Imagerie radar en ondes millimétriques appliquée à la viticulture

Dominique Henry

▶ **To cite this version:**

Dominique Henry. Imagerie radar en ondes millimétriques appliquée à la viticulture. Electromagnétisme. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2018. Français. NNT : 2018INPT0044 . tel-02137548

HAL Id: tel-02137548
https://laas.hal.science/tel-02137548

Submitted on 23 May 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.

Université Fédérale

Toulouse Midi-Pyrénées

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)

Présentée et soutenue par :
Dominique HENRY

le mardi 29 mai 2018

Titre :

Imagerie radar en ondes millimétriques appliquée à la viticulture

---

École doctorale et discipline ou spécialité :
ED GEET : Électromagnétisme et Systèmes Haute Fréquence

Unité de recherche :
Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (LAAS-CNRS)

Directeur/trice(s) de Thèse :

Professeur Hervé AUBERT, INP Toulouse, ENSEEIHT
Thierry VERONESE, Ovalie-Innovation

Jury :

M Laurent FERRO-FAMIL, Professeur, Université de Rennes 1, IETR	Rapporteur
Mme Claire MIGLIACCIO, Professeur, LEAT UNS CNRS	Rapporteur
M Cyril LUXEY, Professeur, IUT Nice Côte d'azur	Examinateur
M Stéphane BILA, Directeur de recherche, XLIM UMR	Examinateur
M Anthony GHIOTTO, Maître de conférence, IMS Bordeaux	Examinateur
M Raphaël ROUVEURE, Chargé de recherche, IRSTEA	Examinateur
M Eric SERRANO, IFV Sud-Ouest,	Invité
M Maxime DELBOUIS, Qualisol,	Invité
M Patrick PONS, LAAS-CNRS,	Invité
M Fabio COCCETTI, IRT Saint Exupéry,	Invité

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier mon directeur de thèse Professeur Hervé Aubert pour son encadrement ainsi que les opportunités qu'il m'a proposées pour m'investir sur différents projets parallèles durant ces 5 ans passés au LAAS-CNRS, dont les trois dernières années en tant que doctorant.

Je remercie également l'équipe d'Ovalie-Innovation et particulièrement mon co-encadrant Thierry Véronèse pour les nombreux degrés de liberté qu'il m'a offerts pour mener à bien ces travaux. Je remercie aussi Eric Serrano et André Peyre-Lavigne qui ont suivi l'évolution du projet et ont apporté leur expertise pendant les trois années de thèse.

Un merci aux membres du V'innopôle de l'IFV Sud-Ouest qui m'ont permis l'accès aux vignobles pour les campagnes de mesure.

Je remercie Patrick Pons, responsable adjoint du groupe MINC, qui a apporté son expertise et son expérience pour la conception et l'interrogation sans fil des capteurs passifs, ainsi que Fabio Coccetti pour ses contacts et sa contribution à l'acquisition des radars 77GHz et 122GHz.

Je remercie également ceux avec qui j'ai travaillé pour différents projets, notamment :

- Alexandre Dore et Michel Devy (groupe RAP) dans le cadre du projet PRESTIGE.
- Jimmy Hester et Manos Tentzeris (Georgia Tech) pour la conception du capteur passif Van-Atta et la collaboration à l'article T-MTT.
- Antony Coustou, Julien Philippe, Cristina Arenas Buendia, Maria Valeria de Paolis, Alexandre Rumeau, Emilie Debourg et Ayoub Rifai pour la simulation, la conception et la mesure des capteurs passifs sans fil.

Je continue en remerciant le reste des collègues du groupe MINC non cités précédemment, en commençant par les cadres scientifiques Daniela Dragomirescu et Alexandru Takacs, ainsi que les doctorants et ingénieurs du groupe MINC que j'ai côtoyés, en particulier : Jérémy Valleau, Matthieu Gastaldi, Zhening Yang, Mihai Alexandru, Abdel Okba, Bilal Benamrouche, Jérôme Riondet, Benoît Rougier, Aurélien Gil et la nouvelle relève : Mathieu Chalnot, Gaël Loubet et Alexandre Monti. Je remercie aussi les stagiaires avec qui j'ai pu directement travailler : Camilo Vega Farfan, Vincent Petillat et Thibaut Magalas.

Je finis par remercier Sandrine, qui m'a soutenu (et supporté ?) durant mon doctorat.

Table des matières

Introduction générale 11
1. Agriculture de précision 13
1.1. Origines 13
1.2. Domaines technologiques 14
1.2.1. Géolocalisation et navigation 15
1.2.1.1. Systèmes GNSS 16
1.2.1.2. Systèmes LPS 16
1.2.2. Analyse et gestion des données 18
1.2.3. Lecture à distance 18
1.2.3.1. *Lecture à distance par satellites* 18
1.2.3.2. *Lecture à distance proche* 19
1.2.4. Technologies à taux variable 20
1.3. De l'agriculture de précision vers la viticulture de précision 21
2. Viticulture de précision 23
2.1. Contexte 23
2.2. Technologies utilisées en viticulture de précision 24
2.2.1. La viticulture de précision dans la recherche 24
2.2.2. Les solutions proposées en industrie 26
2.2.3. La détection de grappes et l'estimation du rendement 29
2.2.4. Le radar en viticulture de précision 32
2.2.5. Les autres caractéristiques mesurables en viticulture de précision par télédétection ou détection proche 34
2.2.5.1. *La vigueur* 34
2.2.5.2. *La conductivité électrique apparente du sol* 35
2.2.5.3. *Les dimensions structurelles des rangées de vignes* 36
2.2.5.4. *La discrimination des variétés* 36
2.2.5.5. *Le stress hydrique* 36
2.2.5.6. *L'humidité du sol* 37
2.2.5.7. *L'altitude (topographie)* 37
2.2.5.8. *La détection de mauvaises herbes* 37
2.2.5.9. *La concentration en chlorophylle* 37
2.2.5.10. *La concentration en anthocyanine* 38
2.2.5.11. *L'état des greffes* 38
2.3. Discussion 38
3. Application pour l'estimation de volumes et l'interrogation de capteurs passifs 39

3.1. Introduction 39
3.2. Simulations - Balayage en trois dimensions par radar FM-CW 39
3.2.1. Génération d'un chirp 39
3.2.2. Spectre de battement et résolution en profondeur 41
3.2.3. Balayage tridimensionnel 44
3.2.3.1. *Résolution volumique* 44
3.2.3.2. *Affichage tridimensionnel de la rétrodiffusion d'une cible ponctuelle* 45
3.2.4. Estimations d'une variation de la surface équivalente radar 48
3.2.5. Erreurs générées par le bruit 50
3.2.6. Distribution et fonction de répartition discrètes des niveaux d'échos 52
3.2.6.1. *Définitions et application d'un bruit gaussien* 52
3.2.6.2. *Perturbation de la distribution discrète par la cible ponctuelle de SER variable* 53
3.2.6.3. *Modélisation d'une fonction de répartition continue $\mathcal{F}$* 55
3.2.6.4. *Définition d'un estimateur volumique* 57
3.2.7. Influence du clutter 58
3.2.7.1. *Calcul des estimateurs e_{Max}, e_A et e_W* 58
3.2.7.2. *Calcul du niveau d'écho à partir d'un nombre de voxels constant* 61
3.2.7.3. *Calcul d'un volume à un niveau d'écho constant* 61
3.3. Estimation du volume de cibles canoniques 64
3.3.1. Estimation d'une variation de volume d'une sphère métallique 64
3.3.1.1. *Paramètres de mesures* 64
3.3.1.2. *Validation du modèle de simulation de $\mathcal{F}$* 64
3.3.1.3. *Estimation du volume* 67
3.3.1.4. *Recherche d'un estimateur optimal linéairement* 69
3.3.2. Influence de la distance d'interrogation 71
3.3.2.1. *Paramètres de mesures* 71
3.3.2.2. *Estimateurs du niveau d'écho et de volume* 71
3.3.2.3. *Estimateurs optimaux indépendants de R* 74
3.3.3. Conclusion 75
3.4. Application pour l'interrogation à distance de charges variables et de capteurs passifs 77
3.4.1. Introduction 77
3.4.2. Mode de structure et mode de détection 78
3.4.3. Balayage 3D de charges ON/OFF 79
3.4.3.1. *Paramètres de mesures* 79
3.4.3.2. *Densité volumique de capteurs et affichage 3D* 80
3.4.4. Interrogation 3D de charges d'impédances variables (0Ω, 17Ω, 30Ω et 50Ω) 82
3.4.4.1. *Paramètres de mesures* 82

3.4.4.2. *Affichage 3D et limites de la densité volumique de capteurs* 83
3.4.4.3. *Estimations et distribution des niveaux d'écho* 85
3.4.5. Interrogation 3D de charges d'impédances multiples 86
3.4.5.1. *Paramètres de mesures* 86
3.4.5.2. *Affichage 3D par isosurfaces des niveaux d'échos* 87
3.4.5.3. Définition d'une distribution continue et d'estimateurs 88
3.4.6. Interrogation 3D à distance d'un capteur de température passif 90
3.4.6.1. C*aractéristiques de la thermistance et paramètres de mesure* 90
3.4.6.2. *Affichage 3D des niveaux d'écho radar en fonction de la température* 91
3.4.7. Interrogation 3D à distance d'un capteur passif microfluidique 93
3.4.7.1. *Design du capteur et paramètres de mesure* 93
3.4.7.2. *Affichage 3D et estimation de la position du ménisque* 94
3.4.8. Interrogations 3D à longue distance d'un capteur passif d'humidité 96
3.4.8.1. *Description du système radar et du capteur passif d'humidité* 96
3.4.8.2. *Interrogation radar du capteur passif d'humidité pour trois balayages différents* 97
3.4.8.3. *Interrogation radar du capteur passif à 1.3m et estimation de l'humidité relative.* 98
3.4.8.4. *Interrogation radar du capteur passif à 10m et combinaison de balayages.* 100
3.4.8.5. *Interrogation radar du capteur passif à 2.1m par un balayage de type « SAR »* 102
3.4.8.6. *Interrogation radar longue distance du capteur passif (58m)* 103
3.4.9. Conclusion sur l'interrogation de capteurs passifs par radar FM-CW 105
4. Application à la viticulture 107
4.1. Introduction 107
4.2. Go / No go ? 108
4.3. Mesures en laboratoire 112
4.3.1. Premiers essais d'estimation du volume sur des cibles artificielles 112
4.3.2. Caractérisation de l'atténuation de l'écho radar due aux feuilles 115
4.3.3. Analyse de la rétrodiffusion électromagnétique pour différentes polarisations 117
4.3.3.1. *Orientation de la grappe de raisin* 118
4.3.3.2. *Pied de vigne* 121
4.3.3.3. *Pied de vigne avec des feuilles* 122
4.3.3.4. *Pied de vigne avec des feuilles et ajout d'une grappe de raisin* 124
4.3.3.5. *Ajout d'un fil métallique horizontal dans la scène* 128
4.3.4. Sensibilité de la détection du volume des grappes 129
4.3.5. Influence du vent 133
4.3.6. Influence de la rosée 137
4.3.7. Interférences des échos entre les grappes et les sarments 139
4.4. Mesures sur le terrain 143

4.4.1. Campagne de mesure de l'été 2016 143
4.4.1.1. *Description du protocole de mesure* 143
4.4.1.2. *Rétrodiffusion électromagnétique du vignoble* 145
4.4.1.3. *Scan en 3D des pieds de vignes* 145
4.4.1.4. *Etude de la distribution des niveaux d'écho des pieds de vigne* 146
4.4.1.5. *Algorithme sélectif de génération de contours basé sur des critères surfaciques* 147
4.4.1.6. *Première estimation du volume des grappes de raisin* 150
4.4.1.7. *Répétabilité des mesures en présence de vent* 152
4.4.2. Campagne de mesure de l'été 2017 153
4.4.2.1. *Description du vignoble et des variétés de grappe* 153
4.4.2.2. *Protocole de mesure* 155
4.4.2.3. *Représentation tri-dimensionnelle de la rétrodiffusion électromagnétique des pieds de vignes* 157
4.4.2.4. *Algorithme sélectif de génération de contours basé sur la détection des maxima locaux* 158
4.4.2.5. *Choix du niveau d'écho initial* 161
4.4.2.6. *Estimation du rendement par analyse polarimétrique* 164
4.4.2.7. *Estimation du rendement au cours du développement de la grappe* 167
4.4.2.8. *Flexibilité de l'estimation par analyse polarimétrique* 168
4.4.2.9. *Estimation du rendement par analyse des amplitudes d'échos radar* 170
4.4.2.10. *Flexibilité de l'estimation par analyse d'amplitude à 122GHz* 173
4.4.2.11. *Effet de « regroupement » ou « dispersion » des échos radars* 174
4.4.2.12. *Représentation des contours en 3D* 176
4.4.2.13. *Orientation des rangées de vignes* 178
4.5. Autre application : le comptage de pommes sur les pommiers 180
4.5.1. Contexte : Projet régional PRESTIGE 180
4.5.2. Système utilisé 180
4.5.3. Protocole de mesure 181
4.5.4. Mesures effectuées sur le terrain 182
4.5.5. Calibration entre la caméra et le radar 183
4.5.6. Génération des contours radar en trois dimensions 185
4.5.7. Détection de groupements de pommes et fusion des données optique/radar 186
4.5.8. Présence de pommes et effet de *regroupement* des échos radar 187
4.5.9. Estimation du nombre de bourgeons ou de pommes 188
4.5.10. Perspectives pour le comptage de pommes 189
4.6. Synthèse et perspectives 190
Conclusion générale 193
A. Annexes 195

A.1. Radar FM-CW 24GHz DK-sR-1030E (IMST GmbH) 195
A.2. Radar FM-CW 77GHz RBK_8 (INRAS GmbH) 196
A.3. Radar FM-CW 122GHz EasyRadar (Silicon Radar GmbH) 197
A.4. Antennes patches Tx/Rx à 24GHz (IMST GmbH) 198
A.5. Antenne parabolique (Satimo) 199
A.6. Antenne cornet avec lentille ALC-42240628-01 (Ducommun) 199
A.7. Antennes cornets QSH-SL-18-26-S-20 (Q-PAR Antennas, Steatite) 200
Bibliographie 201
Publications 211

Introduction générale

L'objectif principal de ces travaux de thèse est de pouvoir estimer à distance la quantité (volumique ou massique) des grappes de raisin présentes sur les vignes à l'aide d'un radar FM-CW (*Frequency-Modulated Continuous-Wave)* fonctionnant en bande microonde ou millimétrique, avec une erreur sur le rendement inférieure à 10%. Cette problématique entre dans le cadre de la viticulture de précision (PV), et plus précisément celui de la télédétection proche (*proximal sensing*) appliquée à la PV. En effet, le système radar n'est pas embarqué sur satellite ou autres vecteurs aéroportés, mais reste basé au sol pour effectuer des estimations de rendement à l'échelle intra-parcellaire, voire à l'échelle du pied de vigne. La méthode d'estimation de rendement repose sur un balayage en trois dimensions entre les rangées de vignes afin d'extraire des informations volumiques de la rétrodiffusion de la scène, et particulièrement la rétrodiffusion des grappes de raisin. La problématique de ces travaux se résume donc sur la faisabilité d'estimer le volume de cibles spécifiques (les grappes de raisin) au sein d'un environnement électromagnétiquement complexe (l'ensemble du vignoble et les rétrodiffusions parasites). Atteindre cet objectif offre de nombreux avantages pour les viticulteurs : (i) l'amélioration du rapport rendement/qualité en supprimant au plut tôt une partie de la récolte, (ii) l'optimisation des ressources humaines et la logistique à la récolte, (iii) un remboursement le plus équitable par les assurances en cas d'intempéries qui endommageraient les pieds de vignes. Les travaux sont organisés de la manière suivante :

- La première partie est un état de l'art rapide sur l'agriculture de précision et des différentes technologies intervenant dans ce domaine, que l'on peut classer en quatre groupes : (i) la géolocalisation et la navigation, (ii) la lecture à distance, (iii) l'analyse et la gestion des données et (iv) les technologies à taux variable. Cette partie permet d'introduire la viticulture de précision, qui a ses objectifs propres, bien souvent liés au terroir.
- La seconde partie est un état de l'art de la viticulture de précision, où l'on retrouve l'ensemble des technologies décrites précédemment. On se focalisera en particulier sur les moyens d'estimations de détection et de rendement (principalement par capteurs optiques) et l'utilisation de la technologie radar en viticulture.
- Avant d'effectuer des mesures dans les vignobles, il est nécessaire de vérifier la faisabilité de l'estimation d'une variation de volume par interrogation radar. C'est l'objet de la troisième partie qui se compose de trois sous parties distinctes.
  - La première sous-partie définit des notions utilisées dans la suite du manuscrit, notamment l'interrogation radar par balayage 3D et la définition d'estimateurs statistiques représentant la variation de volume. Ces définitions sont accompagnées de simulations analytiques.
  - La seconde sous-partie des interrogations radar par balayage 3D à 24GHz est effectuée sur cibles canoniques (sphères métalliques de différents diamètres et positions) afin d'en estimer le volume.
  - La troisième sous-partie est plus applicative. À la place des sphères métalliques, on propose d'interroger avec le radar FM-CW des charges variables et des capteurs passifs (thermistance, capteur microfluidique et capteur d'humidité) en utilisant des estimateurs basés sur des niveaux d'échos dans un volume d'étude.
- Alors que dans la partie 3, on analyse les variations d'un écho radar seul, la dernière partie propose des analyses de niveaux d'échos dans des scènes complexes appliquées à la viticulture, et nécessitant le développement d'algorithmes de classification des échos radar. On étudie notamment :
  - Des mesures effectuées en laboratoire afin de caractériser la rétrodiffusion des grappes de raisin dans diverses conditions (en présence de feuilles, de bois, etc…)
  - Des mesures effectuées sur le terrain, avec en particulier la campagne de mesure de l'été 2017 et l'estimation du rendement sur 5 cépages différents, aux fréquences 24GHz, 77GHz et 122GHz.
  - D'autres applications sont aussi étudiées, comme par exemple le comptage de pommes dans des pommeraies dans le cadre du projet régional PRESTIGE.

1. Agriculture de précision

Afin de mieux appréhender certaines problématiques qui se retrouveront par la suite en viticulture de précision (partie 2), un bref historique de l'agriculture de précision (PA) est présenté ainsi qu'un état de l'art des différentes technologies utilisées que l'on peut regrouper en quatre domaines : (a) géolocalisation et navigation, (b) analyse et gestion des données, (c) lecture à distance et (d) technologies à taux variable. En parallèle de cet état de l'art sont repris les chiffres d'une enquête menée par CropLife et Purdue University (Indiana) entre 1996 et 2017 illustrant l'évolution technologique en PA sur les services proposés par les concessionnaires agricoles américains.

1.1. Origines

Un des termes employés initialement était *spatial variability* [1]–[5], le terme agriculture de précision (ou en anglais *precision agriculture*) semble s'être développé à partir de 1992 [6], avec les créations de l'ICPA (the International Conference on Precision Agriculture), en 1995 du *Precision Agriculture Center* [7] ainsi que la publication de la revue *Precision Agriculture* [8] depuis 1999. Le principe de la PA repose sur des interventions parcellaires (travail du sol, semis, récolte, fertilisation, éclaircissage, insecticide, désherbants) localisées et adaptées en fonction des besoins. Elles s'opposent à des interventions non sélectives basées sur un principe d'homogénéité valide seulement pour des parcelles à surface restreinte. Dans le cas d'exploitations couvrant plusieurs dizaines ou centaines d'hectares, des variabilités environnementales peuvent apparaître sous plusieurs formes. On dénombre notamment : (a) les propriétés du sol, (b) les variations topographiques (altitude, inclinaison du sol et ensoleillement) et (c) la présence de nuisibles (mauvaises herbes, rongeurs, insectes, autres parasites). De ces variabilités temporelles et spatiales découlent des fluctuations de rendement au sein d'une même parcelle. Des interventions intra-parcellaires localisées deviennent alors avantageuses : une utilisation adaptée des intrants permet des avantages économiques [9] et une réduction des effets néfastes sur l'environnement [10]. L'utilisation modulée de ces intrants pour de meilleurs rendements, notamment les fertilisants N, P et K (respectivement à base d'azote, de phosphore et de potassium), avait déjà été mise en évidence dès la fin des années 1980 aux Etats-Unis, notamment le développement des *Best Management Practices* (BMP's) *for management of Nitrogen* [11] à University of Minnesota. Cette prise de conscience du lien entre les variabilités environnementales (par exemple des variations du cycle de l'azote) et le rendement des récoltes a permis la naissance de la PA et le développement d'une stratégie de gestion spécifique des parcelles ou SSM (site-specific management) [12]. Elle se traduit depuis les années 2010 aux Etats-Unis par une gestion des intrants appelée 4R (Right source, Right rate, Right time, Right place) [13], c'est-à-dire appliquer le *bon intrant* au *bon taux*, au *bon endroit* et au *bon moment*.

Les occurrences de quelques mots-clés représentatifs de la PA sont présentées (Figure 1) pour un nombre relatifs de publications de la bibliothèque numérique ACSESS (Alliance of Crop, Soil, and Environmental Science Societies) [14] regroupant plus de 120000 travaux de recherche de l'ASA (American Society of Agronomy), la CSSA (Crop Science Society of America) et la SSSA (Soil Science Society of America). En parallèle sont datés quelques évènements contributoires au développement de la PA. On remarque nettement la proportion croissante de mots-clés utilisés depuis 1995, en particulier l'interrogation à distance (*remote sensing*) qui totalise en moyenne 5% des publications répertoriées sur ACSESS ces 5 dernières années.

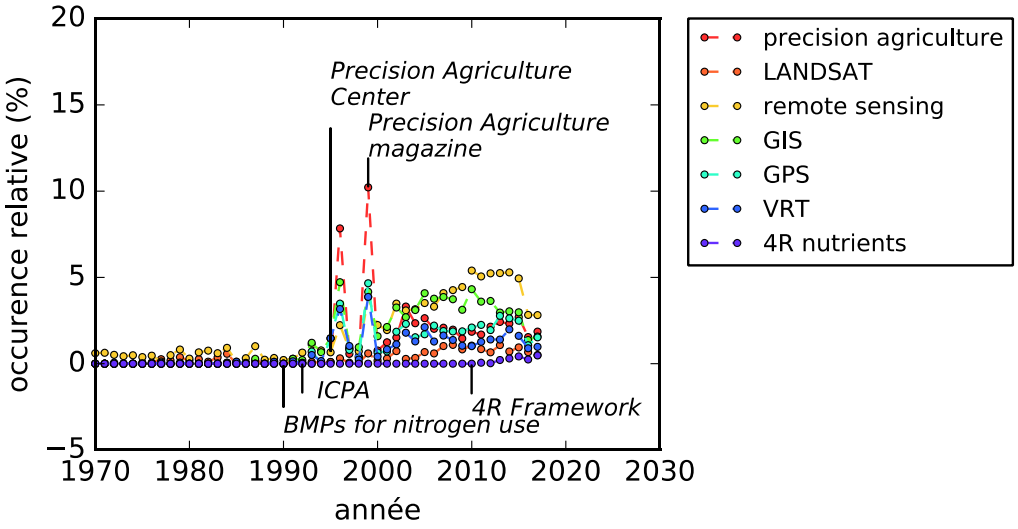


Figure 1. Occurrence relative de différents mots-clés dans les publications de la bibliothèque numérique ACSESS

1.2. Domaines technologiques

La PA évolue avec un développement technologique que l'on peut regrouper en quatre domaines représentés sur la Figure 2 :

- L'interrogation à distance (*remote sensing*) de données physiques pour une application donnée. L'expression *interrogation à distance* implique à la fois : (1) le type de vecteur utilisé (terrestre, aérien) et (2) le type de capteur (très souvent optique) pour mesurer les données à distance (c'est-à-dire sans contact direct avec les plants ou le sol).
- Les technologies liées aux géolocalisations GNSS (Global National Satellite System) et LPS (Local Positioning System), indispensables pour des grandes surfaces d'exploitations.
- La gestion et l'analyse des données, avec par exemple le développement des GIS (Geographical Information System).
- Le développement des VRT (Variable Rate Technology) représentant la technologie utilisée pour effectuer les actions modulées sur l'exploitation.

Une enquête menée par CropLife et Purdue University [15] rend compte de l'importance croissante de ces domaines dans l'agriculture de précision. Cette enquête effectuée par Erickson et al [16] met en évidence les différents services proposés par les concessionnaires agricoles depuis 1997 aux Etats-Unis dans différents Etats (en majorité la région du Midwest). Ces résultats sont retranscrits sur la Figure 3, pour l'année 2017, par une étude basée sur 209 concessionnaires agricoles (coopératives ou indépendants). On remarque notamment la place prépondérante qu'occupe la technologie GPS (Global Positioning System) pour l'aide à la cartographie et l'échantillonnage des sols (78% et 75% respectivement). L'utilisation de l'imagerie par satellite est aussi en pleine expansion où 54% des concessionnaires proposent ce type de service. En 2017, 31% des concessionnaires agricoles interrogés proposent des services utilisant des UAV (Unmanned Aerial Vehicle) (contre 19% en 2015), une technologie en pleine expansion qui s'est popularisée dès le début des années 2010.

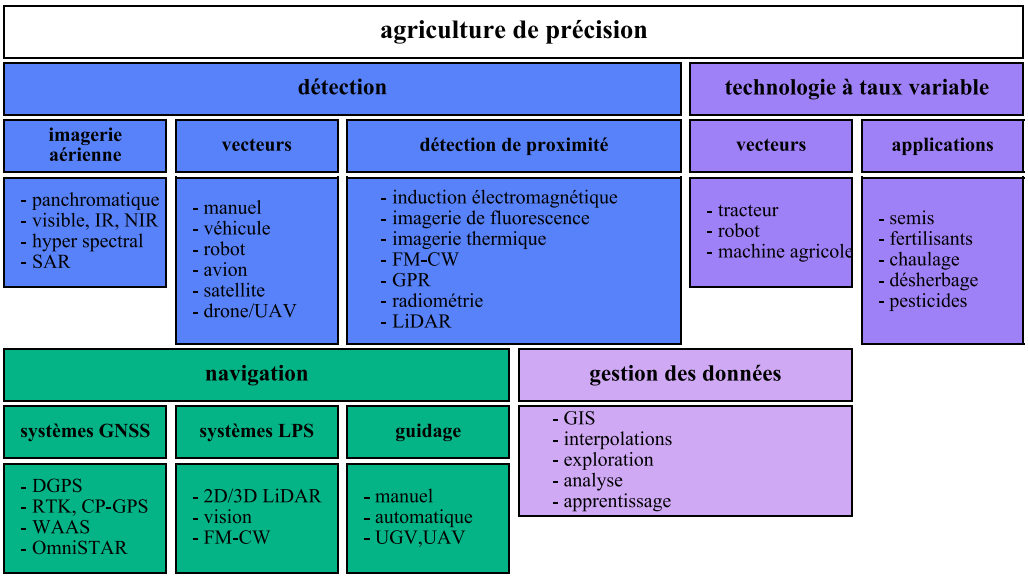


Figure 2. Les quatre domaines technologiques principaux de la PA.

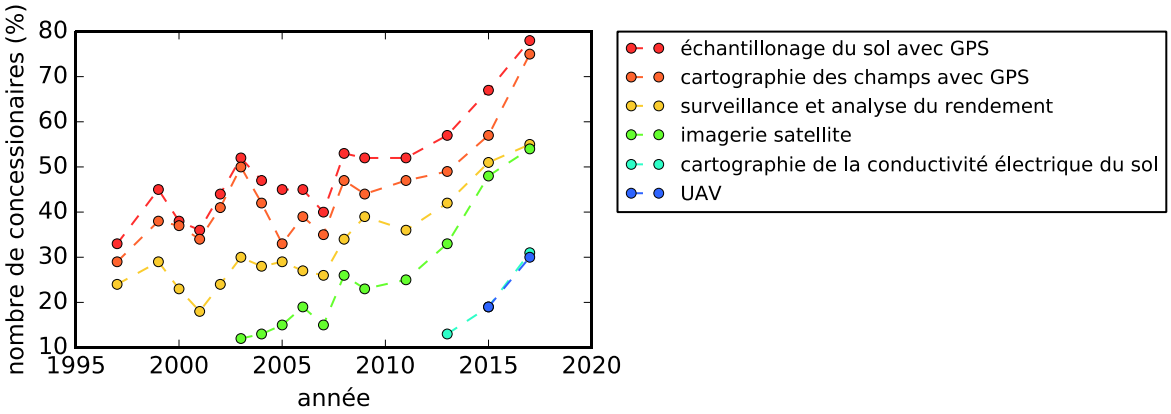


Figure 3. Evolution des services pour la PA proposés par les concessionnaires selon l'enquête de CropLife et Purdue University menée par Erickson et al [15], [16] sur une base de 209 concessionnaires agricoles américains interrogés en 2017.

1.2.1. Géolocalisation et navigation

Connaître avec précision la position d'un véhicule agricole est indispensable pour deux raisons : (a) permettre une navigation dans un environnement avec de nombreuses variabilités environnementales (cultures par rangées, en pente, champs de différentes céréales, vergers…) et (b) dans le cas de machines pour les VRT, une action précise associée à une position. Plusieurs systèmes de navigation existent afin de permettre la localisation d'un véhicule ou robot sur une exploitation. On distingue en particulier les LPS et GNSS. Les caractéristiques de ces systèmes de navigation avaient déjà été comparés (Stafford et Ambler, 1994 [3]), avec pour conclusion des avantages en faveur du GPS, notamment pour sa flexibilité et étendue (illimitée) de fonctionnement. Les LPS sont pourtant toujours utilisés pour la navigation, très souvent en complément des GNSS et d'autres capteurs comme les IMU (Inertial Measurement Unit), et entrent dans un processus d'automatisation des véhicules et de robotisation en environnement agricole.

1.2.1.1. Systèmes GNSS

La majorité des machines agricoles pour la PA utilise les systèmes GNSS pour se géolocaliser. Les premières utilisations des systèmes de géolocalisation par satellites en agriculture datent du début des années 1990 [17] avec la mise en service pour les applications civiles des systèmes GPS et GLONASS. Le développement croissant des systèmes GPS dans le domaine agricole est représenté sur la Figure 4 par les chiffres obtenus lors de l'enquête effectuée par CropLife et Purdue University auprès des mêmes concessionnaires. En 2017, 78% des concessionnaires agricoles interrogés proposent des véhicules guidés automatiquement par GPS, un chiffre en hausse constante depuis le milieu des années 2000, et qui a tendance à remplacer les véhicules par navigation GPS manuelle depuis 2010 (66% des concessionnaires proposaient des véhicules par navigation GPS manuelle en 2010, contre 55% en 2017). Parmi les véhicules GPS automatiques, on peut citer les tracteurs autonomes de CNH [18]. Une autre utilisation grandissante du GPS intervient dans les applications de logistique (34% en 2017).

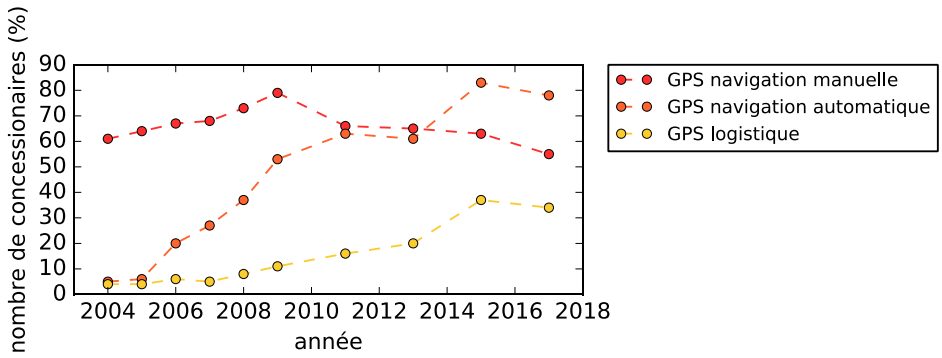


Figure 4. Systèmes GPS proposés par les concessionnaires selon l'enquête de CropLife et Purdue University menée par Erickson et al [15], [16] sur une base de 209 concessionnaires agricoles américains interrogés en 2017.

Le système DGPS (Differential GPS) était déjà préféré par rapport au SA (Selectivity Availability) et permettait d'obtenir des positions avec une précision de ±5 mètres. Par la suite, la méthode RTK (Real-Time Kinematic) ou CPGPS (Carrier-Phase enhancement pour le GPS) a permis dès la fin des années 1990 des navigations dans les champs avec une précision inférieure à 10 centimètres (van Zuydam, 1999 [19]). En revanche, une telle précision ne semble pas forcément nécessaire pour la majorité des applications. En effet 69.9% des concessionnaires agricoles interrogés en 2015 (CropLife et Purdue University [15], [16]) utilisent le système de navigation aérien du gouvernement américain WAAS (Wide Area Augmentation System) qui offre une précision de 1 mètre.

1.2.1.2. Systèmes LPS

Les LPS sont souvent utilisés pour surveiller et ajuster la navigation de véhicules autonomes UGV (Unmanned Ground Vehicule) pour l'agriculture, en complément des systèmes GNSS qui ne sont pas suffisants en termes de précision, et/ou ne sont pas efficaces dans des exploitations masquées par la canopée ou avec de nombreux obstacles. Ils comprennent notamment :

- Les systèmes laser et vision. Pour les systèmes lasers, on parle de LiDAR (Light Detection And Ranging) ou LADAR (LAser Detection And Ranging). Les capteurs lasers et caméra sont embarqués sur les UGV ou robots pour des applications très variées. Les données de différents capteurs sont parfois utilisées simultanément pour effectuer une fusion des données multicapteurs. L'objectif est généralement de corriger des trajectoires à l'aide d'algorithmes et d'obtenir des précisions de l'ordre de la dizaine de centimètres. Des points de repère sont alors utilisés (balises artificielles ou naturelles) pour la navigation.
- Tableau 1 reporte quelques applications d'aide à la navigation par systèmes lasers et de visions.

- Les systèmes microondes. Ils semblent pour le moment être moins utilisés en agriculture que les systèmes laser ou vision à cause de leur plus faible résolution mais offrent d'autres avantages, notamment un fonctionnement quelles que soient les conditions météorologiques ou la luminosité, une portée plus grande que les LiDAR, et des traitements du signal beaucoup moins complexes que les traitements d'images. Les principaux systèmes microondes utilisés pour la navigation restent les radars FM-CW (voir les différents travaux à l'IRSTEA de Rouveure et al, [20]–[22]) et sont souvent complémentaires aux systèmes de vision.
- Tableau 2 recense quelques systèmes microondes utilisés pour la navigation autonome et la géolocalisation en agriculture.

Capteurs	Applications	Méthodes	Vecteur	Référence
2D LiDAR	Navigation en verger	Trilatération. EKF	UGV (Quad)	Kurashiki et al, 2010 [23]
2D LiDAR	Navigation en champs de maïs	Filtre particulaire	Robot	Hiremath et al, 2014 [24]
LiDAR et vision	Navigation en verger (citronniers)	Contrôleur PID	UGV (Tracteur)	Subramianan et al, 2006 [25]
2D LiDAR	Navigation en champs inter-rangée	EKF, NMPC	UGV (Tracteur et remorque)	Backman et al, 2012 [26]
LiDAR et vision	Navigation et détection de souches d'oliviers	SLAM	Robot	Cheein et al, 2011 [27]
Vision	Navigation en champs de maïs	Filtre particulaire	Robot	Hiremath et al, 2014 [28]
Vision	Navigation dans les plantations de palmiers à huile	Viola & Jones et combinaison / segmentation des couleurs	Robot	Juman et al, 2016 [29]
3D LiDAR	Navigation et détection des plants de maïs	Détection et segmentation des plants et du sol	Robot	Weiss et al, 2011 [30]

Tableau 1. Exemples de systèmes LIDAR et vision pour la navigation autonome en agriculture. EKF: Extended Kalman Filter. PID: Proportional – Integrative – Derivative. NMPC: Nonlinear Model Predictive Control. SLAM: Simultaneous Localization And Mapping.

Capteurs	Applications	Méthodes	Vecteur	Référence
Radar FM-CW	Navigation en milieu agricole, détection d'obstacle	SLAM	Robot	Rouveure et al, 2016 [20]
Radar FM-CW	Cartographie, géoréférencement	Fourier-Mellin, SLAM	Véhicule, bateau	Jaud et al, 2013 [21]
Radar FM-CW / LiDAR	Cartographie, géoréférencement	SLAM	Véhicule	Guerrero et al, 2015 [22]

Tableau 2. Exemples de systèmes microondes pour la géolocalisation en agriculture.

1.2.2. Analyse et gestion des données

La géolocalisation va de pair avec le développement des GIS (Geographical Information System), qui analysent les données issues de capteurs pour différents types de cartographies. Le principe des GIS a été développé au Canada en 1962 au CLI (Canadian Land Inventory) par Roger Tomlinson, et l'utilisation des GIS pour l'agriculture est apparue vers la fin des années 1970 [31]. On peut aussi citer par exemple les premières utilisations en PA du logiciel Arcview pour ordinateur personnel [32] (maintenant ArcGIS) au début des années 1990. À cela s'ajoutent des algorithmes d'exploration et de classification de données comme la SVM (Support Vector Machine) dont quelques exemples sont reportés dans le Tableau 3.

Applications	Méthodes	Référence
Analyse de rendement.	*Knowledge Discovery Life Cycle model*	Lee et al, 1998 [33]
Détection de mauvaises herbes	*tree algorithm-C4.5*	Chuanyuan, 2013 [34]
Cartographie de champs de riz	*Principal component analysis*	Xiaoqin et al, 2008 [35]
Modélisation d'une fonction de densité apparente du sol.	*Machine learning*	Ramcharan et al, 2017 [36]
Estimation des paramètres hydrauliques du sol	*SVM*	Twarakavi et al, 2009 [37]
Détection de parasites sur les feuilles de blé	*SVM, k-mean clustering algorithm*	Yuehua et al, 2007 [38]
Détection des défauts sur les calices de pommes	*LS-SVM, DT-CWT*	Yihuan et al, 2012 [39]

Tableau 3. Exemples d'applications utilisant la gestion et classification des données.
LS-SVM: Least Square SVM. DT-CWT: Dual-Tree Complex Wavelet Transform

1.2.3. Lecture à distance

Le terme *remote sensing* ou *remote detection* (télédétection) est devenu récurrent en PA et désigne généralement la capacité à mesurer des données à distance représentatives des propriétés d'un sol ou de la végétation. On distingue deux types de lectures en fonction du type de vecteur utilisé : (a) la télédétection par satellite ou aérienne et (b) la détection qualifiée de *proximal remote sensing* [40] ou *lecture à distance proche*.

1.2.3.1. *Lecture à distance par satellites*

Une grande partie des données multi-parcellaires est obtenue par des satellites d'observation civils ou des véhicules aéroportés. Ces données sont issues de mesures effectuées à distance par des instruments embarqués utilisant des bandes multi-spectrales visibles et infrarouges ou alors de l'imagerie hyper spectrale. Les variations de réflectance en différentes bandes spectrales ou en bande hyper spectrale permettent la détection de sol ou de végétation et de mesurer par exemple : le rendement [41], la présence d'intrants [42], le stress hydrique [43], la prolifération des mauvaises herbes [44], la présence de nuisibles ou de maladies [45], et de nombreuses propriétés du sol [46]. Le programme LANDSAT y a joué un rôle conséquent. On peut citer par exemple par ordre chronologique :

- Le MSS (MultiSpectral Scanner, résolution de 80 mètres) de LANDSAT 3 (1978) utilisant 4 bandes spectrales visibles et infrarouges.
- Le scanner optique en 7 bandes spectrales visibles et infrarouges TM (Thematic Mapper, résolution de 30 mètres) de LANDSAT 4 et 5 (1982-1984).
- La version améliorée ETM+ (Enhanced Thematic Mapper, résolution jusqu'à 15m en bande panchromatique) de LANDSAT 7 (1999).

Ce programme a ouvert la voie à d'autres satellites plus adaptés en PA avec des périodes de retours plus courtes et de meilleures résolutions comme en premier lieu IKONOS (1999) et QuickBird (2001), et par la suite RapidEye (2008), GeoEye-1 (2008) et WorldView 1-4 (2007-2016). Les satellites WorldView 3 et 4 proposent à ce jour des images avec la résolution la plus fine (31 cm par pixel pour les images panchromatiques et 124 cm par pixel pour les images multi-spectrales) avec une période de retour entre 1 et 3 jours.

L'ensemble de ces instruments de mesures multi-spectraux embarqués sur satellites a permis le développement de nombreux paramètres et indicateurs photométriques appelés indices spectraux de végétation (*spectral vegetation indices*) [47] dépendant de la réflectance à différentes longueurs d'onde. Un des plus classiques est le NDVI (Normalized Different Vegetation Index) [48], et sert à quantifier la présence de végétation en utilisant les bandes spectrales du rouge (650-660 nm, faible réflectance des végétaux) et proche infrarouge (700-1300 nm forte réflectance des végétaux). Une grande partie de ces indices spectraux de végétation ainsi que les différents systèmes optiques embarqués sur satellites jusqu'à 2013 sont répertoriés par Mulla [40].

Hormis les instruments optiques, d'autres satellites embarquent des radars à synthèse d'ouverture SAR (Synthetic Aperture Radar). Les systèmes SAR sont beaucoup moins utilisés que les systèmes optiques bien que les travaux de Moran et al [49] avaient mis en avant l'intérêt de l'interrogation radar en complément de l'optique : le signal microonde est moins atténué par l'atmosphère et peut traverser les couvertures nuageuses, et les mesures radar peuvent s'effectuer de jour comme de nuit. En revanche, les signaux microondes sont très sensibles à la rugosité du sol (à des échelles de rugosité de l'ordre de la longueur d'onde utilisée) et les couverts végétaux génèrent de fortes atténuations. Quelques exemples d'interrogation à distance par SAR avec différents satellites :

- Analyse du couvert végétal et du stress hydrique [50] avec TerraSAR-X (2007 Bande X, résolution maximale : 0.5m sur une zone de 4km par 8km).
- Analyse de la rugosité et de l'humidité du sol [49] avec ERS-2 (1995 Bande C, résolution: 25m, fauchée : 100km).
- Cartographie de sols salins et alcalins [51] avec JERS-1 (1992, bande L, résolution : 18m, fauchée : 75km).
- Estimation de l'humidité des sols [52] avec Radarsat-1 (1995, bande C, résolution standard : 30m, fauchée : 75km-170km).
- Estimation de l'humidité des sols [53] avec Radarsat-2 (2007, bande C, résolution standard : 25m, fauchée : 75km-170km).

1.2.3.2. *Lecture à distance proche*

En dehors de l'imagerie par satellite, d'autres moyens technologiques sont aussi utilisés pour mesurer certaines caractéristiques du sol ou de la présence de végétation. On parle alors de lecture à distance proche et représente les autres vecteurs et systèmes de mesure à distance en dehors de l'imagerie satellite. On distingue l'interrogation à distance basée au sol (ground-based proximal sensing) pour les vecteurs terrestres (tracteurs, robots…) avec capteurs embarqués ou bien des instruments manuels. À cela viennent s'ajouter l'utilisation des UAV depuis 2002 [54] et en particulier les drones [55] au début des années 2010. Les avantages de la lecture de proximité par rapport à l'imagerie par satellite sont : (a) l'accès direct aux données de mesures, (b) des précisions de mesures qui peuvent s'effectuer « *au plant près* », (c) des mesures non affectées par la couverture nuageuse et (d) une prise de décision en direct si les capteurs sont intégrés à des VRT. De nombreux capteurs optiques ont été développés pour ce type de lecture. Une de premières mises en œuvre de cette lecture à distance proche par optique a été effectuée en 1992 par Schepers et al [56]. Une corrélation avait été établie entre la verdure des feuilles de plant de maïs (Minolka [57]) et les carences en fertilisant *N*. Ces travaux ont été approfondis jusqu'à l'industrialisation en 2002 de capteurs embarqués sur tracteurs mesurant le couvert végétal (Yara N-sensor, GreenSeeker, Crop Circle) donnant une mesure indirecte de la vigueur de la plante.

D'autres types de capteurs (hors bandes spectrales optiques) sont aussi utilisés pour mesurer d'autres paramètres. On peut citer par exemple :

- Le développement de la mesure de conductivité du sol (en 1993 avec cartographie [58]), avec des capteurs d'induction électromagnétique (Geonics EM-38) pour la mesure de la salinité, du taux d'argile et l'humidité des sols.
- Les radars à pénétration de sol GPR (Ground-Penetrating Radar) capables de sonder des zones souterraines et détecter la présence d'eau [59]. Cette analyse de la qualité des sols par GPR avait été initiée au début des années 80 par Johnson [60].
- Les radiomètres microondes permettant de mesurer l'humidité des sols [61]. L'utilisation des radiomètres microondes pour mesurer l'humidité des sols a été initiée par Poe et al en 1972.
- Les LiDAR pour des mesures de distance à haute résolution et l'analyse de variation de surface des sols [62]. Une des premières utilisations du LiDAR en agriculture date de 1989 pour détecter l'orientation des nuages de pesticides vaporisés depuis un avion [63].
- Des radars microondes FM-CW (Frequency-Modulated Continuous-Wave) pour détection de sol à travers la végétation [64]. Bouman et al [65], [66] ont développé l'utilisation du radar FM-CW en bande X pour l'agriculture entre 1975 et 1981 en analysant la rétrodiffusion de différents couverts végétaux (pomme de terre, betterave ainsi que blé, orge et chêne).
- L'imagerie thermique pour la détection du couvert végétal du blé [67], et fusion de données avec l'optique pour la détection de fruits [68]. L'imagerie thermique a été utilisée pour la première fois pour surveiller la température du couvert végétal dans un champ de luzerne en 1976 par Blad et al [69].

1.2.4. Technologies à taux variable

L'ensemble des données mesurées et géolocalisées peut être une aide à la décision pour l'application de différentes tâches (utilisation d'intrants, défrichage, récolte …). Ces tâches adaptées en fonction du lieu et/ou de la période de l'année sont assimilées par des engins agricoles (véhicules, robots) automatisés et représentent ce qu'on appelle les VRT. L'expression *variable rate* a été introduit durant la même période que l'expression *precision agriculture* au début des années 1990 [11] et représente la finalité ou la décision prise par l'agriculteur (ou le système en cas d'automatisation) en fonction des données de mesure. Sur la Figure 5 sont représentés les différents services VRT proposés par les concessionnaires agricoles américains selon l'enquête effectuée par CropLife et Purdue University [15], [16]. La plupart de ces services sont en constante progression. En particulier, 78% des concessionnaires proposent des VRT pour les fertilisants, et les services VRT proposés pour les semis ont augmenté de 24% à 50% entre 2013 et 2015. Les VRT sont en général des modules ou accessoires souvent associés à des véhicules comme les tracteurs, mais de plus en plus de projets développent des robots. Le Tableau 4 répertorie quelques exemples de produits utilisés pour la VRT.

Type	Applications	Références
Robot	Spray modulé, désherbage	*Bonirob* (Bosch), Strothmann et al, 2017 [70]
Robot	Spray modulé de désherbant	*Ecorobotix* [71]
Module	Semis	*SeedCommand*, AGLeader [72]
Module	Spray modulé de fertilisants	*Yara N-sensor* [58], *GreenSeeke*r [59], *CropCircle Sensor* [60]
Module	Gestion des intrants	*Field-IQ*, New Holland [73]
Module	Gestion des intrants	*Crop Sensor Isaria*, Claas [74]

Tableau 4. Exemples d'applications et produits VRT existants

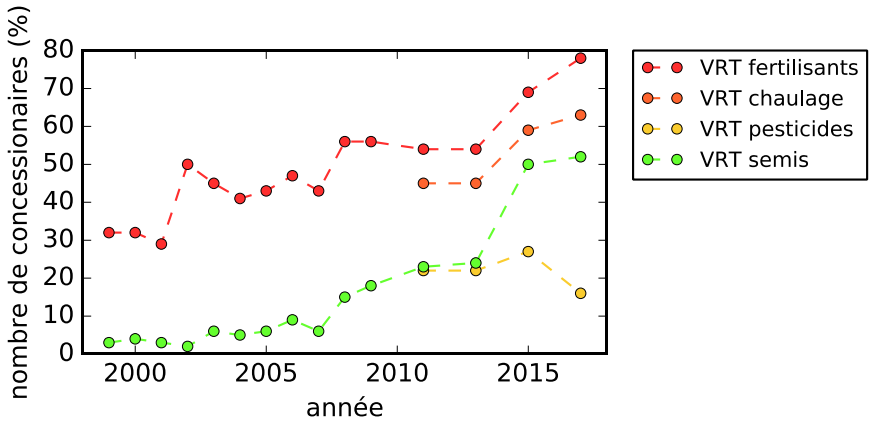


Figure 5. Evolution des services VRT proposés selon l'enquête de CropLife et Purdue University menée par Erickson et al [15], [16] sur une base de 209 concessionnaires agricoles américains interrogés en 2017.

1.3. De l'agriculture de précision vers la viticulture de précision

Un résumé des évènements relatifs à la PA est disponible sur la chronologie présentée ci-dessous sur la Figure 6. Les domaines technologiques qui ont été présentés dans cette partie vont également être présents en viticulture de précision (partie 2). Néanmoins, la viticulture de précision est confrontée à des problématiques plus subtiles qu'un simple objectif de culture intensive. Les critères à atteindre sont plus d'ordre qualitatif (concentration en sucre, acidité…) que quantitatif. On retrouvera principalement une utilisation majoritaire de l'imagerie multispectrale au dépend d'autres technologies (par exemple les radars).

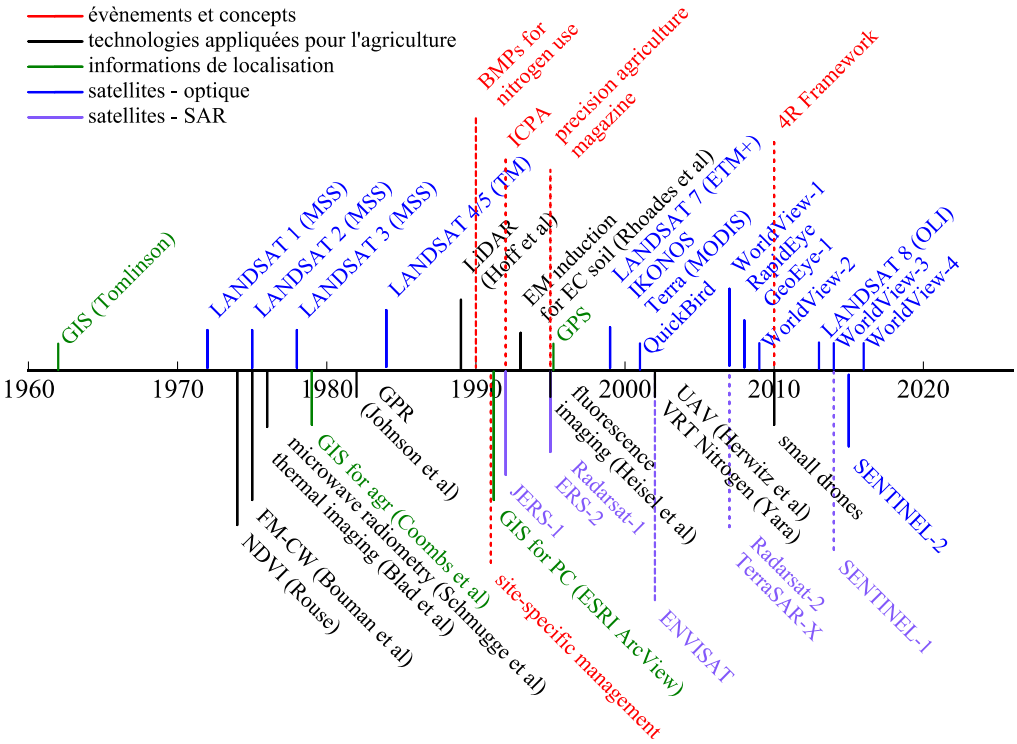


Figure 6. Chronologie de différents évènements liés à la PA.

2. Viticulture de précision

Cette partie se concentre sur la viticulture de précision (PV). On retrouve les quatre domaines technologiques présentés en partie 1 ainsi que les principes de télédétection et détection proche. Les travaux de recherche et solutions industrielles en PV de différentes technologies sont analysés et classés géographiquement afin de mieux comprendre comment évolue aujourd'hui la PV. Etant donné le contexte des travaux de thèse, on se focalise particulièrement sur les moyens d'estimation du rendement et de détection des grappes, ainsi que sur l'utilisation du radar en PV. Différentes caractéristiques des vignes mesurables par télédétection ou détection proche sont aussi répertoriées.

2.1. Contexte

La viticulture de précision est un cas particulier de la PA avec des problématiques propres au domaine viticole. Alors que le traitement des sols et la taille des pieds s'effectue traditionnellement de manière uniforme sur l'ensemble d'une parcelle, des variations de rendement intra-parcellaires subsistent. Il est alors nécessaire de comprendre les causes de ces variabilités (nature du sol, topographie, climat, maladies, traitements …) pour une maîtrise précise du rendement. Ce rendement s'exprime généralement en hectolitre de vin par hectare (ou kilogramme par hectare si l'on considère simplement la récolte du fruit). Contrairement à la PA céréalière classique (décrite en partie I.1) qui a pour but un rendement maximal en tenant compte d'un ensemble de variabilités, la PV est culturellement liée au terroir où la qualité et l'authenticité demeurent des objectifs complémentaires à la maitrise du rendement. Il est même souvent déclaré (à tort ou à raison) que de trop hauts rendements diminuent la qualité du vin (c'est-à-dire sa concentration en sucre et composés phénoliques). Les rendements sont donc alors régulés dans certains pays comme la France et l'Italie pour respecter les normes imposées par les AOC ou AOP (exemple : 35hl/ha pour Châteauneuf-du-Pape). En revanche, ce rendement est un calcul moyen sur l'ensemble de plusieurs parcelles et ne tient pas compte des variabilités parcellaires ou bien du nombre de plants par surface. On comprend donc l'intérêt d'étudier ces variabilités qui reflètent davantage une réalité du terrain plutôt qu'un rendement global moyen par parcelle. La viticulture n'est cependant un domaine de prédilection que pour seulement quelques pays. Comme l'atteste la production de vin annuelle mondiale de 2014 représentée sur la Figure 7, le premier producteur reste l'Italie (4.796 ML), suivi par l'Espagne et la France (4.607 ML et 4.293 ML respectivement) et les Etats-Unis (3.300 ML). Ces résultats sont à compléter avec ceux de la production de grappes non forcément transformées en vin (raisin de table). La production mondiale de grappes de raisin est affichée sur la Figure 8 pour l'année 2016. La Chine est sans conteste le premier producteur de raisin (14.842 Mt en 2016). Elle est suivie par l'Italie (8.021 Mt) et les Etats-Unis (7.097 Mt).

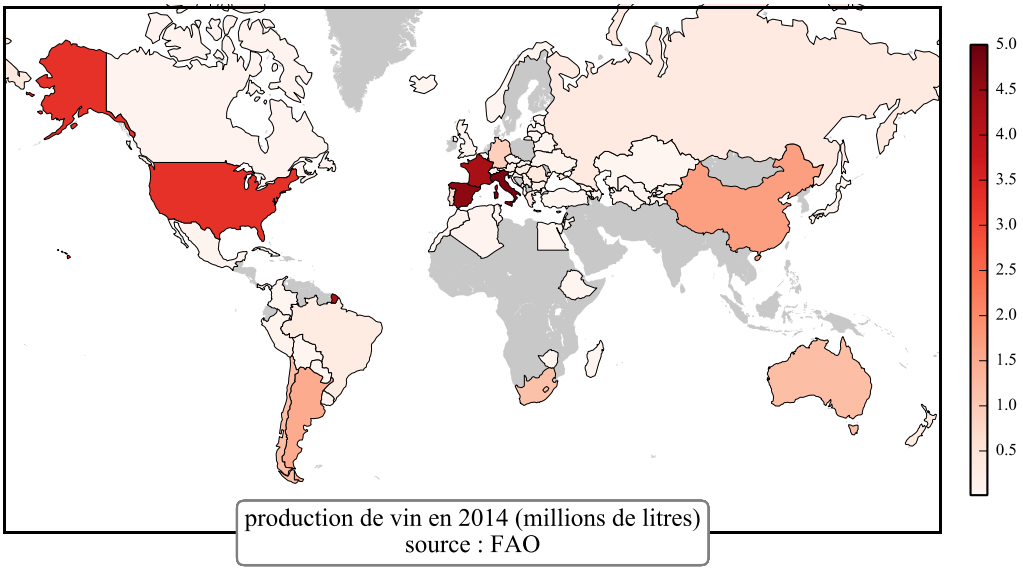


Figure 7. Production de vin (en millions de litres) par pays en 2014. Source : fao.org

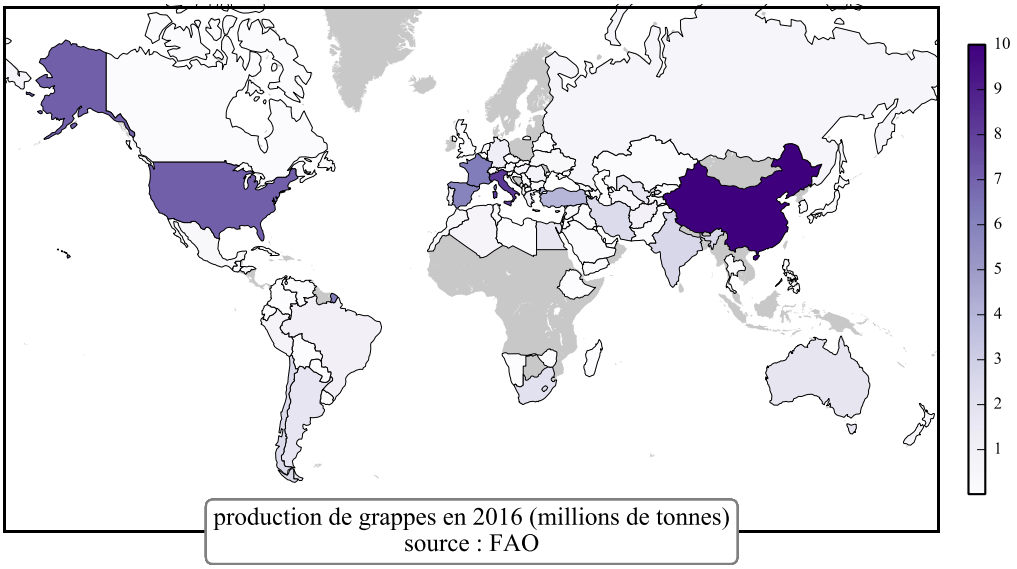


Figure 8. Production de grappes (en millions de tonnes) par pays en 2016. Source : fao.org

2.2. Technologies utilisées en viticulture de précision

2.2.1. La viticulture de précision dans la recherche

La PV fait son apparition en 1999, une dizaine d'années après la PA, par Bramley & Proffitt [75] en Australie et Wample et al [76] aux Etats-Unis. Bramley et al avec le CRC Australia (Cooperative Research Center for Viticulture) avaient mis en place un protocole pour cartographier et analyser le rendement des vignes. Il consistait à géolocaliser par DGPS (précision de ±50cm) le rendement mesuré par les outils du commerce, et proposait des techniques d'interpolation surfacique (généralement du krigeage) pour cartographier le rendement. Cette cartographie pouvait se superposer à d'autres couches de données comme par exemple la conductivité du sol, et l'ensemble de ces données étaient accessibles via un logiciel informatique GIS. Ce projet réunissait alors à la fois plusieurs domaines technologiques déjà cités en partie 1.2 : la géolocalisation, la gestion des données, et de la télédétection ou détection proche. Depuis,

la recherche en PV s'est développée dans plusieurs autres pays. C'est sans surprise que la majorité des travaux de recherche sur la PV depuis 1999 sont originaires d'établissements situés dans des pays où la viticulture y est fortement développée. Sur la Figure 9 sont représentées les contributions à la recherche sur la PV pour différents pays. Sur les 287 publications répertoriées (à partir des bibliothèques numériques IEEExplore, ACSESS, Science Direct et ResearchGate mentionnant le mot-clé *precision viticulture*), plus de la moitié sont originaires du trio méditerranéen Espagne (21%), Italie (19%) et France (15%). 171 de ces publications de recherche concernent spécifiquement la télédétection ou détection proche en PV et sont répertoriées en différents thèmes sur la Figure 10. On constate que l'utilisation de capteurs multispectraux est prédominante (35%). Elle est intimement liée à la mesure du NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) qui reste un indice de végétation présentant beaucoup de corrélation avec des paramètres physiologiques et structurels des vignes. L'analyse des sols, et plus précisément la mesure de la conductivité électrique, est aussi prédominante (15%) car les variabilités géologiques du sol sont souvent fortement corrélées aux variabilités qualitatives des grappes au sein d'une même parcelle de vignes. Les autres technologies de télédétection, en particulier les instruments de mesure radar, ne semblent pas concurrentielles. Les WSN (*Wireless Sensor Network*) sont très souvent utilisés pour mesurer des données environnementales (ensoleillement, température, pression, vent …) [77],[78] et parfois intégrés à des services GIS en réseau [79].

Concernant les vecteurs d'utilisation, beaucoup de mesures sont effectuées à terre (38% des publications concernées), notamment pour étudier certaines propriétés du sol ou caractéristiques des vignes (par exemple la détection de grappes ou de maladies). L'imagerie par satellite est toutefois très récurrente et reste associée aux mesures multispectrales et hyperspectrales de capteurs embarqués. L'utilisation d'UAV devient aussi populaire et a tendance à se substituer aux mesures par satellites ou aéroportées pour l'analyse des variabilités sur des images, sur des exploitations à faible densité végétale. D'après Matese et al [80], les UAV sont une solution plus économique pour des surfaces de vignobles comprises entre 5 ha et 50 ha.

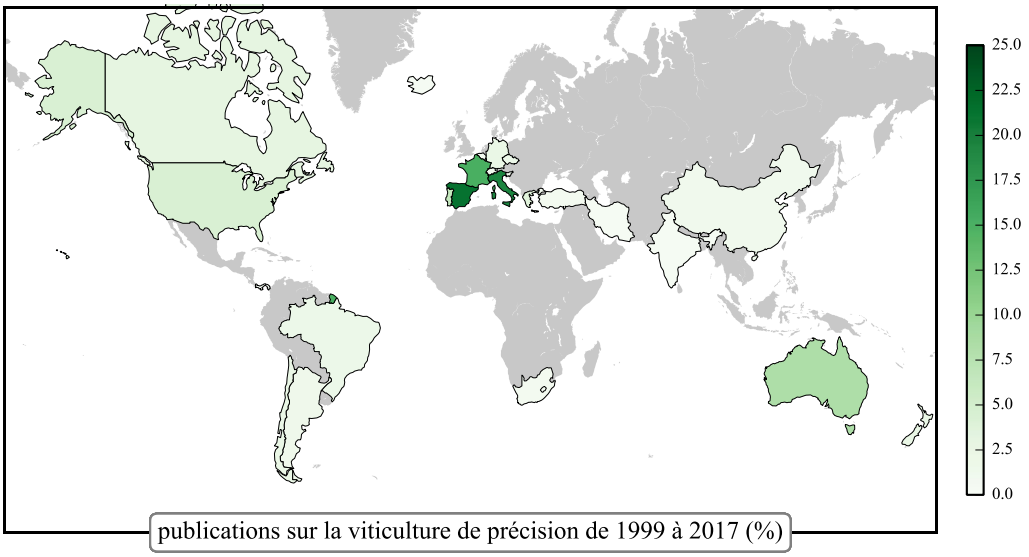


Figure 9. Ensemble des travaux publiés sur la PV entre 1999 et 2017. Statistiques réalisées sur 278 publications de recherche dans les bibliothèques numériques IEEE, ACSESS, Science Direct et ResearchGate avec le mot-clé *precision viticulture*.

