valeur de DutyCycle (exprimée en %) pour une pression donnée dans le circuit.

La courbe de calibration montrée en Figure 3 a été établie pour une pression dans le circuit de quatre bars et pour un jeu de buses AD90° de calibre

Plusieurs cartes de préconisation ont été soumises au système de commande du pulvérisateur.

ISO 04. La calibration a été effectuée sur une plage de DutyCycle comprise entre 10 à 90 %. Pour des valeurs de DC comprises entre 90 et 100 %, le débit est fixe. Au-dessous d'un DC de 15 %, le spectre des gouttes ne se forme plus toujours correctement et des différences de débit entre buses sont susceptibles d'apparaître. Sur la plage de DC comprise entre 20 % et 90 % (que nous avons retenue comme étant la plage de fonctionnement de la PWM), le débit des buses AD90°04 varie entre 0,37 l/min et 1,60 l/min, soit une plage de variation conforme au facteur 4 établi dans le cahier des charges initial. Nous remarquons, sur la Figure 3, une variation linéaire du débit pulvérisé en fonction du DC et une indépendance de la calibration en fonction du nombre de hauteurs de buses ouvertes ou de la descente considérée.

Analyse de la précision d'application Tests réalisés au vignoble et en conditions contrôlées

Afin de tester la capacité du prototype à appliquer précisément les doses consignes, plusieurs cartes de préconisation ont été soumises au système de commande du pulvérisateur. Ces cartes étaient constituées de sept polygones, autrement dit de sept « zones consignes » situées sur un chemin à proximité immédiate des locaux Inrae, ce chemin nous servant à tester la bonne application des cartes avant traitement sur les parcelles viticoles (Figure 4). Dans chaque polygone, des valeurs de volume/hectare consignes ont été définies pour chacune des seize buses. Les cartes de préconisation ont été conçues de manière à exploiter une très large plage de variation du DutyCycle en mode DPA. Une fois soumise au système de commande du pulvérisateur, la carte de préconisation est automatiquement appliquée par celui-ci. Les paramètres de pulvérisation (débit, pression, vitesse d'avancement) sont enregistrés et géoréférencés. Les valeurs lues par les débitmètres à la fréquence de 10 Hz au niveau de chacune des quatre descentes de l'appareil ont été utilisées pour analyser la précision du prototype dans l'application des volumes/ha consignes.

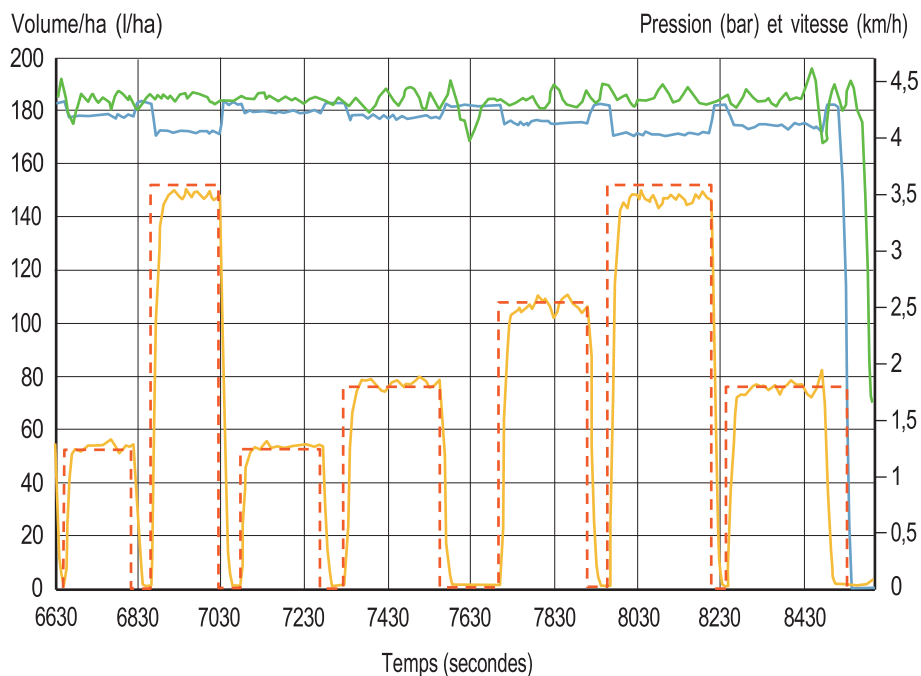
La Figure 5 présente un exemple d'application d'une des cartes de préconisation contenant les sept polygones. Plus précisément, le graphique présente le suivi du volume/ha consigne et du volume/ha appliqué pour une des quatre descentes en fonction du temps.

