



HAL
open science

Estimation dynamique du rendement en viticulture de précision par imagerie radar en ondes millimétriques

Dominique Henry, Hervé Aubert, P Galaup, T Véronèse

► To cite this version:

Dominique Henry, Hervé Aubert, P Galaup, T Véronèse. Estimation dynamique du rendement en viticulture de précision par imagerie radar en ondes millimétriques. XXIIIème Journées Nationales des Microondes, Jun 2024, Antibes - Juan les Pins, France. <hal-04648005>

HAL Id: hal-04648005

<https://hal.science/hal-04648005v1>

Submitted on 15 Jul 2024

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.



HAL Authorization

Estimation dynamique du rendement en viticulture de précision par imagerie radar en ondes millimétriques

D. Henry¹, H. Aubert^{1,2}, P. Galaup³, T. Véronèse³,

¹LAAS-CNRS, 7 avenue du Colonel Roche, 31400 Toulouse

²Toulouse INP - Institut National Polytechnique

³Ovalie-Innovation, 2 rue Marguerite Duras, 32000 Auch

dhenry@laas.fr

Résumé — Ces travaux décrivent une méthode d'estimation du rendement en viticulture de précision utilisant un système radar mobile en ondes millimétriques. Le radar fonctionne à une fréquence porteuse de 122GHz et est installé sur un rover se déplaçant entre les rangées de vigne. Les résultats obtenus montrent qu'il est possible d'estimer la masse des grappes avec une erreur inférieure à 10%.

1. Introduction

L'estimation du rendement est un enjeu majeur en viticulture. Le rendement, que l'on désigne comme la masse ou le volume de grappes de raisin récoltés par surface, est généralement estimé manuellement deux ou trois mois avant les vendanges. C'est une étape fastidieuse pour les viticulteurs, mais néanmoins indispensable pour la logistique viticole, à savoir la location de matériel agricole, le nombre de personnes nécessaires aux vendanges et l'optimisation d'un modèle économique pour les caves coopératives. L'erreur de l'estimation manuelle du rendement est généralement supérieure à 10%, et reste sensible aux variabilités parcellaires, ainsi qu'aux aléas climatiques, qui peuvent modifier considérablement le rendement final.

Pour faciliter l'estimation du rendement, plusieurs technologies de télédétection intra-parcellaire ont émergé ces dernières années en viticulture de précision. Ces solutions reposent généralement sur la détection optique des grappes [1, 2]. Les capteurs optiques présentent plusieurs avantages : ils sont facile d'utilisation, peu onéreux, et les images peuvent être facilement interprétées. Mais ils possèdent aussi des inconvénients pour cette application : les grappes cachées par les feuilles ne sont pas détectées, l'estimation d'un volume peut s'avérer difficile sur des images, et le capteur est sensible à la luminosité et aux teintes (le rendement doit pouvoir être estimé pour toutes les variétés, et à différents stades de maturité). Une autre technologie, utilisant des radars millimétriques FM-CW (onde continue à fréquence modulée) est envisageable pour l'estimation du rendement en s'affranchissant des inconvénients des solutions optiques. En effet, les ondes électromagnétiques sont insensibles aux couleurs de l'environnement, l'estimation du volume est envisageable par la mesure de la profondeur, et l'eau, principal consti-

tuant des grappes de raisin, génère une importante rétro-diffusion des ondes électromagnétiques. Enfin, les grappes cachées par les feuilles sont potentiellement détectables par les ondes millimétriques.

Des travaux préliminaires ont montré la faisabilité d'estimer le rendement en viticulture avec une erreur inférieure à 10% à l'aide de radars FM-CW aux fréquences de 24GHz, 77GHz et 122GHz [3]. En revanche, le système était statique et non-compatible avec une utilisation sur de grandes surfaces à l'échelle d'un vignoble. De plus, il est nécessaire d'augmenter la robustesse de l'estimation du rendement sur un jeu de données offrant plus de variabilité. Ces nouveaux travaux [4] présentent donc une estimation du rendement en viticulture (le rendement désigne ici la masse des grappes de raisin récoltées) à l'aide d'un radar FM-CW installé sur un vecteur mobile (rover). Après une description du système de mesure, les différentes étapes de traitement du signal sont décrites, et une estimation du rendement est proposée à partir de mesures effectuées à différentes dates sur environ 380-400 pieds de vigne.