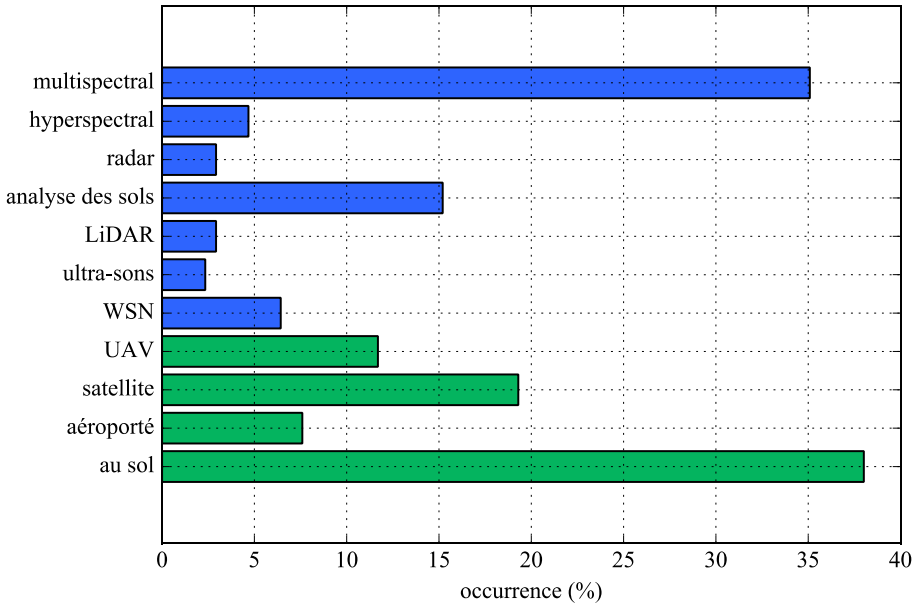


Figure 10. Occurrence de différents thèmes (les méthodes de détection en bleu, les vecteurs en vert) sur 171 publications de recherche sur la détection en PV, entre 1999 et 2017.

2.2.2. Les solutions proposées en industrie

Dans cette section sont reportées quelques solutions industrielles en PV. On peut regrouper ces solutions en trois catégories principales : (a) les solutions de type « robotisées » au sol qui agissent généralement sur l'entretien du vignoble en toute autonomie, (b) des services de télédétection aérienne (souvent UAV ou avion) pour des mesures multispectrales avec des tarifs à l'hectare et (c) des capteurs portables ou intégrés à des véhicules pour des mesures principalement multispectrales. Une liste non exhaustive de ces solutions industrielles est disponible ci-dessous ainsi que leur répartition géographique sur la Figure 11. Bien que cette liste ne soit pas complète, on peut toutefois émettre quelques remarques. Beaucoup de sociétés proposent désormais des acquisitions d'images aériennes par UAV ou par avion, avec comme principale information la vigueur obtenue par le NDVI ou l'EVI (Enhanced Vegetation Index). Les capteurs portables multispectraux les plus utilisés sont d'origine américaine (GreenSeeker, Crop Circle) et mesurent simplement le NDVI. On remarquera aussi les nombreux services en PV australienne, ainsi que le développement de plusieurs robots viticoles en France.

- SmartVineyard propose des solutions de mesures de microclimats par WSN (humidité des feuilles, précipitation, ensoleillement, température, humidité). Les capteurs sont accompagnés d'un logiciel de prévision de maladies.
- Fruition Sciences propose des solutions de surveillance des paramètres des vignes : (a) une mesure de la vigueur par laser, (b) une mesure de NDVI par vecteur aéroporté (prix allant de 10€/ha pour 50cm de résolution à 70€/ha pour 10cm de résolution), (c) mesure du flux de sève par tags RFID, (d) mesure du rendement avant véraison et cartographie.
- PVA (Precision Viticulture Australia) offre des services pour la PV (topographie, imagerie multispectrale aérienne, surveillance du rendement, analyse des sols). L'ensemble des données est cartographié par un logiciel GIS.
- Oenoview® (groupe ICV) propose des solutions de surveillance des parcelles par image satellitaire (SPOT 5, FORMA SAT) pour la mesure de vigueur et d'hétérogénéité. Les données sont visualisables sur smartphone.

- VinBot est un robot intégrant un capteur multispectral pour l'estimation du rendement à partir du NDVI (R^2=0.31 d'après les dernières publications [81]). Un capteur LiDAR 3D est intégré pour la navigation et la construction d'images 3D de la canopée. Une caméra RGB fournit des images du vignoble.
- VitiRover est une solution robotique autonome de désherbage des vignes. Les robots fonctionnent en « troupeau » (50 robots) et possèdent un système d'alimentation par panneaux solaires.
- Naïo a conçu deux robots pour applications viticoles : (a) un robot à chenille pour désherbage à guidage laser et GPS, et (b) TED, un robot enjambeur de vignes conçu aussi pour le désherbage.
- Remote Sensing Australia propose des services d'imagerie aérienne, en particulier la surveillance de vignobles par imagerie multispectrale. Les coûts vont de $30 par hectare (une seule mesure à la floraison ou la véraison) à $72 par hectare (floraison, véraison et mauvaises herbes).
- Total Viticulture Solutions propose divers services pour la viticulture, avec notamment une analyse du rendement cartographié et des estimations de rendement à la récolte.
- Advanced Technology Viticulture propose des cartographies de rendement, d'application d'intrant et des analyses de variabilité.
- Advanced Viticulture est une société de services californienne pour la PV, dont l'analyse des sols et de l'imagerie aérienne.
- CVC (Coastal Viticultural Consultants) est une société de services californienne proposant divers services pour la viticulture comme les services, l'imagerie multispectrale aérienne (TerrAvion) et l'analyse des sols.
- AV&M est une société australienne proposant des services pour la viticulture, dont des analyses d'humidité du sol et de rendement.
- Blade Scape met avant l'utilisation d'UAV (drones) pour la cartographie et l'imagerie aérienne. L'acquisition d'images multispectrales est proposée pour mesurer le NDVI.
- NeoAG est une entreprise chilienne proposant des produits de navigation GPS, ainsi que des services d'imagerie multispectrale avec le satellite RapidEye et des propriétés du sol.
- PrecisionVine utilise les avantages offerts par les drones pour cartographier les vignobles et propose des images multispectrales et des visualisations 3D pour des mesures de la vigueur, d'hydrologie, de risque d'érosion.
- VineView propose des services d'imageries multispectrales aériennes par avion ou par drones. L'indice spectral de végétation EVI est préféré au NDVI car offre plus de variabilité au cours du temps. D'autres paramètres peuvent être mesurés, comme le stress hydrique ou la détection de maladies.
- HarvestMaster (Juniper Systems) propose de nombreux produits utiles pour l'agriculture de précision, notamment des outils précis de mesure du rendement à la récolte.
- Canlink 3000 RGM (FarmScan AG) est un appareil d'estimation du rendement viticole après récolte.
- Greenseeker (Trimble) est un des capteurs optiques (multispectral rouge/infrarouge) les plus utilisés pour la mesure du NDVI au sol.
- Crop Circle (Holland Scientific) est un autre capteur optique multispectral (Holland) mesurant le NDVI.
- Spectron (Pellenc) est un outil portable optique multispectral (13 plages de longueur d'onde) de suivi de maturation du raisin (sucre, acidité et anthocyanes).
- Multiplex (Force-A) est un capteur optique portable multispectral (UV/rouge) pour la mesure de la concentration en anthocyane.
- SmartSpray (Durand-Wayland) est un système intelligent de spray d'intrants basé sur la détection des vignes par ultra-sons.
- Wall-Ye est un robot de tonte, de binage et de désherbage, accompagné d'un logiciel GIS.
- VisionRobotics propose un robot d'élagage des vignes par système vision.
- VinPro est une société représentant 2500 producteurs de vins d'Afrique du Sud, proposant des services en viticulture de précision, comme l'analyse des propriétés du sol, la topographie et des images aériennes multispectrales.

- JTC Viticulture est une entreprise néo-zélandaise proposant des analyses des sols, des estimations de rendements.
- The Viticulture Practice est une entreprise néo-zélandaise proposant divers services de gestion des parcelles, avec notamment des estimations de rendement.
- SpecTerra est une entreprise australienne spécialisée dans les images multispectrales aéroportées avec des applications spécifiques pour l'agriculture de précision.
- V3Maps propose des analyses d'images aériennes acquises par SpecTerra en viticulture pour des cartographies de vigueur des vignes et des intégrations dans des logiciels GIS. Le prix de base est de $250 pour une surface minimale de 5 ha. La surface maximale d'analyse proposée est de 150 ha ($30/ha).
- DroneScape est une entreprise néo-zélandaise spécialisée dans l'acquisition d'images par UAV, avec des applications pour la PV : imagerie RGB et multispectrale avec estimation du rendement, cartographie de maladies et parasites …
- TechnoVit propose une machine de défeuillages à taux variable (Leaf Stripper Mod. 111 VRT) asservie par des mesures de NDVI géolocalisées. Sur le même principe, une machine de spray de fertilisant à taux variable a été conçue (Variable Rate Spreader Mod. 150 VRT).
- TerraSystem est une société italienne proposant des services d'imagerie aérienne, en particulier VitiMap pour la PV par UAV, avion et de satellites.
- Globi Hi-Tech propose des services d'imageries aériennes par UAV (RGB et multispectrales) ainsi que l'intégration des données dans un logiciel GIS.
- Precision Farming (Italie) propose des services pour la PV, notamment des applications VRT (systèmes de spray, systèmes GPS), depuis des cartographies de NDVI acquises par satellite ou autres systèmes aériens.
- VintiOS est un logiciel GIS pour la PV.
- 3edata est une entreprise espagnole spécialisée dans l'acquisition de données par drones.

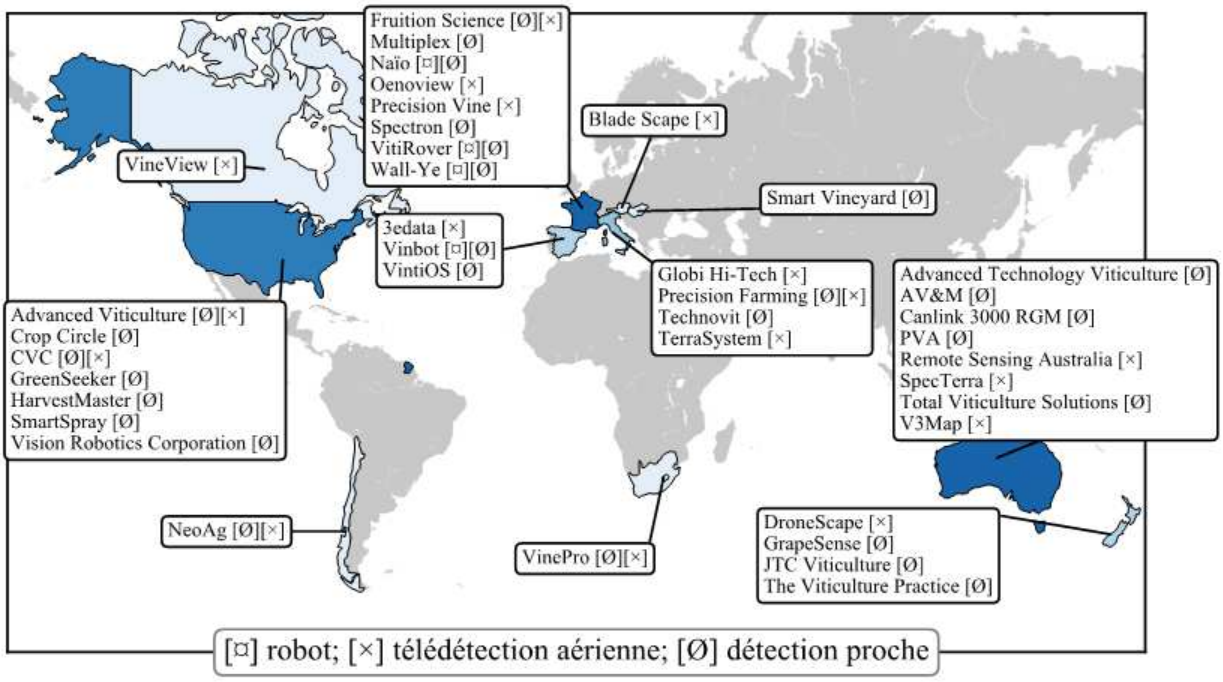


Figure 11. Liste non exhaustive de solutions industrielles en PV, dans les domaines de la robotique agricole, la télédétection aérienne, et la détection proche.

2.2.3. La détection de grappes et l'estimation du rendement

Dans cette section sont répertoriés les travaux en PV dont le but est l'estimation du rendement et la détection des grappes de raisin. La majorité de ces travaux sont des solutions optiques basées au sol. La dernière publication listée utilise une interrogation multispectrale par satellite. Les avantages de la détection par vision sont principalement une acquisition des mesures « quasi-instantanées », des systèmes faibles coûts et une facilité d'utilisation. En revanche, les mesures sont fortement dépendantes de la luminosité et nécessitent des calibrations. Des apprentissages sont aussi nécessaires afin d'affiner les détections. Concernant spécifiquement la détection des grappes de raisin, même si les algorithmes utilisés offrent une détection avec une précision de 100%, une estimation précise du rendement reste difficile à mettre en place. Il faut en effet récupérer les informations volumiques des grappes sur des images 2D (ou 3D pour des caméras stéréos). Il n'est d'ailleurs absolument pas garanti que la majorité des grappes soit visible : en fonction des variétés, les grappes sont soient cachées par les feuilles, les sarments, voire d'autres grappes. Voici quelques techniques de détection optique des grappes de raisin, résumées dans le Tableau 5.

- Chamelat et al [82] proposent une détection de grappes de raisin noir en conditions réelles pour permettre une automatisation des récoltes non-destructive. La détection se base à la fois sur la discrimination des couleurs (en HSV) et la reconnaissance de forme à l'aide des moments de Zernike. Un apprentissage par SVM est utilisé et un taux de reconnaissance de 99% des grappes est obtenu avec un apprentissage de 2160 échantillons prenant en compte les paramètres de couleurs et de formes sur des blocs de 32 pixels. Le taux de reconnaissance descend à 75% pour un apprentissage de 720 échantillons.
- Berenstein et al [83] présentent un système de détection de grappes de raisin (non mûres - vertes) et de feuillage en VRT (spray modulé de pesticides). Une caméra RGB (752x480) fixée sur un chariot est utilisée pour la prise d'image. Deux algorithmes distincts sont développés pour détecter le feuillage (FDA – Foliage Detection Algorithm) et les grappes (trois différents GDA – Grape Detection Algorithm). Le FDA se base sur l'isolation de la couleur verte du feuillage et le GDA1 sur la détection de contours (Canny), GDA2 sur un apprentissage effectué par un arbre de décisions (C5.0 algorithm) et GDA3 par des comparaisons de masques de contours de grappes de référence. Pour les trois méthodes, le taux de détection de grappes (vrais positifs) est de 90%.
- Reis et al [84],[85] proposent une méthode de détection des grappes de raisin noir et blanc et de tige fonctionnant de nuit pour des systèmes autonomes de récolte. Une caméra RGB avec flash est utilisée. Des couleurs initiales de détection sont déterminées en fonction de la variété de grappes (typiquement grappes noires ou blanches). L'algorithme se décompose ensuite en trois étapes : (a) la cartographie des couleurs permettant la détection des grappes sur une image binaire, (b) la dilatation morphologique pour créer des zones uniformes de couleur noire et (c) la détection des grappes par identification des zones non-continues. L'estimation de la position de la tige de la grappe est calculée en fonction des dimensions des zones identifiées. Le taux de détection des grappes blanches est de 91% et des grappes noires de 97%.
- Nuske et al [86] ont mis en place une méthode de comptage de grains de raisins (avant la véraison – grappes de raisin de couleur verte) afin d'estimer le rendement. L'étude est faite sur 450m de rangées de vignes (rendement d'environ 2 tonnes). L'acquisition est faite par une caméra RGB embarquée sur un véhicule utilitaire. L'algorithme de détection comprend trois étapes : (a) détection de la position potentielle des grains par une transformation en symétrie radiale (Loy and Zelinsky), (b) les positions détectées ressemblant le plus aux grappes sont identifiées (méthode des k plus proches voisins) et (c) groupements des grains en grappes pour supprimer les fausses détections. Plus de 90% des grains de raisins sur les images sont détectés et la corrélation entre le nombre de grains et le rendement réel est R^2=0.74. Ce résultat est obtenu sur des variétés dont les grappes sont très peu cachées par le feuillage.

- Diago et al [87] développent une méthode de détection des grappes et de la surface foliaire pour une estimation du rendement. L'acquisition est faite avec une caméra RGB sur 70 plants de vigne en milieu clos (fond blanc derrière les pieds de vigne) défeuillés peu à peu pour ne laisser en dernière étape que le bois. Une classification supervisée par couleur est appliquée pour sept classes : feuilles naissantes (deux classes), feuilles matures (deux classes), le bois, les grappes et l'arrière-plan. La distance de Mahalanobis est utilisée comme critère de classification. La corrélation entre le rendement estimé et le rendement réel est de R^2=0.76 en comptant le nombre de pixels contenant des grappes, et R^2=0.73 en mesurant la masse des grappes.
- Roscher et al [88] proposent une méthode de surveillance de la taille des grains de raisin. Les mesures sont faites au sol avec une caméra RGB, et l'algorithme de détection des grains est composé de cinq étapes : (a) une étape de calibration pour ajuster la luminosité, (b) la détection de formes circulaires de référence et candidats potentiels (transformée de Hough), (c) création de patches centrés sur les cercles en fonction de différents paramètres (couleur, gradient, fond), (d) classification par champ aléatoire conditionnel et (e) détermination de la taille des grains de raisin en mesurant le diamètre des grains détectés en pixels. La corrélation entre les diamètres des grains de raisin réels et mesurés est R^2=0.77.
- Liu et Whitty [89], [90] ont mis en place un algorithme de détection de grappes de raisin pour estimer le rendement à l'aide d'une caméra RGB prenant quatre photos par pied de vigne (de part et d'autre du pied). L'algorithme de segmentation des grappes comporte plusieurs étapes : (a) prétraitements des images avec seuillage en teinte et saturation, (b) réduction des dimensions du vecteur de paramètres avec l'algorithme des k-plus proches voisins, (c) entraînement avec SVM. Le taux de détection atteint 91%. L'ensemble des pieds de vignes possède des grappes non cachées par les feuilles (variétés : Shiraz et Cabernet Sauvignon).
- Škrabánek et al [91],[92] utilisent des images RGB pour la détection de grappes de raisin blanc. Une classification supervisée par SVM binaire est exploitée. Deux noyaux sont comparés pour la classification (linéaire et fonction de base radiale) ainsi que deux paramètres (intensité des pixels et histogramme de gradient orienté (HOG)). Le taux de détection (avec rappel) atteint 90%. Une classification par réseaux de neurone a aussi été développée [93]. Le taux de détection (avec rappel) atteint 70%.
- Aquino et al [94] ont mis en place une détection des fleurs de vigne depuis des images RGB. Les images sont capturées de telle sorte qu'aucune ombre ne soit sur les fleurs. L'algorithme de détection comporte deux phases : (a) l'extraction de la zone d'intérêt (ROI) sur l'image analysée dans l'espace HSV, en ne filtrant que la couleur verte sur le canal H, et en filtrant les ombres des boutons de fleurs par un élément structurant linéaire, suivie par une granulométrie morphologique, et (b) la segmentation des fleurs par une morphologie mathématique suivie d'une décomposition pyramidale gaussienne. Le taux de détection (avec rappel) est de 85%.
- Herrero-Huerta et al [95] proposent une détection des grappes volumique en associant quatre images 2D associées à une image principale centrale (avec une superposition d'au moins 80%). L'ensemble d'images doit posséder les mêmes paramètres de luminosité. La perspective des images est contrôlée par un algorithme SIFT (Scale Invariant Feature Transform). La génération des pixels en 3D est effectuée par technique SGM (Semi-Global Matching). Un maillage par triangulation de Delaunay est effectué pour obtenir un volume. La meilleure corrélation (obtenue en comptant le nombre de grains) entre le rendement estimé et mesuré est R^2=0.79.
- Behroozi-Khazaei et al [96] développent une détection de grappes (raisin blanc) basé sur un réseau de neurones artificiels (ANN). Les paramètres RGB et HSV de trois types de patches sont étudiés : les grappes, les feuilles et le reste des images (sol, ciel, branches …). L'ANN ainsi qu'un algorithme génétique sont utilisés pour la segmentation des grappes. Les résultats sont comparés avec l'algorithme GDA1 [83]. La précision de la détection atteint 99%.
- Pérez et al [97] présentent un système de détection de bourgeons en période hivernale. À partir de patches représentant (ou non) des bourgeons. Les paramètres caractéristiques sont déterminés à partir

d'un algorithme SIFT et un BoF (Bag of Features). La classification est effectuée par SVM et la précision de la détection atteint 86%.

- Aquino et al [98] proposent une estimation du rendement par caméra embarquée sur un quad effectuant des mesures automatiques de nuit sur des grappes avant véraison (grappes non cachées par les feuilles). L'algorithme de détection est composé de trois étapes : (a) la suppression de mesures redondantes, (b) la sélection de candidats par un filtre morphologique et (c) la suppression des faux positifs par un apprentissage supervisé MLP NN (Multilayer Perceptron Neural Network). La corrélation entre le rendement estimé et réel est R^2=0.78.
- Cunha et al [99] utilisent le capteur VEGETATION du satellite SPOT pour estimer le rendement des vignes au Portugal sur une période de dix ans (1998 – 2008). Un estimateur de prédiction du rendement est construit à partir des valeurs du NDVI. Les paramètres de l'estimateur sont adaptés en fonction de quatre régions d'études. La corrélation entre le rendement obtenu et estimé varie entre R^2=0.73 et R^2=0.88 en fonction de la région.
- Sun et al [100] ont étudié la corrélation entre le LAI (Leaf Area Index) et le rendement des vignes de l'année 2013 à partir du capteur multispectral MODIS embarqué sur LANDSAT. La résolution spatiale est de 30m sur des surfaces de vignobles d'environ 250000 hectares. L'enregistrement du LAI est journalier d'Avril à Septembre. Afin de compenser les pertes en résolution ou de données par exemple dues aux conditions nuageuses, un filtre adaptatif de Savitzky-Golay est appliqué. La corrélation entre le rendement mesuré et le LAI est R^2=0.76.
- Gatti et al [101] ont réalisé un système monté sur tracteur (MECS-VINE®) capable de mesurer plusieurs paramètres de la canopée grâce à un indice de végétation appelé CI (Canopy Index). Ce robot possède de nombreux capteurs (par exemple de microclimat comme la température de l'air, l'humidité), ainsi que des capteurs optiques RGB pour analyser la structure de la canopée. Un algorithme (nommé Canopyct), calcule l'estimateur CI définit en tant que le pourcentage de pixels contenant de la végétation sur les images acquises. La classification des pixels de végétation se fait par la méthode d'optimisation de Jenks. Le CI est corrélé au poids des grappes par un facteur R^2=0.76.

Référence	Capteur	Vecteur	Méthodes	Application	Année
Chamelat et al [82]	Caméra RGB	Manuel / au sol	Zernike moments – SVM	Récolte	2006
Berenstein et al [83]	Caméra RGB	Chariot / au sol	Canny /C5.0/ Masques de contours	VRT pesticides	2010
Reis et al [84],[85]	Caméra RGB	Manuel / au sol	Identification par couleurs / dilatation morphologique	Récolte (de nuit)	2011
Nuske et al [86]	Caméra RGB	Véhicule / au sol	Loy and Zelinsky / k-nearest neighbours	Rendement (R^2=0.74)	2011
Diago et al [87]	Caméra RGB	Manuel / milieu clos au sol	Classification supervisée / distance de Mahalanobis	Rendement (R^2<0.76)	2012
Roscher et al [88]	Caméra RGB	Manuel / au sol	Transformée de Hough / champ aléatoire conditionnel	Surveillance de la taille des grains	2014
Liu et Whitty [89], [90]	Caméra RGB	Manuel / au sol	k-nearest neighbours / SVM	Rendement	2015
Škrabánek et al [91],[92],[93]	Caméra RGB	Manuel / au sol	SVM binaire / HOG / Neural Network	Détection	2015-2017
Aquino et al [94]	Caméra RGB	Manuel / au sol	Morphologie mathématique / décomposition pyramidale	Détection des fleurs	2015
Herrero-Huerta et al [95]	Caméra RGB	Manuel / au sol	3D point clouds / SIFT / SGM technique / Delaunay	Rendement (R^2=0.79)	2015
Behroozi-Khazaei et al [96]	Caméra RGB	Manuel / au sol	ANN / algorithme génétique	Détection	2017
Pérez et al [97]	Caméra RGB	Manuel / au sol	SIFT /BoF/ SVM	Détection des bourgeons	2017
Aquino et al [98]	Caméra RGB	Quad / au sol	MLP Neural network	Rendement (R^2 = 0.78)	2018
Cunha et al [99]	VEGETATION	SPOT 4	NDVI correlation	Rendement (0.76<R^2<0.88)	2008
Sun et al [100]	MODIS	LANDSAT	LAI corrélation / filtre de Savitzky-Golay	Rendement (R^2 = 0.76)	2016
Gatti et al [101]	Caméra RGB	Tracteur / au sol	Méthode d'optimisation de Jenks	Rendement (R^2 = 0.76)	2016

Tableau 5. Travaux réalisés pour la détection de grappes de raisin et de rendement.

2.2.4. Le radar en viticulture de précision

Comme constaté en partie 2.2.1, l'utilisation du radar, et en particulier du radar à ondes millimétriques, est anecdotique en PV par comparaison aux capteurs optiques. Le radar peut pourtant avoir différentes applications en fonction de la fréquence d'utilisation. Ci-dessous sont répertoriés différents travaux utilisant les systèmes radars en PV pour diverses applications. Un résumé de ces travaux est disponible dans le Tableau 6.

- Paloscia et al [102] étudient la rétrodiffusion de 40 vignobles à l'aide d'un radar (SAR) aéroporté en bande L (1-2 GHz) et P (250-500 MHz). Le coefficient de rétrodiffusion est étudié en polarisation HH à un angle azimutal de 35° et à un angle en élévation de 47°. La rétrodiffusion des vignobles est apparemment plus élevée en polarisation HH que VV, avec des phénomènes de doubles réflexions. La rétrodiffusion est maximale lorsque l'orientation des rangées de vignes est perpendiculaire à

l'angle d'interrogation. Ce phénomène disparaît en bande C (4-8GHz) où la rétrodiffusion est influencée par les tendeurs métalliques, les piquets ou d'autres éléments structurels des vignobles.

- Burini et al [103] analysent la rétrodiffusion de vignobles en Italie sur les années 1999 et 2001 à l'aide du SAR du satellite ERS-2 en bande C (4-8GHz) en polarisation (VV). La période des mesures est mensuelle. La visualisation et la séparation des parcelles sont toutefois effectuées avec le capteur optique de QuickBird pour intégrer les données des parcelles sur une plateforme GIS. Les parcelles peu pentues et avec une superficie supérieure à 3ha sont étudiées pour des questions de sensibilité (±0.5dB). La rétrodiffusion est mesurée relativement par rapport à des mesures sur sol nu. Des augmentations significatives de la rétrodiffusion ont lieu après les labours entre Avril et Mai (augmentation de la rugosité du sol). Lors du développement des grappes, la rétrodiffusion augmente aussi progressivement de Juillet à Septembre. Une fois les vendanges finies (Septembre), la rétrodiffusion diminue.
- Schiavon et al [104] ont analysé la rétrodiffusion des vignobles avec un radar SAR embarqué par avion en bande C en polarisation VV et VH, et en bande L dans toutes les polarisations. La résolution des mesures est de 2 mètres. Alors qu'une première méthode se basant sur les rétrodiffusions en différentes polarisations semble peu fructueuse, l'étude de la rétrodiffusion se basant sur des rapports de polarisation H/V, L/R circulaires et ±45° linéaires en bande L est plus efficace. Un filtre de Lee amélioré est utilisé pour réduire les speckles. La différence des rétrodiffusions en polarisation croisée et copolarisation (σ_{hv}-σ_{hh}) semble être un bon indicateur de la présence des grappes qui dépolariseraient plus facilement les ondes électromagnétiques que le reste de l'environnement (en l'occurrence le sol et la structure des vignes). Une cartographie de l'estimateur σ_{hv}-σ_{hh} avant et après vendange (5 octobre 2005 / 25 octobre 2005) met en évidence cette différence de rétrodiffusion sans pour autant émettre d'hypothèse sur une corrélation avec le rendement.
- Burini et al [105] proposent une autre méthode de caractérisation des vignobles en fusionnant les données optiques issues du satellite QuickBird et les données SAR aéroportées DLR E-SAR en bande L et bande C. Les données issues des deux capteurs sont des entrées d'un réseau de neurone pour permettre une classification. Alors qu'une classification des données en bande L seulement semble générer des confusions (notamment entre les vergers d'olivier et les vignes), la classification multi-fréquentielle L/C offre de meilleurs résultats. Ces résultats sont encore améliorés avec la classification optique et bande L. On observe une forte corrélation entre l'index de vigueur (optique) et le LAI mesuré au sol. Cette corrélation est en revanche plus discutable entre l'index de vigueur et la rétrodiffusion en bande L, expliquée en partie par la présence de speckles.
- André et al [106] proposent dans leurs travaux une mesure des caractéristiques du sol d'un vignoble à l'aide de trois technologies différentes : l'EMI (induction électromagnétique), l'ERT (tomographie de la résistivité électrique) et le GPR (radar à pénétration de sol). Le GPR fonctionne à 400MHz. Les mesures radars sont collectées sur un intervalle de 5cm sur un vignoble de 30 hectares. Les mesures GPR semblent se corréler avec les mesures ERT et EMI : de fortes réflexions électromagnétiques sont détectées aux positions où la conductivité électrique est élevée. Ces réflexions proviennent aussi de discontinuités du sol : ces discontinuités stratigraphiques sont corrélées à des variabilités de vigueur de la vigne.
- Ballester-Berman et al [107] étudient la rétrodiffusion en bande C mesurée par RADARSAT-2 de 6 parcelles de vignes (3 irriguées et 3 non-irriguées). En parallèle sont effectuées des mesures sur terrain (LAI, humidité des sols). Une analyse temporelle entre février et octobre montre l'augmentation de la rétrodiffusion HV (variation de 3 à 5dB) due à la croissance des vignes. La corrélation entre le LAI et la rétrodiffusion HV varie en fonction des parcelles de R^2=0.61 à R^2=0.95 pour une inclinaison de 34°, et de de R^2=0.69 à R^2=0.96 pour une inclinaison de 40°. Un modèle WCM (Water Cloud Model) est proposé pour interpréter la relation entre la polarisation HV et la quantité de biomasse. En considérant que la variation de rétrodiffusion HV est majoritairement due au développement des grappes et des sarments, un estimateur est défini par rapport à des mesures de références (rétrodiffusion HV avant le développement des grappes).

- Del Frate et al [108] proposent une fusion de données multispectrales (Worldview-2, 8 bandes entre 400nm et 1040nm) et radar (COSMO-SkyMed, bande X, polarisation VV) afin de cartographier la vigueur et l'hétérogénéité au sein d'une parcelle. Les deux paramètres sont déterminés en sortie d'un réseau de neurones. Au final, cinq paramètres sont considérés en entrée du réseau de neurones : trois composantes optiques non-linéaires et 2 composantes SAR de texture.

Référence	Fréquence	Vecteur	Méthodes	Application	Année
Paloscia et al [102]	Bande L (1-2GHz) Bande P (250-500MHz)	Aéroporté	SAR	Analyse de rétrodiffusion	1995
Burini et al [103]	Bande C (4-8GHz)	ERS-2	SAR – retrait du signal de référence (rétrodiffusion du sol nu).	Analyse de rétrodiffusion développement des grappes	2005
Schiavon et al [104]	Bande L (1-2GHz) Bande C (4-8GHz)	Aéroporté DLR E-SAR	SAR – polarimétrie	Analyse de rétrodiffusion	2007
Burini et al [105]	Bande L (1-2GHz) Bande C (4-8GHz) Rouge / NIR	Aéroporté DLR E-SAR QuickBird	Fusion de données optique/SAR réseau de neurones	Analyse de rétrodiffusion	2008
André et al [106]	400 MHz	Basé au sol	Cartographie GPR	Analyse des sols	2012
Ballester-Berman et al [107]	Bande C (4-8GHz)	RADARSAT-2	SAR – polarimétrie Water Cloud Model	Analyse de rétrodiffusion	2012
Del Frate et al [108]	Bande X (8-12GHz) 8 bandes 400nm-1040nm	COSMO-SkyMed Worldview 2	SAR – Fusion de données – Réseau de neurones	Cartographie de vigueur et d'hétérogénéité	2014

Tableau 6. Liste de travaux utilisant la technologie radar en PV

2.2.5. Les autres caractéristiques mesurables en viticulture de précision par télédétection ou détection proche

Dans cette section sont présentées quelques autres caractéristiques physiologiques et structurelles des vignes mesurables par télédétection ou détection proche (en dehors du rendement ou de la détection de grappes avec différentes technologies).

2.2.5.1. *La vigueur*

La vigueur (EN : *vine vigor*) est une caractéristique structurelle de la plante représentative du taux de croissance des rameaux ou sarments et des feuilles. Elle est caractérisée généralement par la circonférence du tronc du pied de vigne, la longueur moyenne de ses pousses (EN : *average shoot length*), la dimension des sarments (EN : *pruning weight*) ou la surface foliaire (EN : *leaf area*). L'ensemble des caractéristiques de la vigne se trouvant en dehors de terre est appelé canopée (EN : *canopy*). Ces paramètres structurels sont connus pour être fortement corrélés avec le rendement des pieds de vignes et la qualité des grappes [109] et peuvent subir de fortes variabilités parcellaires et temporelles [110]. En télédétection aérienne ou par satellite, la vigueur est plutôt caractérisée par la densité (par pixel) de végétation ou des indices de

végétation comme le NDVI, mesuré par des capteurs multispectraux [111]. Le NDVI = $\frac{\rho_{NIR}-\rho_{Red}}{\rho_{NIR}+\rho_{Red}}$ dépend de la réflectance ρ_{RED} dans la bande visible rouge (620nm-700nm) où la lumière est fortement absorbée par la chlorophylle présente dans les feuilles, et la réflectance ρ_{NIR} dans la bande du proche infrarouge (700nm – 1300nm) où la lumière est fortement réfléchie par la chlorophylle. Contrairement à la vigueur mesurée « manuellement » en viticulture, la vigueur par télédétection multispectrale est caractérisée par une biomasse photosynthétiquement active (EN : *photosynthetically active biomass- PAB*). Comme remarqué en partie 2.2.1, l'utilisation du NDVI pour mesurer la vigueur des pieds de vignes est très populaire en PV.

- Des corrélations (R^2=0.73) ont été établies entre le NDVI et l'indice de surface foliaire (EN : *leaf area index - LAI*) [112] par des mesures avec les capteurs multispectraux du satellite IKONOS (résolution de 4m) sur des vignobles en Californie.
- Le NDVI peut aussi être mesuré au sol (notamment des instruments portables populaires comme le GreenSeeker [113]). Dans les travaux de Gée *et al* [114], les NDVI de deux systèmes de mesures multispectraux basés au sol sont comparés et corrélés avec des indices de végétations (« occupation végétale ») pour trois différents cépages et à différentes altitudes.
- Des capteurs LiDAR sont aussi utilisés pour estimer la densité de surface foliaire (LAD) [115]. Un volume mesuré avec un capteur LiDAR basé au sol et monté sur un tracteur (tree row LIDAR-volume) est corrélé avec la LAD par une relation logarithmique.

2.2.5.2. *La conductivité électrique apparente du sol*

La conductivité électrique apparente du sol (EC_a) est une donnée géologique importante en viticulture représentative de la nature du sol (présence de minéraux, d'argile, d'humidité…). Elle est sujette à de fortes variations en fonction de la nature du sol, de sa composition chimique, ou de son humidité. Deux principales technologies [111] sont utilisées pour mesurer cette conductivité : (a) des capteurs de résistivité électriques (ER), et (b) des capteurs d'induction électromagnétiques (EMI). Les travaux de Priori *et al* [116] établissent des comparaisons entre trois systèmes de mesures de la conductivité utilisés dans différentes configurations et pour des sols plus ou moins argileux dans un vignoble. Parmi ces instruments, on peut citer :

- L'instrument de mesure de résistivité ARP (Automatic Resistivity Profiling) de Geocarta [117]. La mesure de résistivité utilise des électrodes injectant un courant électrique (10 mA) à 0.5m, 1.0m et 2.0m. Le système est plutôt invasif (remorque d'une longueur d'environ 2 mètres) et forcément basé au sol. Des travaux ont montré la corrélation entre les variabilités de rendement intra-parcellaires et la résistivité électrique du sol, ainsi que l'inclinaison du terrain [118]. Il est par contre difficile par la seule mesure de la conductivité de trouver les causes de sa variabilité. Des échantillonnages du sol peuvent alors s'avérer nécessaires. Dans les travaux de Andrenelli *et al*, [119], il est montré par analyse d'échantillons complémentaire que la variabilité de la résistivité du sol est fortement corrélée par la présence d'argile (R>0.80) plus que par l'humidité.
- Un instrument de mesure EMI très fréquemment utilisé pour mesurer l'EC_a est l'EM38 de Geonics fonctionnant à 14.5 kHz [120] . Les travaux publiés par Trought *et al* [121] montrent une corrélation (R>0.83) entre l'EC_a mesurée avec le magnétomètre EM38 et la circonférence des troncs des pieds de vigne en Nouvelle-Zélande. Ces travaux mettent en valeur l'influence d'un sol plus ou moins graveleux sur la phénologie des pieds de vigne, entraînant des conséquences sur la teneur en sucre et l'acidité titrable des grappes. Dans les travaux de Rodríguez-Pérez *et al* [122], la mesure de l'EC_a pour différentes polarisations et périodes de l'année permet la cartographie d'argile, de sable et d'ions Na^+ et Mg^{2+} dans des vignobles de Californie.

2.2.5.3. *Les dimensions structurelles des rangées de vignes*

Les dimensions structurelles des rangées de vignes caractérisent l'organisation du vignoble : la hauteur et la profondeur de la canopée, ainsi que la distance inter-rangées.

- Dans les travaux de Weiss *et al* [123], la superposition de photos RGB enregistrées par une caméra embarquée sur un UAV permet de déterminer la hauteur de la canopée, l'espacement des rangées de vignes et leur profondeur avec des précisions de 9.8cm, 8.7cm et 7cm respectivement. L'orientation des rangées de vignes est déterminée en utilisant la transformée de Hough, et la génération du nuage de données tridimensionnelles par un algorithme SfM (Structure from Motion).
- L'utilisation de capteurs ultra-sons sur une plateforme mobile basée au sol [124] permet des mesures de la profondeur de la canopée à différentes hauteurs, avec des corrélations aux mesures manuelles de l'ordre de $0.84>R>0.69$.

2.2.5.4. *La discrimination des variétés*

La discrimination des variétés de grappes est une problématique de classification par imagerie aérienne et satellite. Les technologies utilisées sont les télédétections multispectrales et hyperspectrales. Les classifications se font à l'aide d'algorithmes comme la SVM (Support Vector Machine).

- L'utilisation du capteur aéroporté hyperspectral CASI (Compact Airborne Spectrographic Image) dans la bande 400nm-950nm pour 144 bandes spectrales et une résolution de 10 nm permet la discrimination des variétés Cabernet-Sauvignon et Merlot Noir à un taux de réussite d'environ 90% [125].
- Les mesures hyperspectrales basées au sol (GER 1500 350nm-1050nm, résolution de 3.2nm), par UAV (Micro-Hyperspec A-Series 380nm-1000nm) et des mesures multispectrales par satellite (Worlview-2) sont utilisées pour classifier 4 ou 6 variétés dans des vignobles grecques avec des précisions respectives de 61% et 69% [126].

2.2.5.5. *Le stress hydrique*

Le stress hydrique (EN : *water stress*) est une condition physiologique où la plante transpire davantage d'eau qu'elle n'en absorbe. C'est un indicateur de l'état de santé de la plante et est fortement corrélé à la qualité des grappes. La gestion de l'irrigation des vignes sert alors à réguler ce stress.

- Le WI (Water Index) est un indice du stress hydrique se mesurant par réflectance au niveau de la feuille et de la canopée. Dans les travaux de Serrano et al [127], le WI est défini par le rapport des réflectances à 900nm et 970nm. Il est mesuré manuellement et est corrélé à la différence de température entre l'air et la canopée (coefficient de détermination $R^2>0.45$).
- Les indicateurs thermiques sont en effet de bons estimateurs du stress hydrique de la vigne [128]. Dans les travaux publiés par García-Tejero *et al* [129], on définit le CWSI=$\frac{T_C - T_{wet}}{T_{dry} - T_{Wet}}$ (Crop Water Stress Index) avec T_{wet} et T_{Dry} des températures de références de feuilles respectivement en fermeture ou en pleine transpiration stomatales, et T_C la température de la canopée. Le CWSI est mesuré avec une caméra thermique et est corrélé avec des mesures manuelles de l'évapotranspiration ($R^2>0.61$) et de l'assimilation en CO_2 ($R^2>0.56$) pour deux variétés de grappes (Touriga et Aragonez).

2.2.5.6. *L'humidité du sol*

L'humidité du sol (EN : *soil moisture*), tout comme le stress hydrique, est un indicateur important sujet à de fortes variabilités spatiales et temporelles.

- L'utilisation de caméras thermiques infrarouges au sol et aéroportées sont étudiées par Soliman *et al* [130] pour corréler l'inertie thermique du sol d'un vignoble recouvert d'herbe avec son humidité. Les mesures se font à l'aube et au crépuscule.
- La réflectométrie temporelle (TDR) est aussi utilisée pour mesurer l'humidité des sols. Cette technologie utilise des sondes implantées dans le sol. Des corrélations ont été établies entre le NDVI et l'humidité des sols [131].

2.2.5.7. *L'altitude (topographie)*

L'altitude des pieds de vigne (EN : *elevation*) est une donnée topographique qui a son importance sur la qualité des vignes (autant par les conséquences sur l'ensoleillement que la constitution du sol).

- Les générations de cartographies DSM (Digital Surface Models) par UAV avec caméra RGB sont de plus en plus courantes. Les travaux de Pichon *et al* [132] présentent trois systèmes commerciaux d'UAV générant des DSM testés dans un vignoble afin d'obtenir des DEM (Digital Elevation Models). Ces modèles bien qu'intéressants pour la viticulture, possèdent quelques limitations : les erreurs d'élévation ne sont pas constantes en fonction de l'endroit d'acquisition, et l'estimation de l'élévation n'est pas fiable en présence d'un sol recouvert d'herbe ou de végétation trop abondante.
- Des DEM peuvent aussi être générés par des LiDAR embarqués sur UAV [133]. Les limitations restent cependant les mêmes que pour les caméras RGB.

2.2.5.8. *La détection de mauvaises herbes*

La présence d'herbes invasives au sol peut entraîner des pertes en qualité et en rendement, car elles absorbent une partie des intrants nécessaires au développement des vignes.

- Dans les travaux de De Castro *et al* [134], l'acquisition d'images par une caméra RGB embarquée sur UAV permet la détection de Cynodon dactylon par le biais d'algorithmes de classification. Quatre classes sont détectées (pied de vigne, canopée, sol et Cynodon dactylon) avec une précision de 85%.

2.2.5.9. *La concentration en chlorophylle*

La concentration en chlorophylle est un indicateur de l'état de santé de la plante.

- Les analyses hyperspectrales développées dans [135] montrent l'importance de la bande 700nm-750nm pour la mesure de la concentration en chlorophylle *a* et *b* dans les feuilles de vignes. Des images hyperspectrales aéroportées ont montré une corrélation (R^2>0.55) entre la concentration en chlorophylle et l'indice hyperspectral TCARI/OSAVI.
  - $TCARI = 3\left[(\rho_{700} - \rho_{670}) - 0.2(\rho_{700} - \rho_{550})\frac{\rho_{700}}{\rho_{670}}\right]$
  - $\text{OSAVI} = (1 - 0.16)(\rho_{NIR} - \rho_{Red})/(\rho_{NIR} + \rho_{Red} + 0.16)$

- Dans [136], des analyses d'images hyperspectrales aéroportées prises sous différents angles (nadir, et hors-nadir de 45° illuminée et 45° ombragée) permettent une estimation de la concentration en chlorophylle (et de l'azote) en calculant des indices spectraux (NDVI, TCARI, OSAVI …).

2.2.5.10. *La concentration en anthocyanine*

La concentration en anthocyanine dans les grappes est un indicateur de la maturité de la grappe de raisin :

- Des capteurs optiques portables (Multiplex® sensor FORCE-A [137]) sont utilisés pour détecter indirectement la concentration en anthocyanine [138], [139], en exploitant les propriétés d'émission fluorescente de la chlorophylle dans le rouge (670nm -690nm) et l'infrarouge lointain (720nm - 780nm) lorsqu'elle est excitée par des lumières UV (375 nm) et visible (630 nm rouge, 520 nm vert et 450 nm bleue).

2.2.5.11. *L'état des greffes*

- Des travaux ont montré la possibilité d'étudier l'état de greffes effectuées sur les pieds de vignes par tomographie en rayon X [140].

2.3. Discussion

On constate que la technologie dominante en PV reste la télédétection multispectrale. Elle est majoritairement utilisée pour mesurer la vigueur des vignes grâce à des indices de végétation comme le NDVI (ou bien l'EVI qui offre plus de stabilité temporelle). L'imagerie multispectrale est de plus accompagnée par l'utilisation croissante des UAV depuis 2010. En revanche, l'estimation indirecte du rendement par la mesure du NDVI semble atteindre ses limites (R^2<0.80) et reste très dépendante des conditions environnementales (variété de grappes, propriétés du sol …).

Des mesures directes du rendement sont aussi étudiées, dans la totalité des cas par détection optique des grappes de raisin. Cela nécessite d'une part des algorithmes de classification, et d'autre part des conditions de luminosité bien particulières pour des estimations optimales (pour finalement obtenir des coefficients de corrélations R^2<0.80). La solution optique est par ailleurs inenvisageable si les grappes de raisin sont totalement masquées par les feuilles.

D'un autre côté, la télédétection aérienne par radar a été envisagée, pour des fréquences d'utilisation inférieures à 12 GHz, et à différentes polarisations. Bien que des études aient montrées la rétrodiffusion dépolarisante des vignes, la télédétection SAR génère de nombreuses incertitudes de mesure, notamment par la présence de speckles, et par les variabilités de rétrodiffusion du sol et des équipements du vignoble. Les derniers travaux de classification des parcelles de vigne par radar ont finalement abouti à une fusion de données radar/optique.

Les travaux d'estimation du rendement des grappes de raisin par radar sont par ailleurs inexistants. L'utilisation d'un radar à ondes millimétriques pourrait alors s'avérer utile pour une estimation directe du rendement. Si un tel système était basé au sol, les réflexions de ce dernier seraient alors évitées. On pourrait par ailleurs supposer qu'à partir d'une certaine longueur d'onde, il serait possible de détecter avec assez de précision la rétrodiffusion des grappes de raisin, même cachées par les feuilles, et ainsi contourner les problèmes rencontrés en détection optique.

3. Application pour l'estimation de volumes et l'interrogation de capteurs passifs

3.1. Introduction

Dans cette partie est expliquée en détails la technique d'interrogation par radar FM-CW par balayage 3D, illustrée dans un premier temps par des simulations. On cherche alors à caractériser à partir de cette méthode la variation de la surface équivalente radar (SER) d'une cible ponctuelle (c'est-à-dire un point qui rétrodiffuse les ondes de manière isotrope). La variation de SER peut en effet être corrélée à un changement de volume de la cible. Pouvoir estimer la SER revient à donc à pouvoir estimer le volume d'une cible. Différents estimateurs statistiques sont proposés, basés sur des niveaux d'échos ou des volumes, et une modélisation des distributions et fonctions de répartition sont proposées en partant du principe que la scène de mesure est initialement caractérisée par un bruit gaussien. Les caractéristiques des estimateurs sont ensuite étudiées pour une cible ponctuelle seule, puis en présence de clutters (échos parasites).

Les méthodes décrites en simulation sont appliquées en mesures pour l'estimation de volume de cibles canoniques, plus exactement des sphères métalliques de différents diamètres et à différentes distances d'interrogation. Ces mêmes méthodes sont ensuite appliquées pour l'interrogation de capteurs passifs (charges variables ou capteurs conçu pour l'interrogation radar). Les mesures présentées dans cette partie sont effectuées avec un radar FM-CW fonctionnant à une fréquence centrale de 23,8GHz. Les paramètres de mesures sont résumés dans des tableaux et les caractéristiques des instruments radiofréquences utilisés (antennes et radar) sont disponibles en annexe.

3.2. Simulations - Balayage en trois dimensions par radar FM-CW

3.2.1. Génération d'un chirp

L'interrogation par radar FM-CW (Frequency-Modulated Continuous-Wave) d'une scène repose sur la génération d'un signal modulé en fréquence (appelé *chirp*). Cette modulation en fréquence peut prendre plusieurs formes, dont voici quelques exemples :

- La modulation triangulaire :

$$f(t) = \begin{cases} f_c + \alpha_c \cdot \left(t \cdot mod(PRI) - \frac{1}{2}T\right) \; pour \; 0 < t \cdot mod(PRI) \leq T \\ f_c + \alpha_c \cdot \left(-t \cdot mod(PRI) - PRI + \frac{3}{2}T\right) \; pour \; T < t \cdot mod(PRI) \leq 2T \\ f_c - \alpha_c \cdot \frac{1}{2}T \; pour \; 2T \leq t \cdot mod(PRI) < PRI \end{cases} \quad (1)$$

- La modulation en dents de scie (*sawtooth*):

$$f(t) = \begin{cases} f_c + \alpha_c \cdot \left(t \cdot mod(PRI) - \frac{1}{2}T\right) \; pour \; 0 < t \cdot mod(PRI) \leq T \\ f_c - \alpha_c \cdot \frac{1}{2}T \; pour \; T < t \cdot mod(PRI) \leq PRI \end{cases} \quad (2)$$

- La modulation en escalier (*stepped frequency modulation*):

$$f(t) = \begin{cases} f_c + \alpha_c \cdot \left(k \cdot \frac{T}{n_S} - \frac{1}{2}T\right) \; pour \; 0 < t \cdot mod(PRI) \leq T \\ f_c - \alpha_c \cdot \frac{1}{2}T \; pour \; T < t \cdot mod(PRI) \leq PRI \end{cases} \quad (3)$$

Dans ces expressions $f(t)$ représente la fréquence modulée à un instant *t*, *T* le temps de montée de la rampe de modulation (et de descente dans le cas de la modulation triangulaire), *PRI* (*Pulse Repetition Interval*) la durée entre deux chirps successifs (ou temps de répétition) avec $T \leq PRI$. Le paramètre α_c est le taux de balayage fréquentiel (*frequency sweep rate*) (supposé constant ici) tel que $\alpha_c = \frac{B}{T}$, où *B* désigne la bande de modulation du radar. Par ailleurs, $f_c = f\left(\frac{T}{2}\right)$ représente la fréquence porteuse du chirp. Dans le cas de la modulation en escalier, le paramètre n_S représente le nombre de pas de la modulation, et $k = \left\lfloor \frac{t \cdot mod(PRI) \cdot n_S}{T} \right\rfloor + 0.5$, avec $\lfloor x \rfloor$ la partie entière supérieure de x. Une illustration des différentes modulations est représentée sur la Figure 12 pour f_c=23.8GHz, *B*=2GHz, *T*=1ms et *PRI*=2.5ms.

Considérons alors deux chirps : le premier transmis (Tx) et le second reçu (Rx) à partir d'une réflexion électromagnétique d'une cible ponctuelle située à une distance *R* du radar FM-CW. La durée d'un aller-retour τ du signal après propagation dans le vide est donnée par l'expression :

$$\tau(R) = \frac{2R}{c} \tag{4}$$

Le paramètre $c \approx 2.99 \times 10^8\ m.s^{-1}$ désigne la célérité de la lumière dans le vide. La différence entre les signaux transmis et reçus, parfois appelée *difference frequency signal* (DFS) [141] contient l'information de la position de la cible ponctuelle contenue dans le décalage temporel généré. Cette information est fréquentielle et notée δf. Elle est donnée par l'expression :

$$\delta f(R) = \alpha_c \cdot \tau(R) = \frac{2R \cdot \alpha_c}{c} \tag{5}$$

Une illustration des signaux Tx/Rx pour les modulations triangulaires en dents de scie et leur *DFS* respectifs sont représentés sur la Figure 13 pour un *PRI*=2*T*+*δT* dans le cas de la modulation triangulaire, et *PRI*=1,2*T*+*δT* dans le cas de la modulation en dents de scie. *δT* représente le temps de latence entre l'émission de deux chirps. Chaque modulation présente ses propres avantages et inconvénients. La modulation en dent de scie est la plus simple et permet de détecter les distances des cibles ponctuelles jusqu'à une période maximale *T*=*PRI*. La modulation triangulaire permet une interrogation similaire mais pour un temps d'acquisition au moins deux fois plus long. En revanche, les rampes montantes et descendantes peuvent être utilisées pour mesurer des effets Doppler (ce qui n'est pas possible pour la modulation en dent-de-scie). Dans les différents cas exposés dans ce manuscrit, les effets Doppler ne sont pas étudiés (cibles ponctuelles considérées ici comme immobiles) et les modulations en fréquence utilisées lors des simulations ou dans les systèmes de mesure sont des modulations en dents-de-scie, ou bien des modulations triangulaires où seule la rampe montante est considérée.

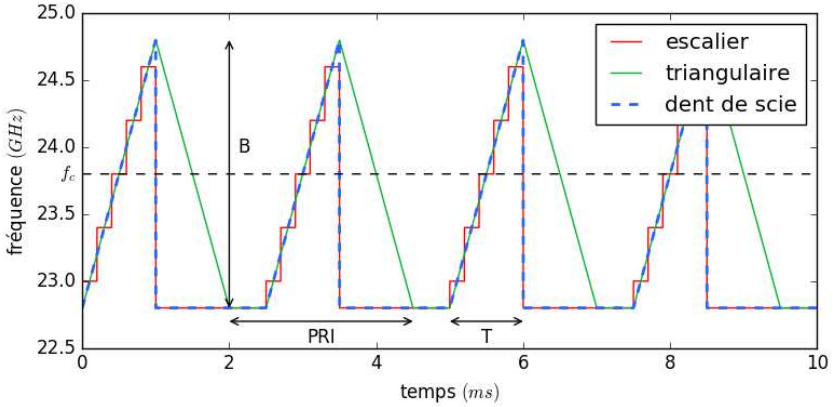


Figure 12. Différentes modulations fréquentielles couramment utilisées pour les radars FM-CW.

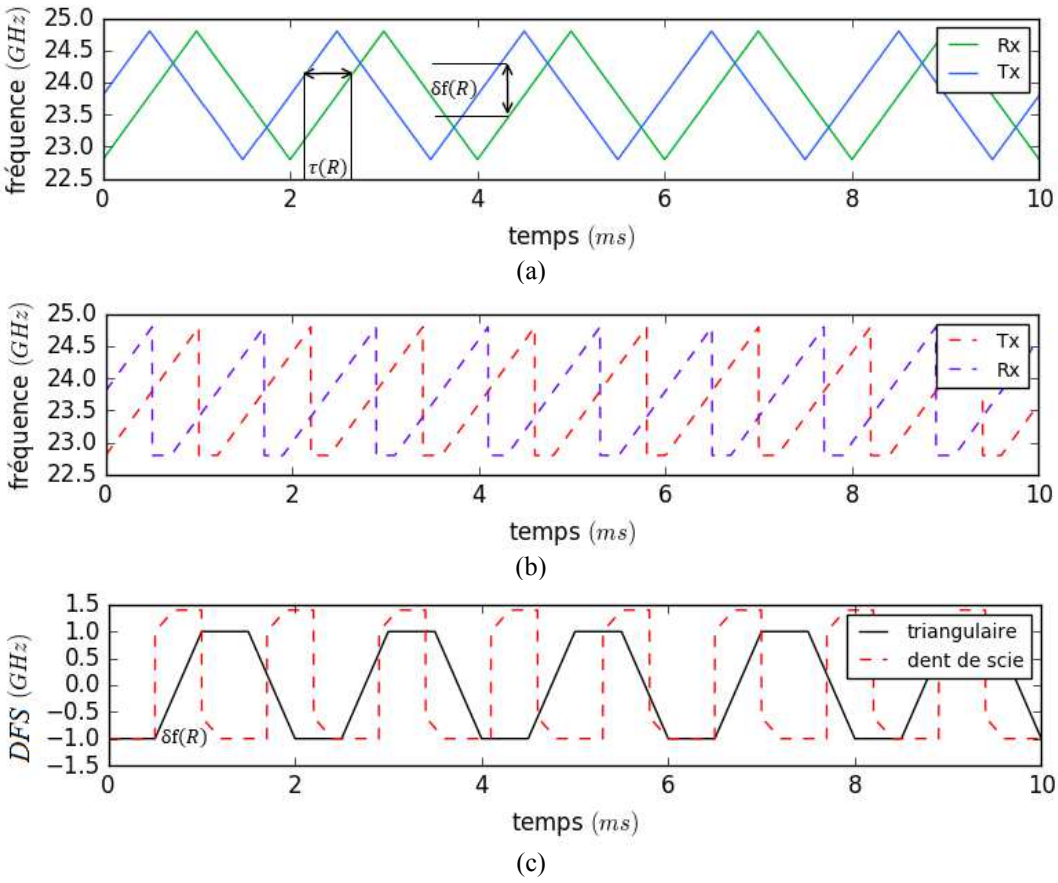


Figure 13. Signaux de transmission et réception issus de la réflexion d'une cible ponctuelle située à une distance R du radar pour (a) une modulation triangulaire et (b) une modulation en dents de scie ainsi que (c) les signaux *DFS* associés.

3.2.2. Spectre de battement et résolution en profondeur

Les distances des cibles ponctuelles s'obtiennent en analysant les différentes fréquences $\delta f(R)$ qui composent le *DFS*. Un des moyens les plus simples pour retrouver ces fréquences est d'appliquer sur le signal une transformée de Fourier rapide (FFT) sur le signal durant la durée totale du temps de montée T. La fréquence la plus basse mesurable est donc celle de la distance minimale mesurable, appelée *résolution en profondeur* [142], que l'on notera d. On a donc $\delta f(d) = \frac{1}{T}$ et, d'après les équations (4) et (5), d est donnée par l'expression :

$$d = \frac{c.T}{2.\alpha_c} = \frac{c}{2B} \tag{6}$$

Si l'on considère deux cibles ponctuelles identiques situées dans la même direction d'interrogation que celle du radar FM-CW, la distance minimale à partir de laquelle les deux cibles ponctuelles sont détectables séparément correspond à la résolution en profondeur d du radar. Ce paramètre (très important si l'on souhaite obtenir une image de résolution suffisante) dépend de la bande de modulation B du radar. Cette bande de modulation est limitée par la linéarité du VCO (*Voltage Controlled Oscillator*). Les valeurs classiques de cette bande de modulation sont aux alentours de 10% de la fréquence porteuse f_c, mais on trouve désormais dans la littérature des radars FM-CW millimétriques annonçant des bandes de modulations plus élevées (13,5% à 60GHz [143], 31,2% à 80GHz [144] et 16,6% à 240GHz [145]).

La distance maximale mesurable théorique notée R_{Max} dépend de l'échantillonnage appliqué sur le *DFS* durant la période *T*. En définissant *N* le nombre d'échantillons, la fréquence maximale mesurable est donc :

$$\delta f(R_{Max}) = \frac{N}{2.T} \tag{7}$$

D'après les équations (4) et (5), la distance maximale mesurable est donnée par l'expression :

$$R_{Max} = \frac{c \cdot N}{4B} \tag{8}$$

Le spectre en fréquence (ou en distance, voir équation (5)) est appelé spectre de battement (*beat frequency spectrum*). Il est utilisé pour visualiser la réflexion des cibles ponctuelles situées à différentes distances d'interrogation. Supposons que le radar FM-CW transmette un chirp de la forme complexe suivante :

$$s_e(t) = A_e \exp(2\pi j \cdot f(t) \cdot t) \tag{9}$$

Le paramètre A_e représente l'amplitude du signal. Considérons alors que la fréquence $f(t)$ soit modulée en dents de scie (voir équation (2)) et qu'une cible ponctuelle se trouve à une distance R_0 du radar, alors l'expression du signal reçu $s_r(t)$ est donnée par :

$$s_r(t, R_0) = A_r \exp\left(2\pi j \cdot f(t) \cdot \left(t - \tau(R_0)\right)\right) \tag{10}$$

Le paramètre A_r représente l'amplitude du signal en réception. Le signal complexe en sortie du mélangeur (et après filtrage des harmoniques hautes fréquences) est donné, d'après les équations (2), (9) et (10) par l'expression :

$$s(t, R_0) = s_e(t) \cdot s_r(t, R_0) = A \exp\left\{2\pi j \cdot \left(f_c \cdot \tau(R_0) + \alpha_c \cdot t \cdot \tau(R_0) - \frac{1}{2}\alpha_c \cdot \tau(R_0)^2\right)\right\} + \mathcal{N} \tag{11}$$

où le paramètre *A* représente l'amplitude du signal en réception et $\mathcal{N}$ le bruit issu du système radar et de l'environnement. On considère le taux de balayage fréquentiel α_c constant (modulation linéaire) et le terme $\frac{1}{2}\alpha_c \cdot \tau(R_0)^2$ représente le bruit de phase (*residual video phase*) [146]. Le spectre de battement est donc représenté en calculant la FFT du signal $s(t, R_0)$:

$$S\left(\delta f(R_0)\right) = \mathcal{FFT}(s(t, R_0)) \tag{12}$$

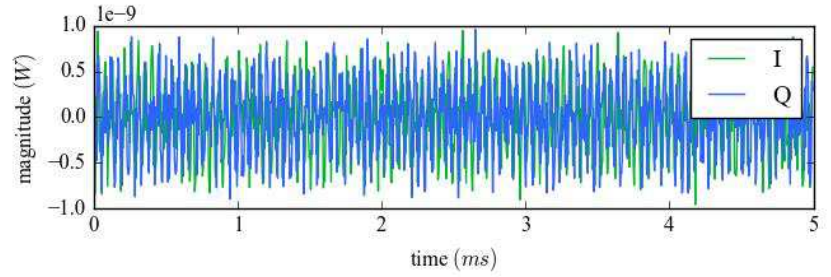
Sur la Figure 14 sont représentés les signaux I et Q (a) du signal temporel $s(t, R_0)$et (b) du spectre de battement $S\left(\delta f(R_0)\right)$ pour une cible ponctuelle située à R_0=8m du radar. Les paramètres choisis sont *B*=2GHz, f_c=23,8GHz, *T*=5ms et *N*=1024. D'après l'équation (6), la résolution en profondeur est donc *d*=7,5cm et d'après l'équation (8), la distance maximale mesurable est R_{Max}=38,4m. La puissance considérée du signal transmis est P_T=0,1W (20dBm). La puissance reçue P_R par le radar issue de la réflexion des ondes sur la cible ponctuelle, représentée ici par l'amplitude de $s(t, R_0)$, est déterminée (sans considérer d'éventuelles chaines d'amplification en réception) par l'équation radar (monostatique) [147]:

$$P_R = \frac{P_T G^2 {\lambda_c}^2 \sigma_{RCS}}{(4\pi)^3 {R_0}^4} \tag{13}$$

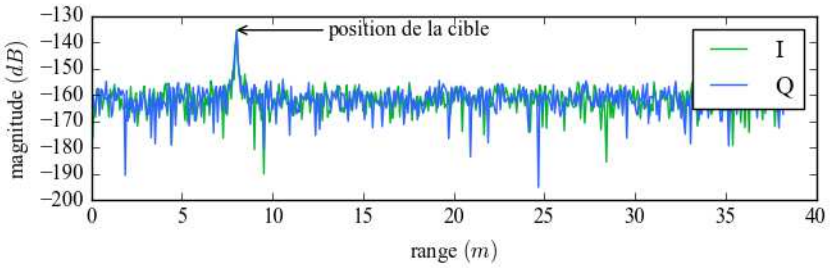
L'exemple montré sur la Figure 14 considère une cible ponctuelle avec une surface équivalente radar (SER) σ_{RCS}=1m² et un gain d'antenne G= 8dBi. Le paramètre λ_c représente la longueur d'onde à la fréquence porteuse f_c. Le bruit $\mathcal{N}$est un bruit gaussien de moyenne nulle et d'écart-type d'environ 10% de la puissance reçue.