(2) Global Positioning System Real Time Kinematic.

(3) www.reseau-teria.com

FIG. 5 : Comparaison entre le volume/ha instantané appliqué par une des descentes du pulvérisateur (calculé à partir des valeurs enregistrées par les et le volume/ha consigne de cette même descente sur chacune des sept zones de la carte)

- Volume/ha instantané appliqué par une des descentes du pulvérisateur
- - - Volume/ha consigne de la descente sur chacune des sept zones de la carte
- Pression hydraulique dans le circuit (bar)
- Vitesse d'avancement (km/h)



Résultats : une très bonne précision d'application

Les résultats des analyses des fichiers d'enregistrement des valeurs de débits instantanés montrent une très bonne précision dans l'application des volumes/ha consignés (Figure 6). Dans toutes les configurations testées correspondant à 42 points de comparaison, la précision du débit appliqué à l'échelle du rang par les deux descentes est inférieure à 5,4 % (erreur maximale) avec une moyenne des valeurs absolues des erreurs voisine de 2,5 %.

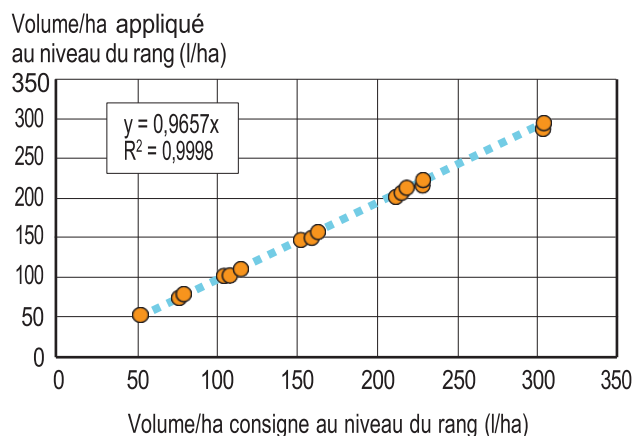
Ce niveau de précision a été confirmé au vignoble par des essais de même type (avec application d'une carte de préconisation). Des essais complémentaires ont permis d'évaluer d'autres paramètres de performance de la machine. Concernant la réactivité du prototype, le temps nécessaire pour ouvrir, fermer la pulvérisation ou changer le volume/ha appliqué est voisin de 100 ms. Pour ce qui concerne la précision du positionnement géographique de l'application de consignés préalablement géo-référencés au sein de cartes de préconisation, des essais réalisés à 7,4 km/h

Cette innovation devrait se développer en cultures pérennes.

ont montré que l'imprécision était inférieure dans tous les cas à 26 cm (moyenne de 23 cm sur douze essais) et inférieure à 19 cm à 4,0 km/h (moyenne de 14 cm sur douze essais).

FIG. 6 : Comparaison entre le volume/ha consigne (en abscisse) et le volume/ha appliqué (en ordonnée) au niveau d'un rang entier

Données établies en utilisant les valeurs lues par les débitmètres au niveau des quatre descentes du pulvérisateur (42 points de comparaison).



Une technologie prometteuse

La technologie PWM développée par Optima Concept et déployée avec Berthoud sur le prototype présenté dans cet article a permis de répondre à l'intégralité du cahier des charges qui avait été fixé. Cette innovation apparaît prometteuse et devrait se développer en cultures pérennes, compte tenu du potentiel en termes de précision, modularité (robustesse de la

quantité d'application malgré les variations de vitesse et de volume/ha appliqué) et réactivité. La solution développée constitue une réelle avancée vers le développement d'une pulvérisation

de précision. La société vient de développer un nouveau dispositif, baptisé AFS (Automatic Foliage Spraying), qui consiste à coupler la technologie PWM avec des capteurs ultrasons de manière à couper automatiquement le jet en présence de trous dans la végétation. Le dispositif AFS fait partie des innovations nominées au dernier Sitevi. Elle est en cours d'évaluation par l'UMT EcoTEch à Montpellier. ▶

POUR EN SAVOIR PLUS

CONTACTS : maude.lewis@inrae.fr ; sebastien.codis@vignevin.com