2. Système de mesure et méthode de balayage

Les capteurs utilisés pour la mesure du rendement sont des radars FM-CW commercialisés par SiliconRadar GmbH [5] fonctionnant à une fréquence de base $f_b=119.3\text{GHz}$ et une bande de modulation $B=6.5\text{GHz}$. Cette bande de modulation permet d'obtenir une résolution en profondeur $d=\frac{c}{2B}=2.3\text{cm}$ où $c=3.10^8\text{m/s}$ représente la vitesse de la lumière dans le vide. La puissance émise maximale transmise par le radar est de 5dBm. Les ondes radars sont transmises et reçues par des antennes patchs polarisées linéairement à travers une lentille diélectrique générant un angle d'ouverture $\theta_{3dB}=8^\circ$. Les chirps (signaux modulés en fréquence) sont émis avec un temps de répétition T_{rep} variant entre 25ms et 30ms. Le radar est installé sur une plateforme mobile (rover) munie d'un moteur permettant un balayage mécanique de la vigne en élévation, notée θ . Une photographie du radar installé sur le rover est disponible sur la Figure 1. Le balayage en élévation est effectué entre les angles $\theta_{min}=10^\circ$ et $\theta_{max}=40^\circ$ avec une vitesse angulaire $\omega=60^\circ/\text{s}$. r représente la dis-

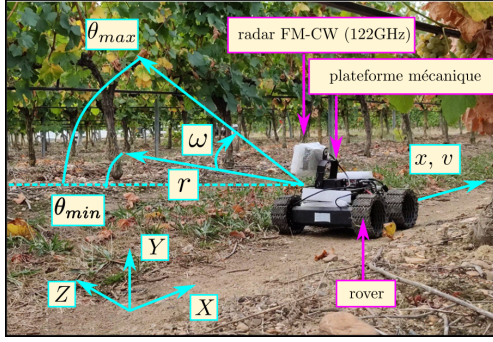


FIGURE 1. Photographie du radar installé sur le rover effectuant un scan d'une rangée de vigne.

tance radiale séparant le radar de la rangée de vigne, v la vitesse linéaire du rover, et x la distance parcourue par le rover le long de la rangée. y représente la hauteur par rapport au sol et z la profondeur. Ainsi, le balayage du faisceau radar s'effectue simultanément le long de la rangée (déplacement du rover) et en élévation (rotation de la plateforme mécanique). Ce type de balayage peut s'apparenter à la méthode *scanSAR* décrite dans [6].

Il est important de pouvoir dimensionner la zone illuminée par le radar afin d'estimer le pourcentage de grappes de raisin scannées durant la mesure. Cette zone illuminée peut être décrite par une approche géométrique où les paramètres clés sont affichés sur la Figure 2. Le radar est représenté par le point P_k et se déplace le long de l'axe X à une hauteur h_0 au-dessus du sol. L'indice k représente le $k^{ième}$ chirp émis par le radar avec un temps de répétition T_{rep} . La zone illuminée par l'antenne du radar dans le plan (Xy_0Z) , où y_0 représente la profondeur entre le radar et la cible, peut être modélisée par une ellipse de demi grand axe a_k et de demi petit axe b_k (les lobes secondaires de l'antenne ne sont pas pris en compte). Les coordonnées du centre de l'ellipse M_k sont donc :

$$\begin{aligned} x_k &= v \times k \times T_{rep} \\ y_k &= y_0 \\ z_k &= z_0 \times \tan(\theta_k) + h_0 \end{aligned} \quad (1)$$

θ_k représente l'angle en élévation lorsque le $k^{ième}$ chirp est émis, et est défini par :

$$\theta_k = \begin{cases} \theta_{min} + \omega \times k \times T_{rep}, & \text{si } \Delta\theta \leq \omega \times k \times T_{rep} \\ \theta_{max} - \omega \times k \times T_{rep}, & \text{si } \Delta\theta > \omega \times k \times T_{rep} \end{cases} \quad (2)$$

θ_k est donc une fonction périodique de période $\frac{\Delta\theta}{\omega}$ d'amplitude $\Delta\theta = \theta_{max} - \theta_{min}$. Enfin, les demi axe a_k et b_k sont définis par :

$$\begin{aligned} a_k &= \frac{1}{2}(\tan(\theta_k + \theta_A) - \tan(\theta_k - \theta_A)) \\ b_k &= z_k \times \tan(\varphi_A) \end{aligned} \quad (3)$$

θ_A et φ_A représentent la moitié des angles d'ouverture de l'antenne respectivement en élévation et azimut. Une simulation de la zone illuminée par le radar dans le plan