Pour mettre en évidence l'importance de la bande de modulation *B*, deux cibles ponctuelles identiques sont placées respectivement à R_0=8,0m et R_1=8,25m. Les paramètres décrits précédemment sont

identiques, exceptée la bande de modulation B, variant de 0,8GHz à 2GHz, ce qui correspond à une résolution en profondeur variant de 18,75cm à 7,5cm. Les deux cibles ponctuelles sont représentées pour B=0,8GHz par un pic identique sur le spectre de battement. Lorsque la bande de modulation B augmente, la résolution en profondeur d diminue et deux pics en fréquence se distinguent sur le spectre aux positions respectives des cibles ponctuelles. Si l'on souhaite distinguer un maximum de cibles ponctuelles différentes, il est préférable d'avoir la bande de modulation la plus grande possible.



(a)



(b)

Figure 14. (a) Signal temporel *s(t)* et (b) amplitude du spectre de battement *S(f)* d'une cible ponctuelle interrogée à une distance R_0=8m pour les canaux I (vert) et Q (bleu).

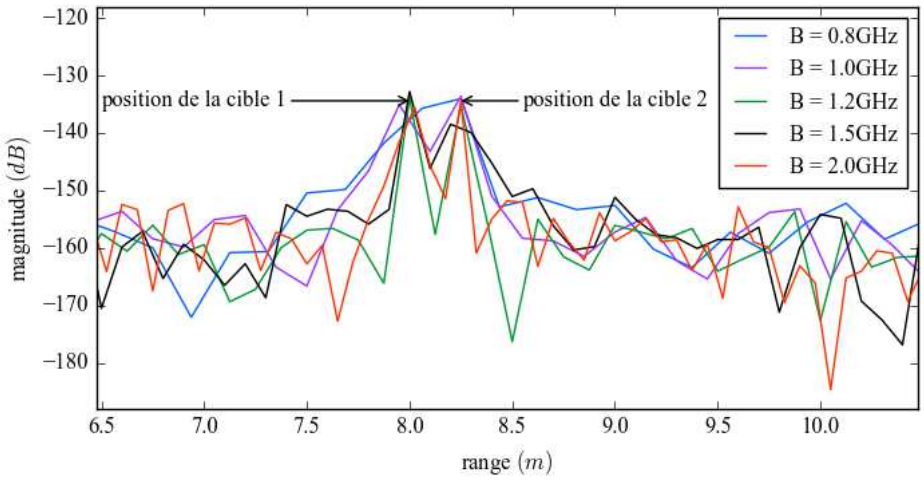


Figure 15. Spectres de battement de deux cibles ponctuelles identiques situées respectivement à des distances R_0=8,0m et R_0=8,25m du radar pour différentes bandes de modulation.

3.2.3. Balayage tridimensionnel

3.2.3.1. *Résolution volumique*

Supposons désormais que l'antenne de transmission du radar soit directive, et que l'on balaye la scène de mesure dans différentes directions d'interrogation. On note alors (θ,φ) la direction d'interrogation de l'antenne de transmission, dans un repère en coordonnées de type azimut/élévation (R,θ,φ) où l'origine O représente la position du radar FM-CW (idéalement le centre de phase de l'antenne de transmission), R la distance d'interrogation, θ l'azimut et φ l'élévation. Le repère est choisi de telle sorte que les coordonnées (R, 0, 0) indiquent une direction d'interrogation orthogonale à la scène que l'on souhaite mesurer. Des illustrations du repère utilisé sont affichées sur la Figure 16. Les coordonnées cartésiennes (X, Y, Z) représentent respectivement la largeur, la hauteur et la profondeur de la scène de mesure. Si l'on souhaite connaître la rétrodiffusion d'une cible ponctuelle dans un volume, il suffit de mesurer le spectre de battement dans plusieurs directions d'interrogation aux alentours de la cible ponctuelle. On définit les pas de résolution en azimut d_θ et en élévation d_φ pour lesquels on déplace l'antenne de transmission. On obtient alors une grille tridimensionnelle en coordonnées azimut/élévation composées de voxels. La résolution volumique v_{res} par l'expression :

$$v_{res}(R) = \left(2dR^2 + \frac{d^3}{6}\right) \times d_\theta \times \sin\left(\frac{d_\varphi}{2}\right) \tag{14}$$

La résolution volumique en coordonnées azimut/élévation dépend à la fois de la distance d'interrogation et d'après l'équation (6) de la bande de modulation du radar. Sur la Figure 17 (a) est représentée le voxel en coordonnées azimut/élévation et sur la Figure 17 (b) la variation du volume de résolution v_{res} en fonction de la distance d'interrogation R pour différentes bandes de modulation B. La résolution volumique augmente suivant la loi $x \mapsto x^2$, ce qui doit être pris en compte pour des estimations de volume. Comme expliqué précédemment, l'utilisation d'une bande de modulation élevée augmente la résolution de l'image, et par conséquent permet une résolution volumique plus fine. Pour chaque voxel est associée une valeur de rétrodiffusion électromagnétique de la scène mesurée, que l'on appellera *niveau d'écho*.

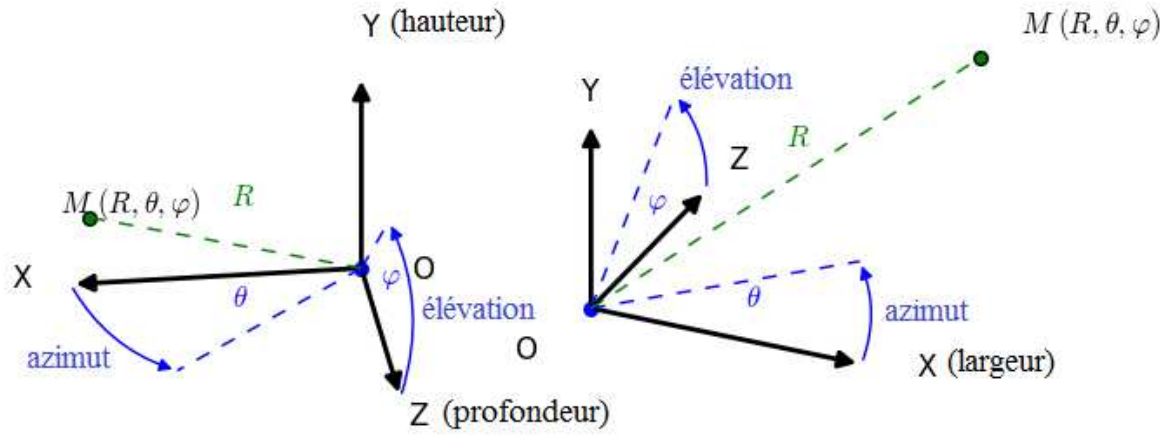
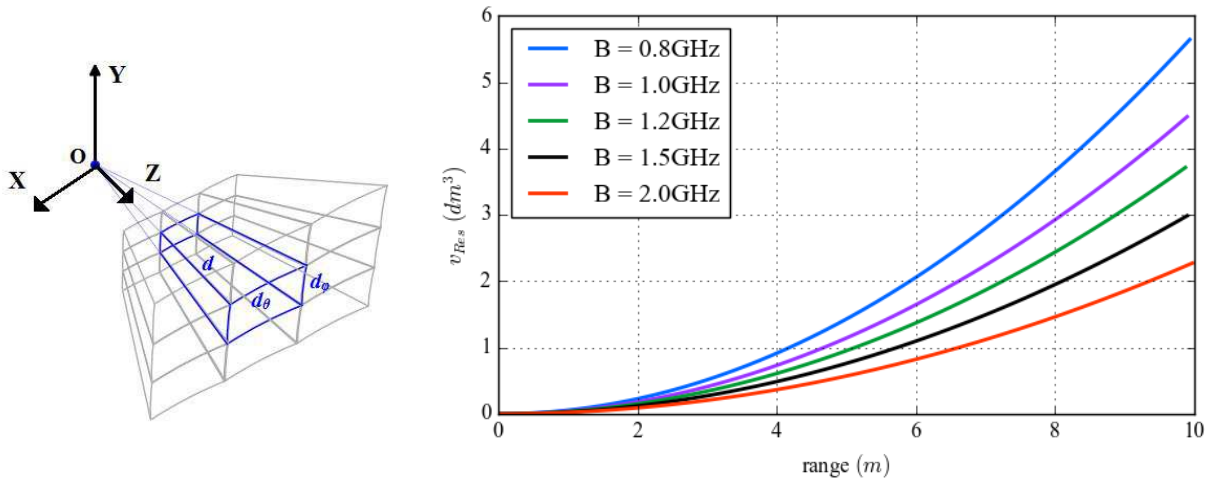


Figure 16. Systèmes de coordonnées azimut/élévation et cartésiens utilisés pour les données en trois dimensions. Le point O représente la position du radar FM-CW.



(a) (b)

Figure 17. (a) Représentation d'un voxel de volume v_{res} et (b) variation du volume v_{res} en fonction de la distance d'interrogation pour différentes bandes de modulation B.

3.2.3.2. *Affichage tridimensionnel de la rétrodiffusion d'une cible ponctuelle*

Supposons désormais qu'une cible ponctuelle réfléchissante se trouve dans une position donnée dans l'espace (R_0, θ_0, φ_0). On se propose d'afficher la rétrodiffusion en trois dimensions de cette cible ponctuelle. Pour ce faire, on modélise un filtre spatial appliqué au spectre de battement, simulant le diagramme de rayonnement de l'antenne de transmission à la fréquence porteuse f_c. Ce filtre est donné par l'expression :

$$\begin{cases} \mathcal{H}_{Ant}(\theta,\varphi) = G_0 \cdot sinc\left(a_{\theta 3dB}\frac{|\theta-\theta_{3dB}|}{\pi}\right)\cdot sinc\left(a_{\varphi 3dB}\frac{|\varphi-\varphi_{3dB}|}{\pi}\right) \\ a_{\theta 3dB} = \frac{2\sqrt{6\cdot\left(1-\frac{\sqrt{2}}{2}\right)}}{\theta_{3dB}} \\ a_{\varphi 3dB} = \frac{2\sqrt{6\cdot\left(1-\frac{\sqrt{2}}{2}\right)}}{\varphi_{3dB}} \end{cases} \quad (15)$$

G_0 représente le gain maximal de l'antenne, θ_{3dB} et φ_{3dB}les angles d'ouverture de l'antenne à -3dB en azimut et élévation. Une représentation du filtre est disponible sur la Figure 18 pour différents angles d'ouverture en azimut dans un plan de coupe φ=0°. En utilisant les équations (12) et (15), la rétrodiffusion tridimensionnelle d'une cible ponctuelle en position (R_0, θ_0, φ_0) est donnée par l'expression :

$$S_{3D}(R_0,\theta_0,\varphi_0) = \mathcal{H}_{Ant}(\theta_0,\varphi_0)\cdot S\big(\delta f(R_0)\big) \quad (16)$$

On simule désormais un balayage en azimut et en élévation du radar FM-CW interrogeant une cible ponctuelle située aux positions (R_0=4m, θ_0=0°, φ_0=0°). Les paramètres de la modulation fréquentielle sont identiques à ceux de la section 3.2.2 avec une bande de modulation B=2GHz. Les angles limites en azimut et en élévation sont de ±10° avec des pas angulaires d_θ=1° et d_φ=1°. Les angles d'ouverture d'antenne choisis sont θ_{3dB}=4° et φ_{3dB}=4°. Sur la Figure 19 (a) sont affichés les niveaux d'écho normalisés de la cible ponctuelle dans un plan de coupe φ=0°.

Afin de pouvoir visualiser la rétrodiffusion de la cible en trois dimensions, on peut par exemple afficher le niveau d'écho de chaque voxel dans un repère en trois dimensions. Le problème de cette méthode est la gestion graphique de chaque point de rétrodiffusion qui peut, en fonction du nombre de

voxels, demander beaucoup de mémoire. On propose ici une autre méthode de visualisation basée sur l'affichage d'*isosurfaces*, c'est-à-dire de surfaces de même niveau d'échos. Une des premières étapes est de transformer les niveaux d'écho enregistrés en coordonnées azimut/élévation en coordonnées cartésiennes. Cette étape permet un affichage en 3D des niveaux d'écho sans déformation visuelle. Les formules de passages des coordonnées azimut/élévation aux coordonnées cartésiennes des repères décrits dans la section 3.2.3.1 sont données par :

$$\begin{cases} x = R \cdot \tan(\theta) \\ y = R \cdot \tan(\varphi) \\ z = R\sqrt{1 - \tan^2(\theta) - \tan^2(\varphi)} \end{cases} \quad (17)$$

Une nouvelle résolution volumique cartésienne, notée v_C doit alors être définie dans ce nouveau repère. On exprime alors les résolutions en largeur d_x, en hauteur d_y et profondeur d_z par les expressions :

$$\begin{cases} d_x = \frac{2 \cdot R_{Min}}{p_x} \tan\left(\frac{d_\theta}{2}\right) \\ d_y = \frac{2 \cdot R_{Min}}{p_y} \tan\left(\frac{d_\varphi}{2}\right) \\ d_z = d \end{cases} \quad (18)$$

La résolution volumique cartésienne v_C est donnée par l'expression :

$$v_C = d_x \cdot d_y \cdot d_z \quad (19)$$

Les facteurs p_x et p_y sont utilisés pour réduire ou augmenter les résolutions en largeur et hauteur relativement à la distance d'interrogation R_{Min} à partir de laquelle on effectue le changement de coordonnées. Le nombre de voxels en coordonnées cartésiennes augmente avec la valeur de R_{Min}. Les facteurs p_x et p_y sont donc ici pour ajuster la valeur de v_C, et par conséquent le nombre de voxels en coordonnées cartésiennes. Les résolutions volumiques dans leurs coordonnées respectives sont visibles sur la Figure 19 (b). Une interpolation polynomiale par parties [148] est ensuite appliquée sur les niveaux d'écho en coordonnées azimut/élévation pour obtenir les niveaux d'écho en coordonnées cartésiennes. Cette interpolation est effectuée avec la fonction *map_coordinates* [149]. Sur la Figure 19 (c) et (d) sont représentés les niveaux d'écho de la cible ponctuelle dans un plan de coupe pour y=0m après changements de coordonnées et des interpolations respectivement à l'ordre 0 et à l'ordre 2. Pour un aspect purement esthétique, la représentation tridimensionnelle des niveaux d'écho s'effectuera à l'ordre 2. Les caractéristiques du volume d'étude pour les deux repères sont disponibles dans le Tableau 7.

Les isosurfaces sont ensuite calculées à partir des niveaux d'échos en coordonnées cartésiennes. Ces surfaces de niveaux d'échos identiques sont calculées à partir de l'algorithme *« marching cubes »* [150] et visualisées à partir de la bibliothèque *Mayavi* développée par Ramachandran *et al* [151]. Plusieurs surfaces peuvent être ainsi calculées pour différents niveaux d'échos, et être superposées comme des calques en jouant sur les transparences. Une représentation des niveaux d'écho normalisés de la cible ponctuelle par isosurfaces est disponible sur la Figure 20. Sur cette figure, 21 isosurfaces sont calculées et superposées pour des niveaux d'écho normalisés allant de -20dB à 0dB avec un pas de 1dB.

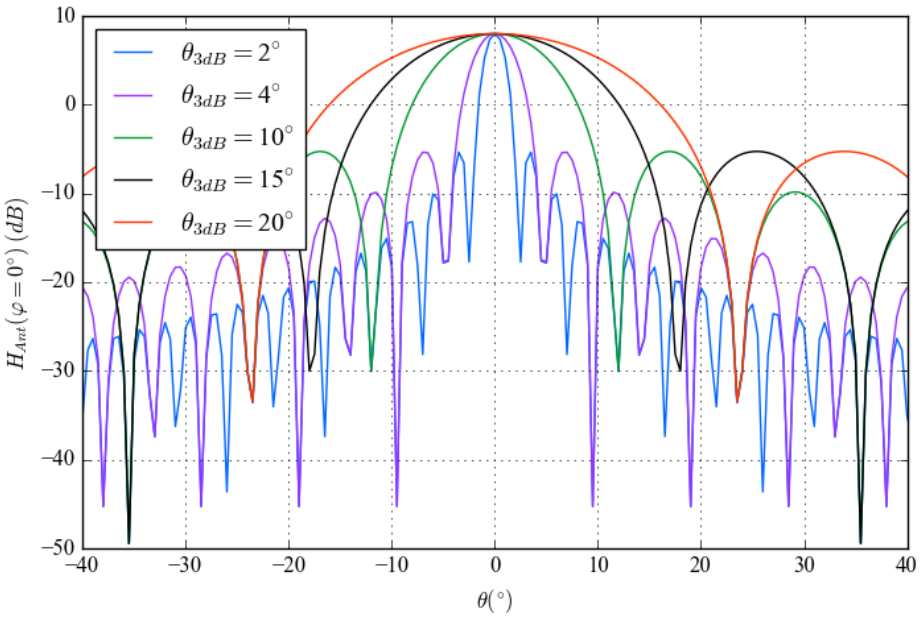


Figure 18. Forme du filtre spatial utilisé simulant le diagramme de rayonnement de l'antenne de transmission pour différentes valeurs d'angles d'ouverture en azimut.

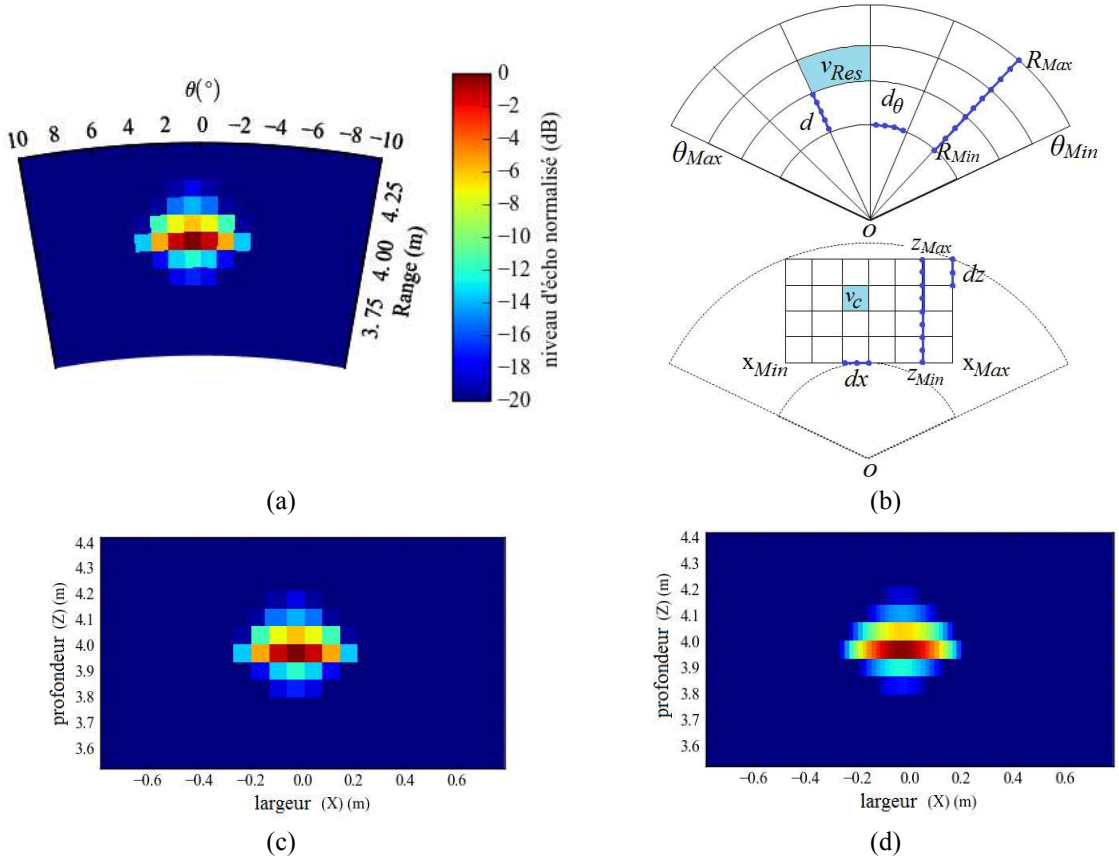


Figure 19. (a) Représentation polaire des niveaux d'écho normalisés de la cible ponctuelle en position (R_0=4m, θ_0=0°, φ_0=0°) dans un plan de coupe pour φ=0°. (b) Passage des coordonnées azimut/élévation vers les coordonnées cartésiennes, avec définition de la résolution volumique v_C. L'interpolation polynomiale par parties des niveaux d'écho est ensuite effectuée (c) à l'ordre 0 et (d) à l'ordre 2, dans un plan de coupe pour y=0m.

paramètres	coordonnées azimut/élévation			coordonnées cartésiennes		
résolutions	d_θ=1°	d_φ=1°	d=7.5cm	d_x=1.75cm	d_y=1.75cm	d_z=7.5cm
limites	θ=±10°	φ=±10°	R_0±0.5m	X=±0.78m	Y=±0.78m	R_0±0.5m
résolution volumique	$v_{res}(R_0)$=350 cm^3			v_C=23cm^3		
nombre de voxels	5733			107653		

Tableau 7. Paramètres du volume d'étude de la cible ponctuelle en coordonnées azimut/élévation et cartésiennes

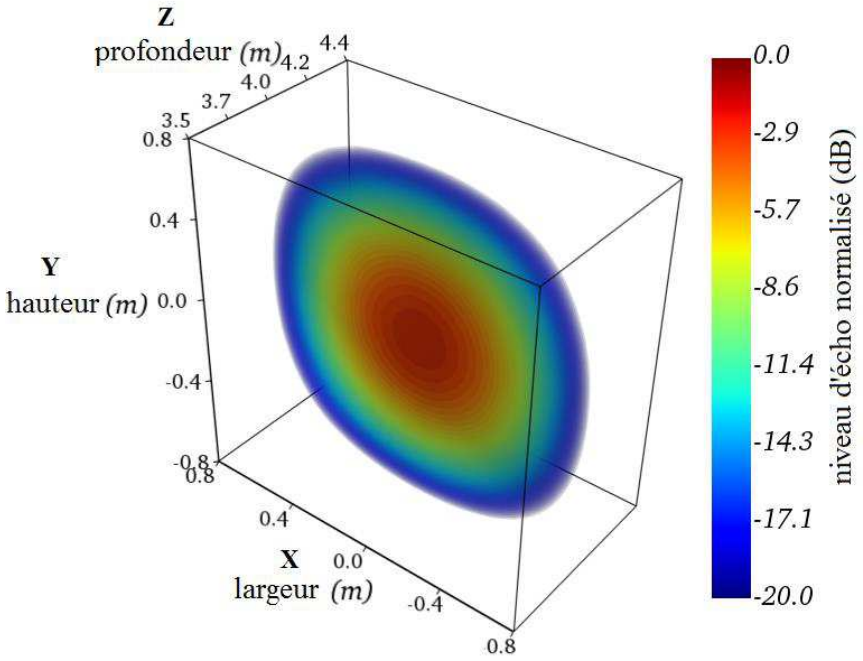


Figure 20. Représentation par isosurfaces des niveaux d'écho normalisés de la cible ponctuelle en position (R_0=4m, θ_0=0°, φ_0=0°) entre -20dB et 0dB.

3.2.4. Estimations d'une variation de la surface équivalente radar

On cherche désormais à estimer une variation des niveaux d'écho radar générée par la cible ponctuelle. Cette variation est représentée par des changements de la surface équivalente radar σ_{RCS}, et peut être causée par des variations de volume de la cible, ou d'une grandeur physique dans le cas de capteurs passifs. L'objectif est alors d'estimer correctement cette variation à partir d'estimateurs construits dans ce but. Considérons alors la cible ponctuelle interrogée par un radar FM-CW dans la section 3.2.3.2 et supposons que sa SER varie en fonction d'une grandeur physique quelconque notée Φ. Il s'agit alors de construire des estimateurs e(Φ) et d'analyser les propriétés suivantes :

- La linéarité, caractérisée par son coefficient de détermination R^2.
- La dynamique pleine échelle, caractérisée par les valeurs minimales et maximales mesurables e(Φ_{Min}) et e(Φ_{Max}).
- La sensibilité de la mesure, caractérisée par la pente α d'un système linéaire tel que e(Φ)=αΦ+β.
- La répétabilité de l'estimation, caractérisée par des analyses de rapport signal sur bruit (SNR) et de la plus petite variation mesurable δΦ.
- La précision de l'estimation (%), caractérisée par $\varepsilon_\Phi = \frac{\delta\Phi}{\Phi_{Min}-\Phi_{Max}}$

Définissons trois estimateurs basés sur les niveaux d'échos de la cible ponctuelle :

- e_{Max} : la valeur du niveau d'écho maximal mesuré dans le volume d'étude, et ne concerne qu'un voxel.
- e_A : la valeur moyenne des niveaux d'écho dans l'ensemble du volume.
- e_W : la valeur moyenne pondérée des niveaux d'écho dans l'ensemble du volume considéré. e_W est défini par l'expression :

$$e_W = \sum_{k=1}^{P} \frac{N(v_k, v_{k+1})}{N_v} v_k \tag{20}$$

où N_v représente le nombre total de voxels, à savoir $N_v = \sum_{k=1}^{P} N(v_k, v_{k+1})$ où v_k est une valeur discrète de niveau d'écho avec v_1 et v_P des niveaux d'écho respectivement initial et final, tels que $v_k = v_1 + k \cdot d_v$, avec d_v la résolution du niveau d'écho. $N(v_k, v_{k+1})$ correspond alors aux nombres de voxels ayant des niveaux d'échos compris dans l'intervalle $[v_k, v_{k+1}]$. Dans la suite de cette partie, e_W est calculé pour $v_1 = e_A$, $v_P = e_W$ et $d_v = 1dB$.

Ces trois estimateurs sont calculés pour différentes SER allant de 1E-2 m² à 1m² pour une valeur de bruit moyen très faible (<-100dB). Les valeurs de ces estimateurs sont affichées sur la Figure 21 et les paramètres des estimateurs calculés sont reportés dans le Tableau 8. On observe un comportement linéaire des trois estimateurs avec un coefficient de détermination R² proche de 1. Ce résultat était attendu pour l'estimateur e_{Max} car la relation linéaire entre la SER d'une cible et l'amplitude du spectre de battement a déjà été démontrée pour une bande de modulation étroite [152]. La pente représente la sensibilité de l'estimateur, qui est plus élevée pour les estimateurs e_{Max} et e_W car ces derniers dépendent des niveaux d'écho les plus élevés. L'erreur du modèle linéaire $\varepsilon_{\text{lin}} = \sqrt{\sum(e_{est} - e_{lin})^2}$ représente l'écart entre les valeurs de l'estimateur et son modèle linéaire. Cette erreur est la plus faible pour e_{Max}, ce qui peut faire de cet estimateur un candidat idéal pour des estimations de grandeurs physiques. En revanche, le fait que la valeur de cette estimation ne dépende que du niveau d'écho d'un seul voxel peut générer des erreurs en mesure. La définition d'estimateurs basés sur de multiples niveaux d'écho peut alors s'avérer intéressante.

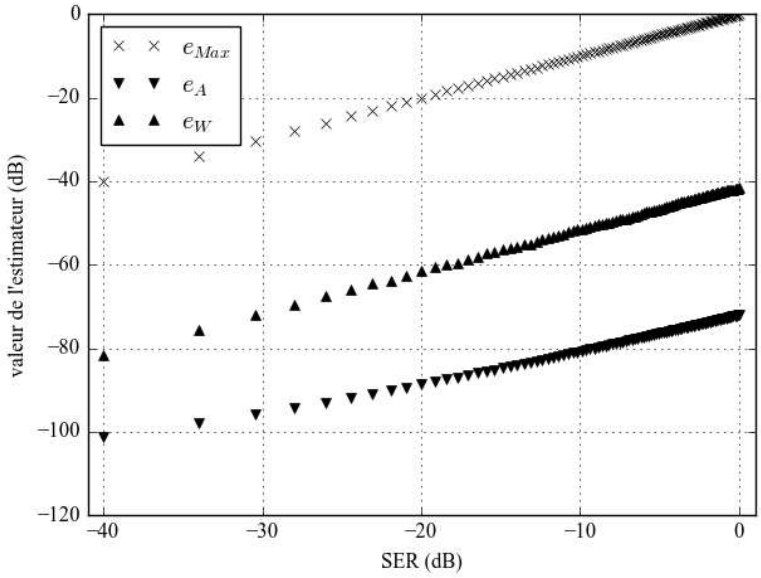


Figure 21. Variation des estimateurs e_{Max}, e_A et e_W en fonction de la SER de la cible ponctuelle.

paramètres	e_{Max}	e_A	e_W
R^2	0,999	0,995	0,999
pente	0,99	0,78	1,00
interception (dB)	0,0	-72,4	-41,5
erreur du modèle linéaire (dB)	1,2E-3	4,3	1,3

Tableau 8. Paramètres du volume d'étude de la cible ponctuelle en coordonnées azimut/élévation et cartésiennes

3.2.5. Erreurs générées par le bruit

Trois paramètres principaux issus du radar FM-CW peuvent limiter ou détériorer les estimations d'une variation des niveaux d'écho radars :

- Le seuil de détection du radar FM-CW, modélisé ici par la moyenne $\mathcal{N}_\mu$ d'un bruit gaussien.
- Le bruit généré par le radar (et l'environnement), modélisé par l'écart-type $\mathcal{N}_\sigma$ d'un bruit gaussien.
- Le seuil de saturation, qui est supposé suffisamment élevé pour éviter une saturation des niveaux d'écho.

Pour mettre en évidence l'influence des paramètres $\mathcal{N}_\mu$ et $\mathcal{N}_\sigma$, on calcule 100 fois la valeur des estimateurs pour un seuil de détection du radar d'environ $\mathcal{N}_\mu$=-33,2dB et un bruit gaussien d'écart-type $\mathcal{N}_\sigma$=±1,5dB. Les valeurs et variations des estimateurs sont représentées sur la Figure 22 pour (a) e_{Max}, (b) e_A et (c) e_W. Pour les trois estimateurs, $\mathcal{N}_\sigma$ dégrade la précision de l'estimation et celle du modèle linéaire, tandis que $\mathcal{N}_\mu$ dégrade la linéarité de l'estimation, comme on peut le remarquer pour des valeurs faibles des estimateurs e_A et e_W proches de $\mathcal{N}_\mu$.

En revanche, si l'on observe la variation relative des valeurs des estimateurs (définie comme le rapport entre l'écart-type et la valeur moyenne de l'estimateur) reportée sur la Figure 22 (d), on observe des variations plus fortes de l'estimateur e_{Max} (autour de 12%) contrairement à celles des estimateurs e_A et e_W dont les valeurs varient autour respectivement de 0,25% et 2%. La raison de cette plus faible variation est un effet de moyenne spatiale qui minimise l'influence de $\mathcal{N}_\sigma$. On peut donc raisonnablement supposer d'après ces simulations qu'en cas de diminution du rapport signal sur bruit, la précision de l'estimateur e_{Max} se dégrade. Les différentes caractéristiques des trois estimateurs calculés en présence de bruit sont reportées dans le Tableau 9.

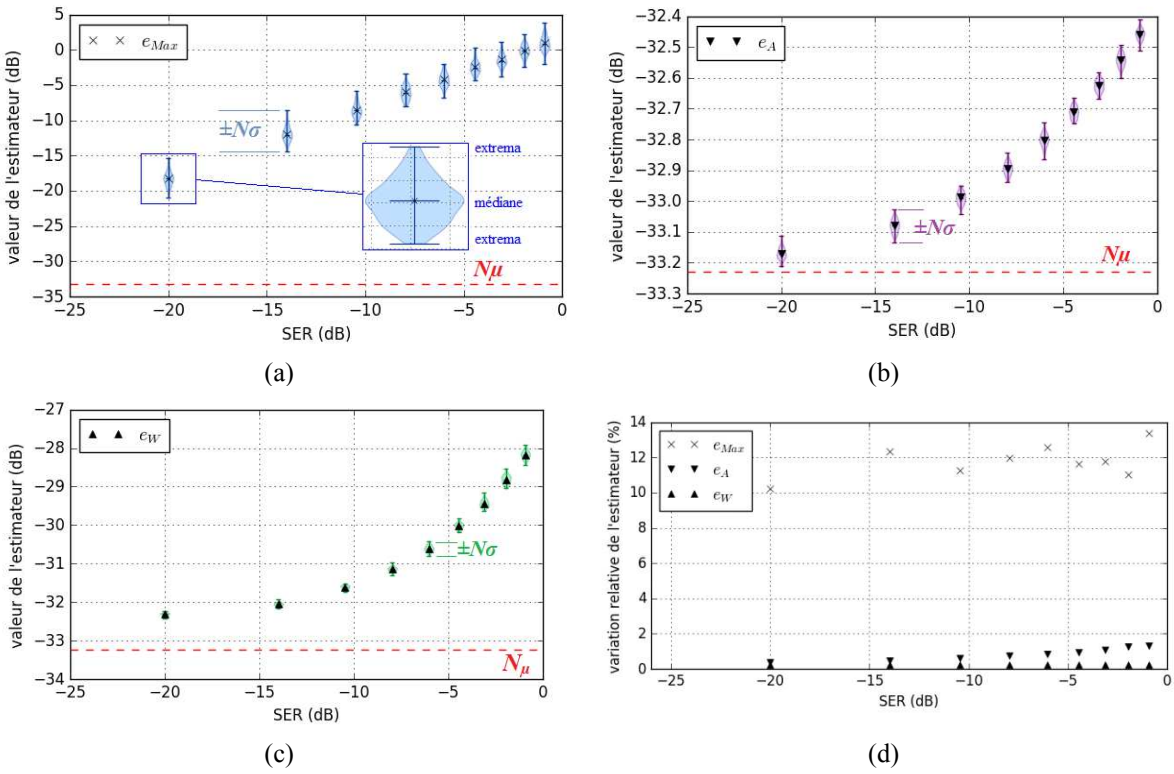


Figure 22. Variations des estimateurs (a) e_{Max}, (b) e_A et (c) e_W en fonction de la SER avec un seuil de détection minimal $\mathcal{N}_\mu$=-33,2dB et un bruit gaussien $\mathcal{N}_\sigma$=1,5dB pour 100 calculs consécutifs des estimateurs. La variation relative des valeurs des estimateurs est disponible sur la figure 11(d) pour chaque valeur de SER.

caractéristiques	**e_{Max}**	**e_A**	**e_W**
SER maximale RCS_{Max} (dB)	-1,0	-1,0	-1,0
SER minimale RCS_{Min} (dB)	-20,0	-8,0	-8,0
R^2	0,999	0,990	0,980
pente α	1,0	6,1E-2	4,1E-1
interception β (dB)	1,8	-32,4	-28,0
ε_{lin} (dB)	0,25	3,5E-2	3,4E-1
δ_{RCS} [a]	±2,5dB	±1,0dB	±0,6dB
$\varepsilon_{RCS} = \frac{\delta_{RCS}}{RCS_{Max} - RCS_{Min}}$	26,3%	28,5%	17,1 %

[a] $\delta_{RCS} = \delta_e / \alpha$ où δ_e est la variation maximale obtenue de l'estimateur

Tableau 9. Caractéristiques et précision des estimateurs calculés pour 100 simulations consécutives avec un seuil de détection $\mathcal{N}_\mu$=-33,2dB et un bruit gaussien $\mathcal{N}_\sigma$=±1,5dB.

3.2.6. Distribution et fonction de répartition discrètes des niveaux d'échos

3.2.6.1. *Définitions et application d'un bruit gaussien*

Afin d'étudier les niveaux d'écho de chaque voxel, on propose de calculer la distribution et la répartition des niveaux d'écho dans le volume d'étude. On définit la distribution discrète des niveaux d'écho $\mathcal{D}$ par l'expression :

$$\mathcal{D}(v_k) = \sum_{k=1}^{P} N(v_k, v_{k+1}) \tag{21}$$

Le paramètre $N(v_k, v_{k+1})$ représente le nombre de voxels dont les niveaux d'écho sont compris entre les valeurs v_k et v_{k+1}, avec $v_k = v_1 + k \cdot d_v$. $[v_1,\ v_P]$ représente l'intervalle de calcul de la distribution discrète $\mathcal{D}$ et d_v la résolution du niveau d'écho. De la même manière, on définit la fonction de répartition discrète $\mathcal{F}$ des niveaux d'échos dans le volume d'étude par l'expression :

$$\mathcal{F}(v_k) = \sum_{k=1}^{P} N(\geq v_k) \tag{22}$$

Le paramètre $N(\geq v_k)$ représente le nombre de voxels dont les niveaux d'écho sont supérieurs ou égaux à v_k, avec $v_k = v_1 + k \cdot d_v$. Sur la Figure 23 sont affichées (a) la distribution $\mathcal{D}$ et (b) la fonction de répartition $\mathcal{F}$ pour des niveaux d'écho du bruit seul (sans cible), calculés avec les mêmes paramètres et niveaux de bruits que dans la section 3.2.6.1. Cette distribution est calculée sur un intervalle de 40 valeurs discrètes de niveaux d'écho. Comme attendu, on obtient une distribution qui suit la même loi Gaussienne que celle du bruit du signal. Cette distribution du bruit est donnée par l'expression :

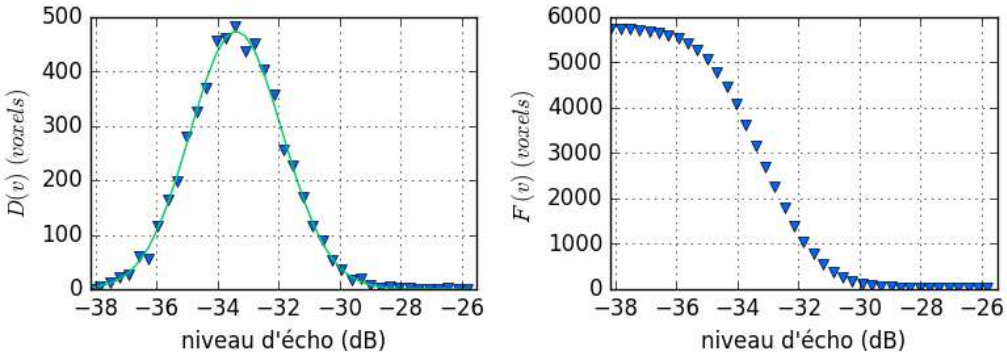
$$\mathcal{D}_{\mathcal{N}}(v) = \frac{K}{\mathcal{N}_\sigma \sqrt{2\pi}} exp\left\{\frac{-(v-\mathcal{N}_\mu)^2}{2\mathcal{N}_\sigma{}^2}\right\} \tag{23}$$

Le paramètre K représente à un facteur d'amplitude en voxels. On propose dans un premier temps de retrouver les paramètres K, $\mathcal{N}_\mu$ et $\mathcal{N}_\sigma$ à partir de la distribution discrète calculée en absence de cible. On procède alors selon trois étapes :

- On effectue premièrement une interpolation de la distribution discrète sur une plage de niveaux d'écho élevés (par exemple 2000 valeurs). L'interpolation choisie ici est linéaire, et est effectuée avec la fonction *interp1d* [149].
- On compare alors la distribution interpolée avec le modèle de l'équation (23) en effectuant une analyse paramétrique avec la fonction *curvefit* [149]. Cette fonction utilise la méthode des moindres carrées non-linéaires [153] pour retrouver les paramètres les mieux adaptés.
- Une fois les paramètres retrouvés, on effectue un test statistique afin de vérifier si les deux distributions sont identiques. Deux tests ici sont alors proposés. Premièrement le test bilatéral de Kolmogorov-Smirnov (KS) [154] avec la fonction *ks_2samp* [149] dont le résultat est une somme des distances entre les deux distributions. Le deuxième test bilatéral appliqué est le test d'Anderson-Darling (AD) [155] avec la fonction *anderson_ksamp* [149]. On exprime alors l'hypothèse nulle H_0: « *les échantillons suivent la loi gaussienne* $\mathcal{D}_{\mathcal{N}}$ *de paramètres K,* $\mathcal{N}_\mu$ *et* $\mathcal{N}_\sigma$ ». On définit la valeur critique α_{KS}=0,05 du test KS la probabilité de rejeter H_0 sachant qu'elle est vraie. De la même manière, on définit les 5 valeurs critiques α_{AD} = [0,25 ; 0,10 ; 0,05 ; 0.25 ; 0.1] du test AD les probabilités de rejeter H_0 sachant qu'elle est vraie. Les valeurs-p des tests sont les plus petites valeurs critiques permettant de rejeter H_0. Pour α_{KS} ou α_{AD} >valeur-p, on ne peut pas rejeter l'hypothèse H_0, et pour α_{KS} ou α_{AD} ≤valeur-p, H_0 est rejetée.

Les paramètres estimés de la distribution du bruit $\mathcal{D}_{\mathcal{N}}$ et les résultats des tests de KS et AD sont reportés dans le Tableau 10. On retrouve logiquement les valeurs des paramètres du bruit gaussien défini dans la section 3.2.6.1. Les valeurs-p des tests de KS et AD sont supérieures ou très proches de 1 et l'hypothèse

nulle ne peut pas être rejetée, indiquant que les deux distributions sont fortement similaires. La distribution du bruit estimée $\mathcal{D}_{\mathcal{N}}$ est affichée en vert sur la Figure 23 (a).



(a) (b)

Figure 23. (a) Distribution $\mathcal{D}$ et (b) fonction de répartition $\mathcal{F}$ discrètes des niveaux d'échos en absence de cible avec un seuil de détection minimal $\mathcal{N}_\mu$=-33,2dB et un bruit gaussien $\mathcal{N}_\sigma$=1,5dB. La distribution estimée du bruit $\mathcal{D}_{\mathcal{N}}$ est représentée par la courbe verte.

paramètres	$\mathcal{D}_{\mathcal{N}}$	**KS[a] test**		**AD[b] test**	
K	143 voxels	valeur-p	0,999	valeur-p	1,175
$\mathcal{N}_\mu$	-33,3 dB	résultat	0,075	résultat	-1,138
$\mathcal{N}_\sigma$	1,49 dB			α_{AD} = 25%	0,325
				α_{AD} = 10%	1,226
				α_{AD} = 5%	1,961
				α_{AD} = 2,5%	2,718
				α_{AD} = 1%	3,752

[a] KS: Kolmogorov-Smirnov
[b] AD: Anderson-Darling

Tableau 10. Paramètres estimés de la distribution du bruit $\mathcal{D}_{\mathcal{N}}$ à partir des valeurs discrètes de la distribution $\mathcal{D}$, et résultats des tests de KS et AD.

3.2.6.2. *Perturbation de la distribution discrète par la cible ponctuelle de SER variable*

On étudie désormais les distributions et fonctions de répartition discrètes du bruit gaussien lorsque la SER de la cible ponctuelle augmente. Les niveaux d'écho générés par la cible ponctuelle provoquent une perturbation de la distribution initiale du bruit gaussien. Afin de caractériser au mieux cette perturbation de la distribution des niveaux d'écho, on modifie la loi de distribution gaussienne en ajoutant une contribution asymétrique $\mathcal{G}$ telle que :

$$\mathcal{D}(v) = \frac{K}{\mathcal{N}_\sigma\sqrt{2\pi}} exp\left\{\frac{-(v-\mathcal{N}_\mu)^2}{2\mathcal{N}_\sigma{}^2}\right\} \cdot \mathcal{G}\left(\gamma \cdot \frac{(v-\mathcal{N}_\mu)}{\mathcal{N}_\sigma}\right)$$
$$avec\ \mathcal{G}(x) = \frac{1}{2}\left(1 + erf\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right)\right) \quad (24)$$

$\mathcal{D}$ est appelée loi normale asymétrique et est caractérisée par un coefficient d'asymétrie γ [156]. La fonction *erf* est la fonction d'erreur [157]. On estime alors le modèle de la distribution de la même manière que dans la section 3.2.6.2, à la différence près que $\mathcal{N}_\mu$ et $\mathcal{N}_\sigma$ sont connus. Il ne reste alors plus qu'à estimer l'amplitude K et le coefficient d'asymétrie γ. Les distributions et fonctions de répartition interpolées pour plusieurs valeurs de SER de la cible sont affichées sur la Figure 24, et les paramètres K et γ sont reportés avec les résultats des tests KS et AD dans le Tableau 11 pour l'hypothèse nulle suivante H_0: « *les échantillons suivent la loi gaussienne asymétrique $\mathcal{D}$ de paramètres K, $\mathcal{N}_\mu$, $\mathcal{N}_\sigma$ et γ* ». On observe une croissance de l'asymétrie vers les valeurs élevées de niveaux d'écho de la distribution lorsque la SER

de la cible augmente, ce qui se traduit par un coefficient négatif γ décroissant. Le coefficient K diminue de la même manière, car les voxels contenant un niveau d'écho de bruit sont remplacés progressivement par des niveaux d'échos issus de la rétrodiffusion de la cible ponctuelle. Les résultats des tests AD et KS montrent qu'on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle pour des valeurs critiques de 5%. On remarque en revanche une diminution des valeurs-p lorsque la SER de la cible augmente, ce qui signifie qu'à partir d'un certain niveau d'écho, la loi gaussienne asymétrique ne sera peut-être plus le modèle le mieux adapté pour décrire la distribution des niveaux d'échos.

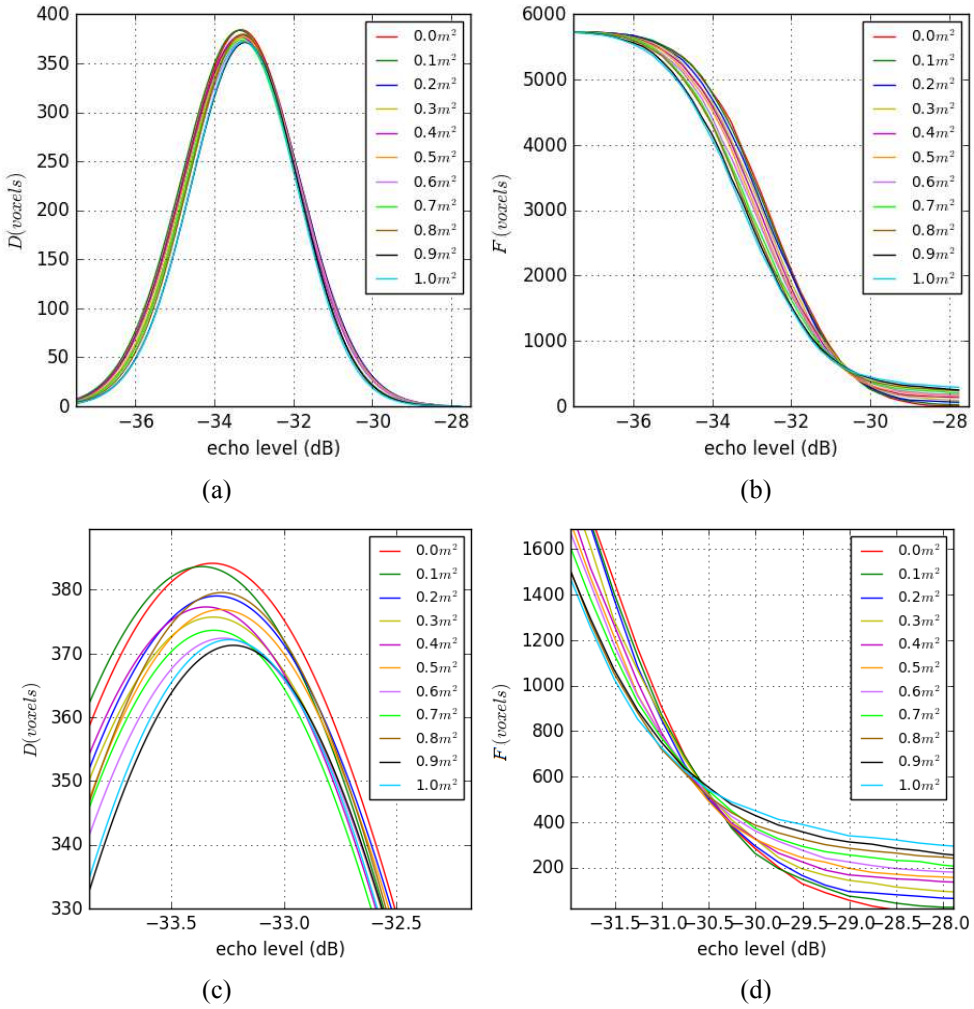


Figure 24. (a), (c) Distribution $\mathcal{D}$ et (b), (d) fonction de répartition $\mathcal{F}$ des niveaux d'échos d'une cible pour différentes SER de 0m² à 1,0m² avec un seuil de détection minimal $\mathcal{N}_\mu$=*-33,2dB* et un bruit gaussien $\mathcal{N}_\sigma$=1,5dB.

σ_{RCS} (m²)	K (voxels)	γ	KS[a] test		AD[b] test	
			valeur-p	résultat	valeur-p	résultat
0,1	280	-0,01	0,99	0,07	1,05	-1,03
0,2	277	-0,07	0,99	0,07	1,15	-1,12
0,3	275	-0,11	0,99	0,07	1,14	-1,11
0,4	270	-0,20	0,98	0,10	0,99	-0,98
0,5	269	-0,29	0,89	0,12	0,79	-0,78
0,6	266	-0,34	0,72	0,15	0,44	-0,22
0,7	263	-0,40	0,72	0,15	0,59	-0,50
0,8	262	-0,46	0,36	0,2	0,36	-0,04
0,9	255	-0,51	0,23	0,22	0,19	0,58
1,0	253	-0,61	0,36	0,20	0,21	0,45

[a] KS: Kolmogorov-Smirnov
[b] AD: Anderson-Darling

Tableau 11. Paramètres estimés de la distribution interpolée $\mathcal{D}$ pour une cible de SER variable, et résultats des tests de KS et AD.

3.2.6.3. *Modélisation d'une fonction de répartition continue $\mathcal{F}$*

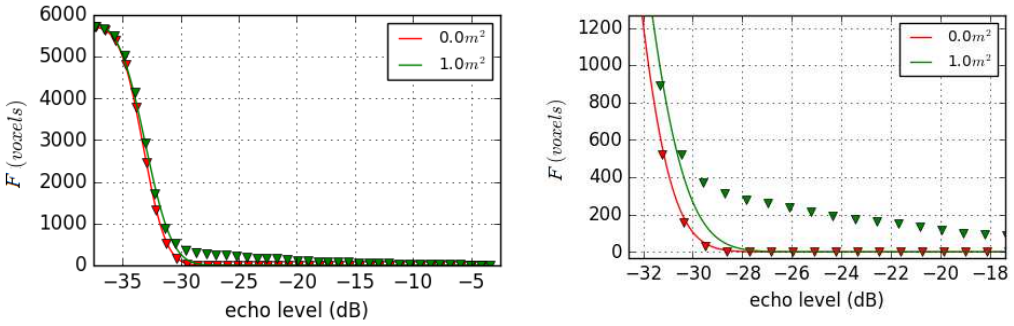
Il est en réalité difficile de modéliser correctement la fonction de distribution des niveaux d'écho du bruit et de la cible ponctuelle. On propose alors de modéliser à la place la fonction de répartition des niveaux d'échos, qui offre autant d'informations que la distribution. Pour cela, on définit premièrement la fonction de répartition du bruit gaussien par l'expression :

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_{\mathcal{N}}(v) &= K \cdot \mathcal{G}\left(\frac{(v-\mathcal{N}_\mu)}{\mathcal{N}_\sigma}\right) \\ avec\ \mathcal{G}(x) &= -\frac{1}{2}\left(1 + erf\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right)\right) \end{aligned} \tag{25}$$

Le signe de la fonction est $\mathcal{G}$ est inversé par rapport à la définition usuelle, car l'objectif est d'obtenir un nombre de voxels dont les niveaux d'écho sont supérieurs à un seuil donné. On souhaite alors modéliser la contribution de la cible ponctuelle. Pour expliquer la méthode, les fonctions de répartitions sans la cible ponctuelle sont affichées sur la Figure 25. Alors que la fonction de répartition sans la cible est correctement modélisée (courbe rouge), des écarts entre les valeurs discrètes et le modèle sont visibles lorsque la cible est présente (cible de SER σ_{RCS} = 1m², courbe verte). Une contribution asymétrique (voir section 3.2.6.2) ne suffit pas à modéliser correctement la présence de la cible ponctuelle. D'après les écarts observés sur la Figure 25 (b), on propose de modéliser la contribution de la cible ponctuelle par :

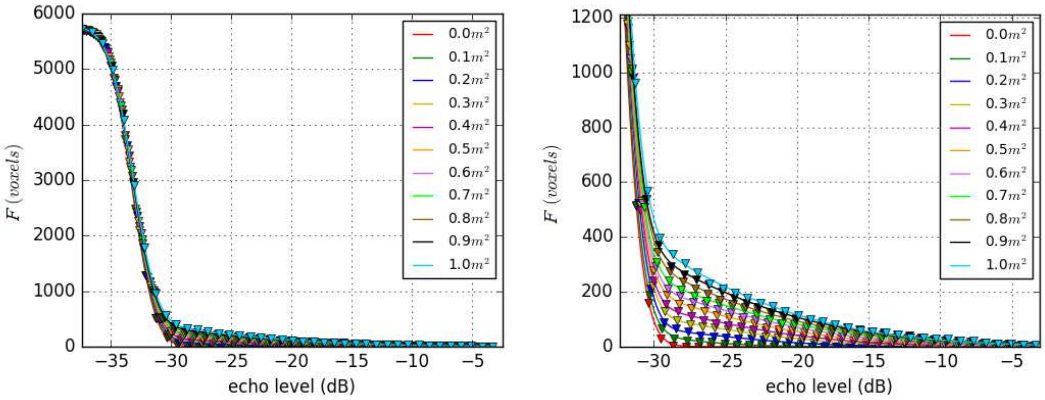
$$\begin{aligned} \mathcal{F}(v) &= K \cdot \mathcal{G}\left(\frac{(v-\mu)}{\sigma}\right) + \mathcal{P}(v) \\ avec\ \mathcal{P}(v) &= \exp\{-(v^2.p_2 + v.p_1 + p_0)\} \end{aligned} \tag{26}$$

L'idée est alors d'avoir un polynôme pour permettre une interpolation, puis de le placer en exponentiel, afin que l'influence de $\mathcal{P}$ soit minimisée lorsque v tend vers l'infini (on suppose p_2 réel positif). Les résultats du nouveau modèle sont affichés pour un ensemble de cibles ponctuelles de SER différentes sur la Figure 26. Les courbes modélisées sont effectivement plus proches des valeurs discrètes. Afin de valider le modèle, les résultats des paramètres et des tests statistiques (le test du χ^2 a aussi été effectué [158]) sont reportés dans le Tableau 12. Les tests sont effectués avec un nombre de pas de niveau d'écho d_v=40 entre (i) une valeur de niveau d'écho de 5dB en dessous de la moyenne du niveau d'écho e_A et (ii) le niveau d'écho maximal e_{Max}. Les tests du χ^2, de KS et AD ne rejettent pas l'hypothèse nulle sur l'ensemble des valeurs de SER. On remarque que les paramètres μ et σ ont des valeurs identiques aux paramètres du bruit $\mathcal{N}_\mu$ et $\mathcal{N}_\sigma$, ce qui signifie que le bruit est toujours bien caractérisé par la loi gaussienne. Les paramètres polynomiaux, en revanche, ont des valeurs qui varient avec le changement de SER, ce qui met en évidence la caractérisation des niveaux d'écho par la fonction $\mathcal{P}(v)$.



(a) (b)

Figure 25. (a) Valeurs discrètes (triangles) et résultats du modèle (courbes) des fonctions de répartition $\mathcal{F}$ en présence d'un bruit gaussien seul (en rouge) et avec une cible de SER égale à 1m (en vert). (b) Zoom sur les niveaux d'échos où l'on distingue l'influence de la cible ponctuelle.



(a) (b)

Figure 26. (a) Valeurs discrètes (triangles) et résultats du modèle (courbes) des fonctions de répartition $\mathcal{F}$ avec la contribution de $\mathcal{P}(v)$ en présence d'un bruit gaussien seul et avec une cible de SER variable. (b) Zoom sur les niveaux d'échos où l'on distingue l'influence de la cible ponctuelle.

σ_{RCS} (m²)	K (voxels)	σ (dB)	μ (dB)	p_0	p_1	p_2	KS[a] valeur-p	AD[b] valeur-p	χ^2 valeur-p
0,0	5726	1,5	-33,2	30,3	53,2	88,4	1,00	1,34	0,99
0,1	5738	1,5	-33,2	1,4	-16,4	14,9	1,00	1,34	0,99
0,2	5569	1,4	-33,1	-5,1	2,0	1,7	0,99	1,08	0,99
0,3	5562	1,5	-33,1	-5,1	0,6	4,4	0,99	1,29	0,99
0,4	5484	1,5	-33,2	-5,5	1,3	3,1	1,00	1,21	0,99
0,5	5459	1,5	-33,2	-5,6	1,0	3,5	1,00	1,22	0,99
0,6	5441	1,5	-33,1	-5,7	0,6	4,2	1,00	1,24	0,99
0,7	5253	1,5	-33,1	-6,1	2,2	2,6	0,99	1,16	0,99
0,8	5332	1,5	-33,2	-6,0	1,2	4,1	0,99	1,14	0,99
0,9	5210	1,5	-33,2	-6,2	1,8	3,2	0,99	1,26	0,99
1,0	5096	1,5	-33,2	-6,4	2,5	2,4	0,99	1,15	0,99

[a] KS: Kolmogorov-Smirnov
[b] AD: Anderson-Darling

Tableau 12. Paramètres estimés de la fonction de répartition $\mathcal{F}$ pour une cible de SER variable, et résultats des tests de KS, AD et du χ^2.

3.2.6.4. *Définition d'un estimateur volumique*

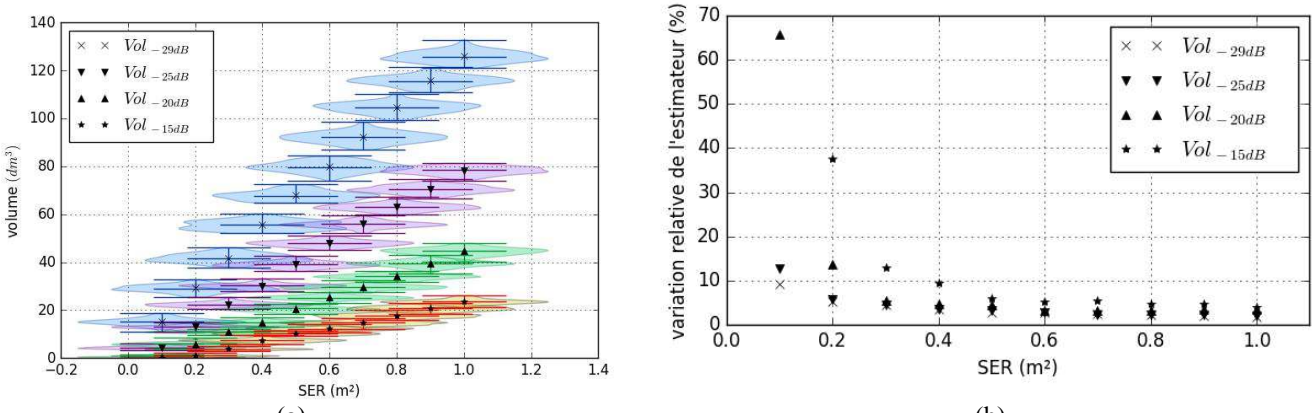
D'après la Figure 24 (d), on remarque qu'à partir d'un certain niveau d'écho, il semblerait que les valeurs des fonctions de répartition s'entrecroisent en un point d'intersection (non démontré ici) situé entre -31,0dB et -30,5dB, puis se séparent en fonction de la valeur de la SER de la cible. En se basant sur l'équation (22), on définit alors un estimateur homogène à un nombre de voxels, par l'expression :

$$N_{v_k} = \mathcal{F}(v_k) \tag{27}$$

En connaissant la résolution volumique à la distance R de la cible de l'équation (14), on définit l'estimateur volumique par :

$$Vol_{v_k} = v_{Res}(R) \cdot N_{v_k} \tag{28}$$

La dépendance par rapport à la distance d'interrogation en R peut être supprimée en effectuant les estimations en coordonnées cartésiennes. Une autre solution est de calculer la résolution volumique moyenne du volume d'étude $\overline{v_{Res}} = \frac{1}{2}\left(v_{Res}(R_{Min}) + v_{Res}(R_{Max})\right)$. Dans notre cas, la résolution volumique moyenne est $\overline{v_{Res}} = 370cm^3$. On propose alors de calculer Vol_v en fonction de la SER de la cible ponctuelle pour quatre niveaux d'écho : -29dB, -25dB, -20dB et -15dB. On effectue les calculs sur 100 mesures successives avec des paramètres de bruit identiques à ceux des sections 3.2.6.1 et 3.2.6.2. Sur la Figure 27 sont affichées (a) les valeurs et variations de Vol_v (b) et les variations relatives de Vol_v en fonction de la SER (échelle linéaire). On observe un comportement linéaire des estimateurs en fonction de la SER en échelle linéaire (coefficients de détermination R^2>0,99). La variation relative des estimateurs diminue avec l'augmentation de la SER pour converger vers une valeur inférieure à 10% avec une variation de bruit $\mathcal{N}_\sigma$=1,5dB. Les caractéristiques et la précision des estimateurs sont reportées dans le Tableau 13. Les plus fines précisions sont obtenues lorsque le niveau d'écho v est le plus faible, par un effet de moyenne spatiale, car plus de voxels sont considérés dans le calcul de l'estimation.



(a) (b)

Figure 27. (a) Estimateur volumique Vol_v calculé pour quatre valeurs de niveau d'écho à -29dB, -25dB, 20dB et -15dB en fonction de la SER de 0,1m² à 1,0m² avec un seuil de détection minimal $\mathcal{N}_\mu$=-33,2dB et un bruit gaussien $\mathcal{N}_\sigma$=1,5dB pour 100 mesures successives.
(b) Variation de la valeur des estimateurs en fonction de la SER.

caractéristiques	$\mathbf{Vol_{-29dB}}$	$\mathbf{Vol_{-25dB}}$	$\mathbf{Vol_{-20dB}}$	$\mathbf{Vol_{-15dB}}$
SER maximale RCS_{Max} (m²)	1,0	1,0	1,0	1,0
SER minimale RCS_{Min} (m²)	0,1	0,1	0,1	0,1
R^2	0,998	0,998	0,999	0,995
pente α (dm^3/m^2)	123	82	48	27
interception β (dm^3)	4,8	-2,7	-3,9	-3,5
ε_{lin} (dm^3)	4,0	2,7	1,0	1,5
δ_{RCS} [a] (m^2)	9,7E-2	1,0E-1	1,5E-1	1,9E-1
$\varepsilon_{RCS} = \frac{\delta_{RCS}}{RCS_{Max} - RCS_{Min}}$	9,8%	10,4%	15,7%	19,9%

[a] $\delta_{RCS} = \delta_e / \alpha$ où δ_e est la variation maximale obtenue de l'estimateur

Tableau 13. Caractéristiques et précision des estimateurs volumiques Vol_v calculés pour 100 simulations avec un seuil de détection $\mathcal{N}_\mu$=-33,2dB et un bruit gaussien $\mathcal{N}_\sigma$=1,5dB.

3.2.7. Influence du clutter

3.2.7.1. *Calcul des estimateurs e_{Max}, e_A et e_W*

On appelle *clutter* les échos parasites issus de l'environnement capables de perturber les estimations de variation de la SER de la cible d'intérêt. Pour étudier l'impact du clutter sur les estimateurs décrits précédemment, on génère une cible ponctuelle de SER=2m² constante en position (R_c=4,25m, θ_c=4°, φ_c=0°) en plus de la cible ponctuelle initiale de SER variable en position (R_0=4,25m, θ_0=-4°, φ_0=0°). Un affichage 3D par isosurfaces des deux cibles ponctuelles est disponible sur la Figure 28. On estime alors la fonction de répartition des niveaux d'écho du bruit gaussien, de la cible ponctuelle et du clutter en utilisant l'équation (26). Les paramètres sont estimés de la même manière que dans la section 3.2.6.3. Les fonctions de répartitions pour différentes SER sont affichées sur la Figure 29 et les résultats des tests KS et AD, sont reportés dans le Tableau 24. D'après les valeurs-p des trois tests effectués, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle, et la présence du clutter ne perturbe pas le modèle de la fonction de répartition défini précédemment.

On calcule les estimateurs des niveaux d'écho e_{Max}, e_A et e_W en présence du clutter pour 100 mesures successives. Les valeurs des estimateurs et leurs variations en fonction de la SER de la cible ponctuelle sont disponibles sur la Figure 30 pour (a) e_{Max}, (b) e_A et (c) e_W. On remarque que l'estimateur e_{Max} ne varie plus linéairement en fonction de la SER. Ceci s'explique par la présence du clutter dans le même volume d'étude, et qui empêche toute estimation par la valeur maximale de niveau d'écho. Les autres estimateurs en revanche, ont toujours un comportement linéaire dans une certaine plage de valeurs de niveaux d'écho éloignés du seuil de détection $\mathcal{N}_\mu$. Les variations relatives des estimateurs sont disponibles sur la Figure 30 (d) et on observe des variations relatives des estimateurs e_A et e_W en dessous de 2% tout comme lors des simulations sans clutter. D'après les valeurs reportées dans le Tableau 15, les précisions des estimateurs e_A et e_W restent les mêmes avec et sans clutter. Le clutter apporte en revanche une augmentation du niveau d'écho moyen, représenté par valeur de l'interception β.

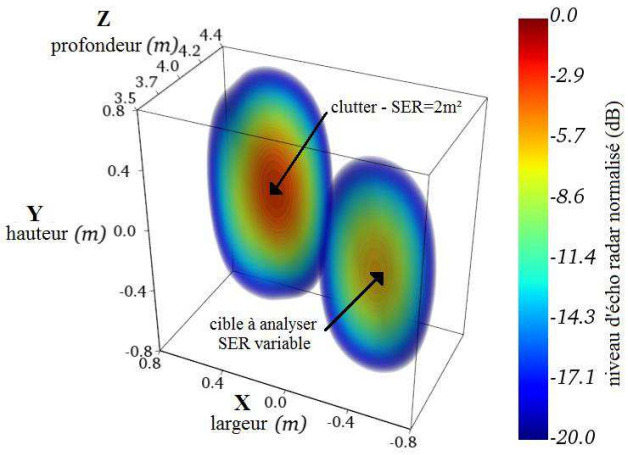
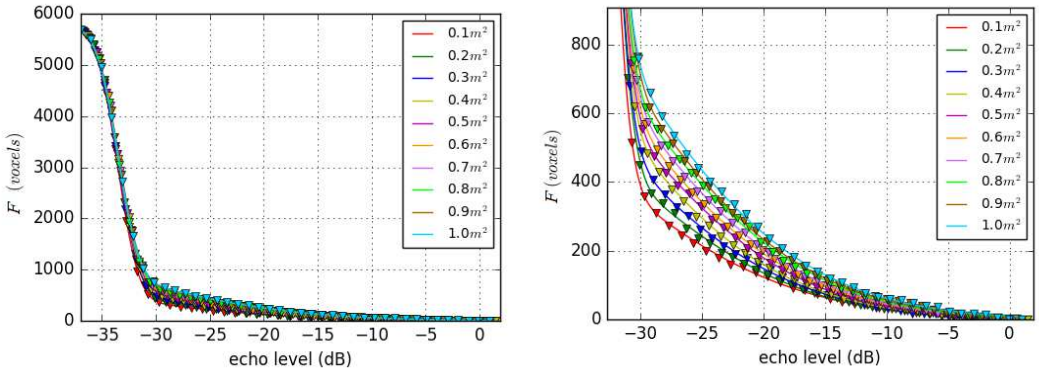


Figure 28. Représentation par isosurfaces des niveaux d'écho normalisés de la cible ponctuelle en position (R_0=4m, θ_0=-4°, φ_0=0°) et du clutter (écho parasite) en position (R_c=4,25m, θ_0=4°, φ_0=0°) entre -20dB et 0dB.



(a) (b)

Figure 29. (a) Valeurs discrètes (triangles) et modèle (courbes) des fonctions de répartition $\mathcal{F}$ avec la contribution de $\mathcal{P}(v)$ en présence d'un bruit gaussien, une cible de SER variable et un clutter de SER égale à 2m². (b) Zoom sur les niveaux d'échos où l'on distingue l'influence de la cible ponctuelle.

σ_{RCS} (m²)	K (voxels)	σ (dB)	μ (dB)	p_0	p_1	p_2	KS[a] valeur-p	AD[b] valeur-p	χ^2 valeur-p
0,1	5194	1,5	-33,5	-6,3	2,0	3,2	0,99	1,09	0,99
0,2	5183	1,5	-33,4	-6,3	1,4	3,6	1,00	1,34	0,99
0,3	5009	1,5	-33,4	-6,6	2,1	3,0	1,00	1,26	0,99
0,4	4881	1,5	-33,4	-6,7	2,4	3,2	0,99	1,16	0,99
0,5	4849	1,5	-33,4	-6,7	1,6	3,5	1,00	1,27	0,99
0,6	4802	1,5	-33,3	-6,8	2,1	2,9	0,99	1,17	0,99
0,7	4795	1,5	-33,4	-6,8	1,9	3,3	0,99	1,12	0,99
0,8	4816	1,5	-33,4	-6,8	1,5	3,3	0,99	1,18	0,99
0,9	4700	1,5	-33,4	-6,9	2,0	2,9	0,99	1,09	0,94
1,0	4648	1,5	-33,4	-6,9	2,0	3,0	0,99	1,17	0,90

[a] KS: Kolmogorov-Smirnov
[b] AD: Anderson-Darling

Tableau 14. Paramètres estimés de la fonction de répartition $\mathcal{F}$ pour une cible de SER variable, et résultats des tests de KS, AD et du χ^2.

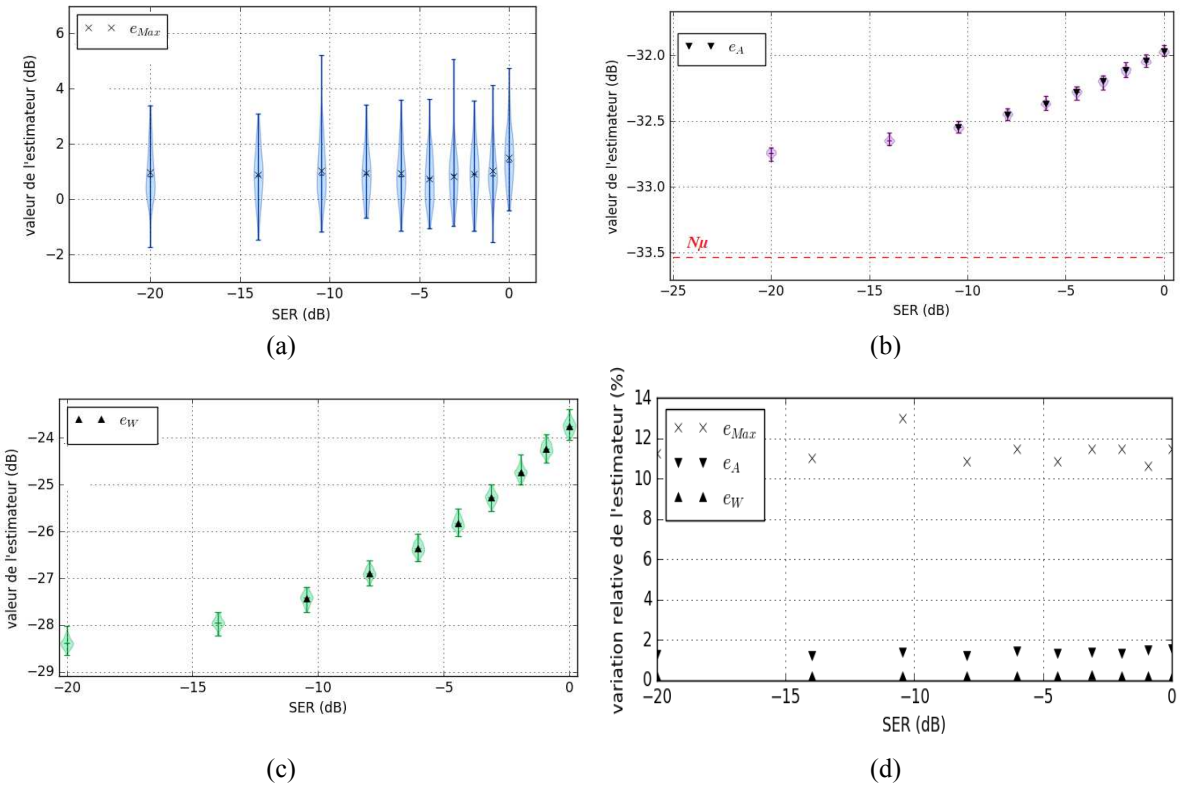


Figure 30. Variations des estimateurs (a) e_{Max}, (b) e_A et (c) e_W en fonction de la SER avec un seuil de détection minimal $\mathcal{N}_\mu$=-33,2dB et un bruit gaussien $\mathcal{N}_\sigma$=1,5dB pour 100 calculs d'estimateurs en présence d'un clutter de SER=2m². (d) Variation relative des valeurs des estimateurs pour chaque valeur de SER.

caractéristiques	**e_{Max}**	**e_A**	**e_W**
SER maximale RCS_{Max} (dB)		-1,0	-1,0
SER minimale RCS_{Min} (dB)		-8,0	-8,0
R^2		0,990	0,984
pente α		0,06	0,40
interception β (dB)		-31,9	-23,9
ε_{lin} (dB)		4E-2	3,4E-1
δ_{RCS} [a]		±1dB	±0,6dB
$\varepsilon_{RCS} = \frac{\delta_{RCS}}{RCS_{Max} - RCS_{Min}}$		28,5%	17,1%

[a] $\delta_{RCS} = \delta_e / \alpha$ où δ_e est la variation maximale obtenue de l'estimateur

Tableau 15. Caractéristiques et précision des estimateurs calculés pour 100 simulations avec un seuil de détection $\mathcal{N}_\mu$=-33,2dB et un bruit gaussien $\mathcal{N}_\sigma$=±1,5dB en présence d'un clutter avec une SER égale à 2m². Les caractéristiques de l'estimateur e_{Max} ne sont pas calculées car le clutter empêche une estimation par le calcul du niveau maximal d'écho.

3.2.7.2. *Calcul du niveau d'écho à partir d'un nombre de voxels constant*

Il est possible, en utilisant la fonction de répartition de l'équation (26), de calculer le niveau d'écho, noté e_S, pour un nombre fixe de voxels dont le niveau d'écho est supérieur ou égal à e_S. L'expression caractérisant e_S est donnée par :

$$N_{e_s} = \mathcal{F}(e_s) \tag{29}$$

À titre d'exemple, on calcule les valeurs de e_s pour N_{e_s} égal à 100, 50 et 20 voxels pour 50 simulations successives. Les caractéristiques sont reportées dans le Tableau 16. Les performances sont très similaires à celles de l'estimateur e_W (voir section 3.2.7.1). On observe une dégradation de la précision de l'estimateur lorsque le nombre de voxels augmente (l'effet de moyenne s'atténue) sans pour autant augmenter la pente α de l'estimation. Cela signifie que l'écart de niveau d'écho est constant entre chaque valeur de SER pour les nombres de voxels considérés.

caractéristiques	**e_S** $N_{e_s} = 100$	**e_S** $N_{e_s} = 50$	**e_S** $N_{e_s} = 20$
SER maximale RCS_{Max} (dB)	-1,0	-1,0	-1,0
SER minimale RCS_{Min} (dB)	-8,0	-8,0	-8,0
R^2	0,990	0,990	0,977
pente α	0,40	0,40	0,40
interception β (dB)	-13,3	-8,9	-3,7
ε_{lin} (dB)	0,27	0,27	0,42
δ_{RCS} [a]	±0,6dB	±0,6dB	±1,2dB
$\varepsilon_{RCS} = \frac{\delta_{RCS}}{RCS_{Max} - RCS_{Min}}$	17,1%	17,1%	34,2%

Tableau 16. Caractéristiques et précision des estimateurs e_s calculés pour 50 simulations avec un seuil de détection $\mathcal{N}_\mu$=-33,2dB et un bruit gaussien $\mathcal{N}_\sigma$=1,5dB en présence d'un clutter avec une SER égale à 2m²

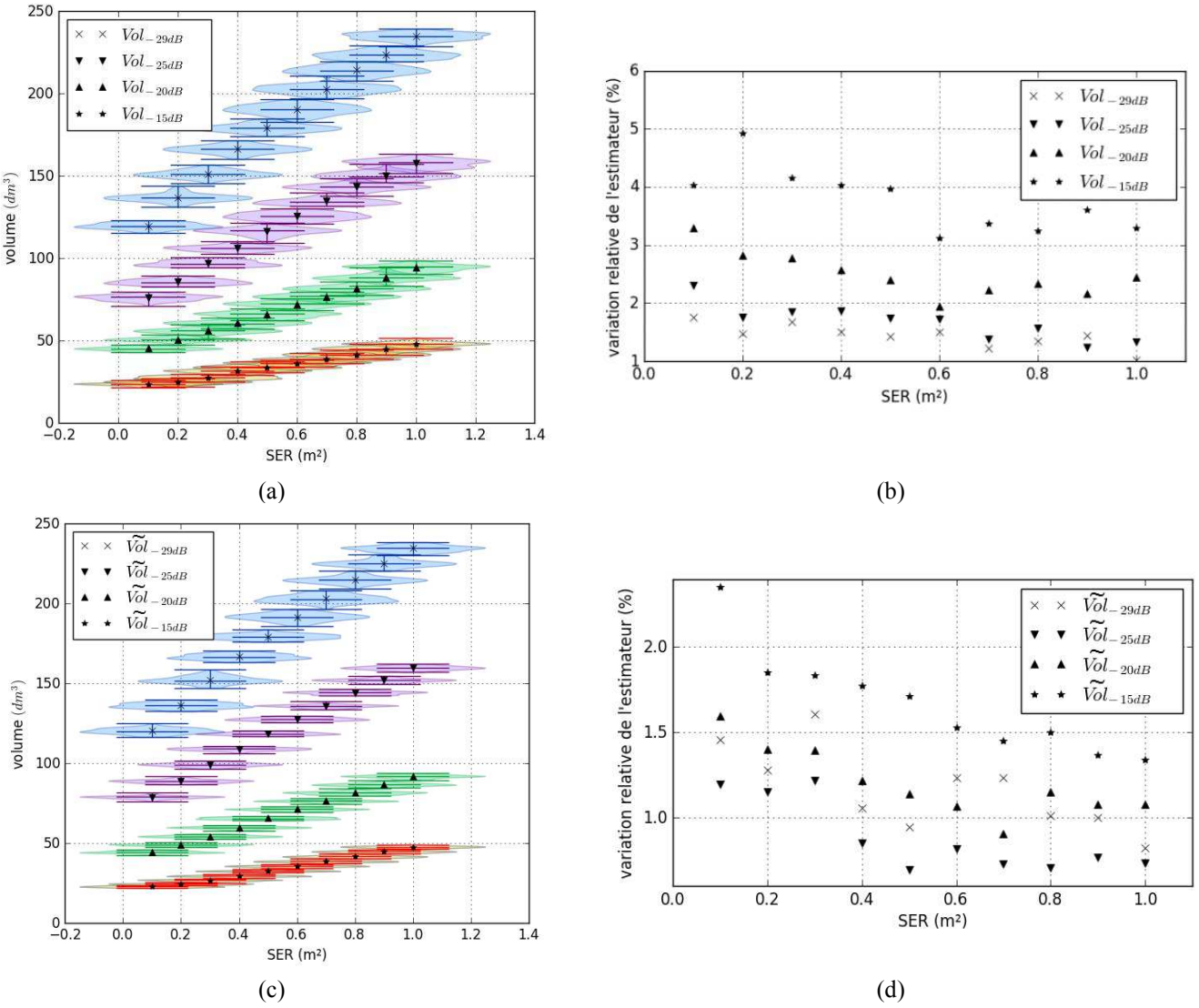
3.2.7.3. *Calcul d'un volume à un niveau d'écho constant*

De la même manière que dans la section 3.2.6.4, on peut calculer l'estimateur Vol_{v_k} de l'équation (28) pour différentes SER de la cible en présence du clutter. On propose de calculer le nombre de voxels pour les mêmes niveaux d'écho à -29dB, -25dB, -20dB et -15dB pour 50 simulations successives. Les estimateurs sont cette fois-ci calculés suivant deux méthodes :

- À partir des valeurs discrètes de la fonction de répartition Vol_{v_k} (voir section 3.2.6.4)
- À partir des valeurs de la fonction interpolée suivant la méthode reportée dans la section 3.2.6.3. On notera cet estimateur $\widetilde{Vol}_v$.

Les valeurs et variations des estimateurs discrets en fonction de la SER de la cible (échelle linéaire) sont affichées sur la Figure 31 (a) et (b) et celles de la fonction interpolée sur la Figure 31 (c) et (d). Toutes les caractéristiques sont reportées dans le Tableau 17. On observe dans les deux cas des comportements linéaires (avec un coefficient de détermination R^2>0,990) non affectés par la présence du clutter. En comparant les figures (b) et (d), on remarque que la variation relative de $\widetilde{Vol}_v$ est plus faible que celle de Vol_{v_k}, surtout lorsque le niveau d'écho augmente. Par exemple, la variation relative de Vol_{-15dB} est en moyenne de 3,5%, alors que celle dde $\widetilde{Vol}_{-15dB}$ est inférieure à 2,5%. Ces observations se confirment en comparant la variation maximale obtenue de la SER de la cible δ_{RCS} et la précision ε_{RCS} résultante. On observe une dégradation de la précision de l'estimation lorsque le niveau d'écho augmente pour Vol_{v_k} comprise entre 10% et 29%, ce qui n'est pas le cas pour $\widetilde{Vol}_v$, où la précision est comprise entre 6% et

11%. Cette amélioration peut s'expliquer par l'interpolation effectuée sur la fonction de répartition qui reste moins sensible à la variation de bruit $\mathcal{N}_\sigma$ que les mesures discrètes.



(a) (b)

(c) (d)

Figure 31. (a) Estimateurs volumiques de valeurs discrètes Vol_{v_k} et (c) $\widetilde{Vol}_v$ pour la fonction de répartition interpolée, calculés pour quatre valeurs de niveau d'écho à -29dB, -25dB, 20dB et -15dB en fonction de la SER de 0,1m² à 1,0m² avec un seuil de détection minimal $\mathcal{N}_\mu$=-33,2dB et un bruit gaussien $\mathcal{N}_\sigma$=1,5dB pour 50 mesures successives en présence d'un clutter de SER égale à 2m².
Variations relatives de la valeur des estimateurs en fonction de la SER pour (b) Vol_{v_k}et (d) $\widetilde{Vol}_v$.

caractéristiques	-29 dB		-25dB		-20dB		-15 dB	
	$\mathbf{Vol_{v_k}}$	$\mathbf{\widetilde{Vol}_v}$	$\mathbf{Vol_{v_k}}$	$\mathbf{\widetilde{Vol}_v}$	$\mathbf{Vol_{v_k}}$	$\mathbf{\widetilde{Vol}_v}$	$\mathbf{Vol_{v_k}}$	$\mathbf{\widetilde{Vol}_v}$
SER maximale RCS_{Max} (m^2)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SER minimale RCS_{Min} (m^2)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
R^2	0,993	0,992	0,996	0,997	0,998	0,999	0,995	0,996
pente α (dm^3/m^2)	126	126	91	90	54	53	27	28
interception β (dm^3)	112	112	68	71	39	38	19	18
ε_{lin} (dm^3)	9,1	9,8	5,1	4,1	1,7	0,7	1,6	1,6
δ_{RCS} [a] (m^2)	1,0E-1	9E-2	1,3E-2	6E-2	2,0E-1	8,3E-2	2,5E-1	1E-2
$\varepsilon_{RCS} = \frac{\delta_{RCS}}{RCS_{Max} - RCS_{Min}}$	11,1%	10,0%	14,4%	6,6%	22,6%	9,2%	28,8%	11,1%

[a] $\delta_{RCS} = \delta_e / \alpha$ où δ_e est la variation maximale obtenue de l'estimateur

Tableau 17. Caractéristiques et précision des estimateurs volumiques Vol_v calculés pour 100 simulations avec un seuil de détection $\mathcal{N}_\mu$=-33,2dB et un bruit gaussien $\mathcal{N}_\sigma$=1,5dB.

3.3. Estimation du volume de cibles canoniques

3.3.1. Estimation d'une variation de volume d'une sphère métallique

3.3.1.1. *Paramètres de mesures*

On propose dans un premier temps d'effectuer des estimations de volumes de cibles canoniques, en l'occurrence des sphères métalliques de différents diamètres. Les sphères métalliques ont en effet une SER qui ne dépend pas de l'azimut et de l'élévation. La SER d'une sphère métallique (totalement réfléchissante) de rayon r_S est donnée par l'expression :

$$\sigma_{Sphère} = \pi \cdot {r_S}^2 \tag{30}$$

Les mesures sont effectuées avec un radar FM-CW à 24GHz dont les caractéristiques sont disponibles en annexe. Un chirp de modulation triangulaire est utilisé avec une bande de modulation B=2GHz, ce qui permet d'avoir une résolution en profondeur d=7,5cm. Une antenne cornet avec lentille est utilisée en transmission, avec des angles d'ouverture θ_{3dB}=4° en azimut et φ_{3dB}=4° en élévation et un gain d'antenne de 28dBi. Un réseau de 1x4 antennes patches est utilisé en réception, avec des angles d'ouverture θ_{3dB}=6° en azimut et φ_{3dB}=6° en élévation. Un balayage en 3D est effectué à l'aide d'un pan-tilt, et les spectres de battement sont enregistrés dans différentes directions d'interrogation, de ±20° en azimut et de -10° à 20° en élévation, avec des résolutions angulaires d_θ et d_φ égales à 1°. Huit sphères métalliques de rayons différents sont mesurées à la position (R_0=1,7m, θ_0=0°, φ_0=0°) par une origine prise sur le radar. L'étude se fait en polarisation verticale en transmission et réception. Les paramètres des mesures sont reportés dans le Tableau 18.

variation du volume d'une sphère métallique	
système radar	DK-sR-1030e
fréquence porteuse	23,8 GHz
bande de modulation	2 GHz
résolution en profondeur	7,5 cm
puissance en entrée	20 dBm
(Tx) antenne	antenne cornet avec lentille [a]
(Rx1/Rx2) antennes	antennes patches 1x4 [a]
scan en azimut	-20° à 20°
résolution en azimut	1°
scan en élévation	-10° à 20°
résolution en élévation	1°
position des cibles	R_0=1,7m, θ_0=0°, φ_0=0°

[a] caractéristiques disponibles en annexe

Tableau 18. Paramètres des mesures effectuées pour caractériser la variation de volume de sphères métalliques

3.3.1.2. *Validation du modèle de simulation de $\mathcal{F}$*

Les niveaux d'écho en trois dimensions générés avec des isosurfaces entre -50dB et -70dB sont affichés sur la Figure 32 pour (a) une mesure de référence sans sphère, et pour des sphères métalliques de rayon (b) 0,5cm, (c) 1cm, (d) 1,5cm, (e) 2cm, (f) 2,5cm, (g) 3,5cm, (h) 5cm et (i) 12,5cm. On remarque l'augmentation progressive des niveaux d'écho provoquée par l'augmentation du rayon de la sphère. Un écho parasite (clutter) généré par les réflexions du sol est aussi présent sur toutes les mesures. L'idée est d'estimer le volume de la cible (lié proportionnellement à la SER dans le cas de la sphère) à partir des niveaux d'échos du volume d'étude. Pour cela, on essaye de modéliser la fonction de répartition $\mathcal{F}$ définie dans la section 3.2.6.3 à partir des niveaux d'écho définis dans un volume compris entre R_{Min}=1,6m et R_{Min}=2,5m, ce qui fait un total de 5292 voxels et une résolution volumique moyenne v_{Res}=90cm^3. On

vérifie en premier lieu si le modèle défini dans la section 3.2.6.3 est valide en effectuant des tests statistiques. Les modèles de fonctions de répartition affichés sur la Figure 33 semblent en adéquation avec les valeurs discrètes de la fonction de répartition. En revanche, les résultats des tests statistiques reportés sur le Tableau 19 montrent que pour la sphère métallique d'un rayon de 12,5cm, le modèle proposé ne représente plus avec précision la répartition des niveaux d'écho (valeurs-p du test du χ^2 très faible). Cet effet est causé par la forte augmentation des niveaux d'échos relativement au niveau de bruit moyen μ. Une des solutions pour retrouver un modèle de fonction de répartition est d'augmenter le degré du polynôme de la fonction $\mathcal{P}(v)$ décrite dans l'équation (26). Les tests statistiques pour la sphère de rayon de 12,5cm sont alors recalculés pour différents degrés. Les résultats sont reportés dans le Tableau 20. Le résultat du test du χ^2 montre une concordance (valeur-p > 0,99) entre le modèle et les valeurs discrètes à partir d'un polynôme de degré 5.

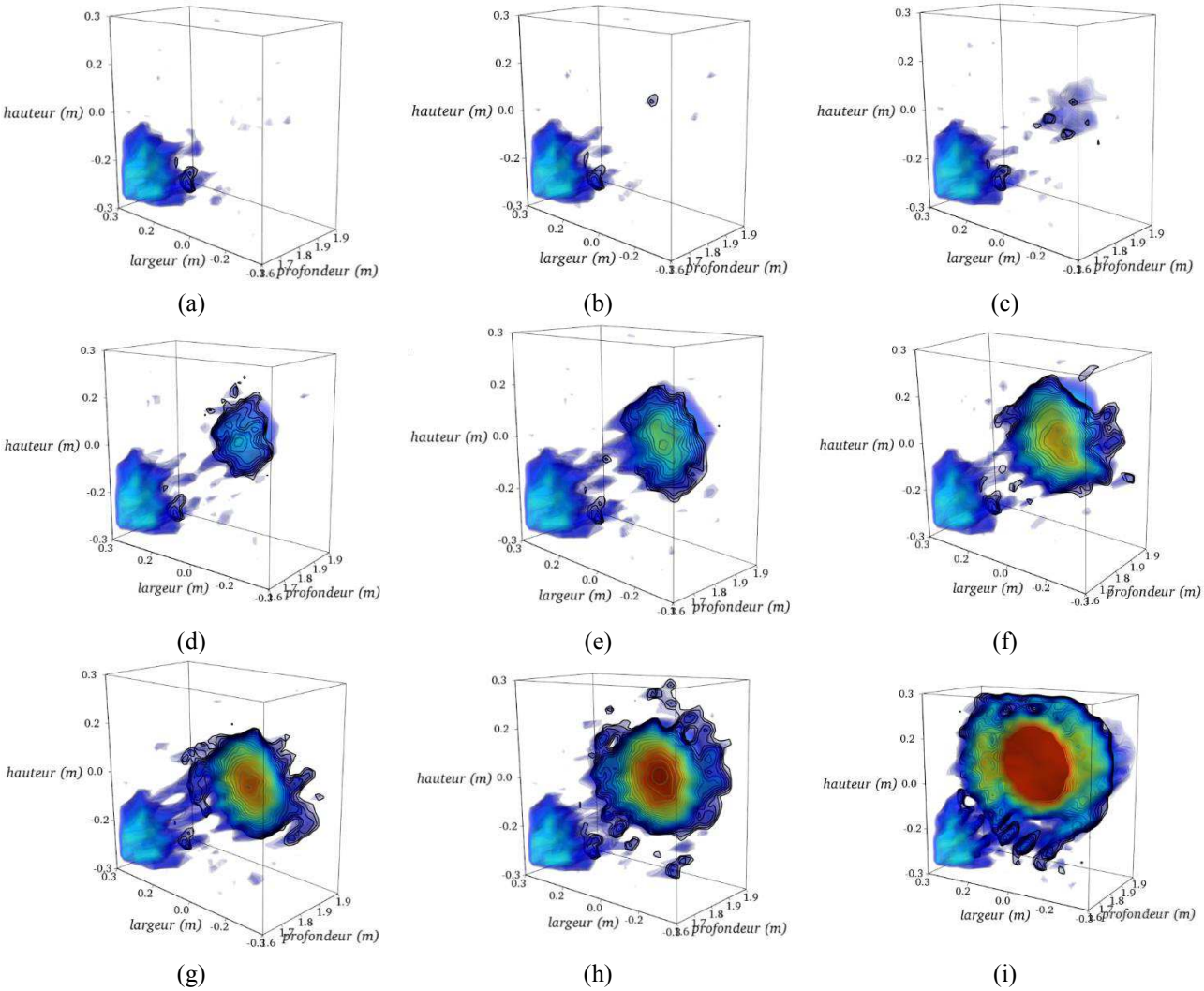


Figure 32. Niveaux d'échos radar représentés en trois dimensions par isosurfaces pour (a) une mesure de référence et des sphères métalliques de rayon (b) 0,5cm, (c) 1cm, (d) 1,5cm, (e) 2cm, (f) 2,5cm, (g) 3,5cm (h) 5cm et (i) 12,5cm. Echelle : -70dB (bleu) à -50dB (rouge).

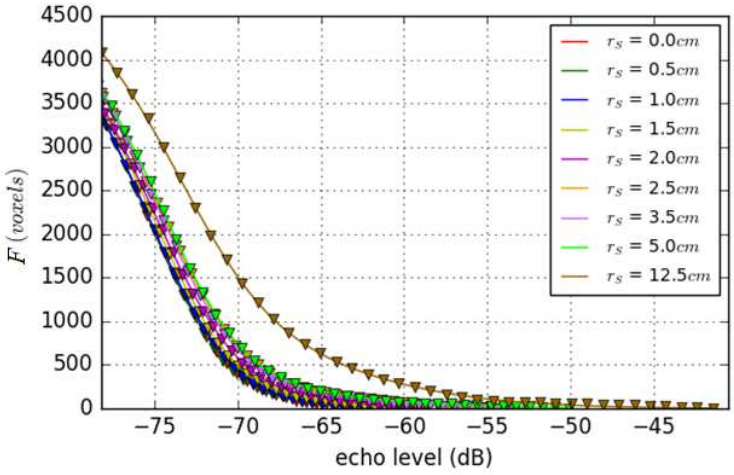


Figure 33. Valeurs discrètes (triangles) et modèle (courbes) des fonctions de répartition $\mathcal{F}$ pour des sphères métalliques de différents rayons.

r_S (cm)	K (voxels)	σ (dB)	μ (dB)	p_0	p_1	p_2	KS[a] valeur-p	AD[b] valeur-p	χ^2 valeur-p
0,0	4638	4,1	-75,6	23,6	-74,9	51,4	1,00	1,36	0,99
0,5	4608	4,1	-75,6	21,5	-70,0	48,3	1,00	1,34	0,98
1,0	4647	4,2	-75,6	17,5	-57,7	39,6	1,00	1,30	0,99
1,5	4635	4,2	-75,3	13,1	-50,7	37,5	1,00	1,30	0,99
2,0	4735	4,5	-75,3	14,3	-53,1	37,8	1,00	1,36	0,99
2,5	4798	4,6	-74,9	4,1	-29,2	23,7	1,00	1,36	0,99
3,5	4623	4,2	-74,8	-0,7	-16,1	16,0	1,00	1,27	0,93
5,0	2681	3,4	-74,0	-7,4	3,4	1,8	1,00	1,25	0,99
12,5	2074	3,7	-73,2	-7,7	2,2	4,2	0,89	0,78	0,00

[a] KS: Kolmogorov-Smirnov
[b] AD: Anderson-Darling

Tableau 19. Paramètres estimés de la fonction de répartition $\mathcal{F}$ pour une sphère métallique de rayon variable, et résultats des tests de KS, AD et du χ^2.

K (voxels)	σ (dB)	μ (dB)	p_0	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	KS[a] valeur-p	AD[b] valeur-p	χ^2 valeur-p
2074	3,7	-73,2	-7,7	2,2	4,2	0	0	0	0,89	0,78	0,00
4430	4,2	-74,6	-6,2	-7,6	25,7	-15,3	0	0	0,99	1,11	0,21
1356	3,2	-73,3	-7,9	2,0	7,3	-1,2	-3,3	0	0,99	1,13	0,49
4512	4,4	-73,0	-4,8	1,3	-74,2	269,2	-330,0	136,7	1,00	1,35	0,99

[a] KS: Kolmogorov-Smirnov
[b] AD: Anderson-Darling

Tableau 20. Paramètres estimés de la fonction de répartition $\mathcal{F}$ pour une sphère métallique de rayon de 12,5cm pour différents degrés d'interpolation, et résultats des tests de KS, AD et du χ^2.

3.3.1.3. *Estimation du volume*

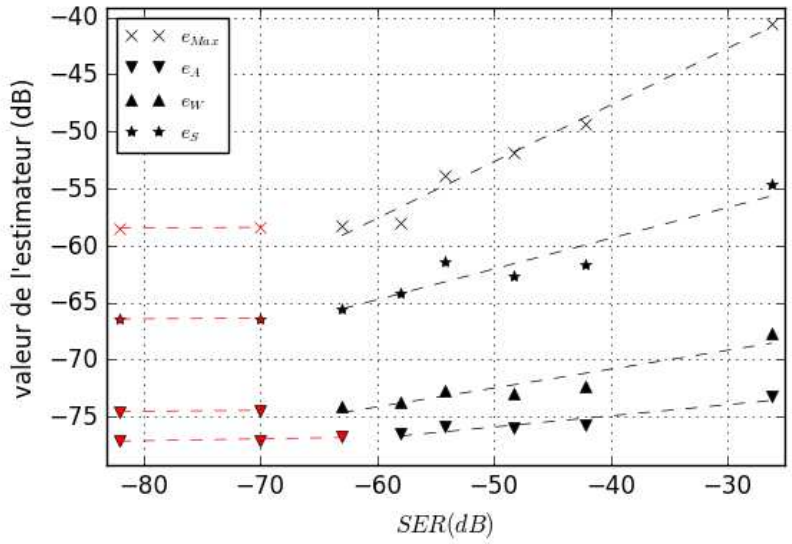
Afin d'estimer le volume des sphères métalliques, les paramètres e_{Max}, e_A, e_W, e_S et $\widetilde{Vol}_V$ sont calculés selon les définitions des sections 3.2.4 et 3.2.6.4. Les estimateurs des niveaux d'échos e_{Max}, e_A, e_W et e_S pour N_{e_s}=100 voxels, sont affichés sur la Figure 34 (a). Les données en rouge représentent le seuil inférieur de détection des niveaux d'écho, généré par le clutter présent dans le volume d'étude. On estime le niveau d'écho maximal de ce clutter -59dB, et en moyenne entre -75dB et -77dB. Dans un environnement bruité comme celui-ci, le rayon minimal détectable de la sphère se situe entre 1cm et 1,5cm (c'est-à-dire une SER entre -63dB et 57dB). Au-dessus de ces seuils, l'augmentation des valeurs des estimateurs sont visibles, mais avec plus ou moins de linéarité. Les performances des estimateurs sont reportées dans le Tableau 21. La meilleure linéarité est obtenue par l'estimateur e_{Max} (coefficient de détermination R^2=0,983).

On remarque en revanche que les estimateurs volumiques $\widetilde{Vol}_V$ tracés sur la Figure 34 (b) pour différents niveaux d'écho entre -70dB et -45dB, n'offrent pas les mêmes performances. Les valeurs des estimateurs sont parfois anormalement élevées, comme pour la sphère de SER $\sigma_{Sphère} = 19{,}6\ cm^2$ (rayon de 2,5cm). Ce phénomène est illustré sur la Figure 36 avec une vue en deux dimensions des niveaux d'écho dans un plan de coupe θ=0° pour (a) la sphère de rayon 2,5cm, et (b) la sphère de rayon 3,5cm. Bien que le niveau d'écho maximal e_{Max} soit plus faible pour la plus petite sphère, on observe un plus grand étalement spatial des niveaux d'échos que pour la plus grande sphère.

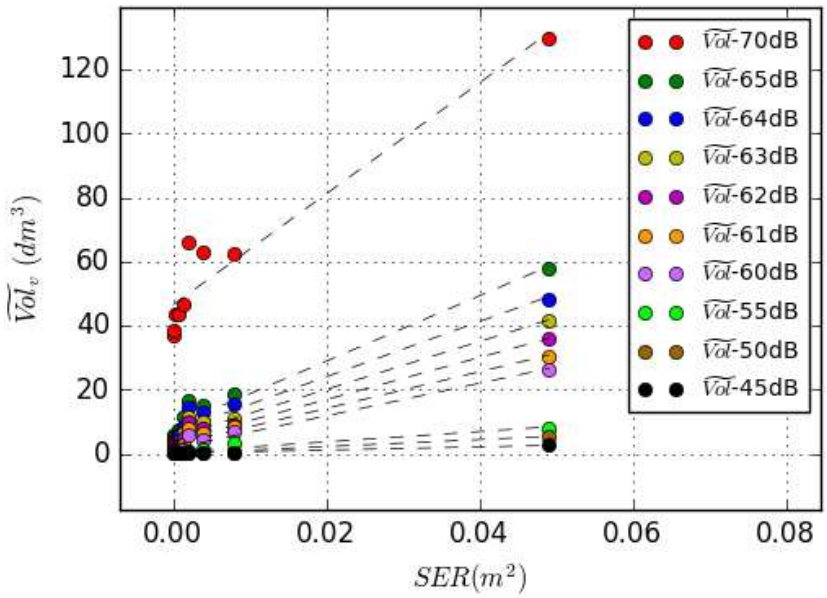
Ces écarts peuvent être en partie expliqués par des variations de rétrodiffusion, provoquées par des ondes rampantes se propageant autour des sphères, et générant des interférences destructives ou constructives en fonction de son rayon. Ce phénomène, expliqué par la théorie de Mie [159], peut être illustré par le calcul de la surface équivalente radar de la sphère en fonction de son rayon, comme illustrée sur la Figure 35 à une fréquence f_c=23,8GHz, c'est-à-dire une longueur d'onde λ_c=1,26cm. Les données ont été calculées avec le module *MiePython* programmé par Scott Prahl [160]. Les fortes variations de la surface équivalente radar sont situées dans la région de Mie, entre $\frac{2\pi r}{\lambda} = 1$ et $\frac{2\pi r}{\lambda} = 10$, c'est-à-dire des rayons de 2mm à 2cm. Pour un rayon de 2,5cm, on se trouve en région optique et les valeurs fortes de l'estimateur ne peuvent donc pas s'expliquer par une augmentation importante de la SER à 23,8GHz. Des analyses de SER sur l'ensemble de la bande radar (non étudiées ici), plutôt que seulement sur la fréquence centrale, peuvent expliquer ces variations.

caractéristiques	**e_{Max}**	**e_A**	**e_W**	**e_S** $N_{e_s} = 100$
SER maximale RCS_{Max} (dB)	-26,1	-26,1	-26,1	-26,1
SER minimale RCS_{Min} (dB)	-63,0	-58,0	-63,0	-63,0
R^2	0,983	0,884	0,881	0,884
pente α	0,49	0,09	0,16	0,26
interception β (dB)	-27,8	-71,0	-64,2	-48,6
ε_{lin} (dB)	1,9	0,8	1,7	2,8

Tableau 21. Linéarité des estimateurs de niveaux d'échos calculés en fonction de la SER de sphères métalliques de différents rayons.



(a)



(b)

Figure 34. (a) Variations des estimateurs e_{Max}, e_A e_W et e_S en fonction de la SER (échelle logarithmique) de la sphère métallique. Les courbes rouges représentent les seuils de détection. (b) Estimateur volumique $\widetilde{Vol}_v$ calculé pour plusieurs valeurs de niveau d'écho en fonction de la SER de la cible métallique.

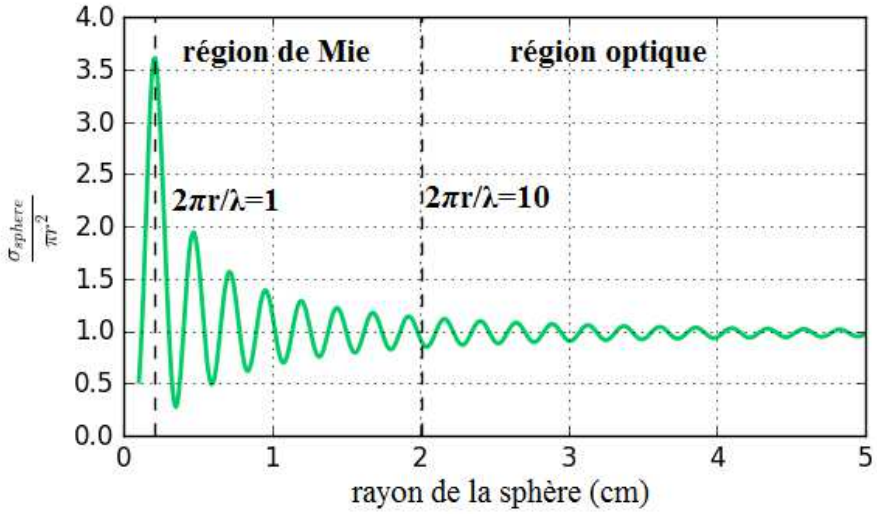
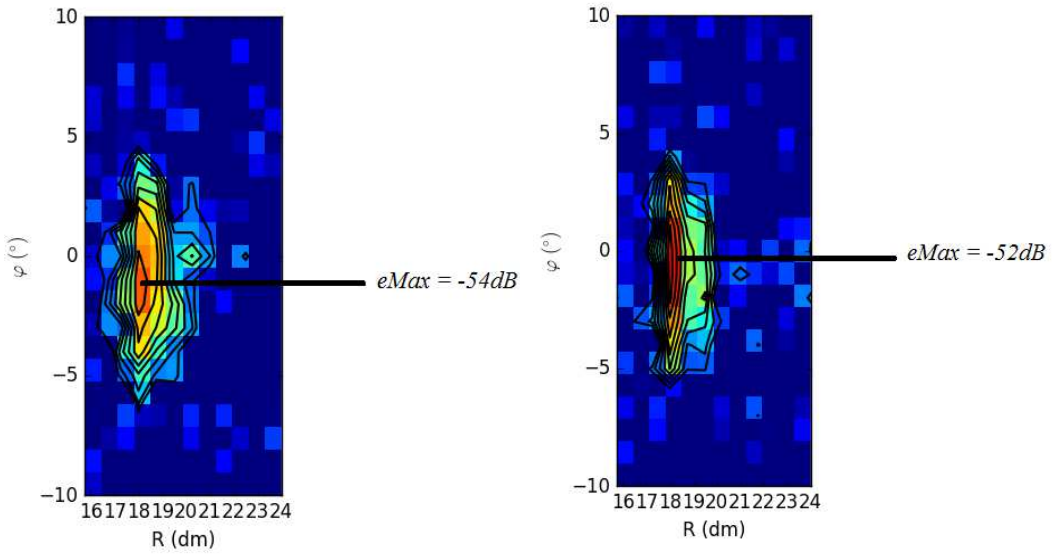


Figure 35. Surface équivalente radar de la sphère métallique en fonction de son rayon pour une longueur d'onde λ=1,26cm.



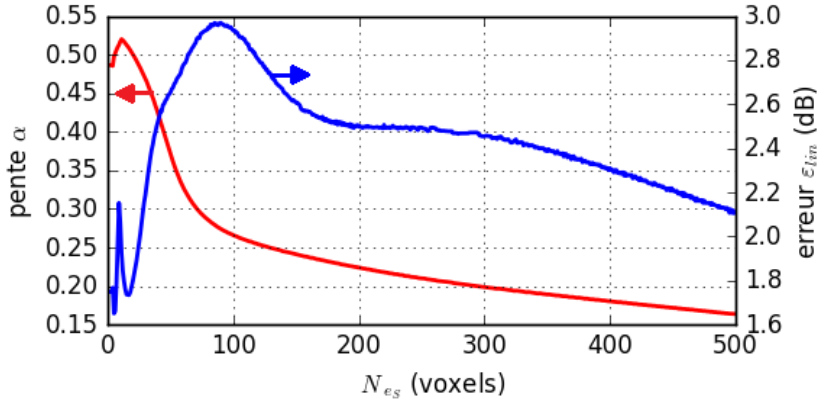
(a) (b)

Figure 36. Niveaux d'écho en coordonnées polaires dans un plan de coupe θ=0° pour une sphère métallique de rayon (a) r_s=2,5cm et (b) r_s=3,5cm. Echelle : -60dB (bleu) à -40dB (rouge).

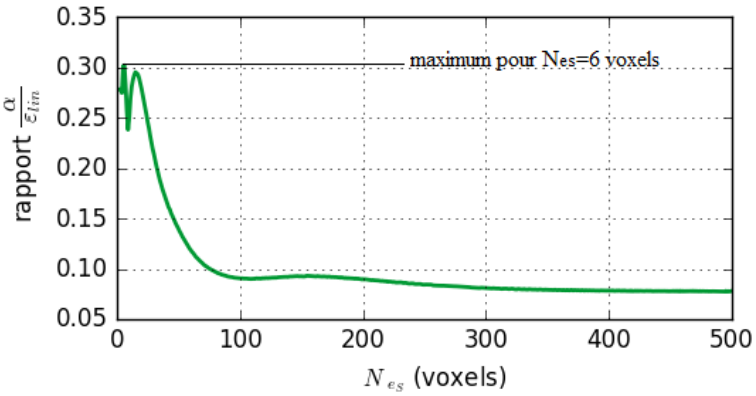
3.3.1.4. *Recherche d'un estimateur optimal linéairement*

L'estimateur optimal peut se définir comme étant celui offrant la meilleure sensibilité tout en conservant la meilleure précision. Si l'on considère l'erreur par rapport au modèle linéaire ε_{lin} défini dans la section 3.2.4, et la sensibilité de l'estimateur α, l'estimateur ayant le comportement linéaire optimal est caractérisé par le rapport $\frac{\alpha}{\varepsilon_{lin}}$ le plus élevé. On propose alors de calculer l'estimateur e_S pour une plage de valeurs N_{e_s} allant de 1 voxel à 500 voxels, et d'analyser ce rapport $\frac{\alpha}{\varepsilon_{lin}}$ pour une surface équivalente radar entre -63,0dB (sphère de rayon 1,5cm) et -26,1dB (sphère de rayon 12,5cm). Sur la Figure 37 sont affichés

(a) la pente α (courbe rouge), l'erreur du modèle linéaire ε_{lin} (courbe bleue) et (b) le rapport $\frac{\alpha}{\varepsilon_{lin}}$ de l'estimateur e_S en fonction du nombre de voxels N_{e_s}. Alors que le rapport reste à quasi- constant lorsque le nombre de voxels est supérieur à 200, on observe une zone optimale pour N_{e_s}<50voxels, avec une valeur maximale de $\frac{\alpha}{\varepsilon_{lin}}$ pour N_{e_s}=6 voxels. Les caractéristiques linéaires de l'estimateur $e_S(N_{e_s}=6)$ sont comparées à celles de e_{Max} pour les mêmes SER et sont reportées dans le Tableau 22. On observe des caractéristiques très voisines entre les deux estimateurs, avec une erreur linéaire ε_{lin} diminuée de 0,4dB pour e_S.



(a)



(b)

Figure 37. (a) Pente α (courbe rouge) et erreur du modèle linéaire ε_{lin} (courbe bleue) et (b) rapport $\frac{\alpha}{\varepsilon_{lin}}$ de l'estimateur e_S en fonction du nombre de voxels.

Caractéristiques	e_{Max}	e_S $N_{e_s}=6$
SER maximale RCS_{Max} (dB)	-26,1	-26,1
SER minimale RCS_{Min} (dB)	-63,0	-63,0
R^2	0,983	0,989
pente α	0,49	0,50
interception β (dB)	-27,8	-28,2
ε_{lin} (dB)	1,9	1,5

Tableau 22. Linéarité des estimateurs de niveaux d'échos e_{Max} et e_S supposé optimal calculés en fonction de la SER de sphères métalliques de différents rayons.

3.3.2. Influence de la distance d'interrogation

3.3.2.1. *Paramètres de mesures*

On propose dans cette section d'étudier le niveau d'écho d'une sphère métallique de rayon r_S=3,5cm à différentes distances d'interrogation de 0,70m à 1,95m. La distance d'interrogation a plusieurs influences, notamment sur (i) l'atténuation du signal, mise en évidence dans l'équation radar (13), (ii) la résolution volumique dans le cas d'un balayage sphérique (voir section 3.2.3.1) et (iii) la résolution, due à une surface illuminée par l'antenne de transmission plus grande. Dans notre cas, on utilise le radar FM-CW à 24GHz possédant un filtre-R^2 non désactivable, qui compense automatiquement l'atténuation du signal. On procède ici à un balayage 3D, dont les paramètres de mesures sont reportés dans le Tableau 23. Des visualisations en coordonnées polaires des niveaux d'écho générés par la sphère métallique dans un plan de coupe φ=0° sont disponibles sur la Figure 38 pour (a) R=0,70m, (b) R=1,20m, (c) R=1,70m et (d) R=1,95m.

3.3.2.2. *Estimateurs du niveau d'écho et de volume*

On souhaite ici calculer les estimateurs des niveaux d'écho et du nombre de voxels en fonction des différentes distances d'interrogation. La sphère ne changeant pas de volume, l'estimateur idéal possède la même valeur quelle que soit la distance R d'interrogation. Sur la Figure 39 (a) sont affichés les estimateurs de niveaux d'écho e_{Max}, e_A, e_W et e_S pour N_{e_s}=100 voxels. Les quatre estimateurs sont sensiblement constants (voir le Tableau 24). Le paramètre α traduit ici l'indépendance de l'estimateur en fonction de la distance d'interrogation R. La pente α est faible pour chaque estimateur, ce qui signifie une faible dépendance en fonction de R. e_W possède la variation de niveau d'écho la plus faible (±1dB). Les estimateurs $\widetilde{\mathrm{Vol}}_v$ sont aussi calculés pour plusieurs niveaux d'écho, mais contrairement à la section précédente, on divise cet estimateur par un facteur v_{Ant} donné par l'expression :

$$v_{Ant}(R) = \left(2dR^2 + \frac{d^3}{6}\right) \times \theta_{3dB} \times \sin\left(\frac{\varphi_{3dB}}{2}\right) \tag{30}$$

v_{Ant} représente le volume illuminé par l'antenne de transmission en fonction de la distance R d'interrogation, avec θ_{3dB} et φ_{3dB} les angles d'ouverture respectivement en azimut et en élévation. Ce volume augmente avec la distance d'interrogation, de la même manière que la résolution volumique v_{Res} définie dans l'équation (14). D'après les équations (14), (28) et (30), on obtient la relation suivante :

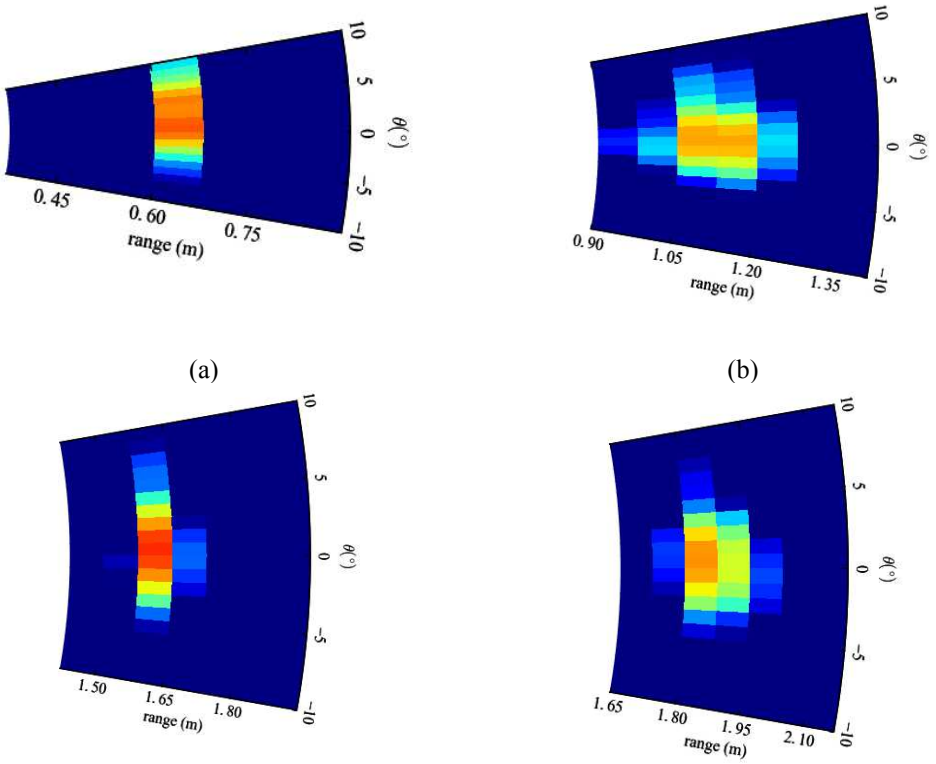
$$\frac{\widetilde{Vol}_v}{v_{Ant}} = \frac{\theta_{3dB} \times \sin\left(\frac{\varphi_{3dB}}{2}\right)}{d_\theta \times \sin\left(\frac{d\varphi}{2}\right)} \cdot N_v \tag{31}$$

On construit ainsi en théorie un estimateur indépendant de la distance d'interrogation R. Cet estimateur est proportionnel au nombre de voxels N_v. Le rapport $\frac{\widetilde{Vol}_v}{v_{Ant}}$ est affiché sur la Figure 39 (b) pour différents niveaux d'écho, allant de -60dB à -34dB et les caractéristiques de quatre de ces estimateurs sont reportés dans le Tableau 25. On remarque que les écarts-types augmentent lorsque le niveau d'écho diminue, et que la dépendance en R semble être compensée lorsque le niveau d'écho augmente. Il s'agit alors de caractériser un estimateur optimal offrant très peu de variations en fonction de la distance d'interrogation R, mais suffisamment sensible pour détecter une variation de volume de la cible.

étude de l'influence de la distance d'interrogation	
système radar	DK-sR-1030e
fréquence porteuse	23,8 GHz
bande de modulation	2 GHz
résolution en profondeur	7,5 cm
puissance en entrée	20 dBm
(Tx) antenne	antenne cornet avec lentille [a]
(Rx1/Rx2) antennes	antennes cornets [a]
cible	sphère métallique de rayon r_s = 3,5cm
distance des cibles	0,70m à 2,00m
scan en azimut	-10° à 10°
résolution en azimut	1°
scan en élévation	-10° à 10°
résolution en élévation	1°

[a] caractéristiques disponibles en annexe

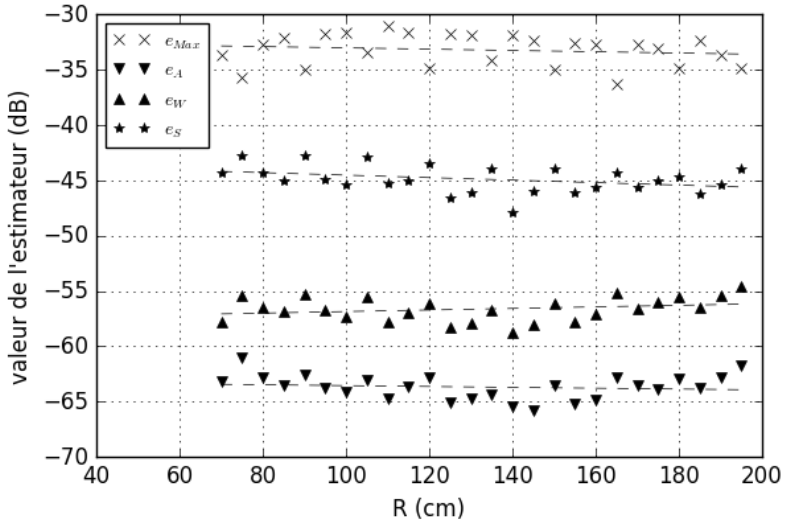
Tableau 23. Paramètres des mesures effectuées pour caractériser l'influence de la distance d'interrogation sur les estimateurs.



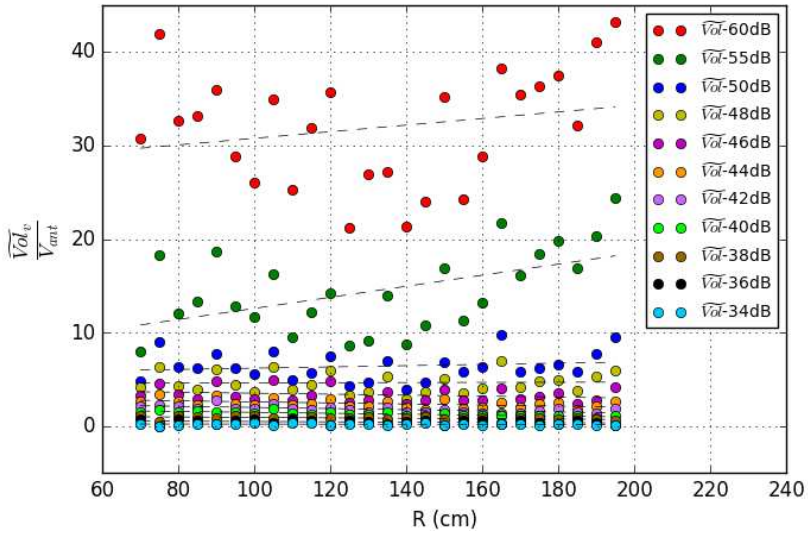
(a) (b)

(c) (d)

Figure 38. Niveaux d'écho générés par la sphère métallique de 3,5cm de rayon en coordonnées polaires dans un plan de coupe φ=0° pour (a) R=0,70m, (b) R=1,20m, (c) R=1,70m et (d) R=1,95m.
Echelle : -50dB (bleu) à -30dB (rouge).



(a)



(b)

Figure 39. (a) Variations des estimateurs e_{Max}, e_A e_W et e_S en fonction de la distance d'interrogation de la sphère métallique d'un rayon de 3,5cm. (b) Estimateur volumique $\widetilde{Vol}_v$ calculé pour plusieurs valeurs de niveau d'écho en fonction de la distance d'interrogation de la sphère métallique.

caractéristiques	**e_{Max}**	**e_A**	**e_W**	**e_S** $N_{e_S} = 100$
pente α (dB/cm)	-5E-3	-3E-3	7E-3	-1,1E-2
valeur moyenne (dB)	-33,2	-63,6	-56,6	-44,8
écart-type (dB)	1,4	1,1	1,0	1,2

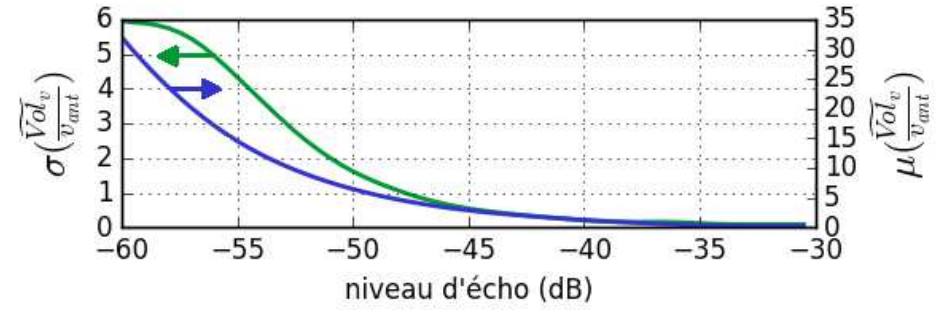
Tableau 24. Variabilité des estimateurs de niveaux d'échos calculés en fonction de la distance d'interrogation d'une sphère métallique d'un rayon de 3,5cm.

$\frac{\widetilde{Vol}_v}{V_{Ant}}$	**-60dB**	**-55dB**	**-40dB**	**-36dB**
pente α (cm^{-1})	3E-2	5E-2	5E-3	-1,5E-3
valeur moyenne	31,9	14,5	1,3	0,4
écart-type	6,0	4,3	0,2	0,2

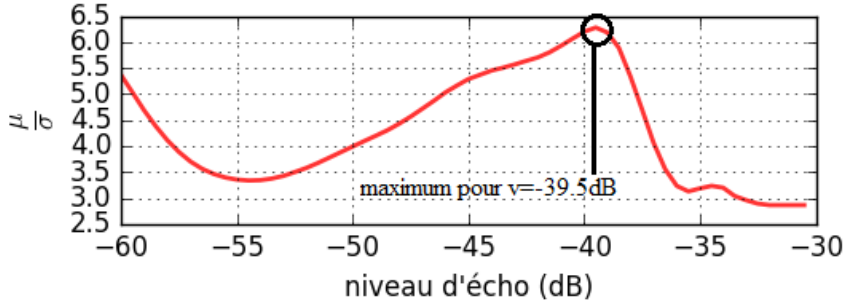
Tableau 25. Variabilité des estimateurs de volume pour différents niveaux d'écho calculés en fonction de la distance d'interrogation d'une sphère métallique d'un rayon de 3,5cm

3.3.2.3. *Estimateurs optimaux indépendants de R*

On propose dans cette section de définir des critères permettant de trouver des estimateurs optimaux indépendants de la distance d'interrogation R et conservant toutefois un maximum d'informations sur les niveaux d'écho. Pour cela, on définit les moyennes $\mu(e)$ et les écarts-types $\sigma(e)$ d'un estimateur e quelconque par rapport à la distance d'interrogation R. L'erreur de l'estimateur e en fonction de R est alors définie par $\sigma(e)$ et la valeur moyenne de l'estimation est contenue dans $\mu(e)$. À titre d'exemple, les moyennes et écarts-types de l'estimateur $\frac{\widetilde{\mathrm{Vol}}_{\mathrm{V}}}{\mathrm{v_{Ant}}}$ sont calculés et affichés en fonction du niveau d'écho sur la Figure 40 (a). Les deux paramètres sont tous les deux décroissants lorsque le niveau d'écho augmente, comme cela a déjà été remarqué dans la section précédente. La question est de savoir s'il existe un estimateur pour lequel l'erreur $\sigma(e)$ est minimale et la moyenne $\mu(e)$ est maximale afin d'obtenir une grande dynamique pleine échelle. On définit alors le critère $\frac{\mu(e)}{\sigma(e)}$ qui doit être le plus haut possible pour caractériser l'estimateur optimal indépendant de R. Le critère $\frac{\mu}{\sigma}$ pour l'estimateur $\frac{\widetilde{\mathrm{Vol}}_{\mathrm{V}}}{\mathrm{v_{Ant}}}$ est affiché sur la Figure 40 (b) en fonction du niveau d'écho. On observe alors une valeur maximale de ce critère pour un niveau d'écho de -39,5dB. Les caractéristiques de l'estimateur $\frac{\widetilde{\mathrm{Vol}}(-39{,}5dB)}{\mathrm{v_{Ant}}}$ sont reportées dans le Tableau 26. L'écart-type et la moyenne obtenus sont σ=1,8E-1 et μ=1,1. On applique le même raisonnement pour l'estimateur e_S en fonction du nombre de voxels. Les critères $\mu(e_S)$, $\sigma(e_S)$ et $\frac{\mu}{\sigma}$ sont affichés sur la Figure 41. La valeur moyenne $\mu(e_S)$ diminue avec le nombre de voxels, alors qu'il semble y avoir un minimum local de l'erreur commise $\sigma(e_S)$ pour 20 voxels. La valeur maximale du rapport $\frac{\mu}{\sigma}$ est alors obtenue pour N_{eS}=20 voxels. Les caractéristiques de l'estimateur $e_S(20\ \text{voxels})$ sont reportées dans le Tableau 26. On observe alors un écart-type d'une valeur de 0,9dB (le plus faible mesurable d'après la courbe verte de la Figure 41 (a)).