(Xy_0Z) sur une longueur de 2m est affichée sur la Figure 3 pour des vitesses v du rover respectivement de (a) 0.2m/s et (b) 0.4m/s. Les autres valeurs de paramètres, et proches des conditions de mesures sur terrain, sont : $y_0=1.2m$; $h_0=0.3m$; $\omega=60^\circ/s$; $\theta_{min}=10^\circ$; $\theta_{max}=40^\circ$; $\theta_A=\varphi_A=\theta_{3dB}/2=4^\circ$ et $T_{rep}=30ms$. Comme attendu, plus la vitesse du rover est élevée, plus la surface totale scannée par le radar sera petite. On observe aussi le même phénomène lorsque le temps de répétition T_{rep} augmente. Afin de scanner un maximum de grappes de raisin et de minimiser les erreurs d'estimation du rendement, il faut maximiser la surface scannée par le radar. En émettant l'hypothèse que la position des grappes dans les rangées de vigne suit une loi normale selon les axes Y et Z et une loi uniforme selon l'axe X , on estime que le nombre de grappes scannées lors d'une mesure varie entre 80% et 95% avec les valeurs de paramètres décrites dans ce paragraphe.

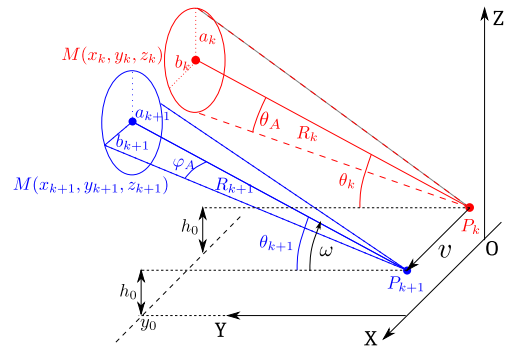


FIGURE 2. Schéma de la méthode de balayage

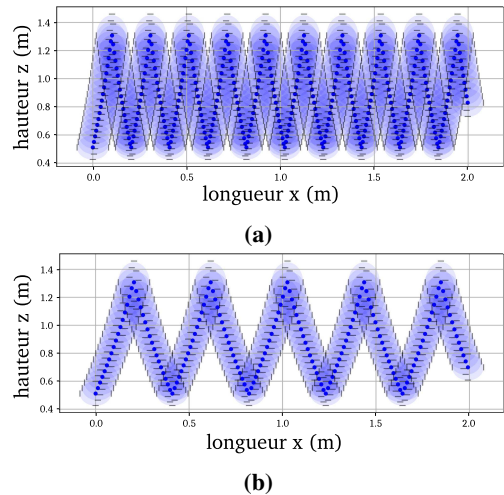


FIGURE 3. Simulation de la zone illuminée par le radar à une profondeur de 1,2m pour une vitesse du rover de (a) 0,2m/s et (b) 0,4m/s.

3. Estimation du rendement

Les images radar enregistrées durant les mesures sont des données bidimensionnelles de type *temps long* \times *distance radiale*. Avant de définir un estimateur du rende-

ment, un traitement préliminaire des image est nécessaire dont voici les principales étapes (pour davantage de détails sur ces étapes, voir [4]) :

- Une région d'intérêt est définie à partir de la détection des échos radars de la rangée de vigne mesurée ;
- Le temps long est converti en longueur à partir de la vitesse du rover enregistrée pendant les mesures. Les valeurs d'amplitude des images radar sont interpolées pour obtenir des données de type *longueur* \times *distance radiale* ;
- Les échos radars de l'image sont segmentés afin à partir d'isolignes de niveau d'écho [7] et des caractéristiques issues de ces échos sont extraites, comme la valeur maximale du niveau d'écho e_{max} et le nombre de pixels \mathcal{N} à l'intérieur de l'isoligne.
- Les caractéristiques de ces échos radars sont ensuite classées afin d'établir si ces échos correspondent à une détection des grappes ou du clutter (échos parasites).

Pour cette dernière étape, la distinction entre clutter et échos radar des grappes peut s'avérer difficile car d'autres cibles réfléchissent les ondes électromagnétiques dans cet environnement (les sarments, les piquets et les tendeurs métalliques). Pour ce faire, une classification des k-plus proches voisins [8] est appliquée sur un jeu de données d'entraînement issu de mesures avant récolte (à fort rendement, où les grappes sont nombreuses), et après récolte (seul le clutter est présent), représentant 17103 échos radar. Deux classes sont ainsi définies : la classe *grappes et clutter* et la classe *clutter* (on notera que la classe *grappes* ne peut pas être définie de manière expérimentale). Un score de classification de 77,3% (8855 échos radars) sur un jeu de données de test est obtenu, ce qui demeure satisfaisant car le clutter est toujours présent, avant ou après récolte. Afin d'appréhender le rôle de cette classification dans l'estimation du rendement, les distributions Φ des caractéristiques \mathcal{N} et e_{max} des échos radar sont affichées sur la Figure 4 pour les vrais positifs (couleur bleue) et les vrais négatifs (couleur rouge) de la classification. En présence de grappes, on observe une augmentation du nombre d'échos radar ayant (i) un nombre de pixels plus grand et (ii) un maximum d'écho plus élevé. Compte tenu des propriétés réfléchissantes des grappes de raisin, ces résultats sont cohérents. La classification peut aussi être représentée spatialement, comme sur les échos radar segmentés sur la Figure 5 avant et après récolte. L'échelle de couleur du rouge au bleu représente la probabilité d'appartenir soit à la classe *clutter* (valeur 0) ou bien à la classe *grappes et clutter* (valeur 1). On observe un plus grand nombre d'échos radar appartenant à la classe *grappes et clutter* avant récolte.