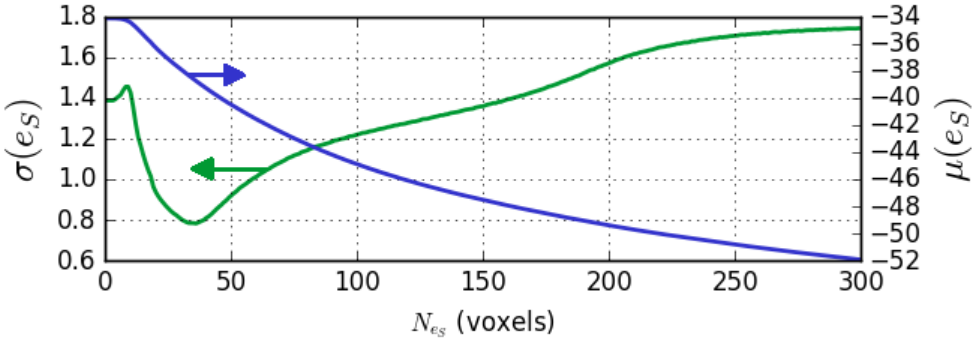


(a)

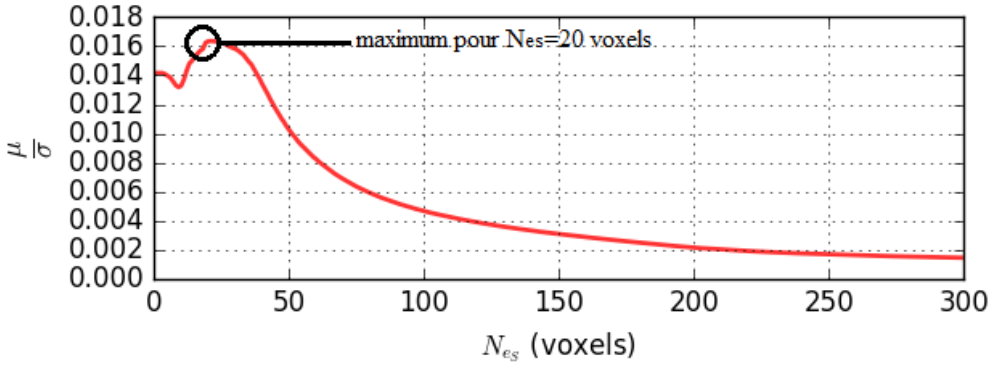


(b)

Figure 40. (a) Erreur de l'estimateur $\sigma\left(\frac{\widetilde{Vol_v}}{v_{Ant}}\right)$ (courbe verte) et moyenne de l'estimateur $\mu\left(\frac{\widetilde{Vol_v}}{v_{Ant}}\right)$ (courbe bleue) suivant la distance d'interrogation R en fonction du niveau d'écho. (b) Rapport $\frac{\mu}{\sigma}$ de l'estimateur $\frac{\widetilde{Vol_v}}{v_{Ant}}$ en fonction du niveau d'écho.



(a)



(b)

Figure 41. (a) Erreur de l'estimateur $\sigma(e_S)$ (courbe verte) et moyenne de l'estimateur $\mu(e_S)$ (courbe bleue) suivant la distance d'interrogation R en fonction du niveau d'écho. (b) Rapport $\frac{\mu}{\sigma}$ de l'estimateur e_S en fonction du niveau d'écho.

caractéristiques	$\frac{\widetilde{\mathbf{Vol}}(-\mathbf{39,5}dB)}{\mathbf{v_{Ant}}}$	e_S **(20 voxels)**
pente α	-4E-3 cm^{-1}	-1E2 dB/cm
valeur moyenne	1,1	-36,3dB
écart-type	1,8E-1	0,9dB

Tableau 26. Variabilité des estimateurs de volume et de niveaux d'écho optimaux calculés en fonction de la distance d'interrogation d'une sphère métallique d'un rayon de 3,5cm.

3.3.3. Conclusion

A l'issue de cette première étude, s'il fallait choisir un estimateur particulier pour estimer le volume d'une sphère métallique, il apparaît qu'un estimateur basé sur des niveaux d'échos comme e_S offre de meilleurs résultats qu'un estimateur basé sur un volume (ou plus exactement sur un nombre de voxels). Il est possible d'estimer ce volume à partir d'un rayon minimal de 2cm, avec un comportement plutôt linéaire. Sur la Figure 42 est affiché le modèle linéaire de l'estimateur e_S (6 voxels) (voir section 3.3.2.2) en échelle linéaire en fonction du rayon de la sphère métallique. L'erreur commise sur le modèle linéaire est ε_{lin}=3,3E-4 avec une pente α=6,7E-4 cm^{-1}. L'erreur commise sur le rayon de la sphère est donc $r_\varepsilon = \varepsilon_{lin}/\alpha$=0,5cm, c'est-à-dire une erreur de volume $V_\varepsilon = 4/3\pi\, r_\varepsilon^3$ de 0,5cm^3.

L'estimateur e_S est aussi indépendant de la distance d'interrogation R, avec une variation relative maximale en échelle logarithmique de 2,4% contre 16,3% pour l'estimateur $\frac{\widetilde{\mathrm{Vol}}_v}{\mathrm{v_{Ant}}}$ (voir le Tableau 26). En revanche, les estimateurs des sections 3.3.1 et 3.3.2 ne peuvent pas être comparés puisque des antennes différentes ont été utilisées en réception.

Dans le cas où la cible possède une forme beaucoup plus complexe qu'une sphère (par exemple, une grappe de raisin), il sera difficile d'estimer son volume à partir d'une valeur de niveau d'écho seulement, car les multiples irrégularités de sa surface peuvent induire, en particulier, une variation angulaire de la densité de puissance rétrodiffusée.

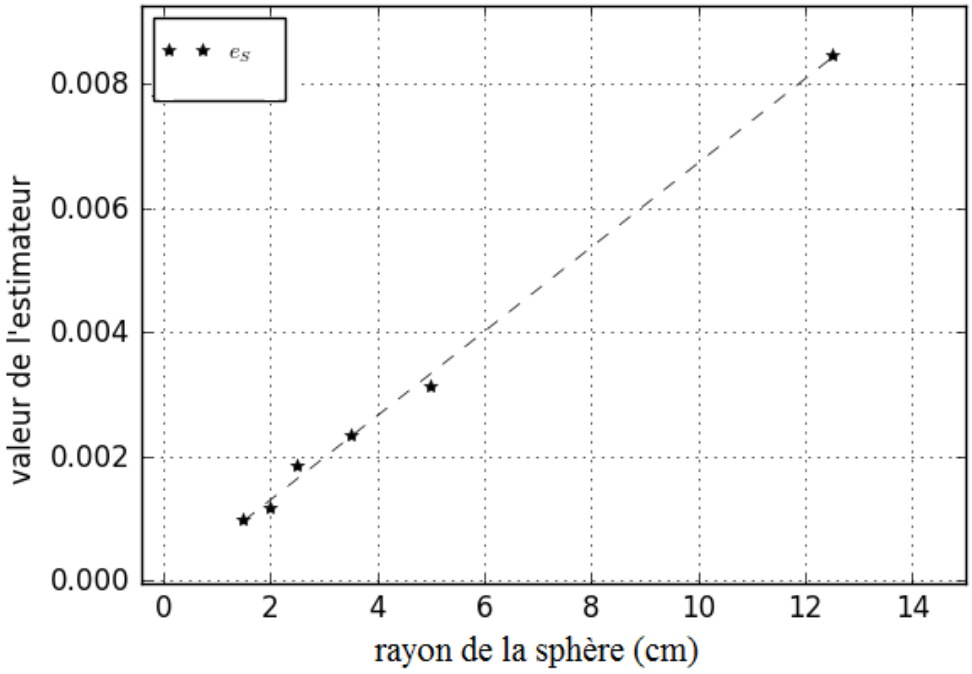


Figure 42. Variation de l'estimateur e_S linéaire qualifié comme optimal (Ne_s=6 voxels) en fonction du rayon de la sphère métallique.

3.4. Application pour l'interrogation à distance de charges variables et de capteurs passifs

3.4.1. Introduction

On étudie dans cette section la faisabilité d'estimer des niveaux d'écho en effectuant une balayage 3D par radar FM-CW. Ces niveaux d'échos sont générés soit par des charges variables (de différentes valeurs d'impédances), soit par des capteurs passifs (sans batteries et sans circuits intégrés). L'étude des niveaux d'échos de capteurs passifs présente un double intérêt :

- Le premier est de tester les limites du balayage par radar FM-CW et de pouvoir caractériser une variation de niveau écho parfois corrélée (voir section 3.3.1) à la variation de volume d'une cible.
- Le second est d'analyser les possibilités offertes par le balayage 3D avec un radar FM-CW pour estimer des grandeurs physiques à distance en interrogeant des capteurs passifs.

Avec l'explosion des capteurs actifs, avec circuits et capteurs intégrés, la lecture à distance de grandeurs physiques ne représente en réalité plus un défi technologique pour les applications de type IoT (*Internet of Things*). Néanmoins, la propagation des ondes électromagnétiques requise pour la transmission de données issues de capteurs, est limitée par de nombreuses contraintes en termes de distance maximale d'interrogation, de lecture multi-capteurs, de durée de vie des batteries, et de bande passante disponible. Ces contraintes limitent les terrains d'applications et les performances des WSN (*Wireless Sensor Networks*) dans plusieurs scénarios. Les circuits WSN sont commercialisés sous différents protocoles de communication comme le BLE (*Bluetooth Low Energy*), Zigbee ou LoRa [161]. Les capteurs de ces réseaux sont des circuits actifs possédant des batteries et des circuits intégrés. La durée de vie de ces batteries peut s'étendre jusqu'à 10 ans dans certaines configurations [162]. En revanche, de par le caractère actif du système de transmission et de réception, ces performances ne peuvent être atteintes que pour des rapports cycliques importants. De tels fonctionnements semblent inappropriés pour des interrogations régulières des capteurs. De plus, l'interrogation sans fil de grandeurs physiques en environnements hostiles devient difficile lorsqu'il s'agit de limiter l'intervention humaine, ou de placer des composants à des températures ou pressions extrêmes, voire en présence de radioactivité. Dans ces conditions où l'on souhaite une interrogation continue et à plus ou moins longue distance, l'utilisation de capteurs passifs peut être une solution envisageable, car la durée de vie de ces capteurs ne dépend que de leurs matériaux constitutifs. En revanche, le vrai défi technologique repose sur l'interrogation de ces capteurs à très longue distance.

Plusieurs technologies sont actuellement utilisées pour effectuer une interrogation sans fil de capteurs passifs. Les technologies RFID (*Radio Frequency Identification*) sont couramment utilisées dans beaucoup d'applications d'identification (basées sur le principe de lecture de code-barres) et de lecture de tags. Cependant, les réglementations sur les limitations de la puissance ne permettent que des interrogations inférieures à 10m dans des environnements complexes ou hautement réfléchissants. On notera néanmoins l'interrogation de capteurs SAW (*Surface Acoustic Wave*) à une distance d'interrogation allant jusqu'à 30m dans des conditions spécifiques [163]. Mais travailler à basses fréquences peut être aussi problématique pour l'intégration de capteurs avec des antennes de tailles réduites. D'autres technologies existent, par exemple les capteurs MMID (*millimeter-wave identification*) fonctionnant à une fréquence autour de 60GHz, et permettant la miniaturisation des tags passifs, comme des capteurs de pression [164]. La distance d'interrogation ne dépasse cependant pas quelques mètres.

On propose dans cette section une solution basée sur l'interrogation de charges variables et de capteur passifs avec un radar FM-CW fonctionnant à 24GHz. À moins que le contraire soit mentionné, la bande de modulation du radar est fixée pour B=2GHz, ce qui revient à avoir une résolution en profondeur d=7,5cm. Le radar effectue un balayage 3D en azimut et en élévation afin d'enregistrer les niveaux d'écho dans un volume, et d'obtenir un maximum d'informations concernant l'écho radar issu de la rétrodiffusion de la charge variable ou du capteur passif. Ces informations sont obtenues en définissant des estimateurs

de niveaux d'écho comme e_{Max}, e_A et e_W (voir section 3.2.4), et d'autres plus complexes basés sur la distribution statistique des niveaux d'échos dans le volume (voir section 3.2.6). Dans un premier temps, les échos de charges variables sont étudiés en état de rétrodiffusion maximale (impédance de 0Ω) ou minimale (impédance de 50Ω) et permettant d'analyser une dynamique pleine échelle maximale atteignable [165]. Plusieurs valeurs de charges variables sont ensuite analysées et la linéarités de ces estimateurs est étudiée [166], [167]. Les interrogations sont ensuite effectuées sur des capteurs passifs réels, avec notamment une thermistance RF pour deux bandes de modulation B différentes [168], un capteur microfluidique et la détection de position du ménisque [169], et finalement l'interrogation d'un capteur passif Van-Atta conçu par Hester *et al* [170] pour la mesure à distance (jusqu'à 58m) de l'humidité relative [171].

3.4.2. Mode de structure et mode de détection

Avant d'étudier les niveaux d'écho issus du capteur passif ou de la charge variable, on définit deux termes présents dans les sections qui suivent :

- Le mode de structure, issu des rétrodiffusions générées par la structure de l'antenne du capteur passif
- Le mode de détection, issu des réflexions par désadaptation d'impédance de la charge ou de l'élément sensible du capteur passif.

Ces deux modes, décrits par Harrington [172], peuvent être dissociés si une ligne à retard de longueur électrique *L* sépare l'antenne et l'élément sensible. Sur la Figure 43 sont représentés un schéma du capteur composé d'une antenne, de la ligne à retard, et de l'élément sensible, ainsi que le spectre de battement obtenu lorsque le capteur est interrogé par un radar FM-CW. Le mode de structure (en rouge) est représenté à 2,5m où se situe l'antenne. Le mode de détection (en vert) est localisé à 4m. Cette distance correspond à la somme de la position de l'antenne du capteur et de la longueur électrique *L*=1,5m de la ligne à retard. Lorsque la grandeur physique (ou la charge) est modifiée, seul le niveau d'écho du mode de détection va varier d'amplitude.

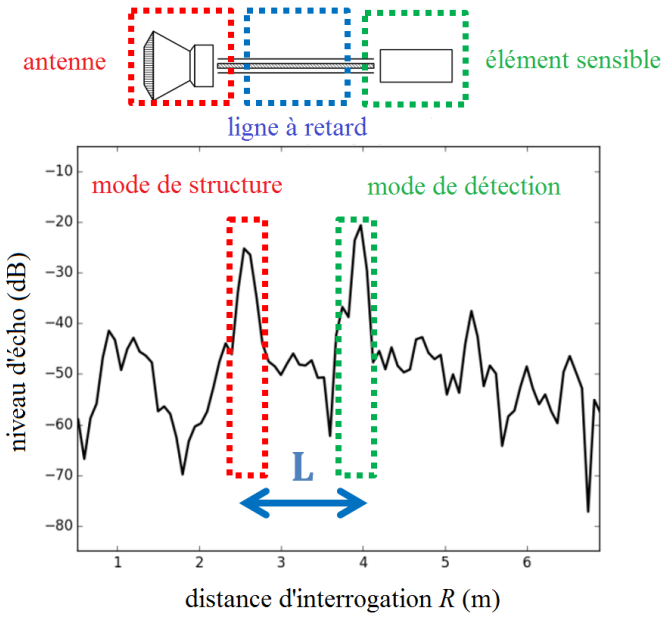


Figure 43. Schéma d'un capteur passif composé d'une antenne, d'une ligne à retard de longueur électrique *L* et d'un élément sensible, et le spectre de battement obtenu avec mise en évidence du mode de structure et du mode détection.

3.4.3. Balayage 3D de charges ON/OFF

3.4.3.1. *Paramètres de mesures*

Les premiers essais d'interrogation à distance de capteurs passifs par balayage tridimensionnel sont effectués « manuellement » en modifiant pas angulaire par pas angulaire la position de l'antenne de transmission, et en enregistrant pour chaque direction d'interrogation le spectre de battement associé. L'antenne utilisée en transmission est une antenne parabolique avec des angles d'ouverture très fins (1° en azimut et en élévation). Un réseau de 1x4 antennes patches est utilisé en réception. Une photographie du système de mesure est disponible sur la Figure 44.

Dans cette section, quatre cibles simulant des capteurs passifs sont interrogées simultanément. Ces cibles sont des charges d'impédance 50Ω (charge adaptée, état « OFF », sans réflexion au niveau de la charge) ou 0Ω (court-circuit, état « OFF », sans réflexion au niveau de la charge). Ces charges sont connectées à des antennes cornets en utilisant des lignes à retard (câbles coaxiaux type K) de longueurs différentes : 20cm, 50cm, 75cm et 100cm. Le coefficient de vélocité de ces câbles est de 0,83. Les longueurs électriques réelles sont donc de 24cm, 60cm, 90cm et 100cm. Les antennes cornets sont situées à 3m de distance de l'antenne de transmission du radar et sont mesurées *indoor* dans un couloir de 1,60m en largeur et 2,5m en hauteur. Les antennes cornets sont disposées de telle sorte qu'une hauteur de 30cm et une largeur de 18cm les séparent, comme illustrées sur la Figure 45. Un résumé des paramètres de mesure est disponible dans le Tableau 27.

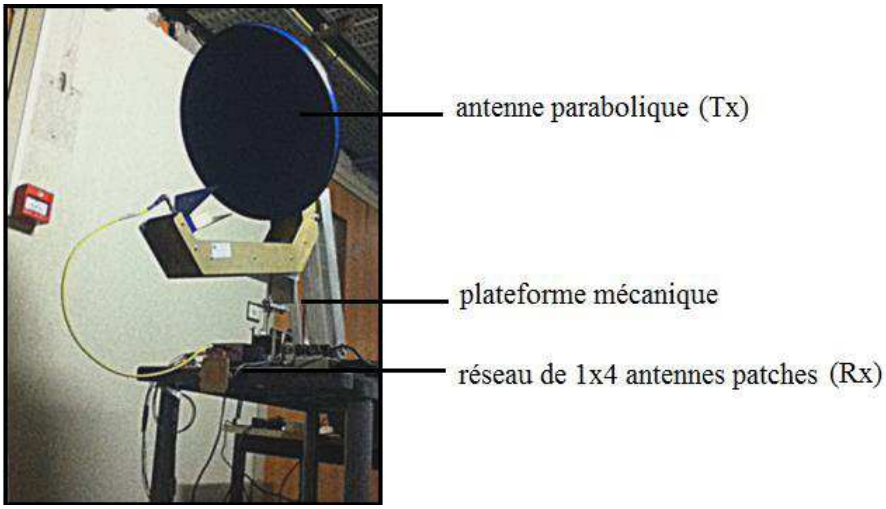
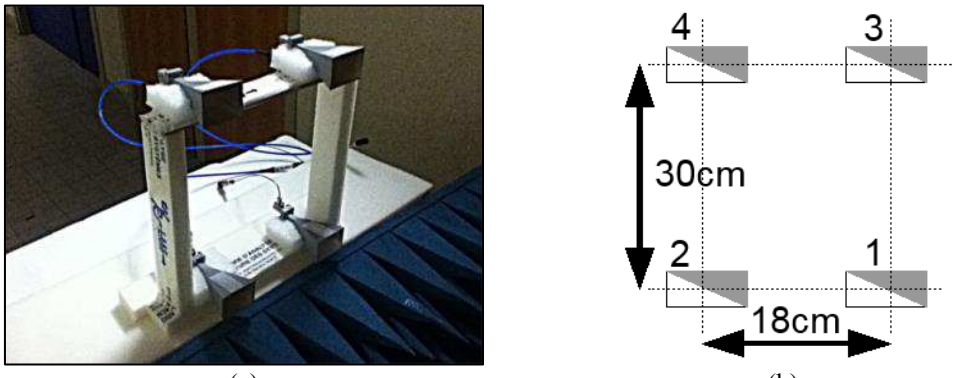


Figure 44. Système d'interrogation par balayage 3D de l'antenne parabolique.



(a) (b)

Figure 45. (a) Photographie des quatre charges avec antennes et (b) schéma de la disposition des antennes.

interrogation de charges d'impédance 0Ω et 50Ω	
système radar	DK-sR-1030e
fréquence porteuse	23,8 GHz
bande de modulation	2 GHz
résolution en profondeur	7,5 cm
(Tx) antenne	antenne parabolique [a]
(Rx) antenne	1x4 antennes patches [a]
scan en azimut	-6° à 6°
résolution en azimut	0,5°
scan en élévation	-6° à 6°
résolution en élévation	0,7°
paramètres des capteurs passifs	
distance du radar	3 m
nombre de charges	4
impédance des charges	0Ω ou 50Ω
antenne	antenne cornet 20dBi
lignes à retard	20cm, 50cm, 75cm, 100cm

[a] caractéristiques disponibles en annexe

Tableau 27. Paramètres des mesures effectuées sur des capteurs passifs avec des charges d'impédance 0Ω et 50Ω.

3.4.3.2. *Densité volumique de capteurs et affichage 3D*

L'idée première est de vouloir visualiser sur une image en 3D des niveaux d'échos générés par les charges, ainsi que de caractériser le nombre de capteurs possiblement interrogeables de cette manière. En considérant la résolution volumique exprimée dans l'équation (14), on peut imaginer une notion de nombre de capteurs interrogeables par volume, autrement dit une densité maximale de capteurs donnée par l'expression :

$$\rho_{opt}(R) = \frac{1}{v_{Res}(R)} \tag{32}$$

Dans cette situation, la densité maximale de capteurs à une distance de 3m est d'environ 4860 capteurs/m^3. Il s'agit en réalité d'une valeur maximale théorique idéale supposant que l'information de chaque capteur est contenue dans un niveau d'écho d'un seul et unique voxel. La vraie densité de capteurs va en réalité dépendre du nombre de voxel nécessaire pour effectuer une *bonne* estimation (linéarité, précision…) de la grandeur physique à mesurer, de la taille physique des capteurs, des interactions de niveaux d'échos entre chaque capteur, des échos parasites (clutters).

Le balayage 3D est effectué pour quatre charges placées simultanément à Z_L=0Ω ou Z_L=50Ω, résultant sur l'enregistrement de plus de 72E3 voxels. Une image des niveaux d'écho en coordonnées polaires est affichée sur la Figure 46 dans un plan de coupe φ=6°. Les charges sont fixées pour Z_L=0Ω et sur cette image sont visibles les niveaux d'échos de deux capteurs. Ceux distingués par des carrés sont les modes de structures, issus des réflexions sur la structure métallique des antennes, et ceux distingués par les cercles sont les modes de détection, dont les niveaux d'échos varient en fonction de Z_L. La distance séparant les modes de structure et de détection dépend de la longueur de la ligne à retard utilisé. La visualisation en 3D des modes de structures et de détection proposée ici repose sur l'affichage d'un nombre de voxels dont le niveau d'écho est au-dessus d'un seuil donné. Les voxels dont le niveau d'écho est supérieur à -20dB sont alors affichés sur la Figure 47 pour (a) une charge Z_L=50Ω et (b) une charge Z_L=0Ω. Quatre échos apparaissent à différentes distances d'interrogation lorsque la charge est à 0Ω. Ce sont les modes de détection des quatre capteurs. On veut alors pouvoir estimer la différence de niveau d'écho entre les deux états ON/OFF. Cette différence peut s'apparenter à une dynamique pleine échelle

maximale. Pour estimer cette dynamique pleine échelle, on définit la variation relative du nombre de voxels en fonction du niveau d'écho *v* pour une charge d'impédance Z_L par l'expression :

$$\Delta_N(v, Z_L) = \frac{N_v(Z_L)}{N_S} \tag{33}$$

N_S représente le nombre total de voxels constituant le volume d'étude, et $N_v(Z_L)$ le nombre de voxels dont le niveau d'écho est supérieur à un seuil *v* donné pour une charge d'impédance Z_L. On caractérise la variation du nombre de voxels entre les deux valeurs extrêmes d'impédance par l'expression :

$$\Delta_{Max}(v) = |\Delta_N(v, 0\Omega) - \Delta_N(v, 50\Omega)| \tag{34}$$

Δ_{Max} est affiché en fonction du niveau d'écho sur la Figure 48. On observe une variation relative maximale du nombre de voxels pour un niveau d'écho v=-40dB pour une dynamique pleine échelle atteignable de 13%. Il faut maintenant pouvoir étudier des valeurs intermédiaires d'impédance afin de pouvoir estimer des sensibilités de mesure.

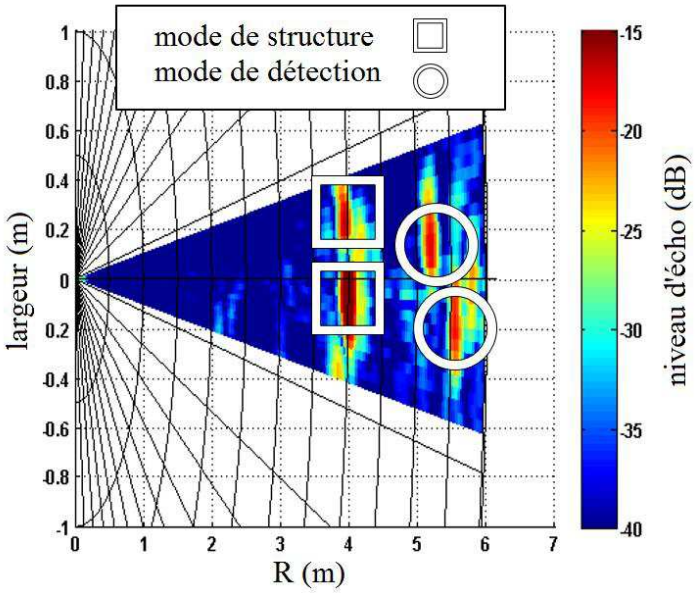
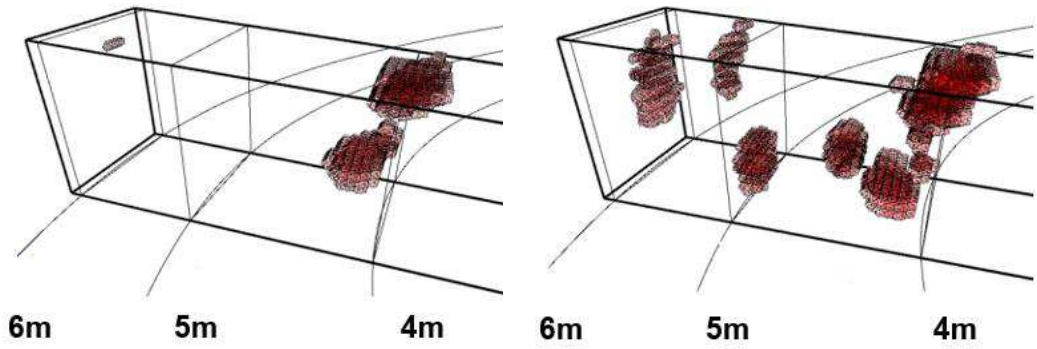


Figure 46. Affichage en coordonnées polaires des niveaux d'échos mesurés dans un plan de coupe φ=6° et pour une impédance Z_L=0Ω.



(a) (b)

Figure 47. Image radar 3D des voxels dont le niveau d'écho est au-dessus de -20dB pour des charges (a) Z_L=50Ω et (b) Z_L=0Ω.

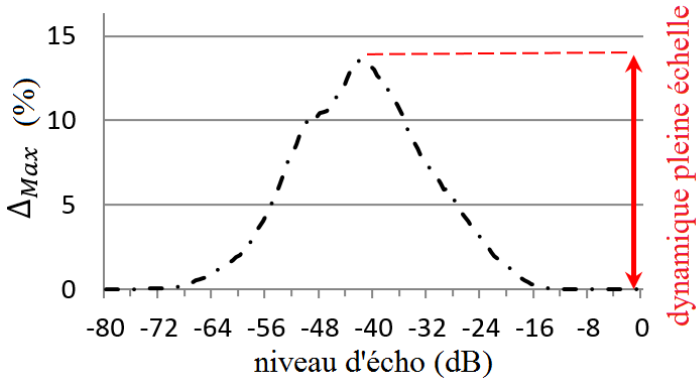


Figure 48. Variation relative du nombre de voxels Δ_{Max} entre les états Z_L=0Ω et Z_L=50Ω en fonction du niveau d'écho

3.4.4. Interrogation 3D de charges d'impédances variables (0Ω, 17Ω, 30Ω et 50Ω)

3.4.4.1. *Paramètres de mesures*

Les paramètres des mesures effectuées dans cette section sont similaires à celles de la section 3.4.3, à la différence près que le balayage 3D de l'antenne parabolique est synchronisé avec le temps d'acquisition du radar, permettant de faire des mesures automatiques à la manière *stop and go*. Pour chaque direction d'interrogation, le spectre de battement est enregistré sur une moyenne de 10 mesures. Le système d'interrogation est affiché sur la Figure 49. On ne mesure ici qu'un seul capteur passif composé d'un antenne cornet d'un gain de 20dBi et d'angle d'ouverture de 60°, une ligne à retard de longueur électrique de 1,2m, et d'une charge dont l'impédance prend 4 valeurs : 0Ω, 17Ω, 30Ω et 50Ω. Les mesures sont effectuées au sous-sol du laboratoire et l'antenne du capteur est située à une distance d'interrogation de 3,3m, ce qui signifie que le mode de détection sera localisé à une distance d'environ 4,5m. Une illustration du capteur passif interrogé est disponible sur la Figure 50 et les paramètres de mesures sont reportés dans le Tableau 28.

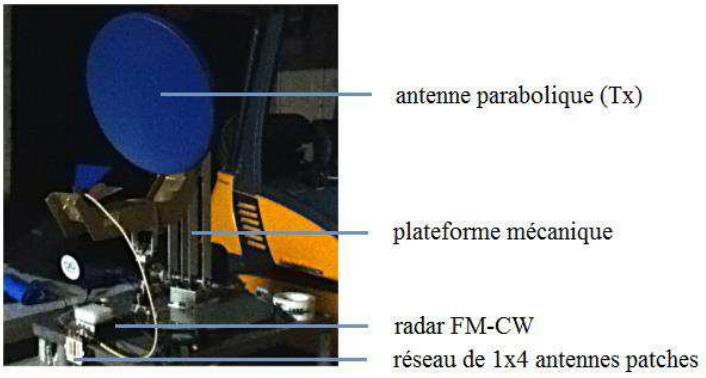
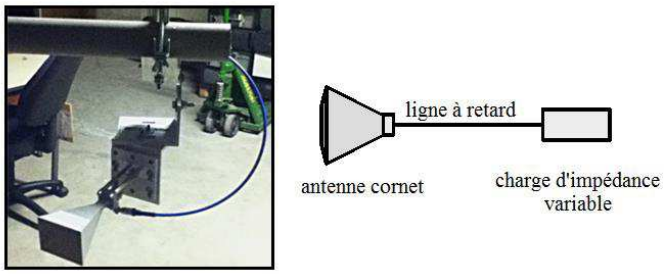


Figure 49. Système d'interrogation par balayage 3D de l'antenne parabolique montée sur une plateforme mécanique.



(a) (b)

Figure 50. (a) Photographie et (b) schéma du capteur passif composé d'une antenne cornet, une ligne à retard et une charge d'impédance variable.

interrogation de charges d'impédance 0Ω, 17Ω, 30Ω et 50Ω	
système radar	DK-sR-1030e
fréquence porteuse	23,8 GHz
bande de modulation	2 GHz
résolution en profondeur	7,5 cm
(Tx) antenne	antenne parabolique [a]
(Rx) antenne	1x4 antennes patches [a]
scan en azimut	-10° à 10°
résolution en azimut	1°
scan en élévation	-2° à 2°
résolution en élévation	0,25°
paramètres des capteurs passifs	
distance du radar	3,3 m
impédance des charges	0Ω, 17Ω, 30Ω et 50Ω
antenne	antenne cornet 20dBi
longueur électrique de la ligne à retard	1,2m

[a] caractéristiques disponibles en annexe

Tableau 28. Paramètres des mesures effectuées pour des charges d'impédances 0Ω, 17Ω, 30Ω et 50Ω.

3.4.4.2. *Affichage 3D et limites de la densité volumique de capteurs*

Les interrogations radar sont effectuées pour les quatre impédances et des représentations en coordonnées polaires des niveaux d'écho sont affichées sur la Figure 51 dans un plan de coupe φ=1° pour (a) Z_L=50Ω, (b) Z_L=30Ω, (c) Z_L=17Ω et (d) Z_L=0Ω. On observe un écho radar avec des niveaux d'échos constants (à 4,5m sur les images, en réalité vers 3,4m car un retard est généré par un câble coaxial connectant le port de transmission du radar et l'antenne parabolique). Cet écho radar représente le mode de structure. Le mode de détection est représenté par l'écho radar situé sur les image à 5,7m (en réalité 4,6m) où les niveaux d'écho varient en fonction de la charge d'impédance Z_L. Cette variation est encore plus visible lorsque l'on affiche les niveaux d'échos en trois dimensions. Sur la Figure 52 sont affichés les voxels en coordonnées azimut/élévation dont le niveau d'écho est supérieur à -25dB pour (a) Z_L=50Ω, (b) Z_L=30Ω, (c) Z_L=17Ω et (d) Z_L=0Ω. On observe progressivement l'augmentation du nombre de voxels avec la diminution de l'impédance à l'emplacement du mode de détection.

Cette augmentation ou diminution de nombre $N_v(Z_L)$ de voxels peut permettre d'affiner la définition de la densité volumique de capteurs dans l'équation (32). Supposons que le niveau d'écho v soit le niveau d'écho minimal nécessaire pour estimer la variation d'une grandeur physique (par exemple entre Z_L=0Ω et Z_L=50Ω). Alors la densité volumique de capteur maximale est donnée par l'expression :

$$\rho(R,v) = \frac{\rho_{opt}(R)}{N_v(\Phi_{Max})} = \frac{1}{v_{Res}(R) \cdot N_v(\Phi_{Max})} \quad (35)$$

Le paramètre Φ_{Max} est la grandeur physique limite telle que $N_v(\Phi_{Max})$ représente le nombre maximal de voxels que l'on peut générer pour un niveau d'écho supérieur à v. Dans cette section, Φ_{Max} est associé à Z_L=0Ω. Les valeurs de $\rho(R,v)$ sont calculées à titre d'exemple pour différents seuils de niveaux d'écho v et reportées dans le Tableau 29. La densité volumique de capteur augmente lorsque l'on choisit un seuil de niveau d'écho de plus en plus élevé. En revanche choisir un niveau d'écho trop élevé revient à limiter la grandeur physique minimale mesurable Φ_{Min}, et donc à réduire la dynamique pleine échelle.

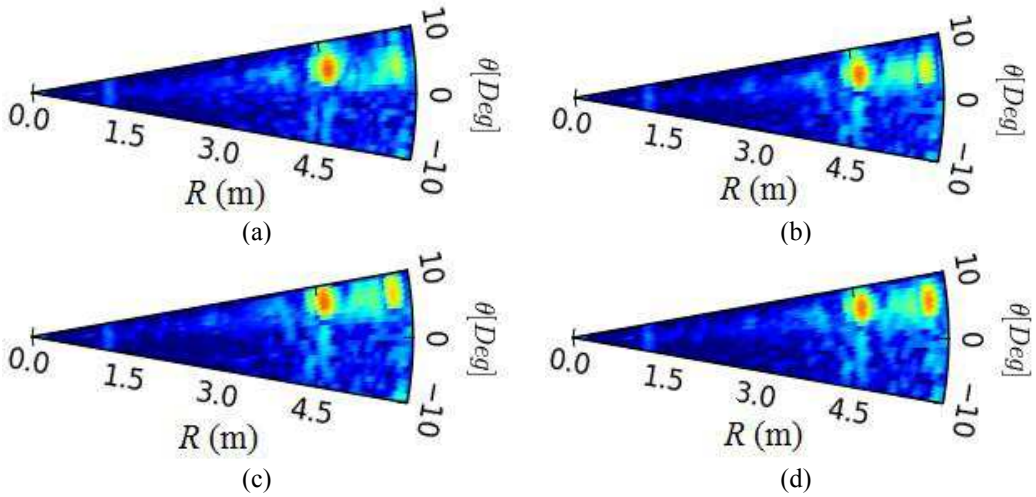


Figure 51. Image radar 2D des niveaux d'échos dans un plan de coupe φ=1° pour des charges d'impédance : (a) Z_L=50Ω, (b) Z_L=30Ω, (c) Z_L=17Ω et (d) Z_L=0Ω. Echelle : -60dB (bleu) à 0dB (rouge)

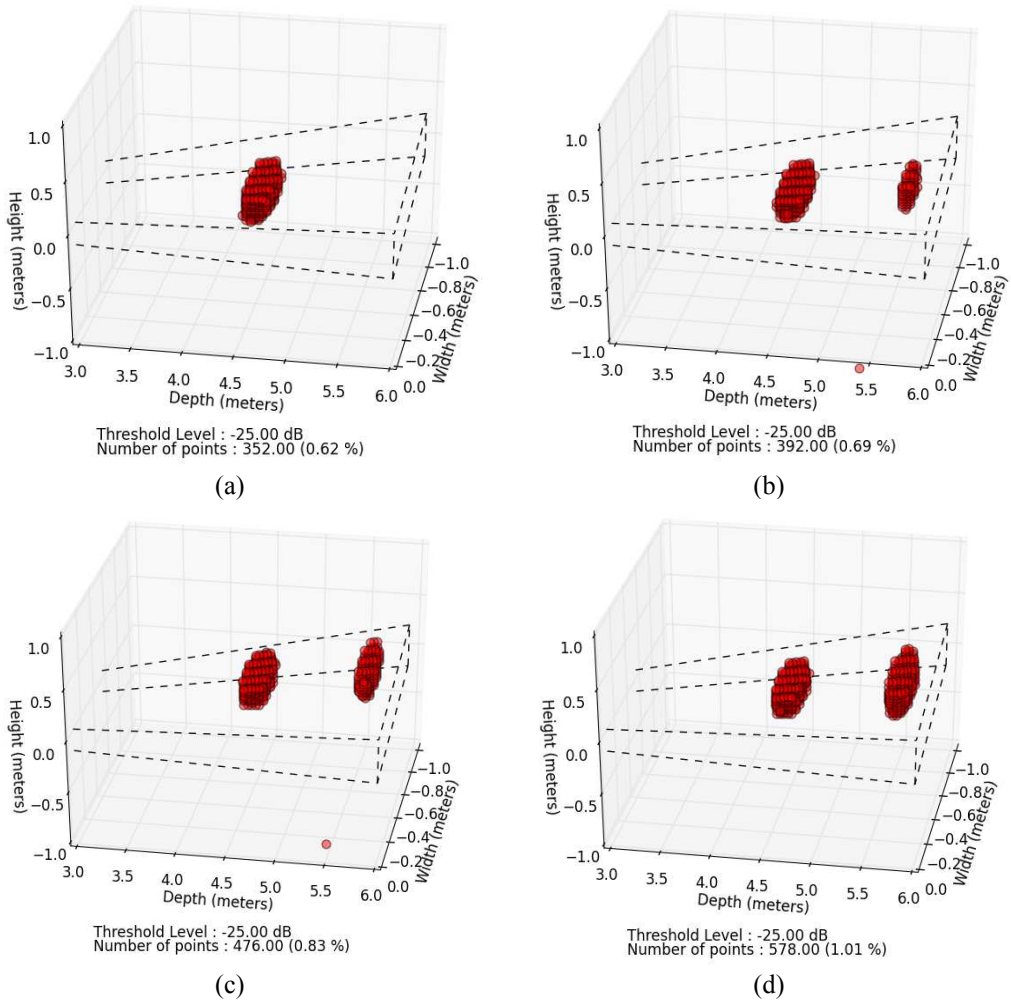


Figure 52. Image radar 3D des voxels dont le niveau d'écho est au-dessus de -25dB pour des charges d'impédance (a) Z_L=50Ω, (b) Z_L=30Ω, (c) Z_L=17Ω et (d) Z_L=0Ω.

niveau d'écho v (dB)	-25	-20	-15
$N_v(Z_L=0\Omega)$ (voxels)	273	137	26
$\rho(R = 4,5m, v)$ (capteurs/m^3)	1	2	11

Tableau 29. Densité volumique de capteur pour différents niveaux d'écho à une distance R=4,5m.

3.4.4.3. *Estimations et distribution des niveaux d'écho*

Dans cette section, trois estimateurs basés sur la valeur des niveaux d'échos e_{Max}, e_A et e_W sont calculés en fonction de l'impédance Z_L. Ces trois estimateurs sont définis dans la section 3.2.7.1 et leurs valeurs sont reportées dans le Tableau 30. On observe une augmentation de la valeur des estimateurs, avec une dynamique maximale de -14dB obtenue pour e_{Max} et e_W. Il est en revanche nécessaire d'effectuer des mesures sur des valeurs d'impédances plus variées si l'on désire avoir des informations sur la linéarité. La fonction de distribution discrète $\mathcal{D}(v_k)$ relative (c'est-à-dire divisée par le nombre total de voxels N_S) définie dans 3.2.6 est affichée sur la Figure 53 pour les quatre valeurs d'impédance. On observe une valeur moyenne très proche, correspondant au niveau d'écho moyen de la scène, ainsi que des variations significatives de la valeur de $\mathcal{D}$ pour des niveaux d'échos supérieurs à -30dB (cadre bleu). Ces variations ont déjà été observées dans la section 3.2.6.2 en simulation ou dans la section 3.3.1 lorsque la cible

augmente de volume. Il serait alors intéressant de caractériser ces variations de distributions en fonction de nombreuses valeurs d'impédance Z_L.

impédance Z_L (Ω)	50	33	17	0
e_{Max} (dB)	-26,9	-21,2	-17,3	-12,2
e_A (dB)	-45,0	-44,4	-44,0	-42,9
e_W (dB)	-43,2	-41,2	-39,8	-37,3

Tableau 30. Valeur des estimateurs e_{Max}, e_A et e_W en fonction des valeurs d'impédances Z_L=50Ω, Z_L=30Ω, Z_L=17Ω et Z_L=0Ω.

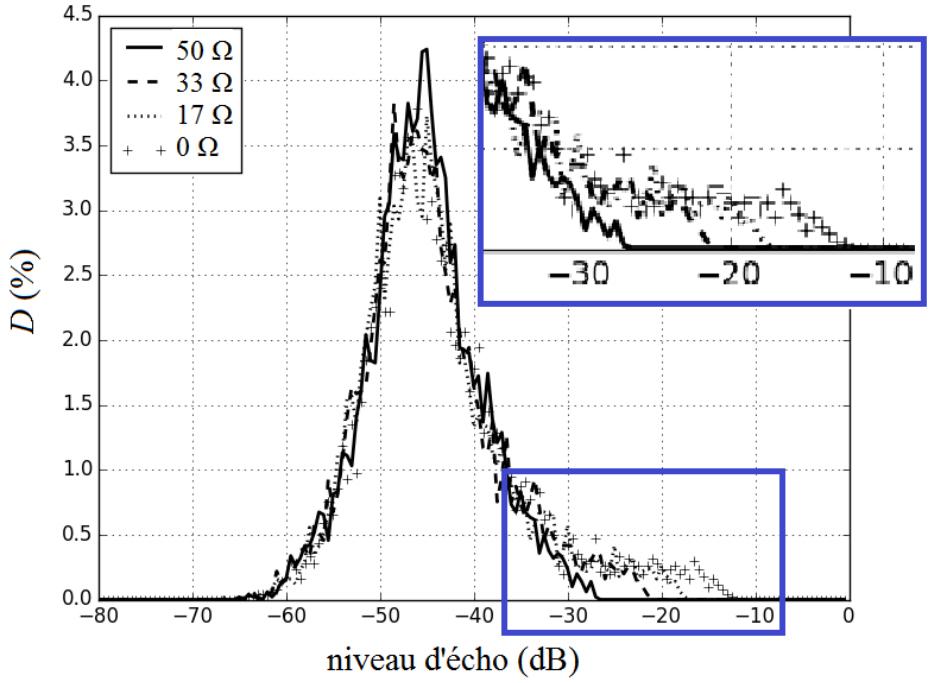


Figure 53. Distribution discrète D relative en fonction du niveau d'écho pour des charges d'impédance de Z_L=50Ω, Z_L=30Ω, Z_L=17Ω et Z_L=0Ω.

3.4.5. Interrogation 3D de charges d'impédances multiples

3.4.5.1. *Paramètres de mesures*

On propose dans cette section d'approfondir les premiers résultats présentés dans les sections 3.4.3 et 3.4.4 en étudiant les niveaux d'échos sur un plus grand nombre de valeurs d'impédance. Pour simuler une variation sur une grande plage de valeurs, on utilise un atténuateur variable possédant deux ports. Le premier port est connecté à la ligne à retard et à l'antenne cornet. Le second port est terminé par un court-circuit. 14 valeurs d'impédance sont ainsi analysées dans une plage de valeurs comprises entre 0Ω et 50Ω. Le capteur passif est interrogé avec les mêmes paramètres de mesures que dans la section précédente, à la différence près que deux distances d'interrogation sont effectuées : à 2,0m et à 5,5m. De plus, le balayage mécanique est effectué avec un système plus performant contrôlé automatiquement par ordinateur, et permettant d'obtenir un balayage plus large en élévation. Les mesures sont effectuées *indoor* en laboratoire. Une photographie de l'installation est disponible sur la Figure 54 et les paramètres de mesure sont reportés dans le Tableau 31.

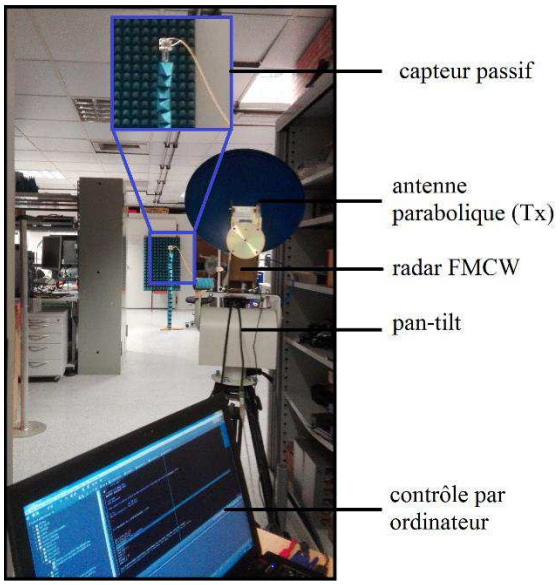


Figure 54. Système d'interrogation par balayage 3D de l'antenne parabolique montée sur une plateforme mécanique, avec le capteur situé à 5,5m.

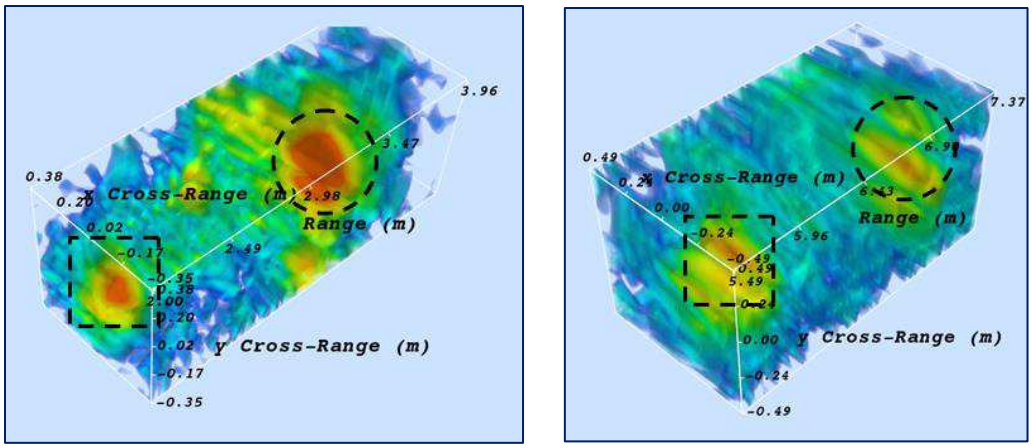
interrogation de charges d'impédances variables	
système radar	DK-sR-1030e
fréquence porteuse	23,8 GHz
bande de modulation	2 GHz
résolution en profondeur	7,5 cm
(Tx) antenne	antenne parabolique [a]
(Rx) antenne	1x4 antennes patches [a]
scan en azimut	-10° à 10°
résolution en azimut	2°
scan en élévation	-10° à 10°
résolution en élévation	2°
paramètres des capteurs passifs	
distance du radar	2,0m et 5,5m
impédance des charges	14 valeurs de 0Ω à 50Ω
antenne	antenne cornet 20dBi
longueur électrique de la ligne à retard	1,3m

[a] caractéristiques disponibles en annexe

Tableau 31. Paramètres des mesures effectuées pour caractériser des charges d'impédances variables.

3.4.5.2. *Affichage 3D par isosurfaces des niveaux d'échos*

On propose une représentation en trois dimensions des niveaux d'écho à l'aide d'isosurfaces, décrites dans la section 3.2.3.2. Pour cela, on effectue en premier lieu une transformation des coordonnées azimut/élévation vers les coordonnées cartésiennes. Les isosurfaces sont affichées sur la Figure 55 pour une impédance Z_L=0Ω à une distance d'interrogation (a) de 2,0m et (b) de 5,5m. Les carrés représentent les modes de structures et les cercles les modes de détection. Malgré la même valeur d'impédance Z_L=0Ω, on observe une atténuation des niveaux d'écho que l'on ne peut pas attribuer à l'atténuation des ondes en espace libre car un filtre-R² est déjà intégré dans le radar. Cette atténuation est discutée dans la section suivante. Le volume d'étude où s'effectuent les analyses de niveaux d'écho est le volume contenant uniquement le mode de détection. Les caractéristiques du volume d'étude sont différentes en fonction de la distance d'interrogation du capteur, et sont reportées dans le Tableau 32.



(a) (b)

Figure 55. Image radar 3D des voxels représentés par des isosurfaces pour une charge d'impédance Z_L=0Ω. Les carrés représentent les modes de structure et les cercles représentent les modes de détection. Echelle : -60dB (bleu) à -30dB (rouge)

Paramètres	2,0 m	5,5 m
profondeur minimale z_{Min}	3,2 m	6,8 m
profondeur maximale z_{Max}	4,0 m	7,2 m
résolution en profondeur d_z	7,5 cm	7,5 cm
largeur minimale x_{Min}	-31 cm	-59 cm
largeur maximale x_{Max}	31 cm	31 cm
résolution en largeur d_x	3,5 cm	3,5 cm
hauteur minimale y_{Min}	-38 cm	-31 cm
hauteur maximale y_{Max}	38 cm	31 cm
résolution en hauteur d_y	3,5 cm	3,5 cm
résolution volumique v_{Res}	9 cm^3	9 cm^3
Nombre total de voxels	32832	23598

Tableau 32. Paramètres volumes analysés en coordonnées cartésiennes.

3.4.5.3. Définition d'une distribution continue et d'estimateurs

Une proposition d'un modèle de distribution continue de niveaux d'échos est proposée à partir d'un modèle gaussien de loi log-normale. Cette distribution est définie par l'équation :

$$\mathcal{D}(v) = \frac{K}{\sigma\sqrt{2\pi}} exp\left\{\frac{-(v-ln(\mu))^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (36)$$

Les paramètres σ et μ représentent respectivement les écarts-type et décalage de la distribution. Dans cette situation et dans le volume étudié, les tests de KS ont montré des valeurs-p élevées (>0,9) confirmant la similitude entre la distribution discrète et le modèle de distribution log-normal. La différence avec l'équation (23) réside dans l'utilisation des niveaux d'écho sur une échelle linéaire au lieu d'une échelle logarithmique. La distribution reste finalement similaire à une loi gaussienne classique lorsque l'on trace les niveaux d'écho en échelle logarithmique. Sur la Figure 56 (a) sont représentées les distributions discrète (triangles bleus) et gaussienne (courbe rouge) des niveaux d'écho du volume d'étude défini pour le capteur positionné à 2,0m, et pour une charge d'impédance Z_L=50Ω. Différents estimateurs et leur valeur sont aussi représentées sur ce graphe, avec notamment deux nouveaux estimateurs :

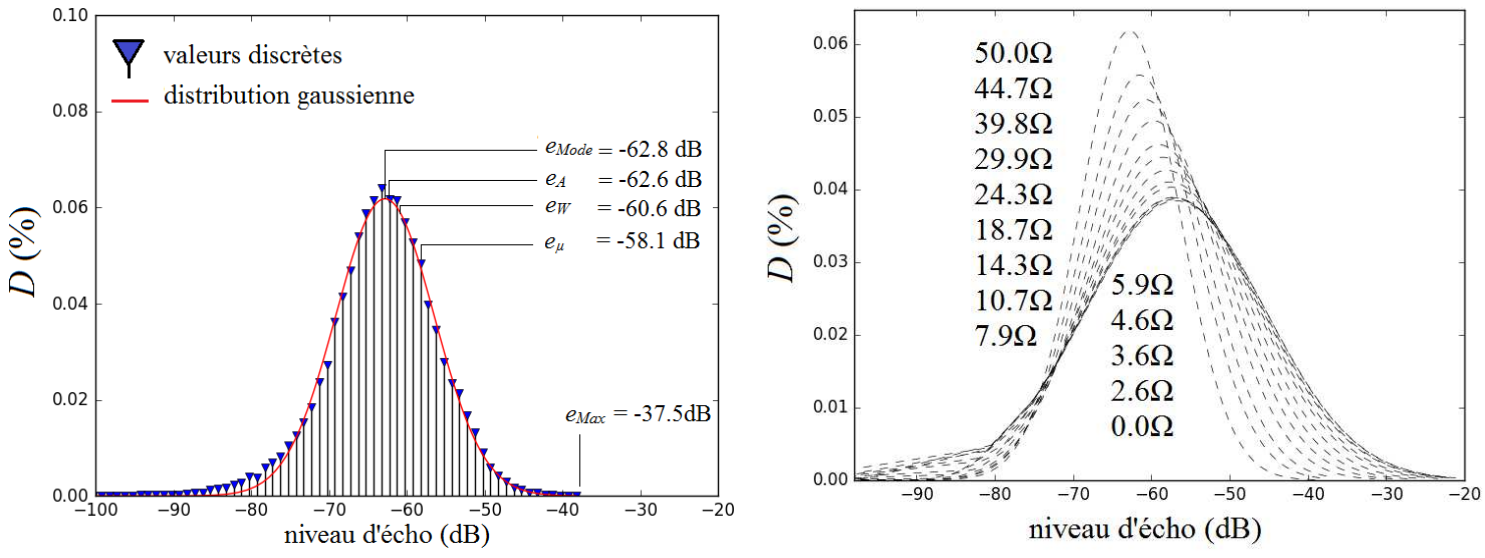
- L'estimateur e_{Mode} caractérisant le niveau d'écho à la valeur maximale de la distribution (appelé *mode* de la distribution). Cet estimateur est donné par l'expression $e_{mode} = \exp(\mu - \sigma^2)$.

- L'estimateur e_μ caractérisant le décalage de la distribution. Cet estimateur est donné par l'expression : $e_\mu = \exp(\mu)$.

La valeur de l'impédance Z_L augmente avec les niveaux d'écho du mode de détection et l'on observe un décalage ainsi qu'un étalement de la distribution vers les niveaux d'écho élevés. Cette modification de la distribution est visible sur la Figure 56 (b) et traduit une modification des paramètres K, μ et σ. On propose alors de calculer la valeur des estimateurs de niveaux d'écho en fonction de l'impédance Z_L. Les estimateurs e_{Max}, e_A, e_W, e_{Mode} et e_μ en fonction de Z_L sont affichés sur la Figure 57 pour (a) un capteur positionné à 2,0m du radar et (b) un capteur positionné à 5,5m du radar. L'estimateur e_{Max} offre les meilleures performances en termes de sensibilité avec une pente α=-0,4dB/Ω. En revanche, un seuil minimal de détection est atteint à partir d'une valeur d'impédance Z_L=40Ω. Les quatre autres estimateurs peuvent alors s'avérer utiles car ils dépendent du niveau d'écho d'autres voxels autre que celui du niveau d'écho maximal, et détecter d'autres variations. Les meilleurs résultats en termes de dynamique pleine échelle sont obtenus avec l'estimateur e_μ, capable d'estimer l'impédance Z_L entre 2,6Ω et 50Ω avec une dynamique de 16,5dB à 2,0m et 10,8dB à 5,5m, une sensibilité α=-0,3dB/Ω et un coefficient de détermination R^2>0,99. On remarquera que la sensibilité α est indépendante de la distance d'interrogation. Seule l'interception β est modifiée (réduction d'environ 10dB), mais cette atténuation ne peut pas être due à la propagation des ondes en espace libre car un filtre de compensation intégré au radar est appliqué. Cette atténuation est peut-être provoquée par une condition en champ lointain non valide. En effet, l'antenne de transmission est grande par rapport à la longueur d'onde. Sa plus grande dimension est le diamètre de la parabole D=50cm pour une longueur d'onde λ=1,26 cm. La distance de Fraunhofer D_f à partir de laquelle on peut considérer une zone de propagation en champ lointain est donnée par l'expression :

$$D_f = \frac{2D^2}{\lambda} \tag{37}$$

Dans notre cas, D_f=39,6m. La zone de champ lointain est donc loin d'être atteinte. On est dans la région de Fresnel où l'atténuation du champ électrique possède un facteur supplémentaire en R^{-1}. Le filtre correctif intégré dans le radar ne suffit donc pas à corriger l'atténuation de la puissance.



(a) (b)

Figure 56. (a) Distribution discrète (triangles bleus) et continue (courbe rouge) des niveaux d'échos pour une valeur d'impédance du capteur Z_L=50Ω positionné à 2,0m, et (b) distributions gaussiennes calculées pour différentes valeurs d'impédances du capteur passif positionné à 2,0m.

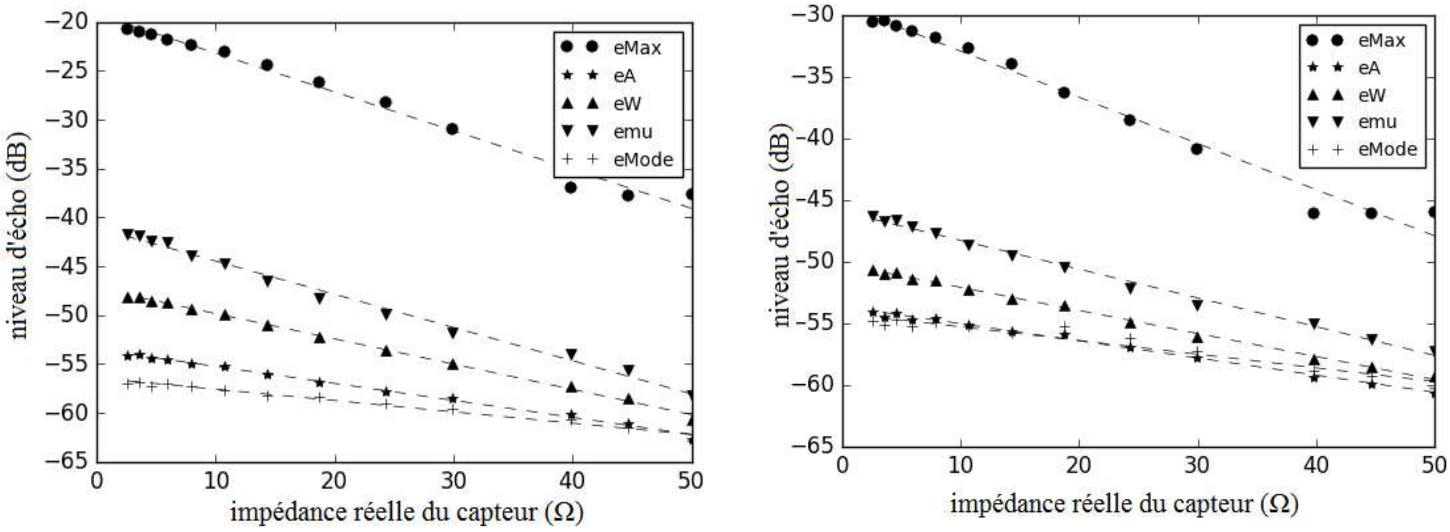


Figure 57. Estimateurs de niveau d'écho calculés en fonction de l'impédance réelle Z_L du capteur pour une distance d'interrogation de (a) 2,0m et (b) 5,5m.

3.4.6. Interrogation 3D à distance d'un capteur de température passif

3.4.6.1. *Caractéristiques de la thermistance et paramètres de mesure*

On cherche dans cette section à estimer la température à partir de l'interrogation à distance d'une thermistance RF du commerce. Cette thermistance (SUSUMU HTF0805) possède une résistance nominale de 50Ω qui varie en fonction de la température pour une fréquence maximale de 12GHz. Les caractéristiques de la thermistance sont affichées sur la Figure 58. Une adaptation manuelle de l'impédance d'entrée du composant est effectuée afin d'observer des variations significatives du coefficient de réflexion en fonction de la température. L'élément sensible est ensuite connecté à une ligne à retard de longueur électrique de 1,3m et d'une antenne cornet. On procède ici à un balayage en trois dimensions de l'antenne de transmission pour deux bandes de modulation différentes : (i) la première pour B=2GHz, correspondant à une résolution en profondeur d=7,5cm, (ii) la seconde pour B=250MHz, correspondant à une résolution en profondeur d=60cm. L'antenne du capteur passif est localisée à 2,4m du radar. On fait varier la température de la thermistance à l'aide d'un tapis chauffant et la température est mesurée à l'aide d'un thermocouple de référence (précision de ±1°C) pour cinq valeurs de température : 25°C, 33°C, 40°C, 49°C et 55°C. Le balayage 3D est alors effectué pour chacune de ces températures. Les paramètres des mesures sont reportés dans le Tableau 33.

Figure 58. Variation relative de la valeur de la résistance en fonction de la fréquence d'utilisation pour différentes températures. Extrait de la datasheet du composant *SUSUMU HTF 0805 series*.

interrogation d'un capteur de température passif	
système radar	DK-sR-1030e
fréquence porteuse	23,8 GHz
bande de modulation	2 GHz ou 250MHz
résolution en profondeur	7,5 cm ou 60cm
(Tx) antenne	antenne parabolique [a]
(Rx) antenne	1x4 antennes patches [a]
scan en azimut	-10° à 10°
résolution en azimut	2°
scan en élévation	-10° à 10°
résolution en élévation	2°
paramètres du capteur de température passif	
distance du radar	2,4m
températures étudiées	25°C, 33°C, 40°C, 49°C et 55°C
antenne	antennes cornet 20dBi
longueur électrique de la ligne à retard	1,3m

[a] caractéristiques disponibles en annexe

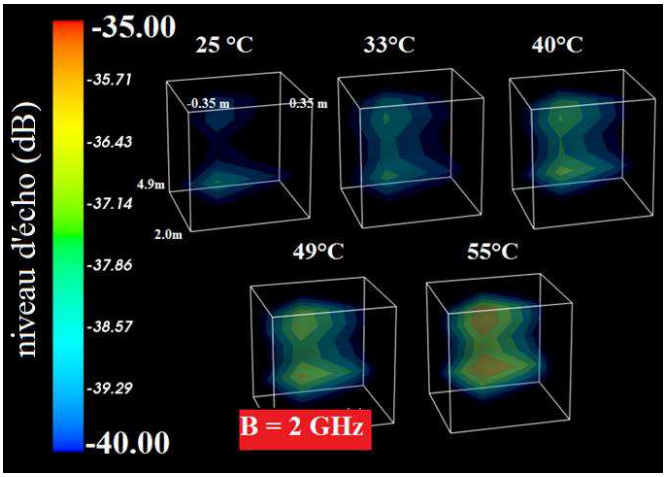
Tableau 33. Paramètres pour la mesure de la température d'un capteur passif.

3.4.6.2. *Affichage 3D des niveaux d'écho radar en fonction de la température*

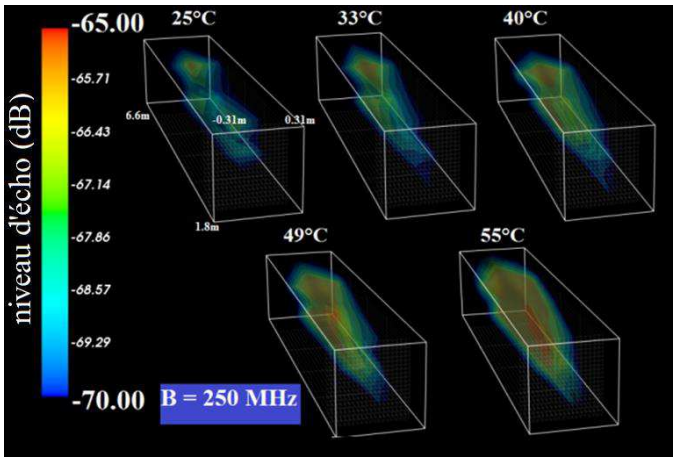
Le mode de détection de capteur, où est contenue l'information sur la température, se situe à une distance d'interrogation de 3,7m (c'est-à-dire la distance du mode de structure à laquelle on additionne la longueur électrique de la ligne à retard). On calcule alors les isosurfaces dans un volume d'étude centré autour de la position du mode de détection. Les niveaux d'écho en 3D sont affichés sur la Figure 59 pour une bande de modulation (a) B=2GHz et (b) B=250MHz. Lorsque la température augmente, le volume de l'écho radar augmente en conséquence. Ce volume, liée à la résolution volumique v_{Res}, dépend de la bande de modulation et donc de la résolution en profondeur (voir équations (6) et (14)). On remarque nettement la perte en résolution de l'image lorsque l'on diminue la bande de modulation. Afin de caractériser la variation en température, l'estimateur e_{Max} et l'estimateur volumique Vol_{v_k} défini dans l'équation (28) avec $v_k = e_{Max}$-5dB, c'est-à-dire un seuil de niveau d'écho 5dB en dessous de la valeur maximale d'écho. Les valeurs de ces estimateurs sont reportées dans le Tableau 34. L'estimateur e_{Max} possède une sensibilité α=0,16dB/°C avec une dynamique pleine échelle de 5dB pour une variation de température ΔT=30°C. Cette sensibilité est dégradée lorsque l'on diminue la bande de modulation : la sensibilité pour B=250MHz est égale à α=0,09dB/°C. L'utilisation de la bande de modulation la plus large

possible est donc préférable pour de meilleures estimations. Ce résultat se confirme en analysant la variation relative de l'estimateur Vol_{v_k}. Entre 25°C et 55°C, Vol_{v_k} augmente de 285% pour B=2GHz contre une augmente de seulement 132% pour B=250MHz.

Malgré la faible dynamique pleine échelle offerte par cette thermistance, ces résultats se révèlent encourageant pour le développement d'une méthode d'interrogation à distance de capteurs passifs réels. Il suffit désormais de designer des capteurs passifs radiofréquences à 23,8GHz pour espérer obtenir de meilleures sensibilités.



(a)



(b)

Figure 59. Représentation en 3D des niveaux d'écho par isosurfaces du mode de détection du capteur passif pour différentes températures, et avec une bande de modulation (a) *B*=2GHz et (b) *B*=250MHz

T(°C)	e_{Max} (dB)		Vol_{v_k} (cm^3)	
	B=2GHz	B=250MHz	B=2GHz	B=250MHz
25	-33,1	-57,7	1,4E2	82E3
33	-32,3	-57,2	2,2E2	98E3
40	-31,0	-56,9	3,2E2	125E3
49	-30,2	-53,5	3,7E2	149E3
55	-28,7	-53,0	5,4E2	191E3

Tableau 34. Valeurs des estimateurs e_{Max} et Vol_{v_k} en fonction de la température et pour différentes bandes de modulation.

3.4.7. Interrogation 3D à distance d'un capteur passif microfluidique

3.4.7.1. *Design du capteur et paramètres de mesure*

Le capteur passif interrogé dans cette section se base sur le design déjà étudié au laboratoire [173] d'un canal microfluidique traversant une ligne de transmission microruban. L'eau présente dans le canal microfluidique possède un coefficient de dilatation dépendant de la température. Une variation de la température provoque alors un changement de position du ménisque au sein du canal. La largeur du canal peut donc être considérée comme une capacité dépendante de la température. Ce canal est fabriqué sur un substrat en verre de type B33 d'une épaisseur de 525µm, métallisé de part et d'autre avec de l'aluminium de 0,5µm d'épaisseur. La longueur totale du canal est de 1mm. Une vue du dessus de ce capteur est disponible sur la Figure 60. La ligne microruban est adaptée à 50Ω et possède une longueur de 1,4cm. Le premier port est connecté à une ligne de 50Ω, le second port à une ligne à retard d'une longueur électrique de 1,8m. Un système de pression externe contrôle la position du ménisque de l'eau à l'intérieur du microcanal.

La position du ménisque à l'intérieur du canal microfluidique peut alors être retrouvée par une interrogation à distance par radar FM-CW, comme il l'a déjà été reporté dans [173]. En revanche, le dépointage du lobe principal de l'antenne de transmission suffit à dégrader significativement la sensibilité de la mesure. Comme pour les sections précédentes, on propose une interrogation du capteur par un balayage 3D pour retrouver le niveau d'écho maximal e_{Max}. L'interrogation est effectuée en laboratoire pour cinq positions du ménisque : 0mm (le canal est vide), 0,2mm, 0,4mm, 0,8mm et 1mm (le canal est rempli). Le capteur est installé sous une station sous pointes, comme indiqué sur la Figure 61, et l'antenne cornet connectée au capteur se trouve à une distance d'interrogation de 2,5m. L'ensemble des paramètres de mesure est reporté dans le Tableau 35.

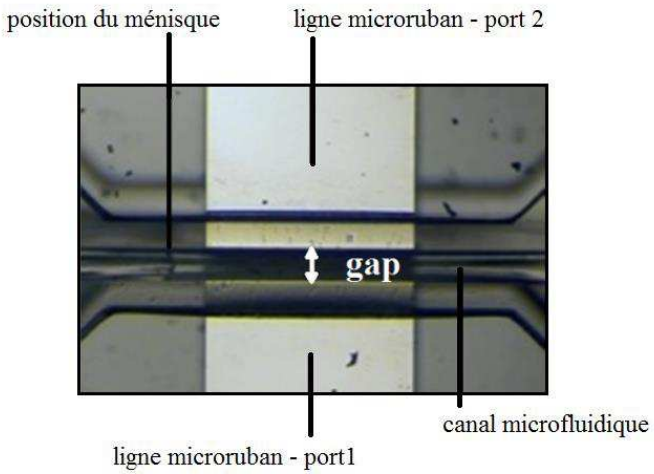


Figure 60. Vu du dessus du capteur de température passif microfluidique fabriqué au laboratoire

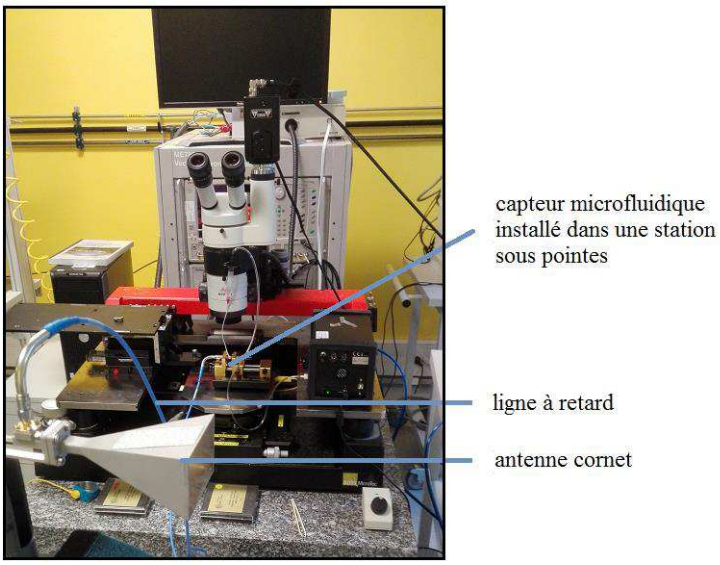


Figure 61. Installation du capteur interrogé à distance en laboratoire

interrogation d'un capteur passif microfluidique	
système radar	DK-sR-1030[e]
fréquence porteuse	23,8 GHz
bande de modulation	2 GHz
résolution en profondeur	7,5 cm
(Tx) antenne	antenne parabolique [a]
(Rx) antenne	1x4 antennes patches [a]
scan en azimut	-10° à 10°
résolution en azimut	1°
scan en élévation	-10° à 10°
résolution en élévation	1°
paramètres du capteur passif microfluidique	
distance du radar	2,5m
positions du ménisque (%)	0, 25, 50, 75 et 100
antenne	antenne cornet 20dBi
longueur électrique de la ligne à retard	1,8m

[a] caractéristiques disponibles en annexe

Tableau 35. Paramètres pour la mesure de la position du ménisque d'un capteur passif microfluidique

3.4.7.2. *Affichage 3D et estimation de la position du ménisque*

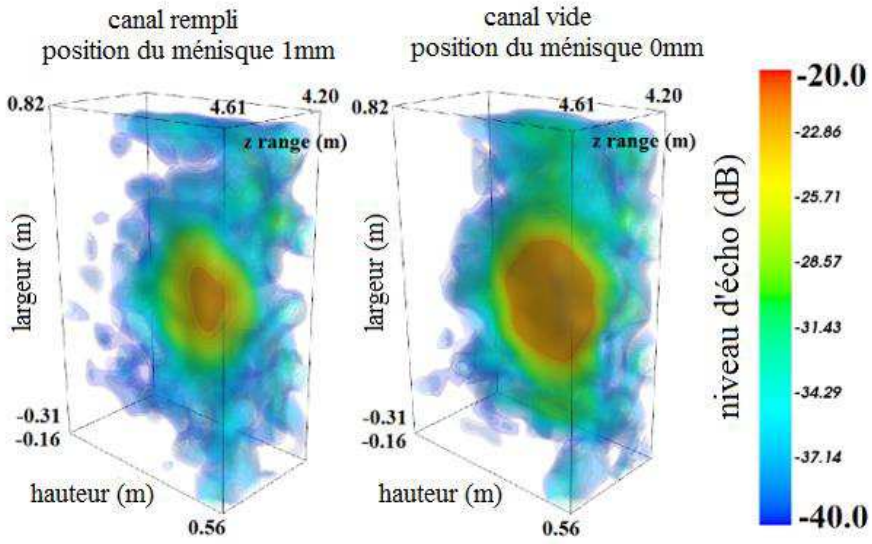
Les niveaux d'écho analysés sont localisés dans un volume d'étude où se trouve le mode détection du capteur microfluidique, à une distance d'interrogation de 4,3m. L'image 3D ainsi obtenue est composée de 33624 voxels d'une résolution volumique cartésienne v_C=11,4cm^3 (voir équation (19)). La représentation avec isosurfaces du niveau d'écho du mode de détection est affichée sur la Figure 62 pour (a) le canal microfluidique rempli d'eau et (b) le canal microfluidique vide. Lorsque le canal est vide, le nombre de voxels dont le niveau d'écho est supérieur à un seuil donné (-20dB ici) est plus important que lorsque le canal microfluidique est rempli. Ce résultat est attendu car le canal se comporte comme une capacité mise en série variant de 100fF (canal rempli) à 150fF (canal vide). Lorsque la capacité est plus faible, davantage de puissance microonde est transmise vers la charge adaptée d'impédance 50Ω, et qui se retrouve ensuite dissipée dans cette charge. Par conséquent, moins de puissance est rétrodiffusée par le capteur. Cette variation de la capacité est fonction de la position du ménisque de l'eau à l'intérieur du

canal. L'interrogation 3D proposée permet de retrouver le voxel ayant le niveau d'écho maximal dans l'ensemble du volume d'étude, représenté par l'estimateur e_{Max}. Cet estimateur représente la position du ménisque dépendante de la température, affiché sur la Figure 63. Le modèle linéaire appliqué sur l'estimateur possède un coefficient de détermination R^2=0,932. La pente ou la sensibilité de e_{Max} est égale à α=6dB/mm. Il est possible de représenter le niveau d'écho maximal en fonction de la capacité du canal microfluidique et on obtient une sensibilité α=0,12dB/pF quatre fois plus élevée que celle obtenue dans où l'interrogation a été effectuée dans une seule direction d'interrogation [173].

Il est possible de calculer la précision de l'estimateur représentant la plus petite variation de position du ménisque mesurable notée δL. Cette précision est de δL=40µm à cette distance d'interrogation en analysant l'écart-type de e_{Max} sur un nombre répété de mesures. La plus petite variation de température mesurable est alors donnée par la relation :

$$\delta T = \frac{S_c}{\alpha_d \, V_{tank}} \delta L \tag{38}$$

Le paramètre α_d désigne le coefficient de dilatation de l'eau, V_{tank}=3mm² le volume du réservoir cylindrique où est contenue l'eau et S_c la surface transverse du canal microfluidique. Le coefficient de dilatation de l'eau varie de 247ppm/°C à 385ppm/°C entre 24,0°C et 40,0°C. On considère pour simplifier dans un premier temps les calculs, de prendre α_d constant pour une température de 24°C. Par conséquent, la plus petite variation de température mesurable est δT=0,8°C pour une dynamique pleine échelle comprise entre 24°C et 37,6°C, c'est-à-dire 13,6°C. La précision de la mesure est donc de 6%, ce qui est une amélioration significative des précédents travaux, où la précision était de 14%



(a) (b)

Figure 62. Représentation en 3D des niveaux d'écho par isosurfaces du mode de détection du capteur passif microfluidique pour le canal (a) rempli d'eau et (b) vide.

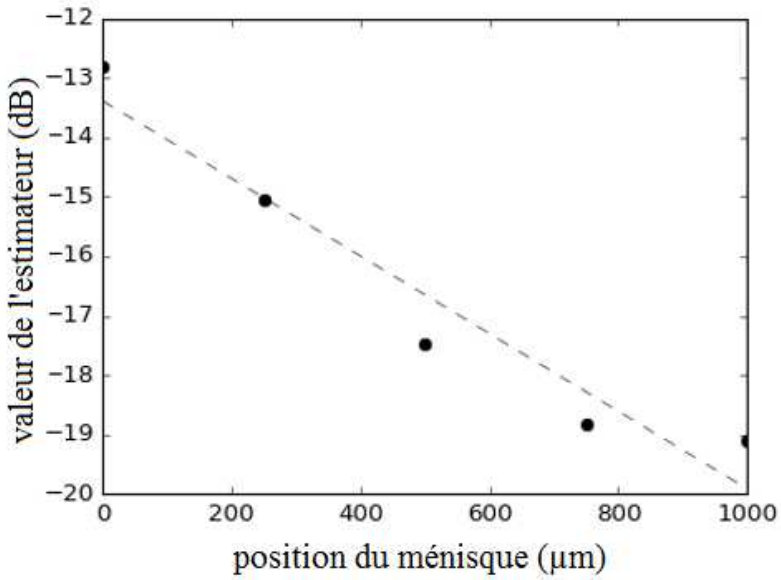


Figure 63. Valeur de l'estimateur e_{Max} en fonction de la position du ménisque

3.4.8. Interrogations 3D à longue distance d'un capteur passif d'humidité

3.4.8.1. *Description du système radar et du capteur passif d'humidité*

Comme pour les autres interrogations de capteurs, le radar FM-CW à 23,8GHz (IMST GmbH, modèle DK-sR-1030e) transmet un chirp, où la fréquence est modulée triangulairement. L'antenne de transmission utilisée est une antenne parabolique d'un gain de 33,5dBi et d'un angle d'ouverture de 2°. La rotation de l'antenne en azimut et en élévation est effectuée avec un pas angulaire de 1°. Une tourelle mécanique (Pelco PT570P) permet la rotation automatique de l'antenne par ordinateur, et reste synchronisée avec la transmission du chirp par le radar. Le signal rétrodiffusé est reçu par deux réseaux de 1x5 antennes patches séparées d'une distance correspondant à la moitié de la longueur d'onde de la fréquence centrale du chirp. Cette distance de séparation permet de calculer la direction d'arrivée des signaux rétrodiffusés. Le gain de l'antenne de réception est de 8,6dBi et avec des angles d'ouvertures de 60° et 25° respectivement en azimut et en élévation. Les antennes de réception et de transmission sont positionnées en polarisations linéaires orthogonales, afin de profiter des avantages de la polarisation croisée offerte par un capteur d'humidité imprimé de type Van-Atta. Une photographie du système de mesure est disponible sur la Figure 64.

Le capteur passif d'humidité utilisé pour les mesures est un réseau d'antennes Van-Atta de dimensions 74mm² par 74mm². Il est constitué de 5 réseaux linéaires d'antennes patches disposés côte-à-côte et imprimés sur un substrat flexible à bas coût (Kapton HN polyimid). La structure Van-Atta à la propriété de retransmettre les ondes incidentes dans la même direction d'interrogation. Contrairement à un réseau d'antennes Van-Atta classique, deux réseaux d'antennes linéaires connectés entre eux sont nécessaires pour que la structure rétrodiffuse les ondes incidentes en polarisation croisée. Comme reporté dans [170], [174], ce capteur possède une SER isotrope, ainsi qu'une robustesse face à des déformations. L'ensemble de ces caractéristiques confère à ce capteur une forte détectabilité sur une large gamme d'angles d'incidence. L'utilisation du radar FM-CW et de la polarisation croisée du champ électromagnétique entre la transmission et la réception facilite la détection du capteur passif en augmentant le rapport signal sur bruit. De plus, le plan de masse du capteur permet un positionnement de ce dernier sur des objets métalliques sans dégrader ses propriétés de rétrodiffusions. Une photographie du capteur utilisé est disponible sur la Figure 65 (a).

La permittivité du Kapton est très sensible à l'humidité, où une faible variation génère un décalage en de la fréquence de résonance du capteur [170]. D'après la datasheet du substrat, la permittivité relative du Kapton en fonction de l'humidité relative (RH) est donnée par l'expression $\varepsilon_r = 3 + 0{,}008RH$. Un design approprié de ce capteur passif à 24GHz peut fournir une variation mesurable du niveau d'écho. Pour démontrer les propriétés uniques de ce capteur passif, des mesures en milieu fermé seront effectuées le long d'un couloir de 60m de long, comme montré sur la Figure 65 (b). En comparaison avec des mesures faites à l'extérieur en milieu ouvert ou non réflectif, les mesures en milieu fermé peuvent générer des multiples trajets et diminuer le rapport signal sur bruit. Ces phénomènes sont généralement dus à la présence d'objets réfléchissants, comme des tuyaux, des grilles métalliques ou des murs. Les mesures sont effectuées dans ce type d'environnement pour valider l'interrogation dans un milieu non-idéal.

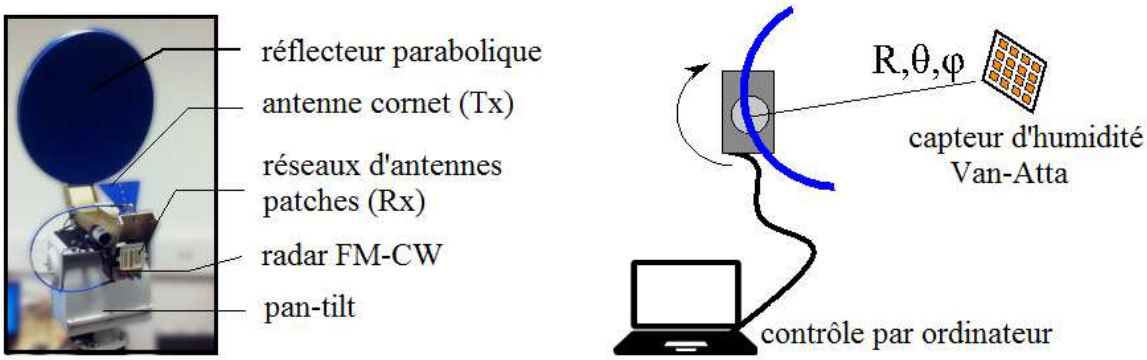


Figure 64. (a) Système d'interrogation radar par radar FM-CW. Les antennes Tx et Rx sont polarisées linéairement orthogonalement. (b) Le radar et le pan-tilt sont synchronisés via un contrôle par ordinateur.

Figure 65. (a) Capteur passif d'humidité Van-Atta fabriqué sur Kapton flexible. (b) Mesures effectuées à longue distance (60m) dans un couloir.

3.4.8.2. *Interrogation radar du capteur passif d'humidité pour trois balayages différents*

Le principe du balayage radar multi-dimensionnel (en 2D ou en 3D) est d'analyser les signaux rétrodiffusés du capteur passif sous différents angles d'interrogation. Les spectres de battement sont enregistrés pour ces différents angles afin obtenir des niveaux d'écho en trois dimensions et contenus dans des voxels (ou bien des pixels dans le cas d'un balayage uniquement en 2D). Le niveau d'écho d'un voxel peut contenir une information concernant l'humidité relative mesurée par le capteur passif. Trois balayages mécaniques sont considérés ici pour l'interrogation à distance de l'humidité relative :

- un balayage sphérique effectué par un radar stationnaire, déjà décrit dans la section 3.2.3
- un balayage cylindrique effectué par un radar se déplaçant par pas latéraux.

- un balayage de type « SAR », où le radar effectue un mouvement linéaire à une vitesse constante.

Ces trois balayages génèrent des résolutions volumiques différentes. La première résolution volumique v_{Res} a déjà était définie dans l'équation (14). La résolution volumique v_{Cyl} du balayage cylindrique et la résolution surfacique du balayage de type SAR sont données par les expressions :

$$v_{Cyl} = R \cdot d \cdot d_x \cdot d_\varphi \tag{39}$$

$$s_{SAR} = d \cdot v_c \cdot PRI \tag{40}$$

Le paramètre R représente la distance d'interrogation, d_x le pas latéral, v_c est la vitesse du radar supposée constante, et PRI le temps de répétition défini dans la section 3.2.1. Une illustration des différentes résolutions volumiques sont affichées sur la Figure 66.

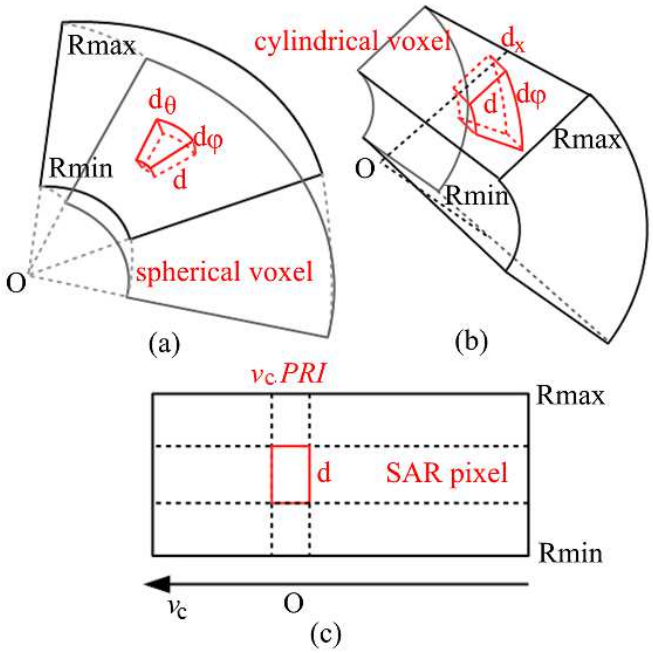


Figure 66. Voxel généré par (a) un balayage sphérique effectué par un radar stationnaire, (b) un balayage cylindrique effectué par un radar se déplaçant d'un pas latéral d_x après chaque balayage en élévation et (c) un balayage de type « SAR » obtenu par un mouvement uniforme du radar à une vitesse constante v_c. Le point O représente la position du radar.

3.4.8.3. *Interrogation radar du capteur passif à 1,3m et estimation de l'humidité relative.*

L'interrogation à distance est d'abord effectuée pour étudier la linéarité et la dynamique pleine échelle du capteur passif d'humidité. Le capteur est alors placé dans une boîte en Rohacell avec une sonde d'humidité de référence (Fisherbrand 90954 d'une précision de ±5%). La boîte possède une faible permittivité relative (ε_r proche de 1) pour minimiser l'influence des réflexions électromagnétiques. L'humidité ambiante à l'intérieur de la boîte est augmentée en chauffant une éponge humide. L'humidité et la température sont enregistrées à la fin et au début de chaque mesure. Pour cette première expérience, le capteur est positionné à 1,3m du radar. Le balayage sphérique est effectué avec des angles de ±10° en azimut et en élévation, nécessitant l'enregistrement de 441 spectres de battements (environ 3960 voxels).

L'humidité relative peut être obtenue à distance à partir d'estimateurs de niveau d'échos. Trois des estimateurs déjà définis dans les sections précédentes sont utilisés ici : e_{Max}, e_A et e_S. L'estimateur e_S est défini ici à partir d'une distribution gaussienne asymétrique $\mathcal{D}$ donnée par l'équation (24) et rappelée ici:

$$\mathcal{D}(v) = \frac{K}{\sigma\sqrt{2\pi}} exp\left\{\frac{-(v-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \cdot \mathcal{G}\left(\gamma \cdot \frac{(v-\mu)}{\sigma}\right)$$
$$avec\ \mathcal{G}(x) = \frac{1}{2}\left(1 + erf\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right)\right) \quad (41)$$

$\mathcal{D}(e_S) = N_{e_S}$, avec N_{e_S} le nombre de voxels associés à e_S. Les paramètres K, μ, σ et γ de la loi $\mathcal{D}$ ont été calculés à partir d'une interpolation de la distribution discrète, et la loi de distribution a été validée à partir d'un test de KS ayant des valeurs-p supérieures à 95%. Pour mettre en évidence le sens physique de l'estimateur e_S, la distribution $\mathcal{D}$ est affichée sur la Figure 67. On peut observer que le profil de la distribution varie en fonction de RH, ce qui modifie la valeur de e_S. L'estimateur e_S dépend du nombre de voxels mesurés et un faible nombre de voxels implique une valeur élevée de e_S et une dynamique pleine échelle élevée, mais au dépend de la précision de la mesure. La condition optimale (si elle existe) de la valeur N_{e_S} est une précision la plus fine possible tout en gardant une dynamique pleine échelle aussi élevée que celle de l'estimateur e_{Max}.

Les estimateurs e_{Max}, e_A, et e_S sont calculés pour des valeurs de RH variant de 38% à 69%, et sont affichés sur la Figure 68. Les paramètres clés des estimateurs (dynamique pleine échelle, sensibilité et linéarité) sont reportés dans le Tableau 36. e_S a été calculé pour N_{e_S}=4 voxels et une sensibilité de -0,6dB/% est obtenue, plus haute que celle de e_{Max} (-0,4dB/%). Afin d'améliorer la précision du modèle linéaire ε_{lin} et la linéarité de l'estimateur e_S, une correction est appliquée en utilisant la linéarité de l'estimateur e_A. Pour effectuer cette correction, on définit les paramètres α_A et α_S les sensibilités respectives des estimateurs e_A et e_S, ainsi que β_A et β_S les interceptions du modèle linéaire. Par conséquent, les estimateurs e_A et e_S peuvent être approximées par les expressions $e_A = \alpha_A RH + \beta_A$ et $e_S = \alpha_S RH + \beta_S$. Pour RH>50%, on définit l'estimateur e_{SC} corrigé par l'expression :

$$e_{SC} = \frac{\alpha_S}{\alpha_A}(e_A - \beta_A) + \beta_S \quad (42)$$

À partir de cette expression, l'estimation de RH est obtenue avec une plus faible erreur sur le modèle linéaire (0,7dB à la place de 0,9dB) et un coefficient de détermination plus élevé (R^2=0,98). Par conséquent, l'analyse statistique des estimateurs comme e_S offre de nombreux avantages et permet l'amélioration de la sensibilité sans trop impacter la précision sur le modèle linéaire.

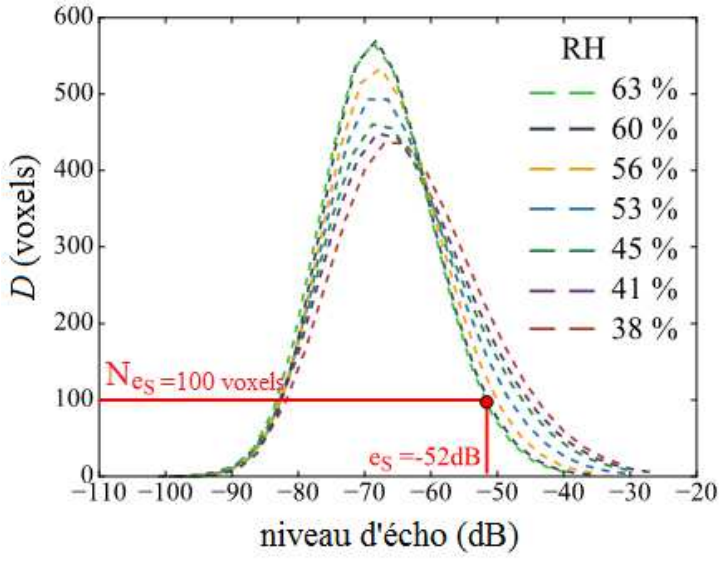


Figure 67. Distribution $\mathcal{D}$ du niveau d'écho pour différentes valeurs d'humidité relatives mesurées à partir du capteur passif Van-Atta. L'estimateur e_S est affiché pour RH=63% tel que $\mathcal{D}(e_S)$=100 voxels.

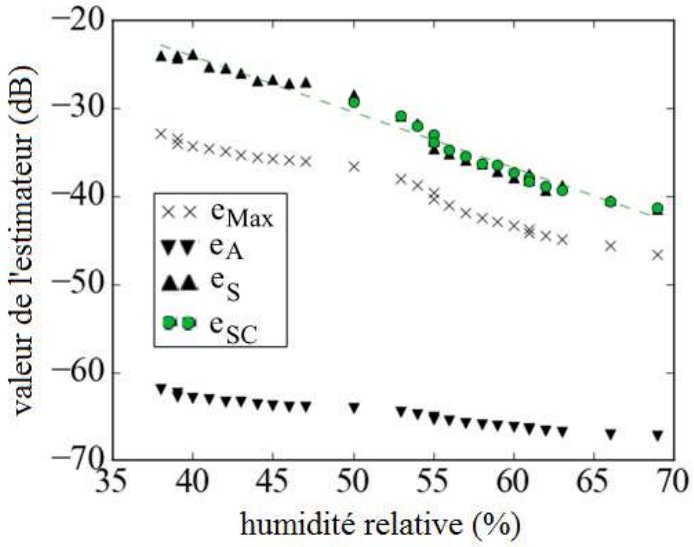


Figure 68. Estimateurs e_{Max}, e_A, e_S et e_{SC} en fonction de l'humidité relative mesurée par le capteur passif de type Van-Atta à une distance d'interrogation de 1,3m.Une correction (points verts) est apporté sur l'estimateur $e_S(N_{es}=4$ voxels) en utilisant les propriétés linéaires de l'estimateur e_A.

Caractéristiques	e_{Max},	e_A	e_S **(4voxels)**	e_{SC} **(4voxels)**
dynamique pleine échelle (dB)	13,7	4,7	17,0	17,0
R^2	0,97	0,98	0,97	0,98
pente α (dB/%)	-0,4	-0,1	-0,6	-0,6
ε_{lin} (%)	1,7	2,0	1,5	1,1

Tableau 36. Performance des estimateurs pour un capteur passif Van-Atta interrogé à 1,3m avec un balayage sphérique

3.4.8.4. *Interrogation radar du capteur passif à 10m et combinaison de balayages.*

Comme remarqué dans la section 3.2.3.1, la résolution volumique sphérique v_{res} augmente avec la distance d'interrogation R et des dégradations de l'estimation de l'humidité peuvent survenir à cause de la présence de clutters. Pour illustrer ces propos, le capteur est placé à 10m du radar et un balayage sphérique est effectué avec des angles de ±5° en azimut et en élévation. Le volume d'étude considéré comporte 270 voxels et la visualisation en 3D des niveaux d'écho est disponible sur la Figure 69 pour RH=34%. Au sein du volume d'étude sont inclus les niveaux d'écho du capteur Van-Att, ainsi que des échos parasites (clutters) qui viennent perturber l'estimation de l'humidité relative. Si ce clutter n'est pas retiré, l'estimation de l'humidité est erronée, et l'on obtient un estimateur que l'on notera $e_{Max\ ERR}$. Supposons que l'on connaisse la position exacte du niveau d'écho du capteur passif. L'estimateur e_{Max} est alors calculé à partir d'un volume restreint excluant les clutters. On notera cet estimateur $e_{Max\ OPT}$. Une autre solution pour estimer l'humidité relative est d'effectuer plusieurs balayages radars azimut/élévation successifs en effectuant une translation d_x du radar perpendiculairement à la direction d'interrogation. Il s'agit donc d'effectuer une combinaison de balayages azimut/élévation et cylindriques, et d'obtenir l'information de rétrodiffusion dans de multiples directions d'interrogation. On définit alors l'estimateur $e_S(n)$, où $n+1$ désigne le nombre de translations linéaires effectuées par le radar (et donc entre une distance transverse allant de 0m à nd_x de largeur). On propose ici d'effectuer 5 translations (donc n=4) d'un pas d_x=1cm. On a donc 5 fois plus de voxels enregistrés (environ 2700). Les estimateurs $e_{Max\ ERR}$, $e_{Max\ OPT}$ et

$e_S(n=4)$ pour $N_{es}=4$ voxels sont affichées sur la Figure 70 en fonction de l'humidité relative variant de 34% à 74%. Comme on pouvait le prévoir, l'estimateur $e_{Max\ ERR}$ est erroné par la présence des clutters qui sont caractérisés par un niveau d'écho constant de -33dB. Si la position du capteur est connue, l'estimateur $e_{Max\ OPT}$ offre de bonnes performances avec une haute linéarité ($R^2=0,97$) et une dynamique pleine échelle de 9,5dB. Si la position du capteur n'est pas connue, les effets indésirables des clutters sont atténués, comme le montre les performances de l'estimateur $e_S(n=4)$. L'estimateur possède une linéarité correcte avec une coefficient de détermination $R^2=0,93$, et une erreur commise sur le modèle linéaire $\varepsilon_{lin}=4,0\%$. L'erreur commise est moins bonne que celle obtenue avec $e_{Max\ OPT}$ (2,5%), mais le fait de pouvoir obtenir une variation des niveaux d'écho détectable en présence de clutters reste intéressant. L'impact sur le nombre n+1 d'étapes effectuées pour permettre la combinaison de balayages 3D a aussi un impact sur l'estimation, comme le montre les caractéristiques des estimateurs qui se dégradent lorsque n diminue (voir le Tableau 37).

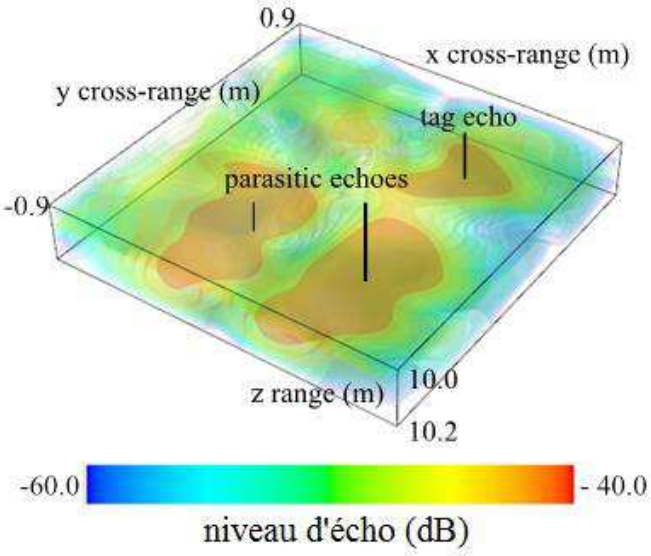


Figure 69. Niveaux d'écho en 3D représentés par des isosurfaces pour des distances d'interrogation comprises entre 10,0 et 10,2m. Ce volume comprend les niveaux d'écho du capteur passif (*tag echo*) ainsi que des clutters (*parasitic echoes*)

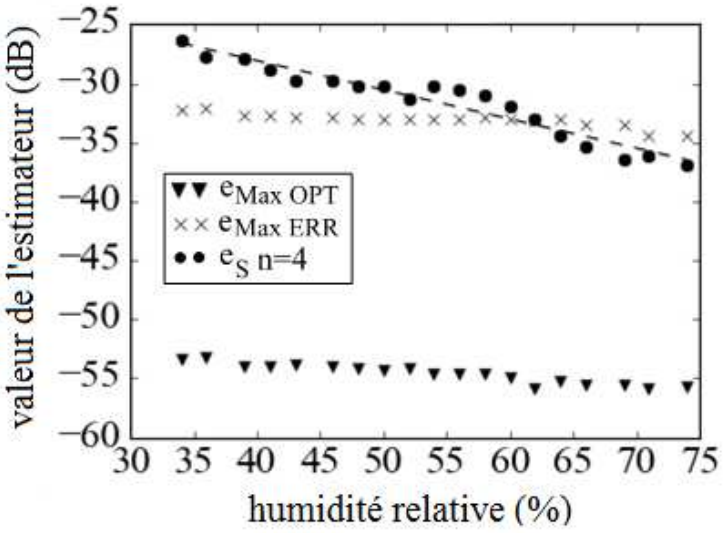


Figure 70. Estimateurs $e_{Max\ ERR}$, $e_{Max\ OPT}$ et $e_S(n=4)$ en fonction de l'humidité relative mesurée à partir d'un capteur passif de type Van-Atta interrogé à une distance de 10,0m. L'estimateur $e_S(n=4)$ est calculé à partir de la combinaison de balayages azimut/élévation et cylindriques.

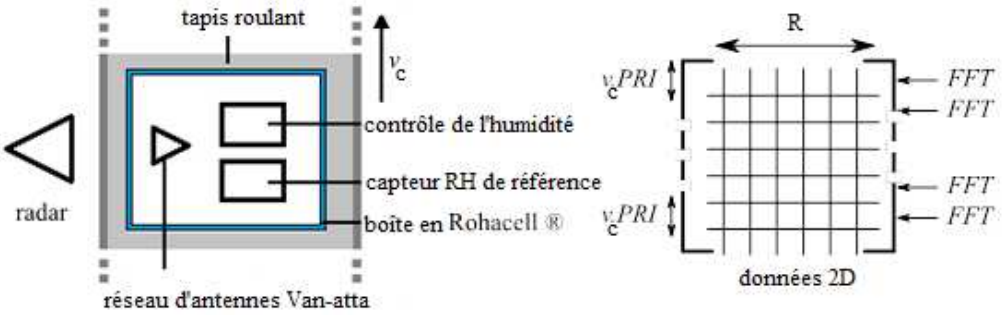
caractéristiques	$e_{Max\ OPT}$ sans clutter	$e_S(n=4)$ avec clutter	$e_S(n=3)$ avec clutter	$e_S(n=2)$ avec clutter	$e_S(n=1)$ avec clutter	$e_S(n=0)$ avec clutter
dynamique pleine échelle (dB)	9,5	10,5	10,6	10,0	10,9	10,3
R^2	0,97	0,93	0,93	0,93	0,92	0,88
pente α (dB/%)	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2
ε_{lin} (%)	2,5	4,0	4,0	4,0	4,5	5,0

Tableau 37. Performance des estimateurs pour un capteur passif Van-Atta interrogé à 10,0m pour différentes combinaisons de balayage.

3.4.8.5. *Interrogation radar du capteur passif à 2,1m par un balayage de type « SAR »*

Dans cette section, on analyse les possibilités d'effectuer d'interroger le capteur passif Van-Atta lorsque celui est en mouvement, en le plaçant sur un tapis roulant. Le capteur a une vitesse constante v_c=3,8cm.s^{-1} et le système radar est stationnaire, comme indiqué sur la Figure 71 (a). Le temps de répétition PRI du radar est de 100ms et le temps de montée de la rampe de modulation est T=5ms. Le rapport cyclique est donc égal à T/PRI=5%. D'après les paramètres des antennes et du radar, on peut considérer une approximation *stop and go* et négliger les effets Doppler [175]. Les données 2D de type « SAR » sont alors générées en appliquant une FFT sur le signal temporel à chaque intervalle de temps PRI comme indiqué sur la Figure 71 (b). Les images radar en deux dimensions pour différentes valeurs d'humidité relative sont affichées sur la Figure 72. Sur cette figure, les ordonnées correspondent à la distance d'interrogation, tandis que les abscisses correspondent au temps de mesure de résolution PRI, ou bien la largeur de résolution spatiale PRI×v_c =3,8cm. Les niveaux d'écho situés à une distance de 2,1m sont principalement générés par le capteur passif d'humidité. Pour RH=20%, la rétrodiffusion du capteur est maximale et est associée au plus haut niveau d'écho mesuré. Pour RH=56%, la fréquence de résonance du réseau d'antennes patches du capteur passif se trouve hors de la bande radar. Par conséquent, un faible niveau d'écho radar est mesuré. On peut de plus observer des hauts niveaux d'écho à 3m générés par les clutters (mur, équipement du laboratoire) générés par l'environnement. Ces échos indésirables ne doivent pas être pris en compte dans l'estimation de l'humidité relative. D'après l'équation (40), la surface de résolution est s_{SAR}=28,5cm². Cette résolution dépend du temps de répétition PRI, et de la vitesse du capteur lorsque le radar est stationnaire (ou inversement de la vitesse du radar si le capteur est stationnaire). Les valeurs de l'estimateur e_{Max} sont alors calculées et reportées sur le Tableau 38 pour différents temps de répétition pour des humidités relatives allant de 20% à 56%. Une bonne linéarité de l'estimateur est observée (coefficient de détermination R^2=0,99), avec une dynamique pleine échelle de 9,0dB. La linéarité et la précision se dégrade lorsque le PRI augmente.

D'après l'ensemble des résultats reportés dans les Tableau 36, Tableau 37 et Tableau 38, on peut observer que la performance des estimateurs dépend en partie de la distance d'interrogation. Plus le capteur est proche du radar, plus la sensibilité est importante. Ce phénomène est principalement dû à une diminution du rapport signal sur bruit lorsque la distance d'interrogation augmente. Néanmoins, on peut retrouver l'humidité relative à partir de calibration et d'un bilan de liaison. Indépendamment de la distance d'interrogation, la précision des estimateurs peut être améliorée : pour les combinaisons de balayages, la linéarité est augmentée avec le nombre n+1 de translations effectuées. Pour le balayage de type « SAR », la sensibilité et la linéarité sont améliorables en réduisant le temps de répétition PRI du radar.



(a) (b)

Figure 71. (a) Capteur passif Van-Atta placé sur un tapis roulant en mouvement à une distance de 2,1m du radar stationnaire. Une mesure équivalente consiste à déplacer latéralement le radar à une vitesse constante et laisser le capteur immobile. (b) Données 2D générées par la translation du capteur à une vitesse constante v_c.

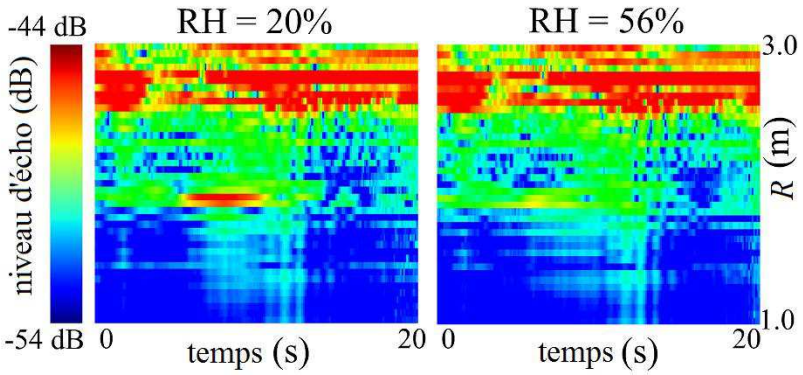


Figure 72. Affichage en 2D des niveaux d'écho générés par le capteur Van-Atta interrogé à une distance de 2,1m pour RH=20% (à gauche) et RH=56% (à droite). Les hauts niveaux d'écho à 3m sont générés par l'environnement.

caractéristiques	e_{Max} PRI=0,1s	e_{Max} PRI=1,0s	e_{Max} PRI=2,5s	e_{Max} PRI=3,0s
dynamique pleine échelle (dB)	9,0	9,4	10,5	10,5
R^2	0,99	0,98	0,94	0,86
pente α (dB/%)	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2
ε_{lin} (%)	1,0	2,0	2,5	6,0

Tableau 38. Performance de l'estimateur e_{Max} pour différents temps de répétition pour un capteur passif d'humidité Van-Atta mobile interrogé à 2,1m.

3.4.8.6. *Interrogation radar longue distance du capteur passif (58m)*

Le réseau d'antennes Van-Atta est désormais positionné à une distance de 58,0m du radar dans un environnement d'humidité relative RH=48%. Une photographie de l'installation est disponible sur la Figure 65 (b). Le radar utilisé est limité à un échantillonnage N=1024 échantillons du signal durant la période *T* de la rampe montante. Par conséquent, il n'est plus possible d'utiliser une bande de modulation *B*=2GHz pour mesurer des niveaux d'échos situés à cette distance. La bande de modulation est donc changée par *B*=1,2GHz (résolution en profondeur *d*=12,5cm) et la distance théorique maximale de détection est alors de 64m (voir équation (8)). De plus, les résolutions en largeur d_x et en hauteur d_y à cette distance sont de l'ordre de 1m pour des pas angulaires de 1°. Les niveaux d'écho sont calculés entre une distance de 57,5m et 58,5m et sont affichés sur la Figure 73 avec des isosurfaces projetées dans le plan XY. L'estimateur e_{Max} représentant le niveau d'écho le plus élevé dans le volume d'étude, a une valeur de

-52,6dB en présence du capteur passif Van-Atta. Lorsque le capteur est retiré, le niveau d'écho diminue et la valeur de e_{Max} atteint -62,1dB, soit une dynamique d'environ 6dB. Cette différence de 6dB prouve que l'on peut détecter le capteur passif à une distance d'interrogation de 58m, malgré la dégradation de la résolution en profondeur. Si on considère que la sensibilité α=0,2dB/% est conservée à cette distance, on pourrait estimer la dynamique pleine échelle à 9dB (à vérifier expérimentalement). Cette interrogation longue distance est rendue possible par la dépolarisation du réseau d'antennes patches qui augmente de manière significative le rapport signal sur bruit, car l'environnement dépolarise beaucoup moins le champ électromagnétique.

Pour illustrer l'impact de la position de radar sur la détection du capteur passif, l'estimateur e_{Max} est calculé pour différentes directions d'interrogation et différentes translations linéaires du radar. Le signal électromagnétique est reçu par deux canaux de réceptions (deux réseaux de 1x5 antennes patches) séparées par une distance de 6mm (environ la moitié de la longueur d'onde). L'estimateur eMax est calculé pour les deux canaux de réception Rx1 et Rx2 en fonction de la direction d'interrogation azimutale (Figure 74 (a)) et de la translation linéaire (Figure 74 (b)) de l'antenne de transmission. On peut observer un écart de niveau d'écho atteignant jusqu'à 10dB entre deux canaux de réception pour une position donnée de l'antenne de transmission. Ces écarts de valeurs peuvent s'expliquer par les propriétés rétrodirectives de l'antenne Van-Atta, qui rétrodiffuse le signal dans une direction d'arrivée précise. Pour vérifier cette hypothèse, on propose de calculer la direction d'arrivée (DoA) du signal à l'aide de l'algorithme MUSIC [176]. L'information sur la DOA du signal est assignée pour chaque voxel du volume d'étude, et on ne garde que les voxels dont la DOA calculée est supérieure à -5°. Les résultats après filtrage DOA sont affichés sur la Figure 73. On remarque alors que seul l'écho radar issu du réseau d'antennes Van-Atta est conservé. Le filtrage par calcul de la DOA pour ce genre de tag rétrodirectif peut s'avérer être un outil efficace pour supprimer le clutter.

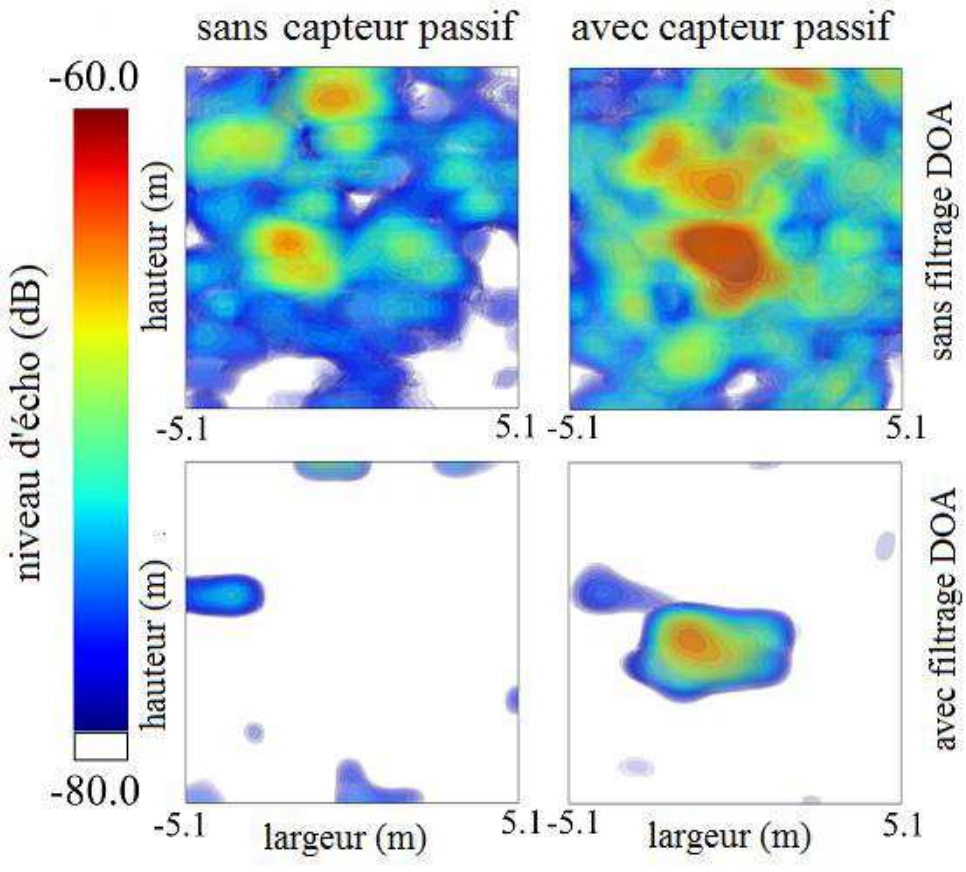
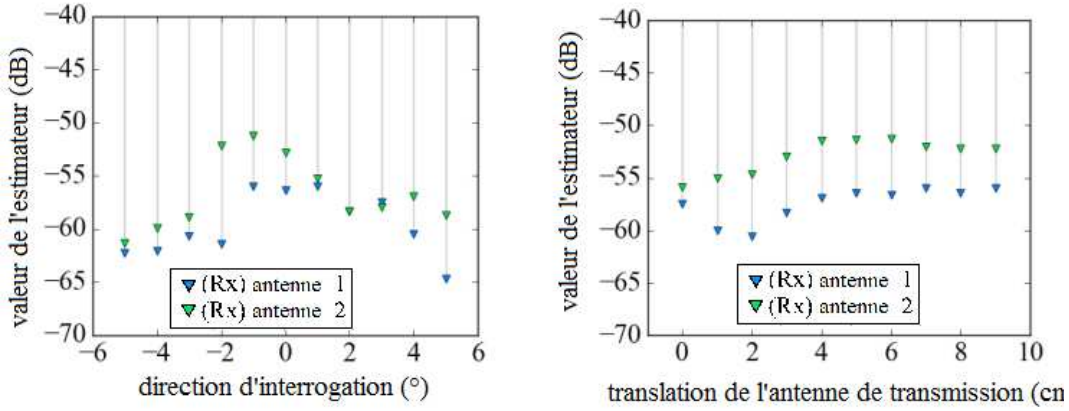


Figure 73. Affichage en projection 2D des isosurfaces des niveaux d'écho pour une distance d'interrogation R entre 57,8m et 58,5m en présence (à droite) et en absence (à gauche) du capteur passif d'humidité. Un filtrage basé sur le calcul de la DOA supprime les clutters (en bas).



(a) (b)

Figure 74. Estimateur e_{Max} calculé pour un capteur passif d'humidité situé à 58m en fonction (a) de la direction d'interrogation azimutale et (b) la translation de l'antenne de transmission pour les deux canaux de réception Rx1 (bleu) et Rx2 (vert).

3.4.9. Conclusion sur l'interrogation de capteurs passifs par radar FM-CW

On a montré dans cette section qu'il était possible d'interroger à l'aide de différentes techniques de balayage des charges variables et des capteurs passifs jusqu'à de très longues portées (58m reportée ici lorsque l'on utilise des interrogations avec des polarisations croisées et une antenne de transmission directive). Les estimations se construisent à partir des niveaux d'échos contenus dans le volume d'étude et offrent de bonnes caractéristiques en termes de linéarité et de dynamique pleine échelle. Cependant, les erreurs d'estimations calculées ε_{lin} reposent sur des écarts de valeur entre le modèle linéaire et les valeurs mesurées. Il reste à désormais à caractériser la variation minimale mesurable $\delta\Phi$ de la grandeur physique Φ en effectuant des tests de répétabilités. Il est aussi intéressant de pouvoir étudier les limites de cette interrogation, notamment en termes de portée, d'estimation d'amplitude, mais aussi en termes d'interrogation multi-capteurs.

4. Application à la viticulture

4.1. Introduction

Cela fait presque 20 ans que le concept de viticulture de précision (PV) a été introduit par Bramley et al [75]. La PV a pour but de mesurer et interpréter les variabilités spatiales et temporelles des vignes au sein des parcelles et par conséquent, intervenir au bon endroit, au bon moment, et de la manière la mieux adaptée. Les technologies associées à la PV sont initialement dérivées de celles existantes en agriculture de précision (PA, voir partie 1), mais contrairement à cette dernière, la PV n'a pas pour but un rendement intensif, car la viticulture est bien souvent liée à la viniculture et au terroir, où la qualité et l'authenticité du produit final sont difficilement compatibles avec une production de masse. Dans certains pays, afin de protéger les authenticités et particularités du terroir, la production est soumise à des réglementations strictes qui limitent le rendement (voir l'*Appellation d'Origine Contrôlée* (AOC) en France [177] et la *Denominazione di Origine Controllata* (DOC) en Italie [178]). Cette limite, exprimée en hectolitre par hectare, ne prend pas en compte d'éventuelles variabilités intra-parcellaires dues à des microclimats, à la topographie et propriétés du sol, et aux maladies. On comprend donc assez facilement l'intérêt que portent les vignerons à prédire et contrôler le rendement de leur vignoble. L'estimation précoce du rendement permet de supprimer une partie de la récolte avant la maturation (éclaircissage des vignes), et d'ainsi équilibrer la concentration en sucre, les composés phénoliques et l'acide titrable. Cette intervention permet l'amélioration de la qualité finale du produit [179], [180]. L'estimation du rendement apporte d'autres avantages, comme l'optimisation des ressources humaines et les équipements nécessaires aux vendanges, mais aussi le remboursement équitable en cas d'intempéries qui endommageraient les récoltes.

L'estimation à distance du rendement des grappes est généralement basée sur une interrogation de capteurs embarqués sur satellites ou systèmes aéroportés, ou bien par détection proche (voir partie 2) avec des systèmes basés au sol [40]. Les capteurs utilisés sont bien souvent optiques ou multi-spectraux. Une des premières détections optiques de grappes de raisin fut proposée en 2006 par Chamelat *et al* [82] à l'aide d'une caméra RGB. Depuis, plusieurs algorithmes ont été développés à partir d'images RGB pour détecter des grappes de raisin noires ou vertes [83], [90], [181], compter les grains [86], [88] et détecter les grappes avant la fin de la nouaison (fermement de la grappe) [98]. Les systèmes optiques peuvent être embarqués à bord de véhicules [182] et des reconstructions en 3D des grappes sont possibles à partir d'images superposées prises sous différents angles [95]. Malgré le développement d'algorithmes très robustes [96], les capteurs optiques se confrontent à une limite lorsqu'il s'agit d'estimer précisément le rendement des grappes. Les meilleurs résultats révèlent des estimations avec des coefficients de corrélation de 79% entre la grappe et les estimateurs statistiques proposés [95]. La difficulté à obtenir des informations en profondeur ou volumique de la scène à partir des images 2D ou stéréo est une des principales causes de cette limite. De plus, les capteurs optiques peuvent échouer à détecter des grappes derrière le feuillage, les sarments ou bien d'autres grappes. Un autre inconvénient est la nécessité de calibrer les capteurs optiques en fonction de la luminosité de la scène. D'autres techniques multi-spectrales basées sur la mesure du NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) [48] ou du LAI (*Leaf Area Index*) fournissent une indication indirecte du rendement. Les capteurs embarqués sur satellites ou systèmes aéroportés offrent une estimation sur de grandes surfaces, par exemple plusieurs parcelles (coefficient de corrélation de 76%) [100], où à l'échelle d'un pays comme le Portugal (coefficient de corrélation entre 76% et 81% suivant les régions) [99].

Afin de repousser les limites des solutions optiques et multi-spectrales, on propose d'utiliser dans cette partie des radars FM-CW millimétriques et microondes basés au sol pour l'estimation du rendement des grappes de raisin. Plus précisément, des estimateurs statistiques de la masse des vignes sont construits à partir de données issues de trois radars du commerce. Les radars embarqués sur satellites [103], [107] ou systèmes aéroportés [104], [105] ont déjà été utilisés pour des applications en viticulture (un des

travaux les plus aboutis, utilisant le radar en PV, est décrit en 2014 par Del Frate *et al* [108] pour la cartographie d'hétérogénéité et de vigueur des vignobles). En revanche, l'utilisation d'un radar FM-CW basé au sol pour l'estimation du rendement n'a jamais été envisagé jusqu'à maintenant. On propose ici la génération d'images radars en trois dimensions à partir d'un balayage de la scène de mesure. Des estimateurs de rendement sont alors construits pour retrouver la masse des grappes de raisin. Le terme *rendement* généralement exprimé en hl/ha en viticulture, est exprimé ici en kg. Ces estimations sont effectuées sur des pieds de vignes où les grappes sont totalement ou partiellement masquées par le feuillage. On assume aussi que la masse volumique des grappes de raisin est constante quelle que soit la variété, et les estimations volumiques des grappes proposées dans cette partie sont proportionnellement liées à l'estimation de la masse.

Cette partie comporte deux sections principales. La première (section 4.3) se focalise sur les mesures effectuées en laboratoire avec un radar FM-CW à 24GHz. Les échos radars de cibles que l'on retrouve dans les vignobles (grappes de raisin, sarments, feuilles…) sont analysés dans différentes conditions et différentes polarisations, afin de comprendre la manière dont sont rétrodiffusées les ondes électromagnétiques, et d'appréhender les difficultés que l'on peut éventuellement rencontrer sur le terrain. La seconde (section 4.4) rapporte les études effectuées sur le terrain durant les étés 2016 et 2017. La première campagne de mesure permet la construction d'un premier estimateur du rendement en développant un algorithme basé sur une sélection d'échos radar à 24GHz appliqué sur une scène de rétrodiffusion complexe. Les conclusions tirées de cette première campagne de mesure ont permis l'été suivant, l'élaboration de nouveaux estimateurs basés sur des analyses polarimétriques à 24GHz et d'amplitudes à 24GHz ,77GHz et 122GHz. Ces estimateurs sont calculés à partir de données issues de 25 pieds de vignes de 5 variétés différentes. Cinq pieds de vignes sont aussi étudiés à différents stades de développement de la grappe, de début Mai à mi-Septembre.

4.2. Go / No go ?

Quelques mois avant le commencement des travaux de thèse, des tests préliminaires sont effectuésafin de répondre à deux questions essentielles :

(i) Les grappes de raisins sont-elles détectables avec un radar microondes ?
(ii) Peut-on mesurer des variations de volume par une interrogation radar ?

Une réponse négative à l'une de ces questions empêcherait alors l'accomplissement de l'objectif principal, à savoir estimer le rendement des grappes par une analyse volumétrique. La deuxième question a été abordée en profondeur en partie 3. En revanche, la question de la réflectivité des grappes de raisin se doit d'être validée. L'idée est de considérer la grappe comme un objet constitué majoritairement d'eau et capable de réfléchir fortement les ondes électromagnétiques. En effet, l'eau possède une permittivité relative élevée allant de ε_r=80 à 0Hz jusqu'à ε_r=8-10j à 122GHz à une température de 20°C [183]. L'idée est alors d'utiliser les fréquences microondes, proches ou inférieures aux longueurs d'ondes millimétriques, afin de pouvoir détecter des cibles de la taille au minimum d'une « petite » grappe (quelques centimètres). En 2014 était disponible au laboratoire un radar FM-CW fonctionnant à 30GHz (longueur d'onde de 1cm) fabriqué lors de précédents travaux de thèse (Chebila, 2011 [184]) dont une illustration est disponible ci-dessous (Figure 75). Le VCO possède une zone de linéarité entre 29,0GHz et 29,7GHz, permettant d'obtenir une résolution en profondeur $d = \frac{c}{2.B} = 21cm$ où c représente la vitesse de la lumière dans le vide et B=700MHz la bande modulation du radar. Le signal de modulation choisi est un signal triangulaire de 1kHz et le spectre de battement est visualisé avec Matlab® comme illustré sur la Figure 76. Il semble qu'un effet de sur-échantillonnage génère des pics d'amplitude périodiques sur le spectre (en bleu). Un filtre passe-bas est alors appliqué pour supprimer cet effet périodique (en rouge).

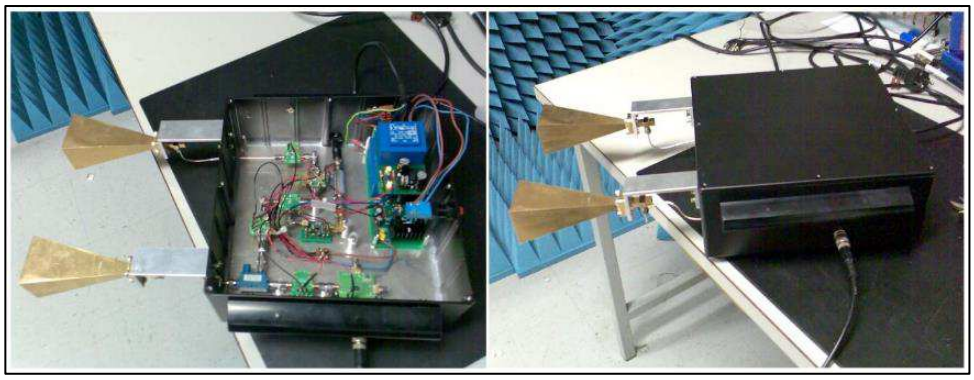


Figure 75. Radar FM-CW 30GHz utilisé pour les mesures préliminaires.