Une fois ces étapes effectuées, un estimateur statistique du rendement viticole est proposé :

$$y_{est} = a\xi(\bar{\mathcal{N}}) \sum_{m=1}^M (p_m \times \mathcal{N}_m)^b \quad (4)$$

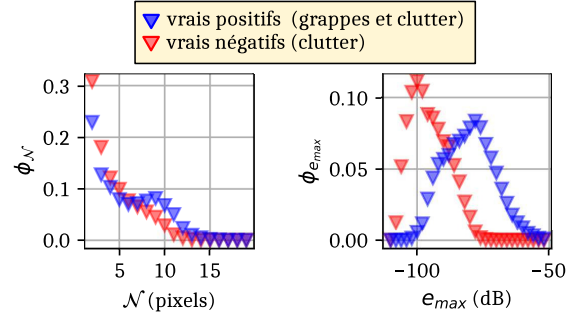


FIGURE 4. Distribution des caractéristiques \mathcal{N} (nombre de pixels) et e_{max} (valeur maximale d'écho) des échos radars après classification.

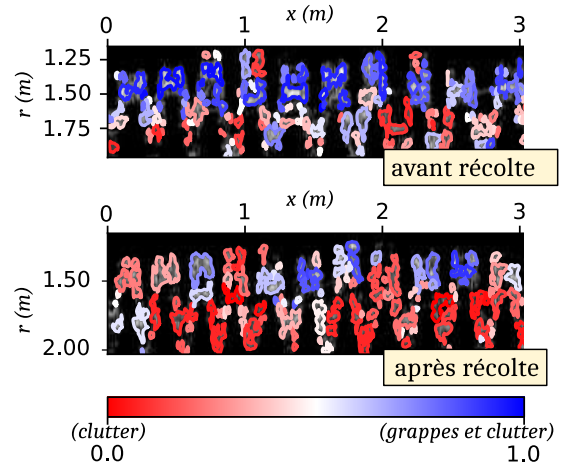


FIGURE 5. Échos radar segmentés avant et après récolte.

avec

$$\xi(x) = \frac{1}{2}(1 + \tanh(c \times x + d)) \quad (5)$$

et

$$\bar{\mathcal{N}} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \mathcal{N}_m \quad (6)$$

\mathcal{N}_m représente le nombre de pixels du m^{ieme} écho radar, p_m est la probabilité qu'un écho radar appartienne à la classe *grappes et clutter*. $\xi(\bar{\mathcal{N}})$ est un facteur de correction dépendant du nombre moyen de pixels par écho radar, noté $\bar{\mathcal{N}}$, corrigeant des biais observés entre les mesures des années 2019 et 2020. $\bar{\mathcal{N}}$ a tendance à augmenter en présence de grappes (voir *condensation des isolignes* [7]). Les coefficients a , b , c et d sont calculés en appliquant la méthode non-linéaire des moindres carrés sur une partie du jeu de données d'entraînement. Les coefficients suivants sont obtenus : $a=4.7 \times 10^{-2}$ kg.pixels $^{-b}$; $b=9.7 \times 10^{-1}$; $c=1.0$ pixels $^{-1}$; $d=-4.7$.