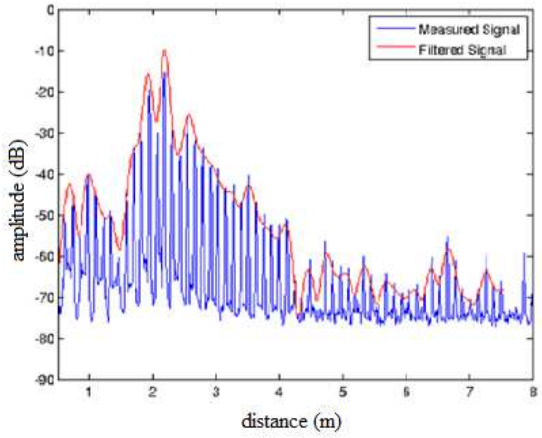


Figure 76. Exemple de spectre de battement obtenu avec le radar 30GHz (bleu) avec effet de sur-échantillonnage, supprimé par un filtre passe-bas (rouge)

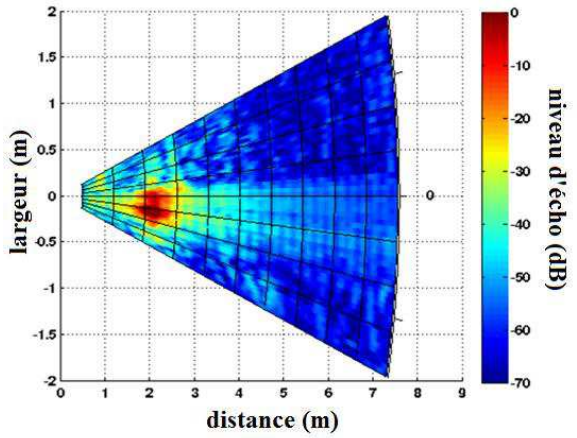
Le radar FM-CW est utilisé en combinant en transmission une antenne parabolique d'un gain de 33dBi et d'un angle d'ouverture de 2°. La zone illuminée par le radar est alors beaucoup plus réduite que pour un cornet classique. Un balayage azimutal (manuel) de l'antenne est ensuite effectué entre ±15° avec un pas de 1°. À chaque direction d'interrogation, le spectre de battement est enregistré, permettant d'obtenir au final un spectre en 2D en coordonnées polaires. Pour répondre aux deux questions posées en début de section, la série de mesures ci-dessous est effectuée :

- Mesure d'une grappe de raisin seule,
- Mesure de grappes de raisin parmi des pieds de vignes,
- Mesure des pieds de vigne seuls,
- Mesures de cubes métalliques de différentes dimensions.

Les résultats obtenus (en laboratoire) pour les différentes mesures de grappes et de pieds de vignes sont reportés sur la Figure 77. La présence d'un écho radar bien distinctif à environ 2m sur la Figure 77 (a) lors de la mesure d'une grappe de raisin seule permet de confirmer la possibilité de détecter une grappe de raisin par interrogation radar microonde. Par ailleurs, les variations d'écho radars visibles entre les Figure 77 (c) et (e), c'est-à-dire en présence et en absence de deux grappes de raisin parmi de jeunes pieds de vigne permettent de confirmer la possibilité de détecter les grappes de raisins dans un environnement plus complexe composé de feuilles et de sarments. On remarque, par ailleurs, que les feuilles et les sarments génèrent aussi une rétrodiffusion électromagnétique avec laquelle il faudra composer lors de l'estimation du volume des grappes en conditions réelles. Sans pour autant détecter de manière évidente l'écho généré par les grappes de raisin, on remarque une concentration d'échos radar plus compacte en présence des fruits. Ce phénomène de « regroupement » des échos radar sera observé par la suite lors des mesures en conditions réelles (voir section 4.4.2.11).

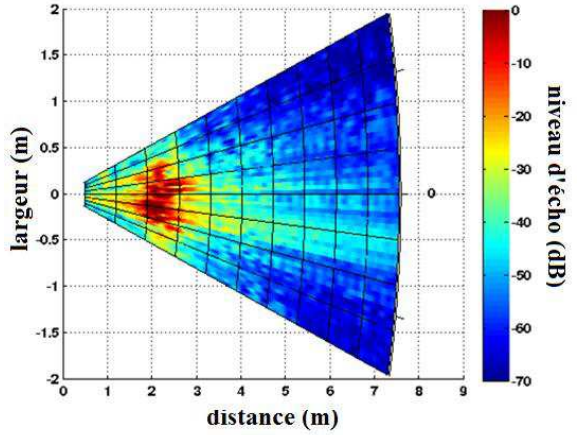
Afin d'étudier la possibilité d'estimer des volumes par interrogation radar microondes, les mêmes types de mesures en deux dimensions sont effectués sur des cubes métalliques de 3cm, 5cm et 7cm de côté. Les images radar sont affichées sur la Figure 78 et l'on remarque facilement une augmentation à la fois du niveau d'écho, mais aussi de la taille de l'écho radar avec les dimensions de la cible. On observe toutefois une distorsion et séparation d'échos radar pour un cube métallique de 7cm de côté, pouvant s'expliquer par des lobes secondaires du spectre de battement. Un fenêtrage du signal serait alors nécessaire pour corriger ces distorsions. L'ordre de grandeur des surfaces d'écho radar mesurées des trois cubes est respectivement de 75cm², 414cm² et 912cm² pour une valeur de niveau d'écho supérieure à -25dB.

Les différents résultats préliminaires présentés ici montrent qu'il est tout à fait possible de détecter par interrogation radar microonde une grappe de raisin, et d'estimer le volume d'une cible par une analyse d'amplitude d'écho ou de surface d'écho radar. Ces tous premiers résultats ont permis le démarrage de la thèse et confortent l'idée d'une estimation possible du rendement viticole par radar microonde FM-CW, et sont à l'origine du dépôt d'un brevet par Ovalie-Innovation et le LAAS-CNRS [185].



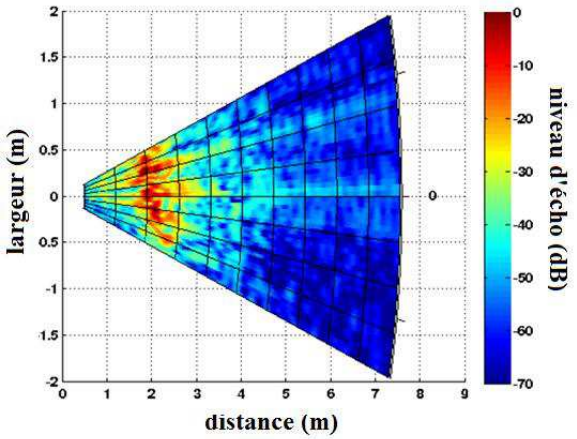
(a)

(b)



(c)

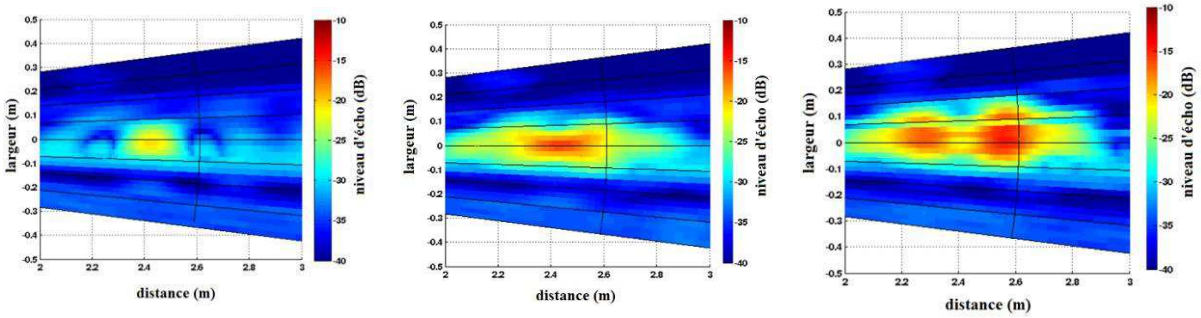
(d)



(e)

(f)

Figure 77. Série de mesures effectuée pour mettre en évidence la réflectivité électromagnétique des grappes de raisin : (a) image radar 2D à 30GHz d'une grappe seule et (b) grappe de raisin seule ; (c) image radar 2D à 30GHz de deux grappes de raisin disposées parmi des jeunes pieds de vigne et (d) deux grappes de raisin disposées parmi des jeunes pieds de vigne ; (e) image radar 2D à 30GHz des jeunes pieds de vigne sans grappes et (f) jeunes pieds de vigne sans grappes.



(a) (b) (c)

Figure 78. Série de mesures effectuée pour mettre en évidence la possibilité d'estimer des volumes : images radar 2D à 30GHz d'un cube métallique de (a) 3cm, (b) 5cm et (c) 7cm de côté.

4.3. Mesures en laboratoire

Dans cette section sont regroupées les différentes mesures faites en laboratoire sur la détection et l'estimation du volume des grappes, ainsi que d'autres paramètres liés à l'environnement en viticulture.

4.3.1. Premiers essais d'estimation du volume sur des cibles artificielles

Des premiers essais d'estimation du volume sont effectués sur des cibles artificielles, composées d'une poche en plastique et chacune remplie de 5mL d'eau. Les interrogations sont effectuées avec le radar FM-CW 24GHz dont les caractéristiques sont disponibles en annexe. Ces cibles numérotées de 1 à 6 sont disposées successivement sur polystyrène (très faible réflexion électromagnétique) de manière à imiter grossièrement la forme d'une grappe de raisin et d'augmenter le volume total d'eau de la cible avec un pas de 5mL. La disposition de ces cibles est visible sur la Figure 79. La rétrodiffusion tridimensionnelle enregistrée par balayage mécanique de l'antenne parabolique est affichée sur la Figure 80. Chaque point représenté est une mesure de rétrodiffusion électromagnétique située dans l'espace en coordonnées azimut/élévation (r,θ,φ). Pour des raisons de clarté, un seuillage a été appliqué pour n'afficher que les points de rétrodiffusion dont le niveau d'écho est supérieur à -20dB (couleur bleue). La couleur rouge correspond à un niveau d'écho maximal. Ce simple aperçu tridimensionnel permet d'observer la variation du niveau d'écho radar en fonction du volume de la cible, avec sans surprise une augmentation du niveau d'écho qui suit l'augmentation du volume d'eau. On peut caractériser cette variation d'écho radar de deux manières différentes : en analysant le niveau d'écho radar ou en comptant le nombre de voxels à partir d'un seuil donné. Un aperçu global de cette variation peut être représenté par une distribution du niveau d'écho radar (voir sur la Figure 81). Sur cette distribution le niveau d'écho moyen peut être observé au niveau de la valeur maximale du nombre de voxels (aux alentours de -35dB), ainsi qu'une variation de cette distribution plutôt forte à partir de -25dB. Différents estimateurs présentés dans la partie précédente sont répertoriés dans le Tableau 40, avec notamment :

- $N_{e>20dB}$ le nombre de voxels dont le niveau d'écho associé est supérieur ou égal à -20dB. On observe une variation linéaire de l'estimateur (coefficient de détermination R^2=0,96) de 18 voxels par mL. On comprend en revanche que cet estimateur dépend à la fois du niveau d'écho et de la résolution spatiale. C'est un bon moyen d'obtenir une grandeur physique volumique, puisque homogène à une résolution volumique ;
- $e_{mean>20dB}$ représentant la valeur moyenne du niveau d'écho à partir d'un seuil de -20dB. La variation est aussi linéaire (R^2=0,97) avec sensibilité de 0,4dB/mL ;
- e_W représentant la valeur moyenne pondérée (décrite dans la partie 3) du niveau d'écho. La variation est linéaire (R^2=0,98) avec une sensibilité plus faible que $e_{mean>20dB}$ (0,3dB/mL) ;
- e_{max} représentant la valeur maximale du niveau d'écho (associée donc à un voxel) qui ici ne présente pas de bonnes caractéristiques. Il semble que la rétrodiffusion maximale se trouve

dans des niveaux d'élévation inférieurs non mesurés (écho radar tronqué). On comprend alors l'intérêt de développer un système d'élévation plus performant.

D'après ces premiers résultats, il semblerait qu'estimer le volume d'une cible, en l'occurrence un volume d'eau variable, soit tout à fait possible en analysant le niveau ou le nombre de voxels d'un écho radar en trois dimensions. Des variations linéaires des estimateurs sont observées, du moins lorsqu'une échelle d'amplitude en dB est adoptée, et la possibilité de mesurer des variations de 5mL de volume d'eau est encourageant.

Mesure de cibles artificielles	
système radar	DK-sR-1030e
fréquence porteuse	23,8 GHz
bande de modulation	2 GHz
résolution en profondeur	7,5 cm
(Tx) antenne	antenne parabolique [a]
(Rx) antenne	1x4 antennes patches [a]
scan en azimut	-10° à 10°
résolution en azimut	0,5°
scan en élévation	3 niveaux d'élévation [b]
distance de la cible	1 m

[a] caractéristiques disponibles en annexe
[b] système d'élévation pas assez précis pour estimer une mesure d'angle

Tableau 39. Paramètres des mesures effectuées sur des cibles artificielles.

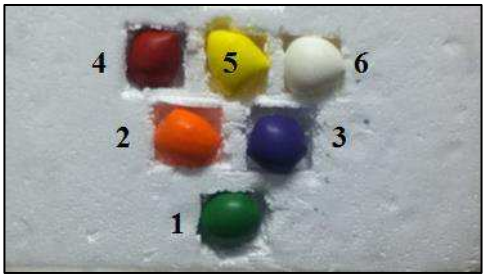


Figure 79. Cibles artificielles d'un volume de 5mL disposées sur du polystyrène.

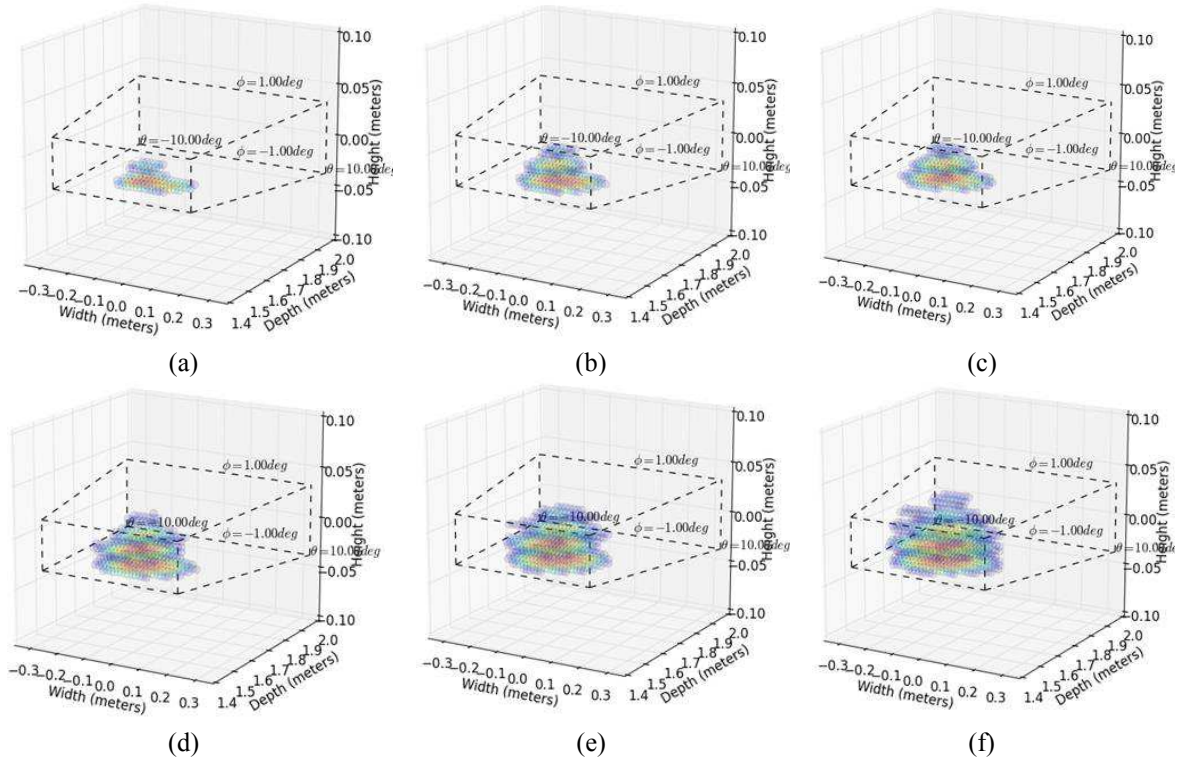


Figure 80. Représentation tridimensionnelle de la rétrodiffusion électromagnétique à 23,8 GHz des cibles artificielles pour un volume de (a) 5mL, (b) 10mL, (c) 15mL, (d) 20mL, (e) 25mL et (f) 30mL. La couleur bleue représente un niveau d'écho de -20dB, la couleur rouge le niveau maximal d'écho.

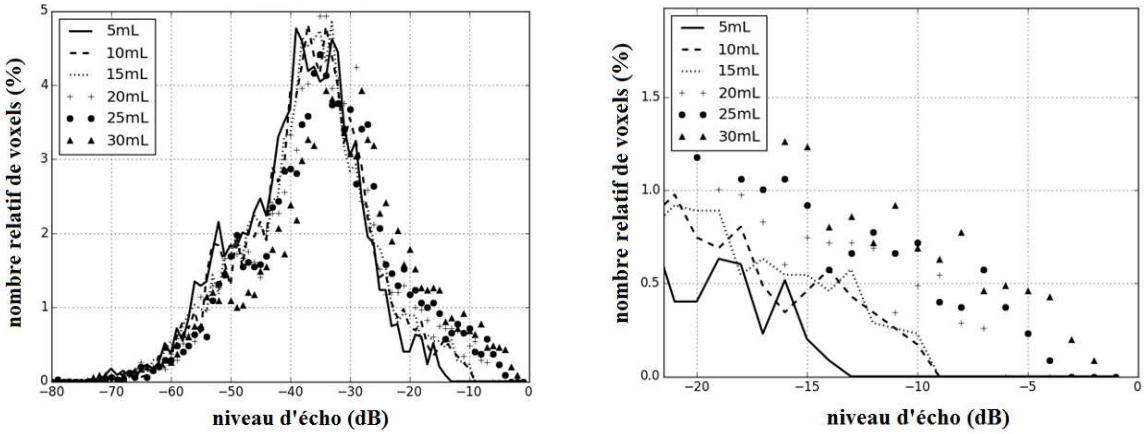


Figure 81. (a) Distribution du niveau d'écho radar dans le volume d'étude considéré pour différents volumes d'eau. (b) Agrandissement de la distribution entre -20dB et 0dB.

volume	5 mL	10 mL	15 mL	20 mL	25 mL	30 mL	Variation	R^2
$N_{e>20dB}$	93	185	204	327	414	551	18 voxels/mL	0,96
$e_{mean>20dB}$	-13,8	-9,4	-9,1	-6,1	-3,6	-1,7	0,4dB/mL	0,97
e_W (dB)	-40,9	-38,6	-38,2	-36,0	-34,8	-33,1	0,3dB/mL	0,98
e_{max} (dB)	-33,1	-32,5	-32,8	-32,3	-32,2	-32,2	-	0,74

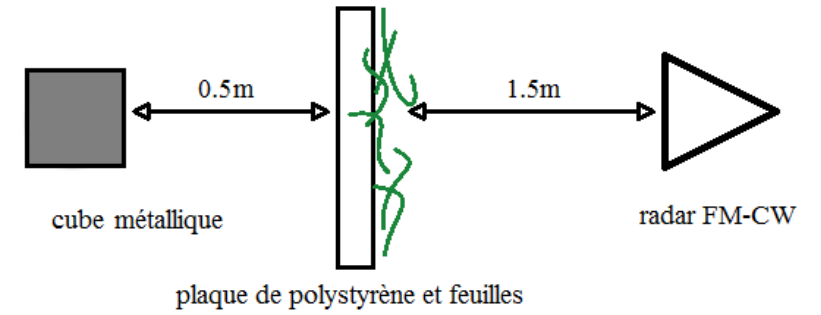
Tableau 40. Variation de différents estimateurs en fonction du volume d'eau.

4.3.2. Caractérisation de l'atténuation de l'écho radar due aux feuilles

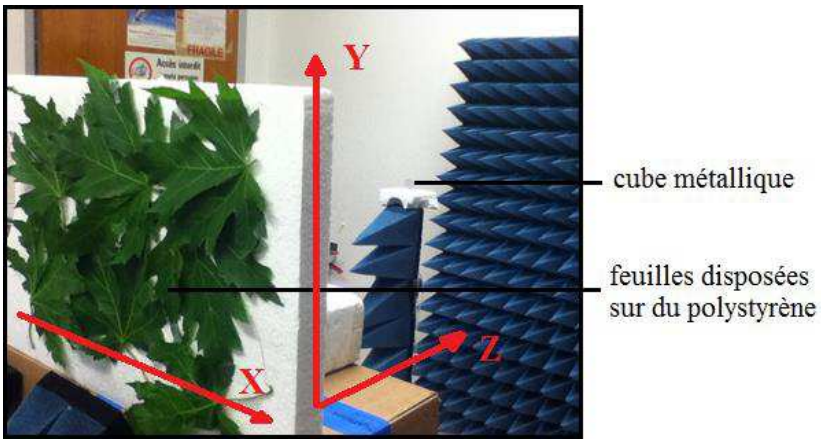
Dans cette section on essaie de caractériser l'atténuation de l'écho radar d'une cible due aux feuilles. Le protocole de mesure est alors le suivant :

- Mesure de l'écho radar d'une cible de référence : cube métallique de 3cm de côté.
- Mesure de l'écho radar d'une cible de référence derrière un mur de feuilles disposées orthogonalement à la direction d'interrogation.
- Mesure de l'écho radar d'une cible de référence derrière un mur de feuilles disposées un peu plus aléatoirement.

Les paramètres des mesures sont disponibles dans le Tableau 41 et une illustration de l'expérience sur la Figure 82. L'estimateur e_{max} est calculé pour les trois situations. Pour le cube métallique seul, la valeur maximale d'écho mesurée est de -1,7dB. Lors de la présence de feuilles disposées toutes orthogonalement à la direction de propagation, on observe une atténuation de 3,3dB (e_{max}=-5,0dB). Lorsque ces feuilles sont disposées un peu plus aléatoirement, l'atténuation est de 1,7dB (e_{max}=-3,4dB). Les feuilles provoquent donc des atténuations non négligeables de l'écho radar et devront être prises en compte lors de l'estimation du volume des grappes. De plus, cette atténuation dépend de la disposition des feuilles : des feuilles orthogonales à la direction d'interrogation auront tendance à rétrodiffuser davantage les ondes électromagnétiques qu'une feuille ayant une orientation quelconque, ce qui risque d'ajouter des incertitudes lors de l'estimation. Les différentes mises en place et les échos radars du cube métallique correspondants sont affichés sur la Figure 83.

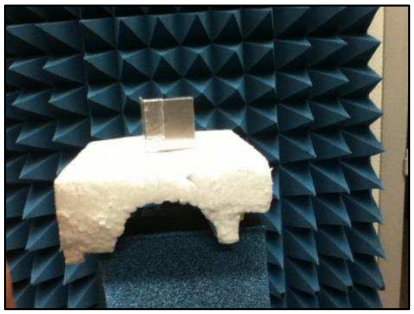


(a)

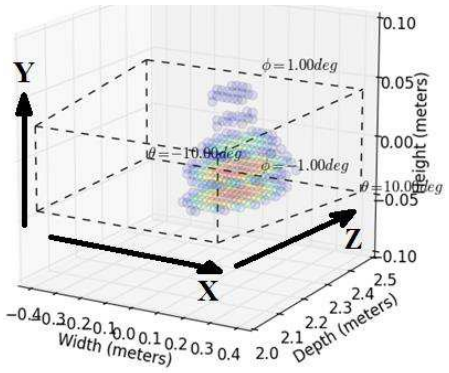


(b)

Figure 82. (a) Schéma et (b) mise en place des mesures pour mettre en évidence l'atténuation due aux feuilles.

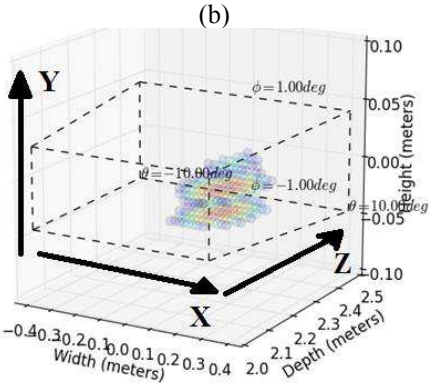


(a)



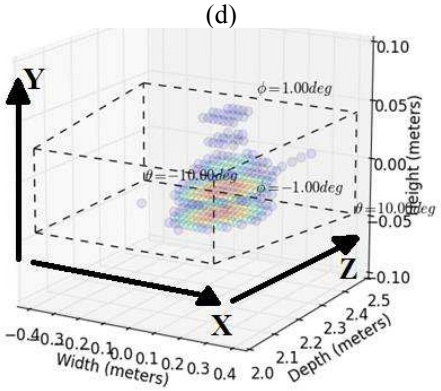
(b)

(c)



(d)

(e)



(f)

Figure 83. (a) Cube métallique de 3cm de côté ; (b) écho radar en 3D du cube métallique seul ; (c) feuilles disposées de manière orthogonale à la direction d'interrogation ; (d) écho radar en 3D du cube métallique en présence de feuilles disposées de manière orthogonale à la direction d'interrogation ; (e) feuilles désordonnées ; (f) écho radar en 3D du cube métallique en présence de feuilles désordonnées. La couleur bleue représente un niveau d'écho de -20dB, la couleur rouge le niveau maximal d'écho.

Atténuation des feuilles	
système radar	DK-sR-1030e
fréquence porteuse	23,8 GHz
bande de modulation	2 GHz
résolution en profondeur	7,5 cm
(Tx) antenne	antenne parabolique [a]
(Rx) antenne	1x4 antennes patches [a]
scan en azimut	-10° à 10°
résolution en azimut	0,5°
scan en élévation	3 niveaux d'élévation [b]
distance de la cible	2 m
distance des feuilles	1,5 m

[a] caractéristiques disponibles en annexe
[b] système d'élévation pas assez précis pour estimer une mesure d'angle

Tableau 41. Paramètres des mesures effectuées pour caractériser l'atténuation due à la présence de feuilles.

4.3.3. Analyse de la rétrodiffusion électromagnétique pour différentes polarisations

Une analyse de la rétrodiffusion à différentes polarisations est réalisée dans cette section afin d'étudier la rétrodiffusion de différents éléments présents sur les pieds de vignes, à savoir :

- Le bois des pieds de vignes
- Les feuilles
- Les grappes
- Les tendeurs métalliques

Dans le cas de l'interrogation radar à 24GHz, plusieurs combinaisons de couplages de polarisation linéaires sont effectuées en transmission et réception. Les lettres V et H représentent respectivement les polarisations verticale et horizontale du champ électrique, et à titre d'exemple, la combinaison VH indique une transmission en polarisation verticale et une réception en polarisation horizontale. C'est pourquoi deux antennes cornets identiques (Rx1 et Rx2), dont la seconde (Rx2) est tournée de 90° par rapport à la première (Rx1), reçoivent le signal sur les deux canaux de réception. En revanche, le radar ne possède qu'un seul canal de transmission, donc l'antenne cornet circulaire avec lentille (Tx) est tournée alternativement de 90° entre deux mesures du même pied de vigne, afin d'effectuer des interrogations en polarisation V et H. On obtient donc quatre combinaisons de rétrodiffusions différentes qui composent la matrice de polarisation : {VV, VH, HV, HH}. Pour chaque mesure, un balayage des antennes est effectué en azimut et en élévation (avec le pan-tilt plus flexible et robuste). L'ensemble des paramètres des mesures est reporté dans le Tableau 23. La série de mesures suivante est alors effectuée au laboratoire :

- Une grappe verticale seule
- Une grappe horizontale seule
- Un pied de vigne seul
- Un pied de vigne avec quelques feuilles
- Un pied de vigne, quelques feuilles et une grappe de raisin
- Un pied de vigne, quelques feuilles, une grappe de raisin et une cible canonique (sphère métallique de 7cm de diamètre)
- Un pied de vigne, quelques feuilles, une grappe de raisin.
- Un pied de vigne, quelques feuilles, une grappe de raisin et un fil de fer horizontal.
- Un pied de vigne, quelques feuilles, deux grappes de raisin et un fil de fer horizontal.

Analyse de polarisation	
système radar	DK-sR-1030e
fréquence porteuse	23,8 GHz
bande de modulation	2 GHz
résolution en profondeur	7,5 cm
puissance en entrée	20 dBm
(Tx) antenne	antenne cornet avec lentille [a]
(Rx1/Rx2) antennes	antennes cornets [a]
grappe seule	
scan en azimut	-10° à 10°
résolution en azimut	1°
scan en élévation	-10° à 10°
résolution en élévation	1°
distance des cibles	1m
scène avec pied de vigne	
scan en azimut	-20° à 20°
résolution en azimut	1°
scan en élévation	-20° à 20°
résolution en élévation	1°
distance des cibles	1,5m

[a] caractéristiques disponibles en annexe

Tableau 42. Paramètres des mesures effectuées pour caractériser l'atténuation des feuilles.

4.3.3.1. *Orientation de la grappe de raisin*

Une grappe du commerce est utilisée pour ces tests menés en laboratoire. Un aperçu en trois dimensions par isosurface de la rétrodiffusion de la grappe en couplage de polarisation VV disposée verticalement et horizontalement est disponible sur la Figure 84. Les grappes sont disposées sur du polystyrène afin de minimiser l'influence du support. À première vue les échos radars des deux grappes semblent semblables si l'on observe qu'une seule combinaison polarimétrique. En revanche, la visualisation de la matrice de polarisation entière disponible sur la Figure 85 amène d'autres remarques :

- Lorsque la grappe est disposée horizontalement, le niveau d'écho radar est plus élevé en couplage de polarisation HH que VV. Inversement, lorsque la grappe est disposée verticalement, le niveau d'écho radar est plus élevé en couplage de polarisation VV que HH.
- On remarque dans les deux cas une dépolarisation de H vers V significative, mais plus élevée (d'environ 4dB) lorsque la grappe est disposée verticalement.

On comprend alors que l'estimation du volume est dépendante de l'orientation de la cible, et qu'une analyse polarimétrique devrait permettre d'analyser non seulement la forme de la cible (plutôt allongée ou plutôt étalée), mais aussi de retrouver son volume par une combinaison d'échos radar en différentes polarisations. D'après les distributions du niveau d'écho radar sur la Figure 86 (grappe horizontale en couleur bleue, grappe verticale en couleur verte) et les valeurs de différents estimateurs dans le Tableau 43, la grappe semble rétrodiffusée davantage les ondes électromagnétiques lorsqu'elle est disposée verticalement. Ce phénomène est probablement dû à une surface équivalente radar plus importante de la grappe en orientation verticale. L'estimateur $N_{e>mean}$ propose des nombres de voxels relativement proches (±30voxels) entre les grappes verticales et horizontales. En revanche ces nombres de voxels dépendent du niveau d'écho moyen e_{Mean}, ce qui peut s'avérer problématique dans le cas d'un changement d'environnement générant des variations de e_{Mean}.

Une autre solution pour essayer d'estimer un volume commun sans prendre en compte l'orientation de la grappe est de combiner les niveaux d'écho des couplages de polarisation. Si l'on considère v_p le niveau

d'écho d'un voxel dans un couplage de polarisation p, alors on peut définir v_{max} le voxel de niveau d'écho maximal des quatre couplages de polarisation par l'expression:

$$v_{max} = max(v_p)_{p=VV,VH,HV,HH} \quad (1)$$

De cette combinaison un nouvel écho radar tridimensionnel est généré voxel par voxel. La distribution de cet écho radar, ainsi qu'un estimateur $N_{e>thresh}$ sont représentés sur la Figure 87 pour les deux grappes, une horizontale (bleu) et une autre verticale (vert). $N_{e>thresh}$ dénombre le nombre de voxels dont l'amplitude est supérieure à un niveau d'écho variable (que l'on peut finalement définir comme une fonction de répartition). Le point rouge (-37,0dB, 56 voxels) présent sur les deux graphiques représente la valeur d'intersection des estimateurs $N_{e>thresh}$ pour les deux grappes, respectivement horizontale et verticale. C'est une estimation du volume commune quelle que soit l'orientation de la grappe. Pour une valeur supérieure à ce seuil, on remarque que la valeur de $N_{e>thresh}$ reste finalement proche (±5voxels) pour les deux orientations. Malgré les variations de rétrodiffusion générées par des orientations différentes, il est possible de définir des estimateurs à partir d'analyses d'écho radar pour plusieurs couplages de polarisation afin de retrouver le volume de la grappe de raisin.

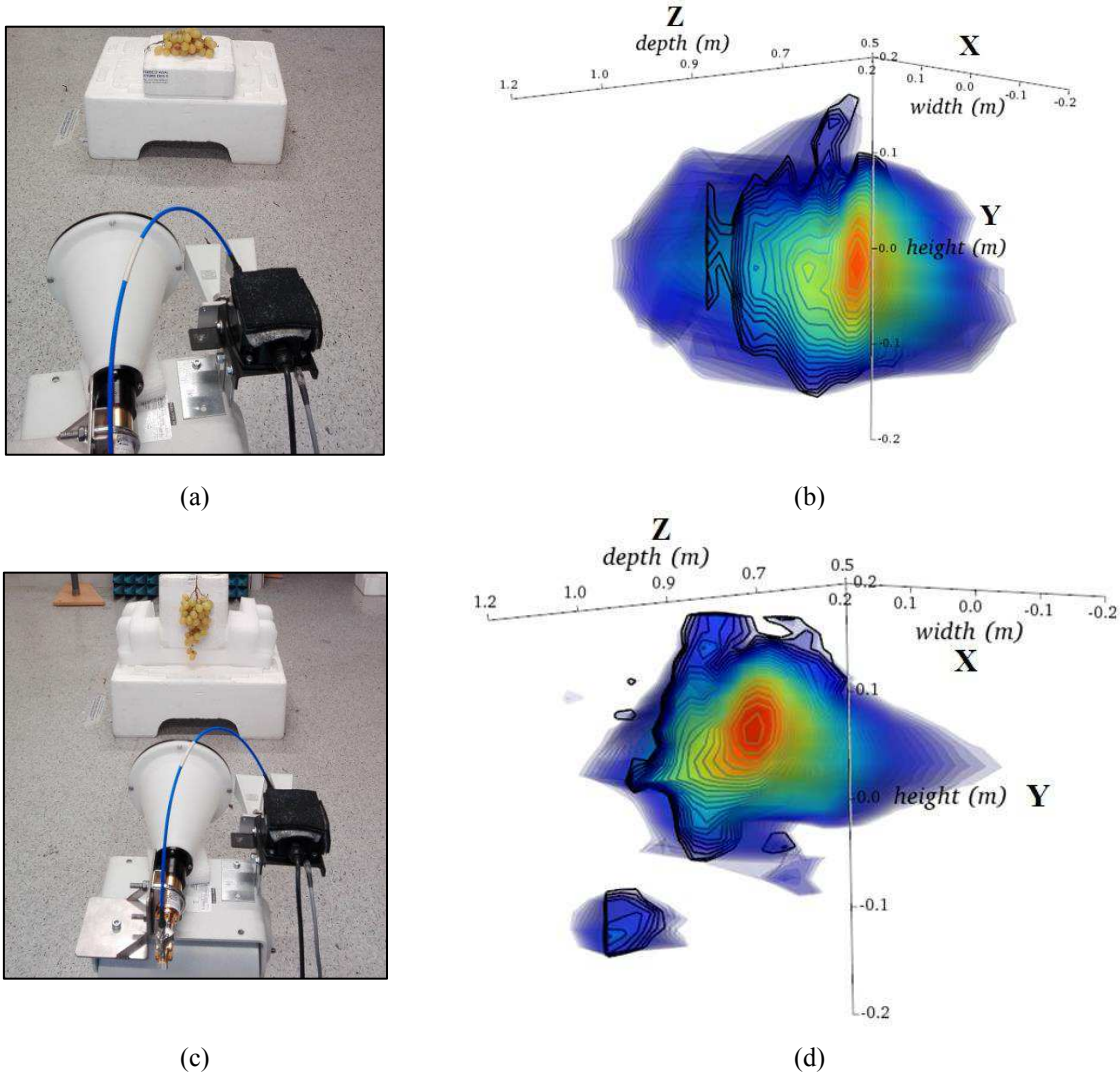
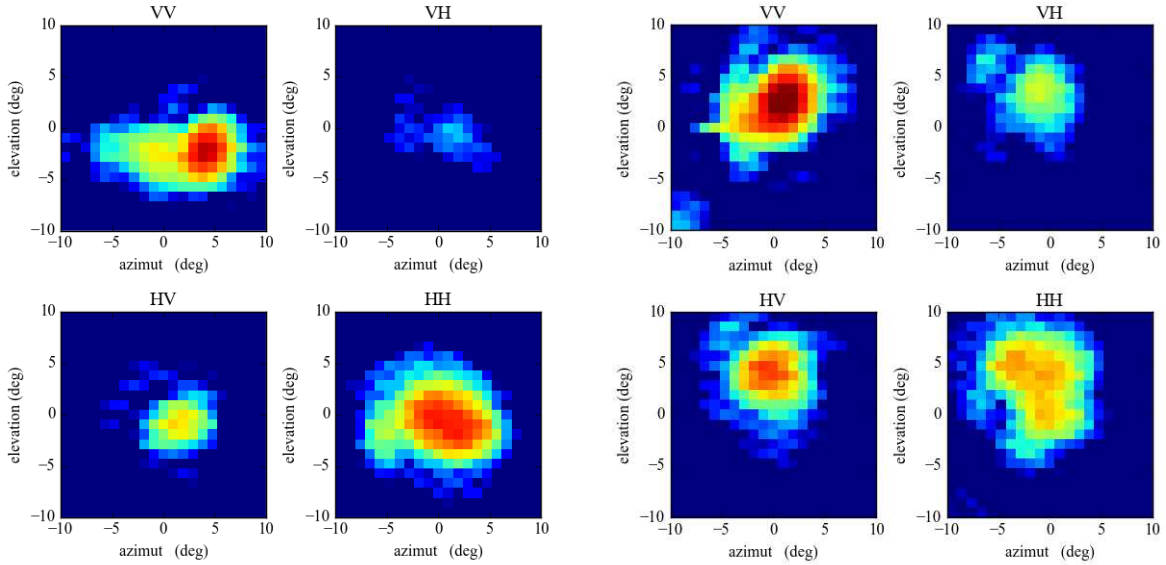


Figure 84. (a) Grappe disposée horizontalement sur un support en polystyrène; (b) écho radar en 3D par isosurfaces de la grappe horizontale en couplage de polarisation VV; (c) Grappe disposée verticalement sur un support en polystyrène ; (d) écho radar en 3D par isosurfaces de la grappe verticale en couplage de polarisation VV. Echelle : -50dB (bleu) à -30dB (rouge).



(a) (b)

Figure 85. Echo radar en 2D (θ,φ) pour un plan de coupe en R=0,975m (soit 13 fois la résolution en profondeur *d*) et pour les quatre couplages de polarisation {VV,VH,HV,HH} de (a) la grappe disposée horizontalement; (b) la grappe disposée verticalement. Echelle : -50dB (bleu) à -30dB (rouge).

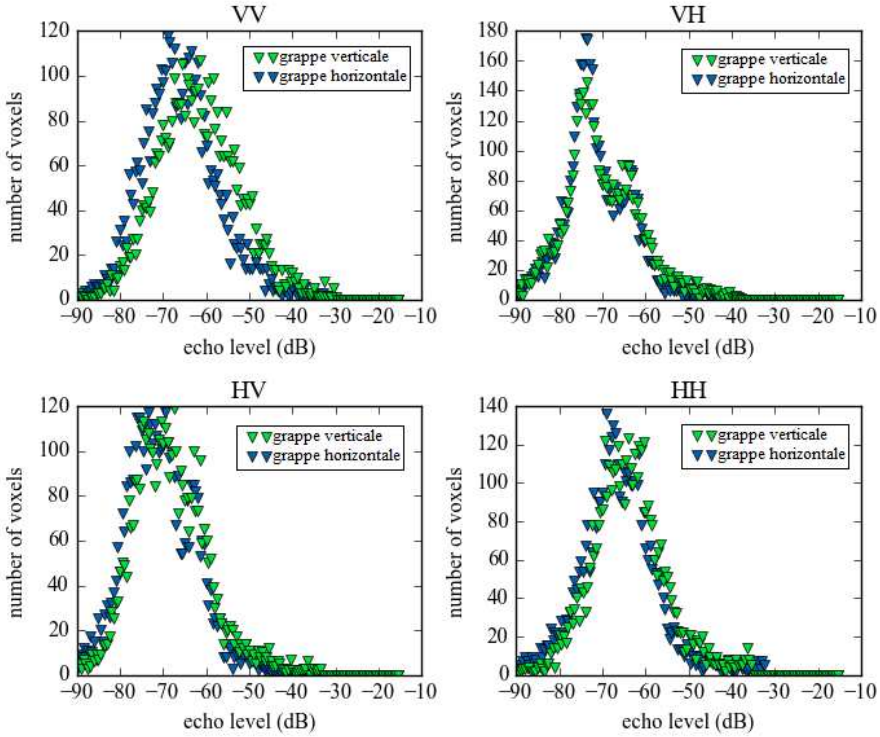


Figure 86. Distribution du niveau d'écho radar dans les quatre couplages de polarisation {VV, VH, HV, HH} pour la grappe horizontale (couleur bleue) et la grappe verticale (couleur verte).

Estimateur	$N_{e>mean}$	e_{mean} (dB)	e_W (dB)	e_{max} (dB)
grappe horizontale VV	2022	-65,5	-60,5	-31,1
grappe horizontale VH	1886	-70,8	-67,6	-43,4
grappe horizontale HV	1975	-70,1	-66,0	-36,2
grappe horizontale HH	1988	-65,7	-60,1	-32,1
grappe verticale VV	2071	-61,6	-56,4	-29,6
grappe verticale VH	1916	-69,7	-65,0	-37,9
grappe verticale HV	1986	-67,9	-62,7	-32,9
grappe verticale HH	2031	-63,7	-59,1	-35,0

Tableau 43. Variation de différents estimateurs en fonction des couplages de polarisation et orientation de la grappe de raisin. $N_{e>mean}$ représente le nombre de voxels dont le niveau d'écho radar est supérieur à l'estimateur moyen e_{mean}.

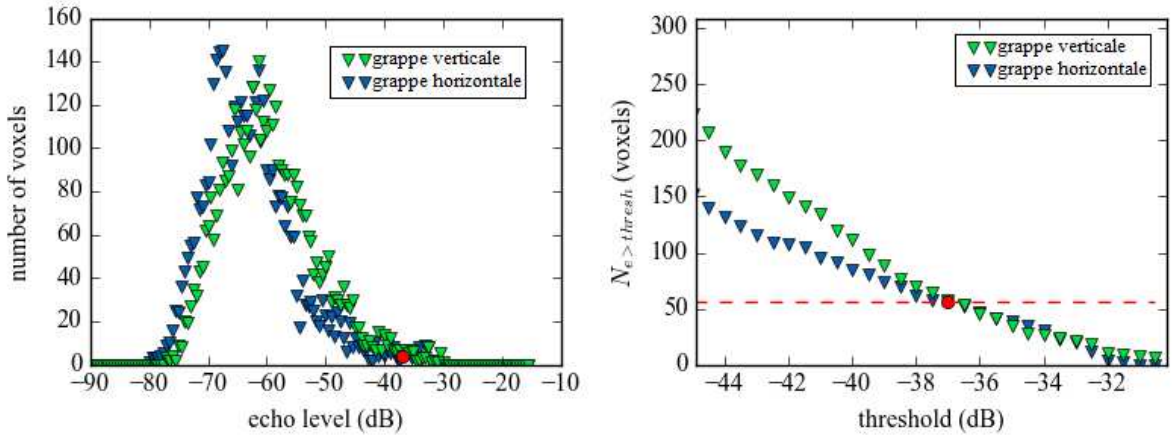
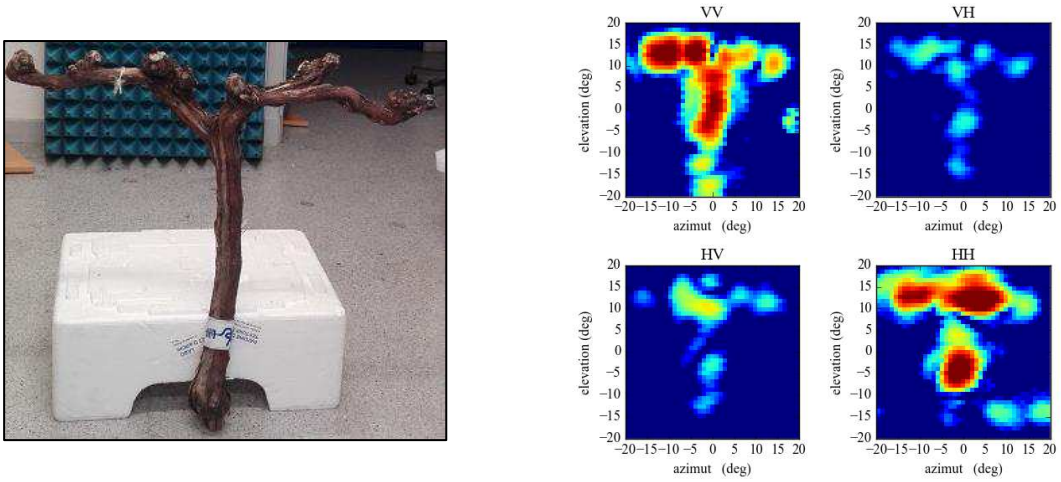


Figure 87. Distribution (à gauche) et estimateur $N_{e>thresh}$ (à droite), pour un écho radar ne regroupant que les niveaux d'écho maximum par couplage de polarisation, pour les grappes horizontales (bleu) et verticales (vert). Le point rouge indique la première intersection des valeurs de $N_{e>thresh}$ pour les grappes horizontales et verticales.

4.3.3.2. *Pied de vigne*

Le pied de vigne (bois mort) est interrogé seul sous différents couplages de polarisation afin de vérifier sa capacité ou non à perturber l'estimation du volume. Il est composé d'un tronc principal vertical et de deux sarments horizontaux. Une photographie du pied de vigne ainsi qu'une image radar 2D dans le plan (θ,φ) pour les couplages VV, VH ,HV et HH sont visibles sur la Figure 88. En rouge correspondent les niveaux d'écho supérieurs ou égaux à -40dB, et en bleu les niveaux d'écho inférieurs ou égaux à -60dB. En comparant la photographie et les images radar, on remarque que les composantes verticales, comme le tronc du pied de vigne, rétrodiffusent davantage les ondes électromagnétiques en VV. Il en est de même pour les composantes horizontales, comme les sarments, et en HH. En revanche les nœuds ont tendance à rétrodiffuser indépendamment de la polarisation du champ incident. Quelques formes irrégulières, en particulier la jonction entre le pied et les sarments, dépolarisent verticalement le signal (écho de -46,8dB en couplage de polarisation HV). En utilisant l'équation (1), on peut combiner l'ensemble des échos radars dans les quatre couplages pour reconstituer approximativement la structure du pied de vigne. Un aperçu en trois dimensions par isosurfaces de cette recombinaison est disponible (voir sur la Figure 89). Ces premiers résultats montrent une rétrodiffusion importante du pied de vigne, qui peut engendrer par la suite des erreurs d'estimation du volume des grappes. Des méthodes de discrimination seraient alors nécessaires pour distinguer l'écho radar d'un pied de vigne et celui d'une grappe de raisin.



(a) (b)

Figure 88. (a) Photographie du pied de vigne seul et (b) Image radar 2D dans le plan (θ,φ) pour R=1,35m (soit 18 fois la résolution en profondeur *d*) pour les quatre couplages de polarisation. Echelle : -60dB (bleu) à -40dB (rouge).

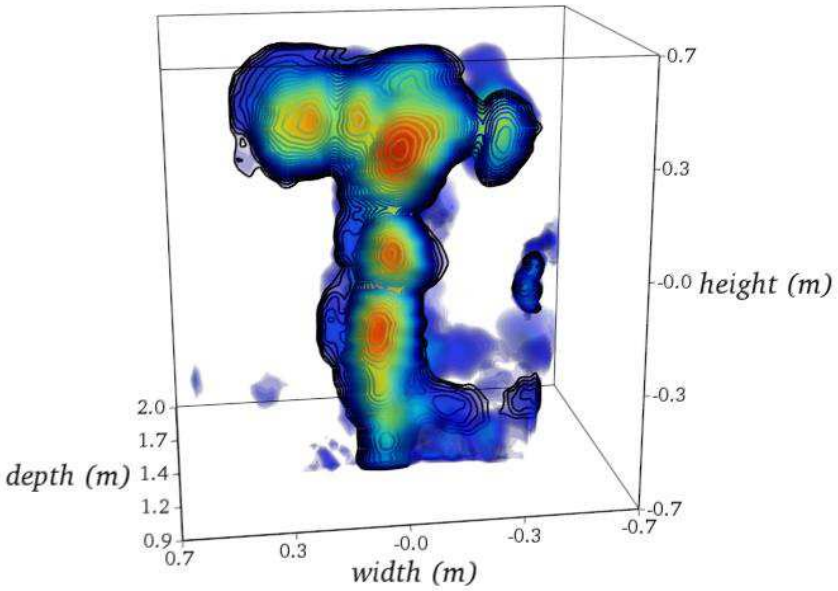


Figure 89. Aperçu en trois dimensions de l'écho radar du pied de vigne par isosurfaces en recombinant les niveaux maxima d'écho pour les couplages VV, VH, HV et HH. Echelle : -65dB (bleu) à -35dB (rouge).

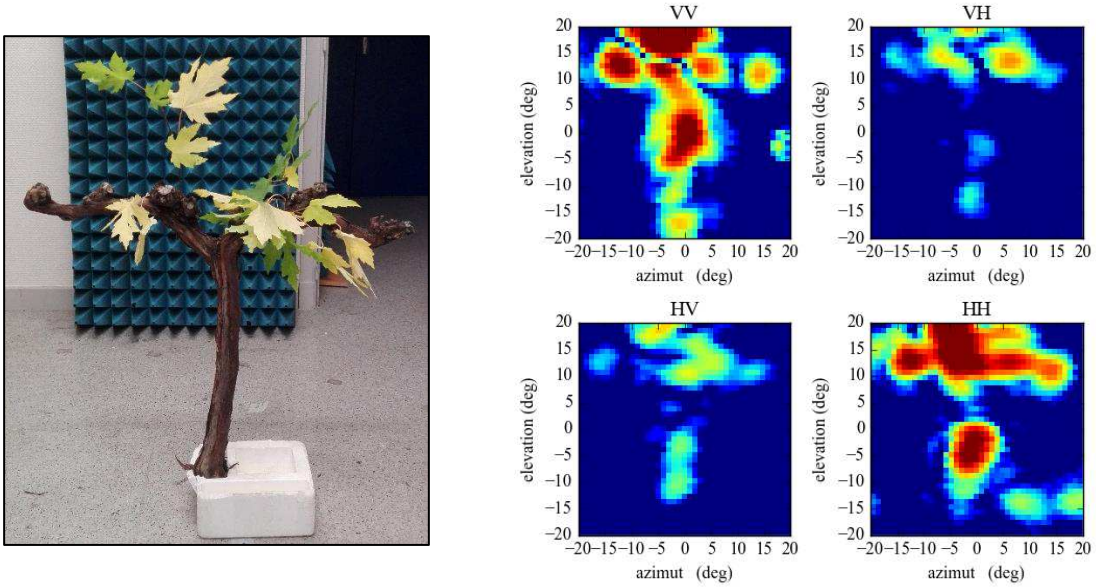
4.3.3.3. *Pied de vigne avec des feuilles*

Il a été montré dans la section 4.3.2 que les feuilles provoquaient une atténuation non-négligeable du signal électromagnétique. Cette atténuation dépendait notamment de la disposition de ces feuilles. On cherche à vérifier ici si les feuilles, par leur disposition peu régulière, dépolarisent le signal incident. On place alors sur le pied de vigne présenté dans la section 4.3.3.2 des feuilles dans des orientations différentes. Le balayage mécanique 3D est effectué, et les images de l'écho radar 2D dans le plan (θ,φ) pour les différents couplages de polarisation, ainsi qu'une photographie du pied de vigne avec les feuilles, sont affichés (voir Figure 90). Par comparaison avec les images radar obtenues sur le pied de vigne sans les feuilles (voir Figure 88), on observe l'apparition de nouveaux échos radar avec un niveau VV (-27,2dB) et HH (-36,0dB) élevés à l'emplacement des feuilles disposées au-dessus du pied de vignes. D'autres échos radars au niveau de l'emplacement des feuilles sont présents en VH et HV, synonyme

d'une dépolarisation du signal. Cette différence apportée par les feuilles dans chaque polarisation est mise en évidence par l'affichage de l'estimateur $N_{e>thresh}$ du pied de vigne seule (courbes bleues) et avec des feuilles (courbes vertes) sur la Figure 91. La courbe rouge en pointillée représente la différence entre les estimateurs $N_{e>thresh}$ avec et sans feuilles, notée $\Delta N_{e>thresh}$. On remarque alors que les feuilles apportent de nouvelles rétrodiffusions radars représentées par des valeurs positives de voxels, avec au maximum :

- +1130 voxels en couplage VV pour un seuil ≥-63,0 dB
- +840 voxels en couplage VH pour un seuil ≥-70,5 dB
- +1160 voxels en couplage HV pour un seuil ≥-70,0 dB
- +1270 voxels en couplage HH pour un seuil ≥-62,0 dB

Les feuilles apportent donc des rétrodiffusions qui se répartissent plutôt uniformément suivant les quatre combinaisons VV, HH, HV et VH. Ces perturbations dues au feuillage seront aussi à prendre en compte pour l'estimation du volume des grappes de raisin.



(a) (b)

Figure 90. (a) Photographie du pied de vigne avec les feuilles et (b) Image radar 2D dans le plan (θ,φ) pour R=1,35m (soit 18 fois la résolution en profondeur *d*) pour les quatre couplages. Echelle : -60dB (bleu) à -40dB (rouge).

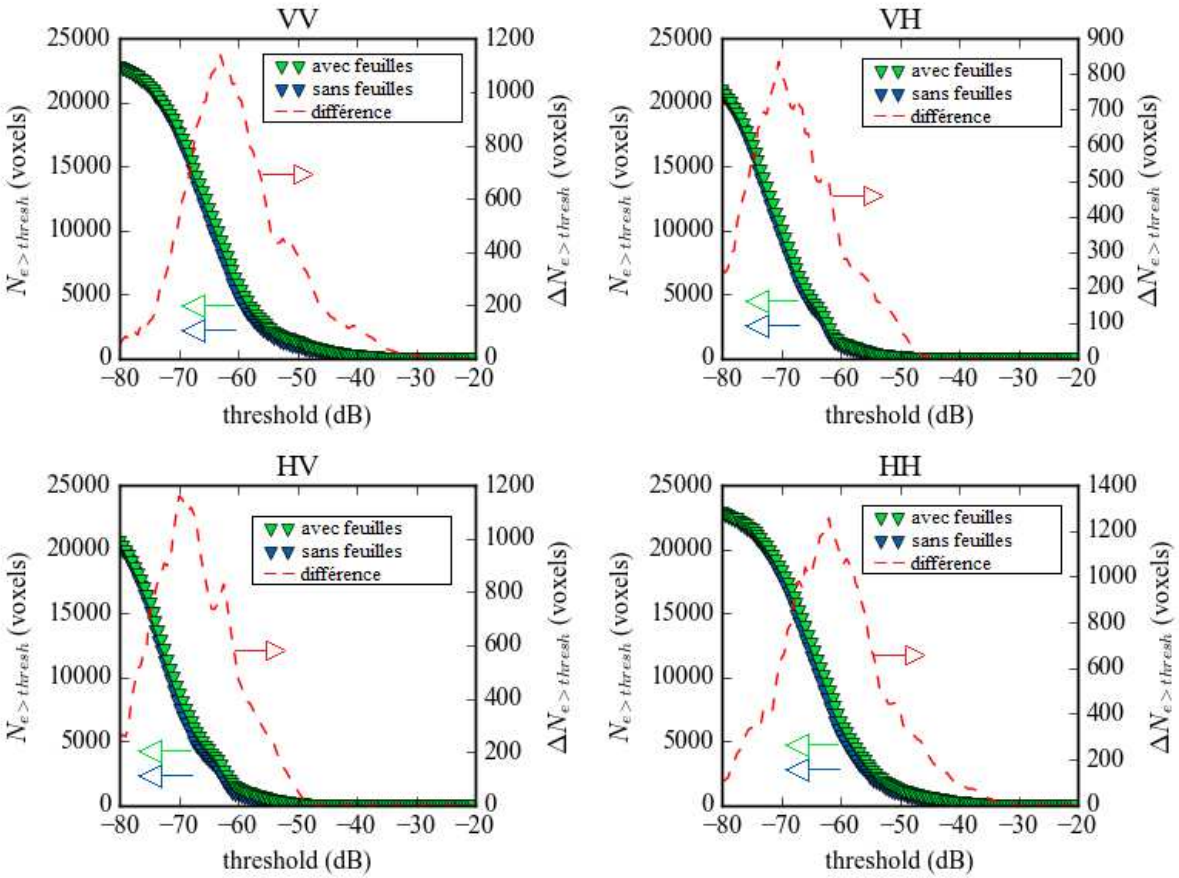


Figure 91. Estimateur $N_{e>thresh}$ (ou fonction de répartition) des échos radars pour un pied de vigne seul (couleur bleue) et en présence de feuilles (couleur verte) pour les quatre couplages. La différence avec/sans feuilles $\Delta N_{e>thresh}$ est représentée par la courbe rouge en pointillés.

4.3.3.4. *Pied de vigne avec des feuilles et ajout d'une grappe de raisin*

Dans la scène décrite dans la section 4.3.3.3 est ajoutée une grappe de raisin sur le sarment droit du pied de vigne et très légèrement occultée par les feuilles. Le même balayage mécanique est effectué, et les images radar 2D dans le plan (θ,φ) sont affichées ainsi qu'une photographie de la scène sur la Figure 92. Les images radars en couplage de polarisation VH et HV montrent un écho radar à l'emplacement de la grappe de raisin, avec un niveau d'écho maximal atteignant -36,3dB, synonyme d'une forte dépolarisation de la grappe de raisin. D'après les résultats obtenus dans la section 4.3.3.1, cette dépolarisation est du même ordre de grandeur lorsque la grappe de raisin est seule. Afin de caractériser la contribution de la grappe de raisin sur la scène de mesure pour les quatre couplages de polarisation, un comparatif avec/sans grappe est effectué en utilisant les données de mesure de la section 4.3.3.3. L'estimateur $N_{e>thresh}$ est alors calculé, puis comparé entre les deux situations. Sur la Figure 93 est représenté $N_{e>thresh}$ pour les quatre couplages de polarisation sans (courbe bleue) et avec la grappe de raisin (courbe verte). La différence de voxels avec/sans la grappe de raisin est représentée par $\Delta N_{e>thresh}$ (courbe rouge). La contribution de la grappe de raisin est la suivante :

- +586 voxels en couplage VV pour un seuil ≥-65,0 dB
- +397 voxels en couplage VH pour un seuil ≥-69,0 dB
- +949 voxels en couplage HV pour un seuil ≥-72,0 dB
- -1016 voxels en couplage HH pour un seuil ≥-63,5 dB

On remarque une diminution du nombre de voxels en couplage HH supérieurs à -63,5dB. Ce résultat s'explique par deux raisons :

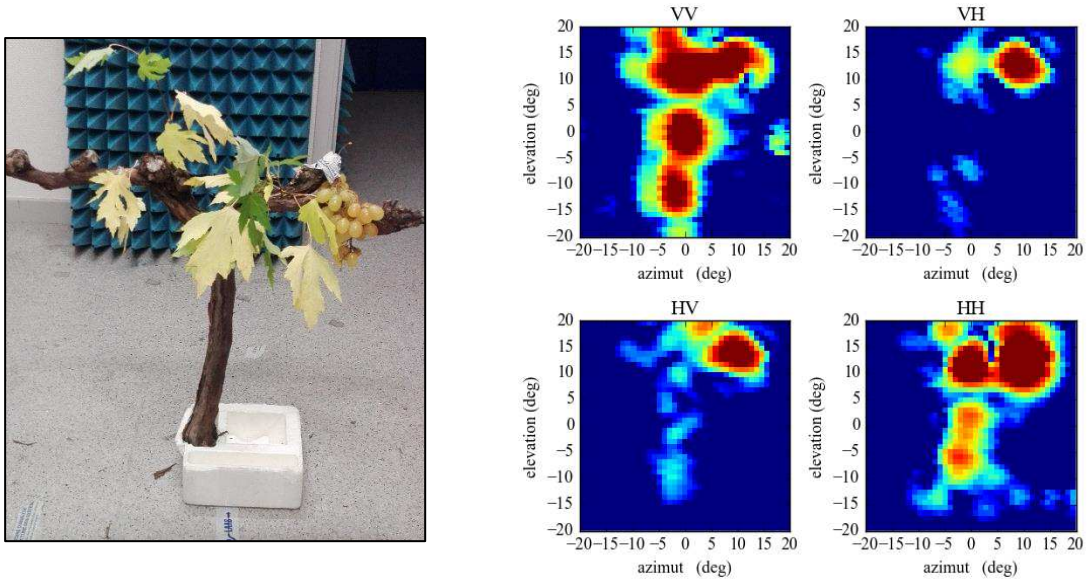
(i) Un effet de masquage du sarment droit par la grappe de raisin. En effet, dans la section 4.3.3.3 l'écho radar du sarment droit en couplage HH était relativement élevé. Le sarment est masqué par la grappe et provoque une diminution significative du nombre de voxels en couplage HH avec un niveau d'écho élevé.

(ii) Le changement de position des feuilles entre les mesures avec/et sans grappes. Cette modification de la scène peut provoquer des variations de polarisation.

L'analyse de dépolarisation peut donc se révéler comme un moyen d'identification d'échos radar des grappes parmi d'autres cibles comme le pied de vigne ou les feuilles. Afin de vérifier si la dépolarisation observée est due principalement à la grappe, et non d'une interaction avec le sarment, on procède de nouveau à un balayage 3D, avec cette fois-ci une sphère métallique de 7cm de diamètre, connue pour ne pas dépolariser les ondes électromagnétiques (voir partie 3). Cette sphère métallique est ensuite remplacée par une autre grappe plus petite que la première. Sur la Figure 94 est représentée les images radar 2D dans le plan (θ,φ) pour R=1,275m (soit 17 fois la résolution en profondeur *d*) ainsi que des photographies de la scène avec la sphère métallique ou la grappe de raisin.

Lorsque la sphère métallique est présente, on remarque alors l'apparition d'un nouvel écho radar appartenant à cette dernière. Cet écho radar rétrodiffuse fortement (-30,0dB au maximum) aux copolarisations VV et HH, et faiblement (-47,1dB au maximum) aux polarisations croisées VH et HV. On comprend donc que la dépolarisation est bien une propriété propre à la grappe de raisin et ses contours irréguliers. La sphère, de forme régulière, reste quant à elle beaucoup moins détectable en polarisation croisée.

Cette analyse se confirme lorsque l'on place la deuxième grappe de raisin à la place de la sphère métallique : des échos radar en polarisation croisée apparaissent comme pour la première grappe, à des niveaux d'échos maximum de -41,6dB (en couplage VH) et de -40,3dB (en couplage HV). On peut donc créer un estimateur basé sur les échos radars en polarisation croisée. Dans le Tableau 44 sont reportés les estimateurs $N_{e>-60dB}$ et $N_{e>-55dB}$ pour les couplages VH et HV en fonction du nombre de grappes présentes dans la scène. L'ajout du fil métallique horizontal est mentionné dans ce tableau car il influence la valeur des estimateurs en polarisation croisée (voir section 4.3.3.5 suivante). Les estimateurs augmentent avec le nombre de grappes en couplage HV. Ce n'est pas le cas pour la couplage VH entre les mesures avec une et deux grappes : des effets de masquage du sarment gauche par la seconde grappe ont peut-être lieu. Il est en tout cas certain que ce genre d'estimation dépend de l'environnement, puisque l'ajout du fil métallique, ou le changement d'orientation des feuilles, suffit à modifier significativement les valeurs de $N_{e>thresh}$.