4. Résultats

Les mesures ont été effectuées au vignoble de l'IFV (Institut Français du Vin et de la Vigne) près de Gaillac durant les étés 2019 et 2020, sur une parcelle *conservatoire* comportant différents cépages rouges et blancs. Au

TABLEAU 1. Rendement estimé and erreur relative calculée à partir des mesures effectuées en 2019 et 2020

date	mesuré (kg)	estimé (kg)	ε (%)
30-07-2019	897.8	1013.5	12.9
08-08-2019	897.8	945.0	5.3
22-08-2019	200.7	279.7	39.4
27-08-2019	1469.4	1541.6	4.9
03-09-2019	1469.4	1516.2	3.2
12-09-2019 *	1469.4	1511.9	2.9
23-09-2019	0	1581.2	-
01-07-2020	1232.3	732.0	40.6
08-07-2020	1232.3	1020.8	17.2
13-07-2020	1232.3	1098.1	10.9
22-07-2020	1232.3	1116.7	9.4
17-08-2020 †	1232.3	1241.1	0.7
31-08-2020 † *	1232.3	1283.8	4.2
07-09-2020 † *	1232.3	1240.3	0.6
30-09-2020 †	0	377.9	-

† : la moitié de ces mesures est utilisée comme données d'entraînement pour la classification des échos radar

* : données utilisées pour calculer les coefficients de l'estimateur : $a=4.7 \times 10^{-2}$ kg.pixels^{-b}, $b=9.7 \times 10^{-1}$, $c=1.0$ pixels⁻¹ and $d=-4.7$

total, 13 rangées de vigne d'une longueur d'environ 50m ont été mesurées à différentes dates. Pour obtenir la valeur vraie du rendement, les rangées ont été récoltées manuellement et la masse des grappes a été pesée en période de vendanges. Les résultats des estimations sont reportés dans le Tableau 1. Les dates du 23-09-2019 et du 30-09-2020 sont des mesures effectuées après récolte. Des estimations avec une erreur ε inférieure à 10% sont obtenues, notamment aux dates les plus proches des récoltes (le 12-09-2019 et le 07-09-2020). Cette erreur augmente lorsque l'on recule dans l'année avec une estimation du rendement beaucoup plus faible au début de l'été (jusqu'à 40% d'erreur le 01-07-2020), car le volume des grappes est beaucoup plus petit à cette période. On remarquera que le rendement après récolte le 23-09-2019 est surestimé. Il est possible que ces mesures soient perturbées par du clutter (le radar était installée différemment entre les années 2019 et 2020). Enfin, on remarquera que l'estimation du rendement après récolte (le 30-09-2020) donne un résultat non-nul. Autrement dit, il reste des échos radars classés en tant que grappes, en réalité générés par le clutter. Ces échos résiduels permettent de déterminer la sensibilité de l'estimation, seuil en-dessous duquel il n'est pas possible d'obtenir une estimation correcte du rendement. Ce seuil est estimé à environ 1,1kg par pied de vigne.

5. Conclusion

Ces travaux ont montré la faisabilité d'estimer le rendement viticole par ondes radar millimétriques avec une erreur inférieure à 10% en installant le radar sur un vecteur mobile. Ce vecteur se déplaçait à une vitesse moyenne de 0.3m/s et d'autres campagnes de mesure sont organi-

sées pour effectuer des estimations avec des vecteurs plus rapides. Ces nouvelles mesures étudieront l'impact de la vitesse et du clutter sur l'estimation du rendement, ainsi que l'influence d'autres paramètres, comme les conditions météorologiques.

6. Remerciements

Les auteurs remercient E.Serrano, C.Gaviglio et l'équipe de l'IFV Sud-Ouest (Brames-Aigues, France) pour leur expertise et leur disponibilité, ainsi que les collègues de l'équipe MINC (LAAS-CNRS, Toulouse, France) et Ovalie-Innovation (Auch, France) pour les récoltes manuelles.

Références

- [1] R. Chamelat *et al.*, "Grape Detection By Image Processing," in *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, 2006, pp. 3697–3702.
- [2] S. Liu *et al.*, "3DBunch : A Novel iOS-Smartphone Application to Evaluate the Number of Grape Berries per Bunch Using Image Analysis Techniques," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 114 663–114 674, 2020.
- [3] D. Henry *et al.*, "Proximal Radar Sensors for Precision Viticulture," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 57, no. 7, pp. 4624–4635, 2019.
- [4] D. Henry *et al.*, "Dynamic estimation of the yield in precision viticulture from mobile millimeter-wave radar systems," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 60, pp. 1–15, 2022.
- [5] "Evalkits - Silicon Radar Wiki," <https://siliconradar.com/wiki/Evalkits>, accessed : 2021-02-04.
- [6] J. A. Richards, *Remote Sensing with Imaging Radar*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [7] D. Henry and H. Aubert, "Isolines in 3D Radar Images for Remote Sensing Applications," in *2019 16th European Radar Conference (EuRAD)*, 2019, pp. 69–72.
- [8] D. L. Wilson, "Asymptotic properties of nearest neighbor rules using edited data," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-2, no. 3, pp. 408–421, 1972.