(a) (b)

Figure 92. (a) Photographie du pied de vigne avec les feuilles et la grappe de raisin (b) Image radar 2D dans le plan (θ,φ) pour R=1,275m (soit 17 fois la résolution en profondeur *d*) pour les quatre couplages. Echelle : -60dB (bleu) à -40dB (rouge).

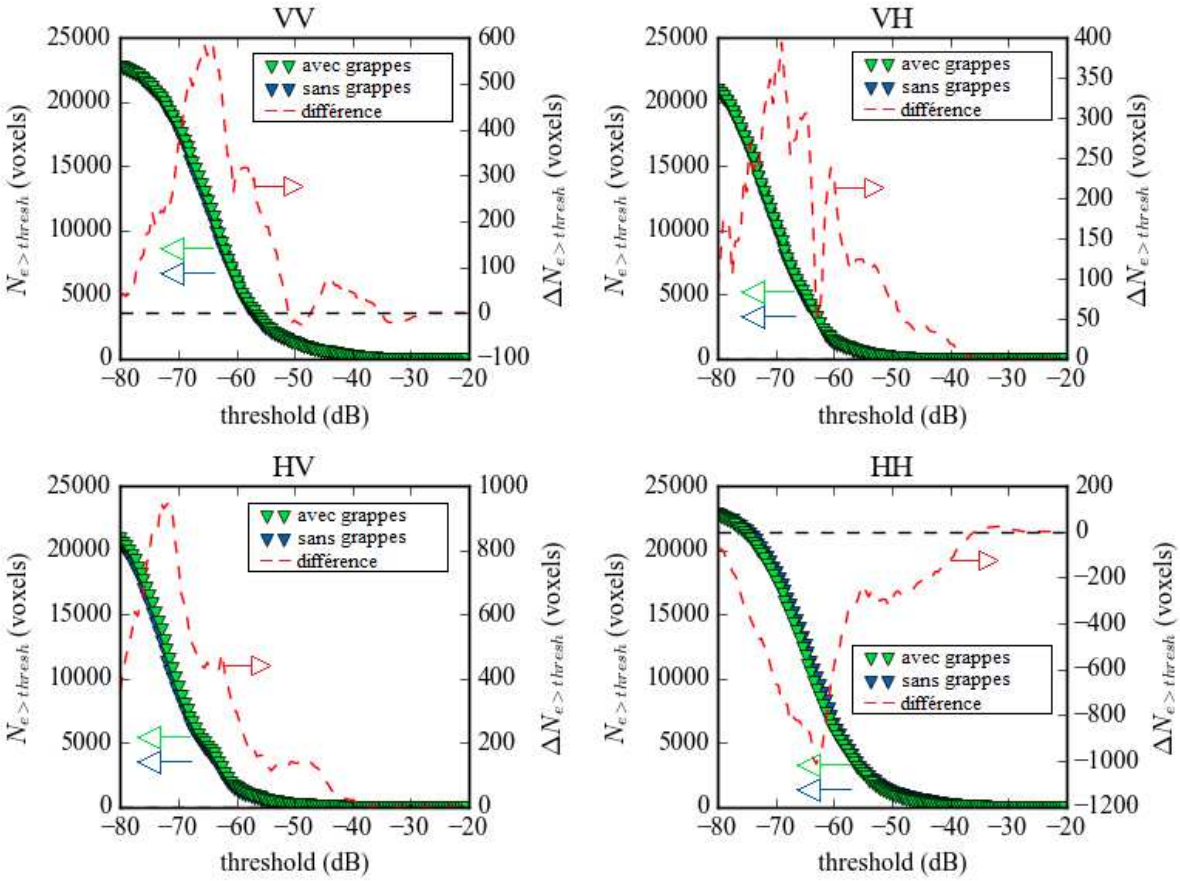
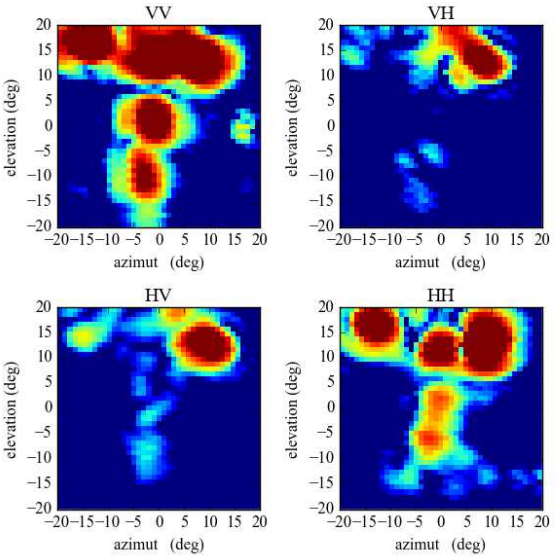
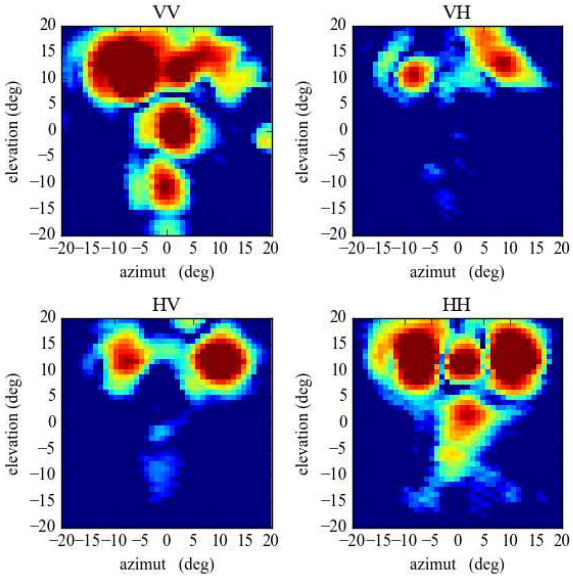


Figure 93. Estimateur $N_{e>thresh}$ (ou fonction de répartition) des échos radars pour un pied de vigne avec feuilles sans grappe (couleur bleue) et en présence d'une grappe de raisin (couleur verte) pour les quatre couplages. La différence avec/sans grappe $\Delta N_{e>thresh}$ est représentée par la courbe rouge en pointillés.



(a) (b)



(c) (d)

Figure 94. (a) Photographie du pied de vigne avec les feuilles et la grappe de raisin et la sphère métallique. (b) Image radar 2D associée dans le plan (θ,φ) pour R=1,275m (soit 17 fois la résolution en profondeur *d*) pour les quatre couplages de polarisation. (c) Photographie du pied de vigne avec les feuilles et deux grappes de raisin. (d) Image radar 2D associée dans le plan (θ,φ) pour R=1,275m (soit 17 fois la résolution en profondeur *d*) pour les quatre couplages de polarisation. Echelle : -60dB (bleu) à -40dB (rouge).

Estimateur	**$N_{e>-60dB}$ (VH)**	**$N_{e>-55dB}$ (VH)**	**$N_{e>-60dB}$ (HV)**	**$N_{e>-55dB}$ (HV)**
aucune grappe	1228 voxels	458 voxels	1241 voxels	493 voxels
une grappe	1457 voxels	582 voxels	1539 voxels	628 voxels
une grappe + fil*	1606 voxels	606 voxels	1731 voxels	696 voxels
deux grappes +fil*	1342 voxels	548 voxels	1959 voxels	799 voxels

* voir section 4.3.3.5

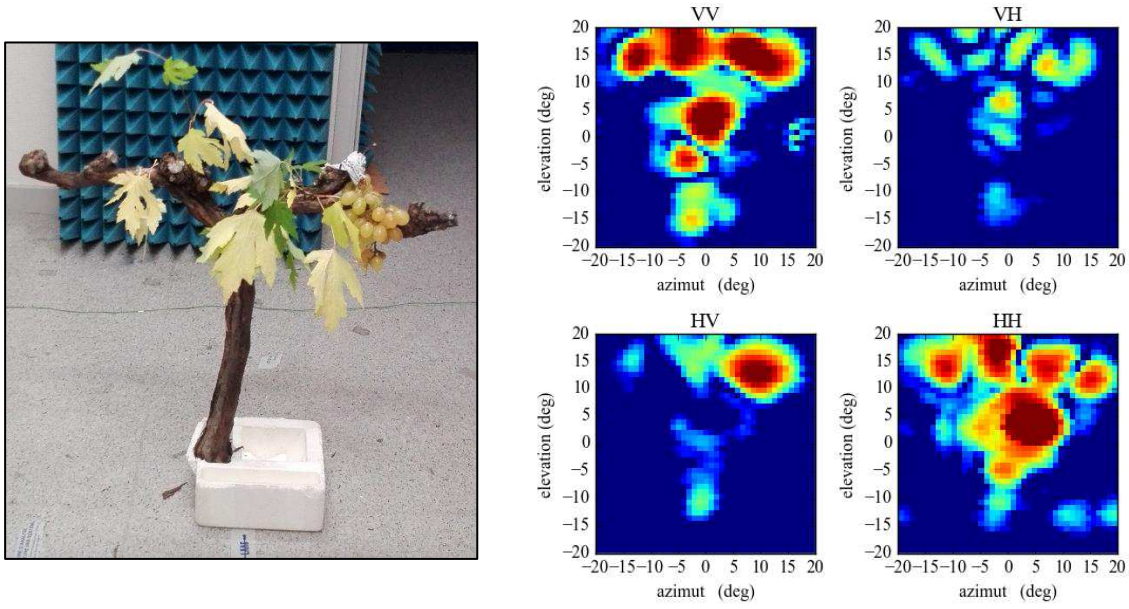
Tableau 44. Variation de l'estimateur $N_{e>-60dB}$ et $N_{e>-55dB}$ en polarisation croisée en fonction du nombre de grappes présentes dans la scène, et la contribution du fil métallique horizontal

4.3.3.5. *Ajout d'un fil métallique horizontal dans la scène*

De nombreux éléments métalliques, notamment des tendeurs horizontaux ou des tuyaux d'irrigation, sont présents dans les vignobles. Afin d'étudier la rétrodiffusion de ce type d'élément, on ajoute un fil de fer horizontal derrière le tronc à mi-hauteur. Le placement du fil de fer a eu lieu avant l'ajout de la seconde grappe de raisin. La photographie de la scène ainsi que les images radar 2D dans le plan (θ,φ) pour les différents couplages de polarisation sont affichées sur la Figure 95 pour R=1,35m. On remarque nettement un écho radar en couplage HH (-30,6 dB) caractéristique de la rétrodiffusion de fil métallique horizontal. L'ensemble des contributions apportées par le fil de fer horizontal est affiché sur la Figure 96 en comparant l'estimateur $N_{e>thresh}$ sans le fil métallique (courbe bleue) et avec le fil métallique (courbe verte). La différence entre les deux estimateurs avec/sans fil est représentée par $\Delta N_{e>thresh}$ (courbe rouge). La contribution du fil de fer peut se résumer par :

- +507 voxels en couplage VV pour un seuil ≥-60,5 dB
- +948 voxels en couplage VH pour un seuil ≥-72,6 dB
- +269 voxels en couplage HV pour un seuil ≥-64,5 dB
- +71 voxels en couplage HH pour un seuil ≥-46,0 dB

On note l'augmentation significative du nombre de voxels en couplage VH, due à l'orientation horizontale du fil métallique.



(a) (b)

Figure 95. (a) Photographie du pied de vigne avec les feuilles et la grappe de raisin et le fil de fer (b) Image radar 2D dans le plan (θ,φ) pour R=1,35m (soit 18 fois la résolution en profondeur *d*) pour les quatre couplages. Echelle : -60dB (bleu) à -40dB (rouge).

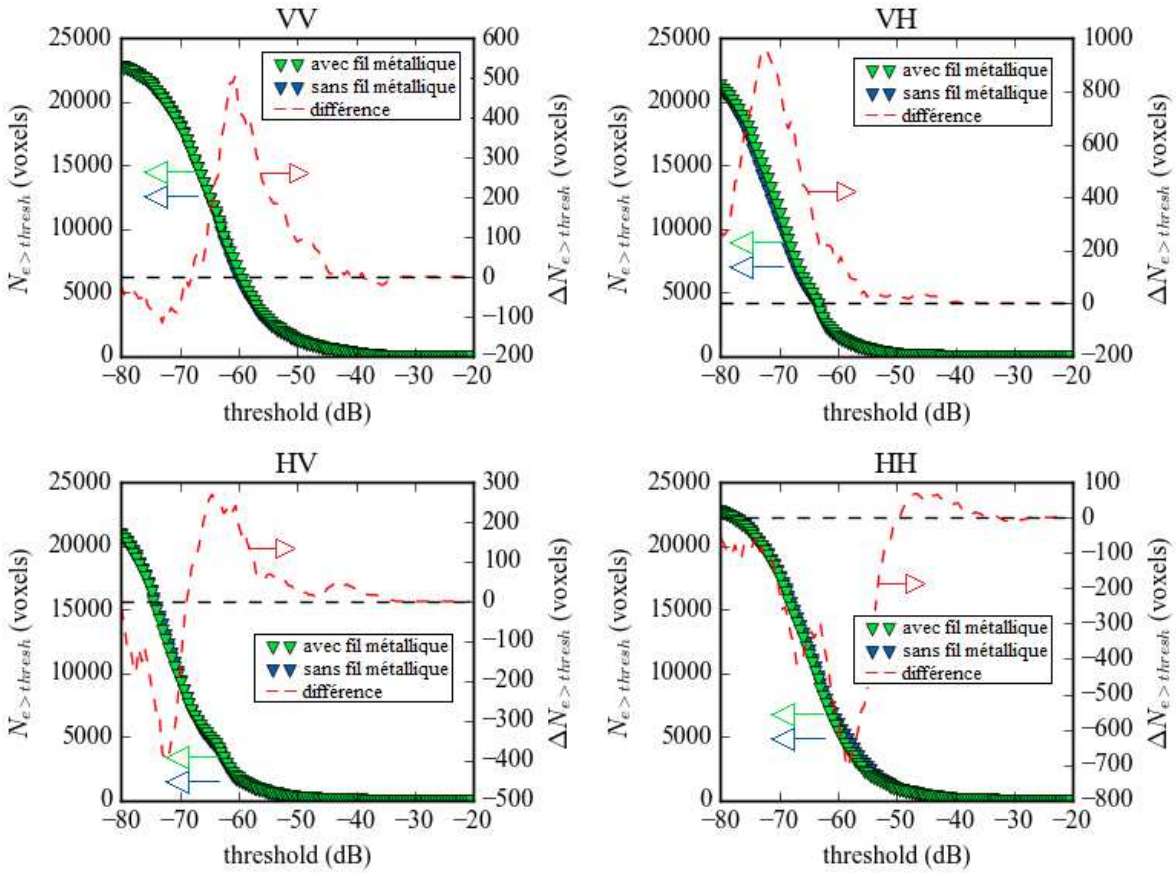


Figure 96. Estimateur $N_{e>thresh}$ (ou fonction de répartition) des échos radars pour un pied de vigne avec feuilles et une grappe de raisin sans (couleur bleue) et en présence d'un fil métallique horizontal (couleur verte) pour les quatre couplages. La différence avec/sans fil métallique $\Delta N_{e>thresh}$ est représentée par la courbe rouge en pointillés.

4.3.4. Sensibilité de la détection du volume des grappes

Dans cette section, on étudie la sensibilité du radar à détecter une variation de volume d'une grappe de raisin. Une grappe de raisin du commerce est interrogée en effectuant un balayage mécanique 3D avec le radar 24GHz en polarisation verticale et horizontale. Les paramètres de mesures sont reportés dans le Tableau 45. Plusieurs séries de mesures sont effectuées :

- Une grappe de raisin seule entière (50 grains)
- Suppression de 5 grains…
- Etc… jusqu'à obtenir une grappe ne comportant que 5 grains de raisin

Des photographies de la scène, ainsi que des représentations en 3D par isosurfaces de la rétrodiffusion de la grappe de raisin en combinant les couplages VV, VH, HV et HH (de la même manière que dans la section 4.3.3.1 en utilisant l'équation (1)), sont affichées pour la grappe de raisin avec 50, 35, 20 et 5 grains de raisin. Sur ces quatre exemples, on observe une diminution du niveau d'écho radar. En revanche, cette diminution n'est pas systématique. Les valeurs de $N_{e>-70dB}$ disponibles dans le Tableau 46 mettent en évidence des estimations irrégulières, en particulier un niveau d'écho élevé pour des grappes de raisin entre 5 et 25 grains. Ces irrégularités peuvent être causées par plusieurs raisons :

- Des résonances dues aux dimensions de la cible.
- Des interférences constructives dues à de multiples réflexions.

Ces effets peuvent entraîner des erreurs d'estimation du volume des grappes si ces dernières se retrouvent isolées de leur environnement (c'est-à-dire si elles ne sont pas en contact direct avec les sarments ou d'autres feuilles, pouvant alors générer ces résonances ou interférences) ce qui finalement a très peu de chance de se produire en conditions réelles. On propose néanmoins de définir un estimateur afin de pouvoir prédire le plus précisément possible le nombre de grains de raisin sur la grappe (ou le volume de cette grappe, en supposant que les grains de raisin aient la même taille). On émet alors l'hypothèse que l'estimation du nombre de grains de raisins est définie par une combinaison linéaire du nombre de voxels calculé à différents niveaux d'écho et différentes polarisations. L'estimation du nombre de grains est alors donnée par l'expression :

$$E_b = \sum_{p=VV,VH,HV,HH} a_p \cdot \omega(p) \tag{2}$$

avec

$$\omega(p) = \sum_{k=v_{Min}}^{v_{Max}} N_{e>v(k)}(p) \times d_v \tag{3}$$

$N_{e>v(k)}(p)$ représente le nombre de voxels supérieur à un niveau d'écho $v(k)$ pour un couplage de polarisation p, c'est-à-dire la fonction de répartition des niveaux d'écho dans le volume d'étude. Le terme $\omega(p)$ n'est autre que l'intégrale numérique par la méthode des rectangles de la fonction de répartition, calculée entre un niveau d'écho minimal v_{Min} et un niveau d'écho maximal v_{Max}, avec un pas d_v. Il s'agit alors de trouver les coefficients a_p pour chaque couplage tels que :

$$Y = A\overline{W} \tag{4}$$

avec

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_M \end{bmatrix}, \quad \overline{W} = \begin{bmatrix} 1 & \omega_{1,1} & \omega_{1,2} & \dots & \omega_{1,P} \\ 1 & \omega_{2,1} & \omega_{2,2} & \omega_{m,p} & \omega_{2,P} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \omega_{M,1} & \omega_{M,2} & \dots & \omega_{M,P} \end{bmatrix} \text{ and } A = \begin{bmatrix} \beta \\ \alpha.a_{VV} \\ \vdots \\ \alpha.a_{HH} \end{bmatrix} \tag{5}$$

Le vecteur Y représente le nombre de grains estimé pour M mesures radars. $\overline{W}$ est une matrice $P\times(M+1)$ composée des $\omega_{m,p}$ éléments pour un couplage p et une mesure m. Les coefficients réels α et β sont respectivement la pente et l'interception de l'estimateur tels que pour une mesure m effectuée par le radar. La relation entre E_b et le nombre de grain estimé est y_m donné par :

$$E_b = \alpha y_m + \beta \tag{6}$$

Le vecteur A solution de cette équation est alors obtenu en calculant :

$$A = \overline{W}^{\dagger} Y + \left[I - \overline{W}^{\dagger}\overline{W}\right] u \tag{7}$$

$\overline{W}^{\dagger}$ représente la matrice pseudo-inverse de $\overline{W}$, I la matrice identité et u un vecteur arbitraire. La linéarité de l'estimateur E_b augmente avec la réduction du terme $\left[I - \overline{W}^{\dagger}\overline{W}\right] u$. Les bornes v_{Min} et v_{Max} choisies pour le calcul de $\omega(p)$ sont les valeurs minimales et maximales mesurées pendant les mesures. Le pas d_v choisi est de 0,5dB.

Le résultat de l'estimation est affiché sur la Figure 98 et les caractéristiques de l'estimateur sont reportées dans le Tableau 47. Lorsque l'estimateur est calculé sur l'ensemble des mesures entre 0 grains et 50 grains, on obtient un coefficient de détermination R^2=0,87, avec une précision sur le modèle linéaire de 6 grains. En approximant le grain de raisin à une sphère de 2cm de diamètre, c'est-à-dire d'un volume d'environ 4mL, la précision du modèle linéaire est de l'ordre de 24mL. Lorsque l'on retire de l'estimation les trois mesures où l'on suppose l'apparition de résonances ou autres interférences (pour 5, 15 et 25 grains), le coefficient de détermination est grandement amélioré, avec R^2=0,95 et la précision (volumique) du modèle linéaire est de l'ordre de 16mL. On peut donc estimer le volume d'une grappe isolée avec une bonne précision. En revanche, en-dessous d'un certain volume et pour certaines formes de grappes, des résonances électromagnétiques (ondes rampantes) peuvent apparaître et perturber cette estimation.

Variation du volume d'une grappe de raisin	
système radar	DK-sR-1030[e]
fréquence porteuse	23,8 GHz
bande de modulation	2 GHz
résolution en profondeur	7,5 cm
puissance en entrée	20 dBm
(Tx) antenne	antenne cornet avec lentille [a]
(Rx1/Rx2) antennes	antennes cornets [a]
grappe seule	
scan en azimut	-10° à 10°
résolution en azimut	1°
scan en élévation	-10° à 10°
résolution en élévation	1°
distance de la grappe	1m

[a] caractéristiques disponibles en annexe

Tableau 45. Paramètres des mesures effectuées pour caractériser la variation de volume d'une grappe de raisin.

estimateurs (voxels)	**$N_{e>-70dB}$ (VV)**	**$N_{e>-70dB}$ (VH)**	**$N_{e>-70dB}$ (HV)**	**$N_{e>-70dB}$ (HH)**	**$N_{e>-70dB}$ (max)**
aucune grappe	1060	0	0	909	1388
5 grains	1208	245	305	1092	1503
10 grains	1154	139	169	1041	1415
15 grains	1291	275	219	1283	1602
20 grains	1005	143	86	1233	1496
25 grains	1067	473	515	1261	1513
30 grains	1181	336	488	958	1431
35 grains	1145	332	322	1062	1481
40 grains	1229	288	309	1120	1482
45 grains	1288	537	617	1231	1588
50 grains	1354	375	391	1255	1689

Tableau 46. Variation de l'estimateur $N_{e>-70dB}$ pour les couplages VV, VH, HV et HH et de la combinaison des quatre couplages de polarisation en fonction du nombre de grains de raisin.

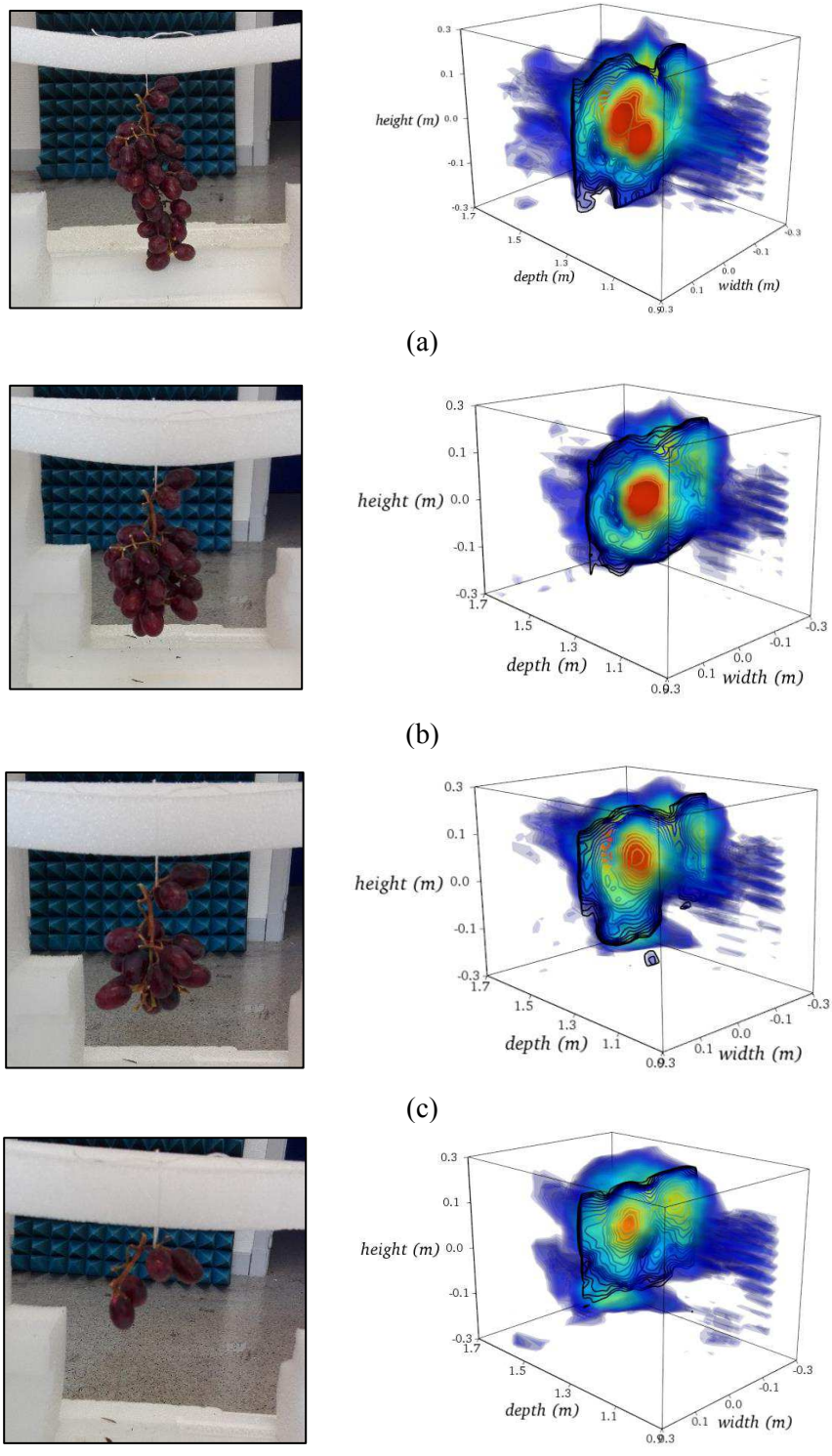
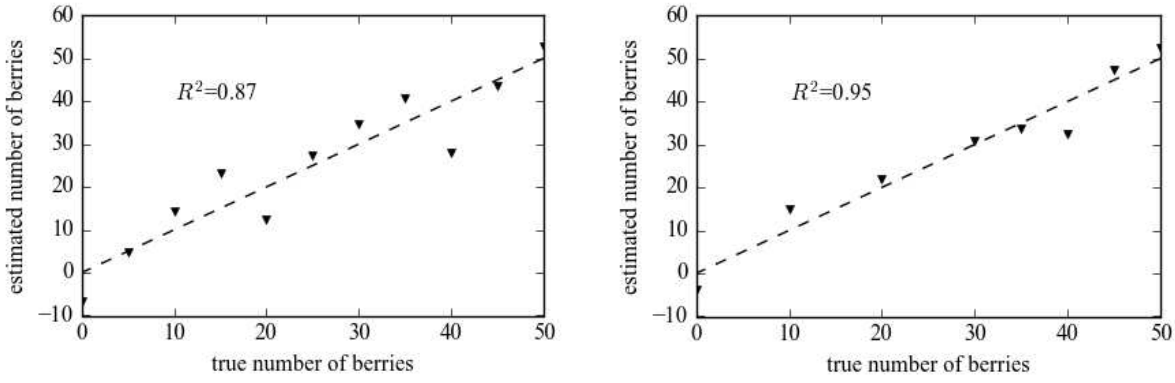


Figure 97. Photographie de la grappe de raisin (gauche) et écho radar 3D par isosurface correspondant (droite) en combinant les quatre couplages VV, VH, HV et HH pour (a) 50 grains ; (b) 35 grains ; (c) 20 grains ; (d) 5 grains. Echelle : -60 dB (bleu) à -40dB (rouge).



(a) (b)

Figure 98. Estimation du nombre de grains présents sur la grappe de raisin avec l'estimateur E_b pour (a) l'ensemble des mesures et (b) en retirant les mesures où apparaissent probablement des résonances pour 5 grains, 15 grains et 25 grains.

estimateur E_b – toutes les mesures			
R^2	0,84	a_{VV}	2,1E-1
précision du modèle linéaire	7 grains	a_{VH}	7,8E-1
α (voxels.dB.grains^{-1})	127	a_{HV}	-5,0E-1
β (voxels.dB)	33,2E3	a_{HH}	-3,0E-1
estimateur E_b – retrait de 3 mesures			
R^2	0,97	a_{VV}	2,2E-1
précision du modèle linéaire	3 grains	a_{VH}	8,5E-1
α (voxels.dB.grains^{-1})	241	a_{HV}	-4,6E-1
β (voxels.dB)	119,3E3	a_{HH}	-7,4E-1

Tableau 47. Paramètres de l'estimateur E_b calculés pour l'ensemble des mesures, puis en retirant les mesures où apparaissent probablement des résonances pour 5 grains, 15 grains et 25 grains

4.3.5. Influence du vent

Dans cette section est étudiée l'influence du vent sur les images radar. Le vent peut provoquer des mouvements sur les feuilles, et ainsi perturber l'estimation du volume des grappes de raisin en générant des fluctuations du niveau d'écho radar et des effets Doppler indésirables. Afin de caractériser le mouvement des feuilles, on procède à un balayage 3D d'une scène composée d'un pied de vigne et de deux grappes, dont l'une est cachée par des feuilles. Un ventilateur (débit 61m^3.h^{-1}) est fixé au pan-tilt afin de provoquer un souffle dans la direction d'interrogation du radar. Des photographies du système avec le ventilateur, ainsi que de la scène sont affichées sur la Figure 99 et les paramètres de mesures sont reportés dans le Tableau 18. Lorsque le ventilateur est activé, on procède à la mesure de 12 répétitions successives dans la même direction, afin d'établir des analyses statistiques sur les niveaux d'écho enregistrés. On définit alors l'écart-type de variation temporelle σ_0 pour un voxel donné par la relation :

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{1}{N_{Rep}} \sum_{k=1}^{N_{Rep}} |v_k - \bar{v}_t|^2} \quad (8)$$

Où N_{Rep} représente le nombre de mesures effectuées dans une direction d'interrogation, v_k est le niveau d'écho du voxel pour la mesure k et $\bar{v}_t$ la valeur moyenne du niveau d'écho du voxel sur l'ensemble des mesures. On définit de même l'écart-type de variation spatiale σ_1 pour un voxel donné par :

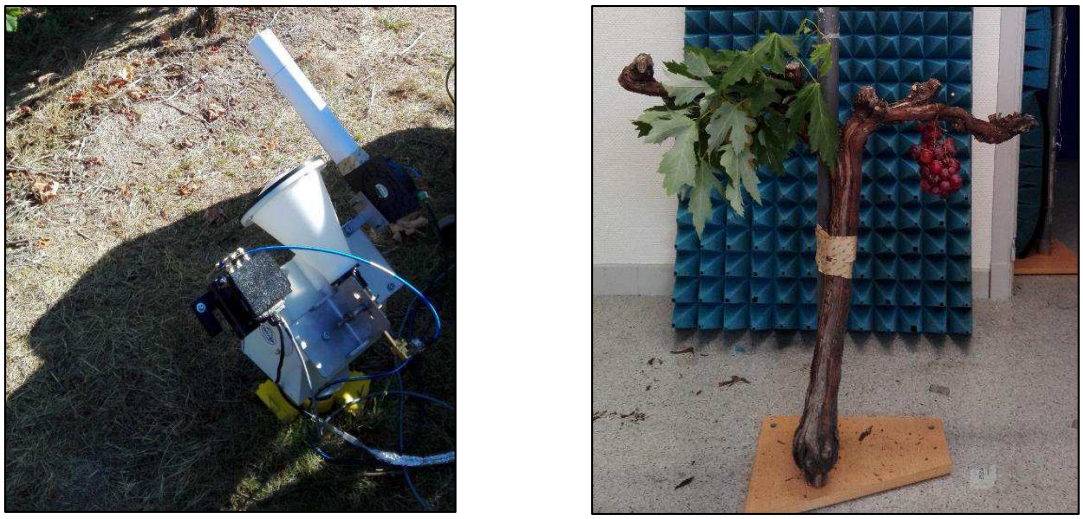
$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{1}{N_\varphi N_\theta}\sum_{p=1}^{N_\varphi}\sum_{q=1}^{N_\theta}\left|v_{p,q} - \overline{v_s}\right|^2} \quad (9)$$

Où σ_1 est calculé pour chaque voxel v dans un motif de dimensions $N_\varphi \times N_\theta$ et $\overline{v_s}$ représente la moyenne du niveau d'écho du voxel central dans cette fenêtre. Pour les mesures suivantes, on utilisera un motif de 3x3 voxels.

Les images radar 2D du niveau d'écho et de σ_1 dans le plan (θ,φ) pour R=1,05m (soit 14 fois la résolution en profondeur *d*) sont affichées sur la Figure 100. Le niveau d'écho mesuré sans vent (a) (c'est-à-dire sans activation du ventilateur), met en évidence deux échos radars, le premier correspondant à la grappe de raisin seule sur le sarment droit, et le second correspondant à l'autre grappe de raisin sous les feuilles au niveau du sarment gauche. Le plus faible niveau d'écho de la grappe sous les feuilles est prévisible, comme remarqué dans la section 4.3.2. Les valeurs de $\sigma_1$sans vent (b) mettent en évidence une faible variation spatiale du niveau d'écho à l'emplacement des grappes (σ_1<2dB). En revanche, cette variation spatiale augmente autour des échos radars (σ_1>5dB), ce qui donne une impression de contour des échos. Cet effet est dû à un gradient d'écho variable des cibles. Lorsque le faisceau de l'antenne de transmission illumine le centre d'une cible suffisamment grande (tronc ou grappe de raisins), les variations du niveau d'écho sont alors plus faibles et la valeur de $\sigma_1$diminue. Quand ce faisceau illumine le bord des cibles, les variations du niveau d'écho sont plus fortes et la valeur de $\sigma_1$augmente, d'où cet effet de contour.

Sur la Figure 101 se trouvent les valeurs de σ_0 et σ_1 lorsque le ventilateur est activé (mêmes coordonnées que les images radar précédentes données sur la Figure 100). Le mouvement des feuilles génère des variations temporelles du niveau d'écho, comme le montrent les valeurs élevées de σ_0 (a) à l'emplacement des feuilles. En revanche, les valeurs de σ_0 sont faibles (inférieures à 1dB) à l'emplacement de la grappe de raisin sans feuilles. Les variations spatiales du niveau d'écho (b) mettent aussi en évidence la présence des feuilles en mouvement par des valeurs de σ_1 plus élevées (supérieures à 6dB) à leur emplacement au niveau du sarment gauche.

Sur la Figure 102 sont reportées des images radars 2D dans le plan (θ,φ) pour des combinaisons maximales de niveaux d'écho en R={0,975m, 1,050m, 1,125m} (soit 13, 14 et 15 fois la résolution en profondeur *d*). Sur (a) et (b) sont représentés les niveaux d'écho de la scène d'une seule mesure en présence des feuilles en mouvement avec et sans la grappe derrière les feuilles. Le cercle rouge indique la grappe sur le sarment droit, facilement détectable dans les deux cas. En revanche, la détection de la grappe derrière les feuilles est plus difficile. Sur (c) et (d) sont représentées les mêmes scènes, mais après une moyenne de 12 mesures successives. La deuxième grappe est alors plus facilement détectable (deuxième cercle rouge sur l'image (d)). Une amélioration significative des estimateurs $N_{e>-65dB}$ et $N_{e>-60dB}$ sont visibles dans le Tableau 49 après la moyenne des mesures, où le nombre de voxels augmente avec le nombre de grappes ($N_{e>-65dB}$ augmente de 44 voxels après l'ajout de la seconde grappe). La moyenne de plusieurs mesures peut alors s'avérer nécessaire pour diminuer les variations de niveaux d'écho généré par les feuilles en mouvement. En revanche, cela nécessite plusieurs interrogations de la même scène, ce qui entraîne des temps d'acquisitions plus élevés, ce qui n'est pas forcément désirable pour notre application. D'autres méthodes peuvent être envisagées pour réduire l'effet de mouvement des feuilles, par exemple des analyses polarimétriques (non étudiées ici en laboratoire pour des feuilles en mouvement).



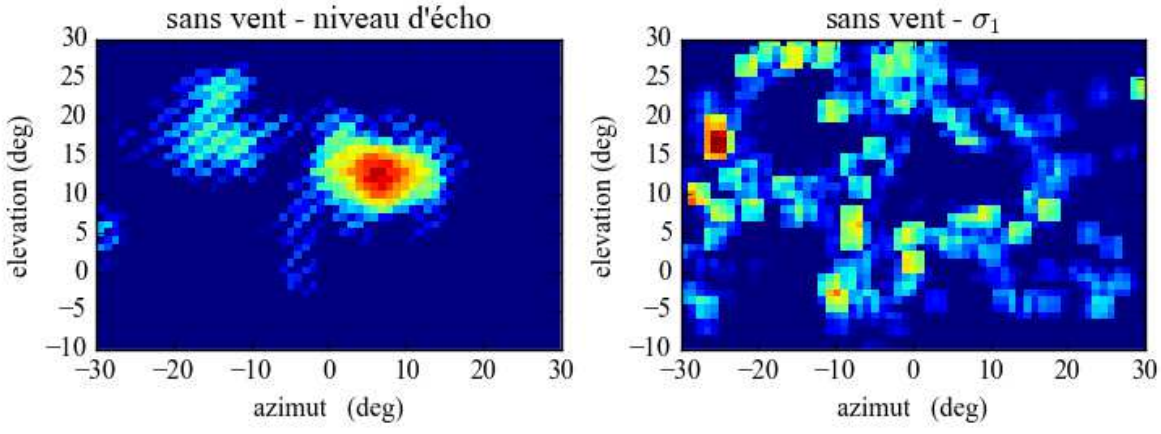
(a) (b)

Figure 99. (a) Photographie du système radar avec le ventilateur et (b) pied de vigne avec une grappe de raisin sur le sarment droit et une autre grappe de raisin cachée sous les feuilles sur le sarment gauche.

caractérisation de l'influence du vent	
système radar	DK-sR-1030e
fréquence porteuse	23,8 GHz
bande de modulation	2 GHz
résolution en profondeur	7,5 cm
puissance en entrée	20 dBm
(Tx) antenne	antenne cornet avec lentille [a]
(Rx1/Rx2) antennes	antennes patches 1x4 [a]
scan en azimut	-20° à 20°
résolution en azimut	1°
scan en élévation	-10° à 30°
résolution en élévation	1°
distance des cibles	1m
Nombre de répétitions	12

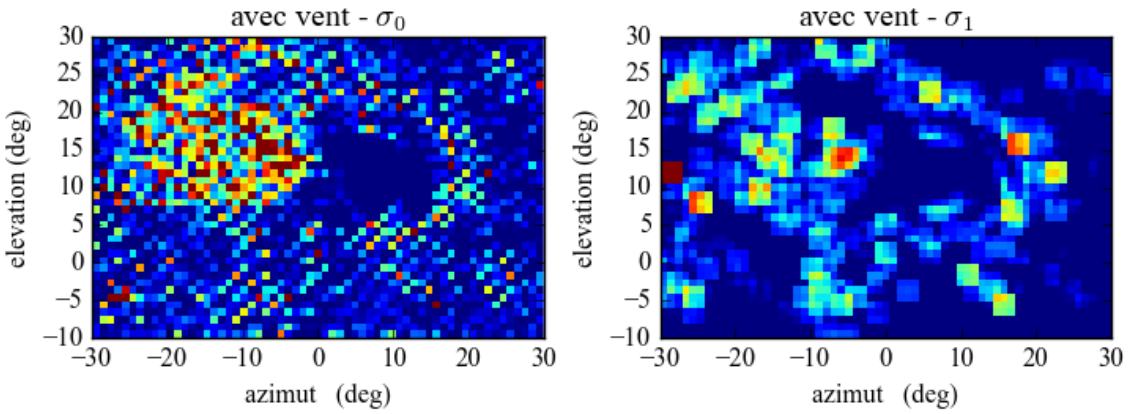
[a] caractéristiques disponibles en annexe

Tableau 48. Paramètres des mesures effectuées pour caractériser l'influence du vent.



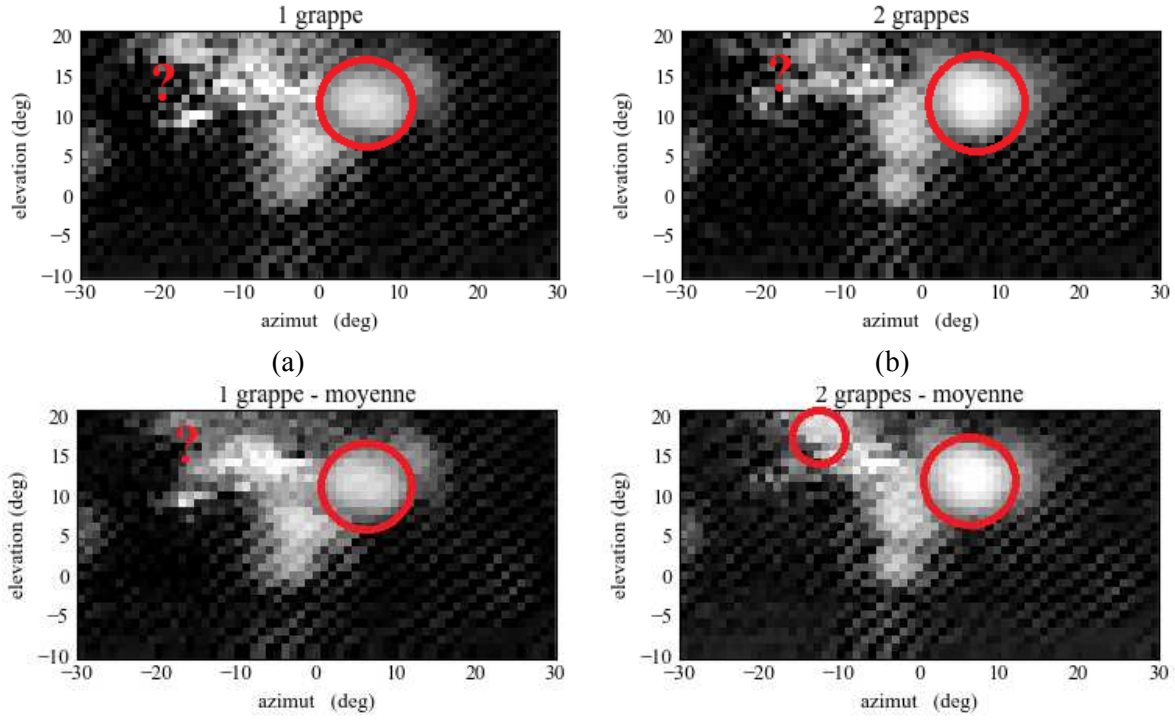
(a) (b)

Figure 100. Images radar 2D dans le plan (θ,φ) pour R=1,05m (soit 14 fois la résolution en profondeur *d*) du pied de vigne et des deux grappes de raisin, dont une sous des feuilles pour :
(a) une mesure sans vent du niveau d'écho – échelle : -75dB (bleu) à -55dB (rouge)
(b) une mesure sans vent de σ_1 pour une fenêtre de 3x3 voxels – échelle : 3 dB (bleu) à 10dB (rouge)



(a) (b)

Figure 101. Images radar 2D dans le plan (θ,φ) pour R=1,05m (soit 14 fois la résolution en profondeur *d*) du pied de vigne et des deux grappes de raisin, dont une sous des feuilles pour :
(a) une mesure avec vent de σ_0 pour 12 mesures successives – échelle : 1 dB (bleu) à 6dB (rouge)
(b) une mesure avec vent de $\sigma_1$pour une fenêtre de 3x3 voxels – échelle : 3 dB (bleu) à 10dB (rouge)



(a) (b)

(c) (d)

Figure 102. Images radar 2D dans le plan (θ,φ) pour une combinaisons d'échos maximaux en R={0,975m,1,050m, 1,125m}(soit 13,14 et 15 fois la résolution en profondeur *d*) en présence de vent pour :
(a) 1 grappe de raisin dans la scène pour une seule mesure effectuée
(b) 2 grappes de raisin dans la scène pour une seule mesure effectuée
(c) 1 grappe de raisin dans la scène sur une moyenne de 12 mesures effectuées
(d) 2 grappes de raisin dans la scène sur une moyenne de 12 mesures effectuées
échelle : -75dB (noir) à -55(dB) blanc

estimateurs (voxels)	$N_{e>-65dB}$	$N_{e>-60dB}$
1 grappe	467	122
2 grappes	363	97
1 grappe – moyenne	364	100
2 grappes – moyenne	408	132

Tableau 49. Variation des estimateurs $N_{e>-65dB}$ et $N_{e>-60dB}$ pour une et deux grappes de raisin et avec ou sans moyenne des mesures en présence de vent.

4.3.6. Influence de la rosée

Un dernier paramètre environnemental pouvant perturber l'estimation du volume des grappes de raisin est la rosée. Les fines gouttelettes d'eau se trouvant sur les feuilles peuvent augmenter leur rétrodiffusion, mais aussi augmenter l'effet atténuateur des feuilles déjà présenté dans la section 4.3.2. Afin de caractériser l'effet de la rosée sur l'estimation du volume, on propose l'expérience suivante : une sphère métallique de 6,4cm de diamètre est disposée à 1,5m de distance du radar. Entre le radar et la sphère s'intercale une feuille en plastique à une dizaine de centimètres de la sphère. Un balayage 3D, dont les paramètres de l'interrogation sont disponibles dans le Tableau 50, est effectué deux fois : (i) pour une feuille de plastique sèche et (ii) pour une feuille de plastique aspergée de gouttelettes d'eau. Une photographie de l'expérience est disponible sur la Figure 103. L'écho radar de la sphère métallique est ensuite analysé dans les deux situations. L'image radar 2D correspondante dans plan de coupe (θ,φ) est affichée pour R=1,50m (soit 20 fois la résolution en profondeur *d*) sur la Figure 104 pour la feuille de plastique sans (a) et avec gouttelettes (b), ainsi que les valeurs de trois estimateurs pour les différents couplages reportées dans le Tableau 51. Ces estimateurs sont calculés dans un volume comprenant la sphère métallique et la feuille de plastique. On remarque une atténuation du signal d'environ -1dB, représentée par les valeurs de e_{max} en couplages VV, VH et HH lorsque les gouttelettes d'eau sont présentes. Cette atténuation est expliquée car une partie des ondes est réfléchie au préalable par les gouttelettes d'eau sur la feuille de plastique. En revanche, on observe une augmentation de 1dB du niveau d'écho de la sphère en couplage HV, probablement causée par un effet dépolarisant des gouttes d'eau sur la feuille de plastique. Les effets de la rosée ne sont donc pas à négliger lorsqu'il s'agit d'estimer le volume des grappes.

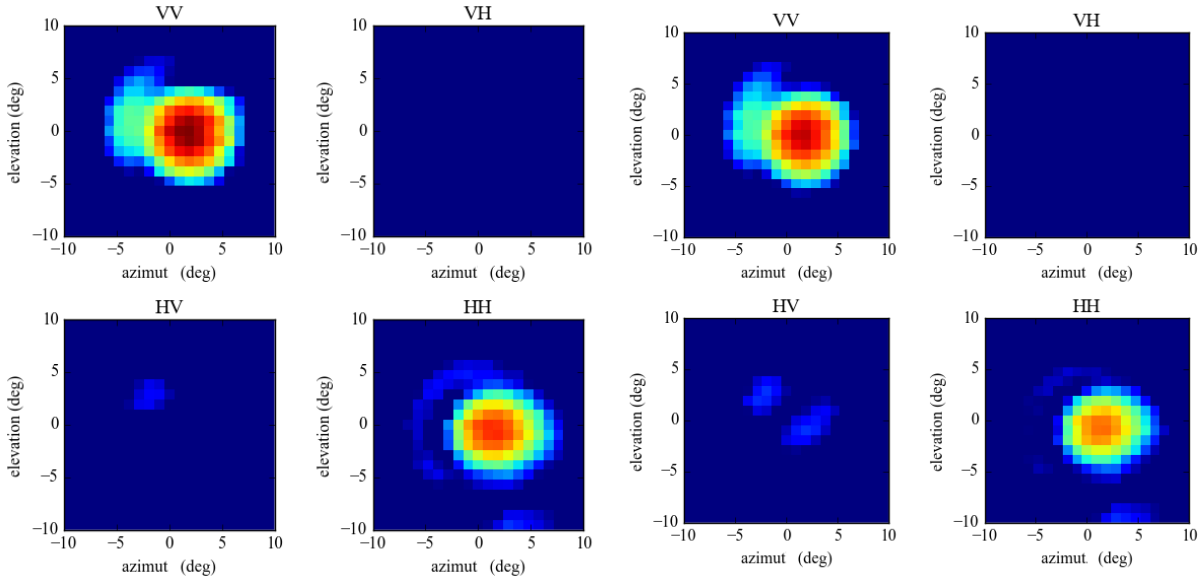
Caractérisation de l'influence de la rosée	
système radar	DK-sR-1030[e]
fréquence porteuse	23,8 GHz
bande de modulation	2 GHz
résolution en profondeur	7,5 cm
puissance en entrée	20 dBm
(Tx) antenne	antenne cornet avec lentille [a]
(Rx1/Rx2) antennes	antennes cornets [a]
scan en azimut	-10° à 10°
résolution en azimut	1°
scan en élévation	-10° à 10°
résolution en élévation	1°
distance de la sphère métallique	1,50m
distance de la feuille en plastique	1,35m

[a] caractéristiques disponibles en annexe

Tableau 50. Paramètres des mesures effectuées pour caractériser l'influence de la rosée

(a) (b)

Figure 103. (a) Photographie de l'expérience mise en place pour caractériser l'influence de la rosée.
(b) Gouttelettes d'eau sur une feuille de plastique pour simuler l'effet de la rosée. L'écho de la sphère métallique est étudié lorsque la feuille comporte ou non des gouttelettes d'eau.



(a) (b)

Figure 104. Images radar 2D dans le plan (θ,φ) pour R=1,50m (soit 20 fois la résolution en profondeur *d*) de la sphère métallique de 6,4 cm de diamètre pour :
(a) une feuille de plastique sans gouttelettes d'eau
(b) une feuille de plastique avec gouttelettes d'eau
Echelle : -50dB (bleu) à -30dB (rouge)

estimateurs	$N_{e>-65dB}$ (voxels)	$N_{e>-60dB}$ (voxels)	e_{max} (dB)
sans gouttelettes			
VV	2753	1442	-29,9
VH	290	52	-49,9
HV	456	120	-47,4
HH	2820	1645	-32,6
avec gouttelettes			
VV	2705	1450	-31,1
VH	250	40	-50,4
HV	493	155	-46,4
HH	2770	1618	-34,0

Tableau 51. Variation des estimateurs $N_{e>-65dB}$, $N_{e>-60dB}$ et e_{max} dans les quatre couplages de l'écho radar de la sphère métallique en présence et en absence de gouttelettes sur la feuille de plastique.

4.3.7. Interférences des échos entre les grappes et les sarments

Il a été montré dans la section 4.3.4 qu'il était tout à fait possible d'estimer le volume d'une grappe de raisin en définissant des estimateurs construits à partir des niveaux d'écho des quatre couplages VV, VH, HV et HH. En revanche, ces estimateurs se basent sur des échos radar de grappes de raisin isolées, ce qui est très improbable en conditions réelles. Les grappes sont toujours liées aux sarments dans des configurations très diverses : la grappe peut être disposée horizontalement, verticalement, entrelacée, devant ou derrière les sarments. Avec une résolution en profondeur de 7,5cm et des angles d'ouverture d'antenne de 8° (pour l'antenne cornet avec la lentille), il est alors difficile d'obtenir des échos radar distincts dont l'un est associé à un sarment, et l'autre à une grappe de raisin. On obtient en réalité un écho radar généré par des rétrodiffusions issues simultanément du sarment et de la grappe de raisin. Pour mettre en évidence ces interférences des échos, un balayage 3D de la scène, dont les paramètres sont identiques à ceux reportés dans le Tableau 45, est effectué sur trois scènes différentes :

- Un sarment seul
- Un sarment derrière une grappe de raisin (identique à celle de la section 4.3.4)
- Un sarment devant une grappe de raisin

Les images radar 2D dans le plan (θ,φ) pour R=1,125m (soit 16 fois la résolution en profondeur *d*) ainsi que les photographies des trois scènes de mesure sont affichées sur la Figure 105. On observe des variations du niveau d'écho en fonction des trois scènes, sans pour autant déterminer clairement si l'écho radar visualisé dans les différents couplages de polarisation est plutôt une contribution de la rétrodiffusion du sarment ou de la grappe. Les valeurs de l'estimateur $N_{e>-65dB}$ en couplages VV, VH, HV et HH pour ces trois scènes, ainsi que la grappe de raisin seule (mesurée précédemment dans la section 4.3.4), sont reportées dans le Tableau 52. On peut déjà remarquer plusieurs phénomènes :

- Lorsque la grappe de raisin est présente, le nombre de voxels en couplages VH et HV augmente, car la grappe de raisin a tendance à dépolariser les ondes électromagnétiques, comme remarqué dans la section 4.3.3.4. Ce phénomène apparaît, que la grappe soit positionnée devant ou derrière le sarment.
- Lorsque la grappe est devant le sarment, le nombre de voxels en couplage VV augmente par rapport au sarment seul (+177 voxels) mais le nombre de voxels en couplage HH diminue par rapport au sarment seul (-213 voxels). Ce phénomène s'explique par la forme verticale de la grappe, qui contribue davantage à la rétrodiffusion en polarisation VV qu'en couplage HH.
- En présence simultanée de la grappe et du sarment, le nombre de voxels issus des couplages VH et HV est supérieur à ceux des scènes où la grappe de raisin ou le sarment sont seuls. Cela signifie que la rétrodiffusion combinée de la grappe et du sarment génère des dépolarisations supplémentaires qui peuvent être utiles pour caractériser la présence des grappes de raisin.

Afin de déterminer s'il est possible d'estimer le volume de la grappe de raisin en présence du sarment, on essaye de reconstruire un nouvel estimateur $E_{b\ Test}$ construit de la même manière que dans la section 4.3.4 pour déterminer le nombre de grains sur la grappe. Cette fois-ci, cinq mesures sont étudiées pour retrouver les coefficients a_{vv}, a_{vh}, a_{hv} *et* a_{hh} :

- Un sarment seul – 0 grain
- Un sarment derrière une grappe de raisin (identique à celle de la section 4.3.4) – 50 grains
- Un sarment devant une grappe de raisin – 50 grains
- La grappe seule (les mêmes données que celles de la section 4.3.4) – 50 grains
- Une mesure à vide, sans cibles – 0 grain

Pour éviter des surestimations, les coefficients a_{VV}, a_{VH}, a_{HV} *et* a_{HH} sont calculés trois fois en supposant alternativement que l'un des coefficients soit nul. Quatre groupes de coefficients sont donc calculés : $\{a_{VV}, a_{VH}, a_{HV}, 0\}$, $\{a_{VV}, a_{VH}, 0, a_{HH}\}$, $\{a_{VV}, 0, a_{HV}, a_{HH}\}$ et $\{0, a_{VH}, a_{HV}, a_{HH}\}$. Les valeurs de ces coefficients sont différentes en fonction des groupes, et une valeur moyenne est alors calculée pour chaque coefficient. Les valeurs de ces coefficients sont reportées dans le Tableau 53 et l'estimation du nombre de grains de raisin présents dans chaque scène est disponible dans le Tableau 54. Les valeurs des coefficients a_p calculés sont négatives en couplages VV et HH, et positives en couplages VH et HV, ce qui reflète l'importance de la dépolarisation de la grappe de raisin pour permettre des discriminations entre les niveaux d'écho issus du sarment et ceux de la grappe. L'erreur commise sur l'estimation du nombre de grains est plutôt faible (± 1grain) car l'estimateur a été construit pour cinq scènes particulières. En augmentant le nombre de mesures et de configurations différentes, l'obtention d'un estimateur plus flexible est probablement envisageable.

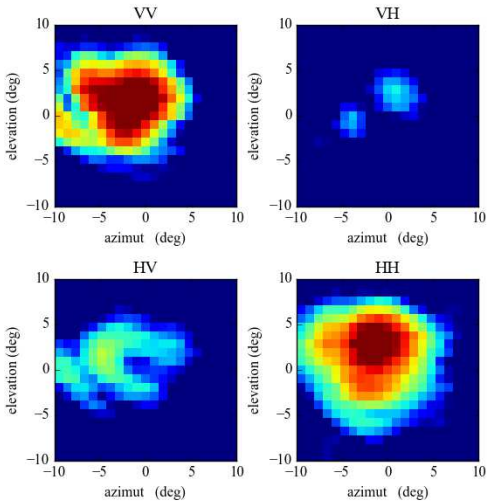
Pour mettre en évidence l'impact du sarment sur l'estimation du volume, les scènes mesurées avec le sarment (donc trois scènes supplémentaires) sont ajoutées à la construction de l'estimateur E_b de la section 4.3.4 et forment ainsi un nouvel estimateur appelé $E_{b\ Sarment}$. Les nouveaux et précédents estimateurs sont affichés sur la Figure 106. On observe une augmentation significative de l'erreur d'estimation du nombre de grains de raisin, avec un coefficient de détermination R^2=0,89 et une précision du modèle linéaire égale à 7 grains, soit environ 28mL. Cette dégradation de l'estimation entre E_b et $E_{b\ Sarment}$ était attendue, puisque la variation de volume de la grappe de raisin est mesurée sur une scène en absence de sarment. Afin de connaître réellement l'impact du sarment sur l'estimation, il aurait fallu produire les mêmes mesures de variation de volume que dans la section 4.3.4 avec la présence du sarment (non étudiées ici).

estimateurs (voxels)	**$N_{e>-65dB}$ (VV)**	**$N_{e>-65dB}$ (VH)**	**$N_{e>-65dB}$ (HV)**	**$N_{e>-65dB}$ (HH)**
grappe seule [a]	897	149	156	778
sarment seul	1068	92	239	1114
grappe devant	1245	231	298	901
grappe derrière	862	174	255	1250

[a] mesure effectuée avec la grappe de raisin de la section 4.3.4

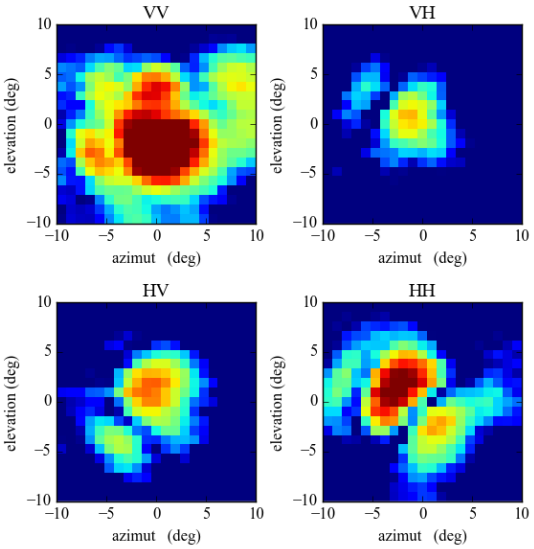
Tableau 52. Variation de l'estimateur $N_{e>-65dB}$ dans les quatre couplages et pour les quatre scènes de mesure.

(a)



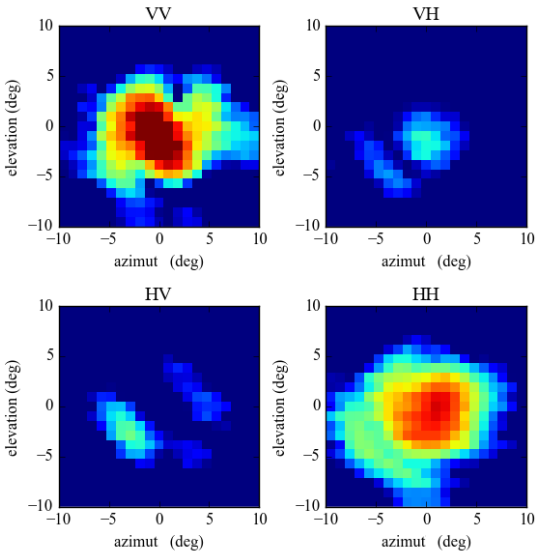
(b)

(c)



(d)

(e)



(f)

Figure 105. Photographies et images radars 2D associées dans le plan (θ,φ) pour R=1,125m (soit 16 fois la résolution en profondeur *d*) en couplages VV, VH HV et HH pour : (a)(b) un sarment seul, (c)(d) une grappe de raisin devant le sarment et (e)(f) une grappe de raisin derrière le sarment. Echelle : -60dB (bleu) à -40dB (rouge).

coefficients	groupe 1	groupe 2	groupe 3	groupe 4	moyenne
a_{VV}	-1,48E-4	-1,74E-3	8,30E-3	0	-3,39E-3
a_{VH}	4,70E-3	4,02E-3	0	4,59E-3	4,44E-3
a_{HV}	-2,76E-3	0	1,23E-2	-2,67E-3	2,27E-3
a_{HH}	0	-9,40E-4	-4,43E-3	-1,65E-4	-1,85E-3

Tableau 53. Valeurs des coefficients de l'estimateur $E_{b\ Test}$ calculées en différents groupes, afin d'éviter des surestimations.

scène de mesure	nombre réel de grains	nombre estimé de grains
scène vide	0	-1
sarment seul	0	1
grappe devant le sarment	50	49
grappe derrière le sarment	50	50
grappe de raisin seule	50	50

Tableau 54. Estimation du nombre de grains de raisin pour différentes scènes en utilisant l'estimateur $E_{b\ Test}$.

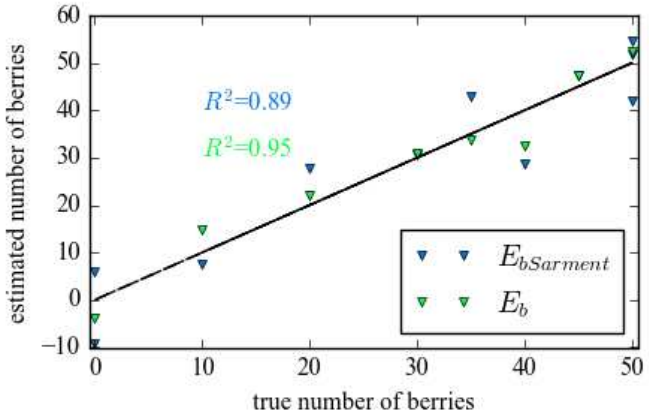


Figure 106. Estimation du nombre de grains de raisin en construisant l'estimateur E_b (couleur verte, voir section 4.3.4) et l'estimateur $E_{b\ Sarment}$ (couleur bleue) auquel les mesures des trois scènes avec le sarment ont été ajoutées.

4.4. Mesures sur le terrain

4.4.1. Campagne de mesure de l'été 2016

Les résultats présentés dans cette section portent sur l'estimation du rendement effectué sur des pieds de vignes sur le terrain (à l'IFV Sud-Ouest à Peyrole) durant l'été 2016 avec le radar FM-CW fonctionnant à 24GHz. Plusieurs configurations d'interrogations ont été envisagées durant cette période, avec l'utilisation ou non d'un ventilateur pour générer du vent et minimiser le mouvement des feuilles par moyenne (voir section 4.3.5), le changement de l'antenne de transmission (utilisation d'une antenne cornet avec lentille à la place de l'antenne parabolique) et de la hauteur de l'antenne, etc… pour finalement analyser le rendement de 6 pieds de vignes de deux variétés différentes. Ces études n'ont été faites que pour le couplage VV. Un estimateur basé sur l'amplitude des échos radar est proposé pour estimer le rendement. Cette étude préliminaire en conditions réelles fait l'objet d'un premier article de revue sur ce sujet [186].

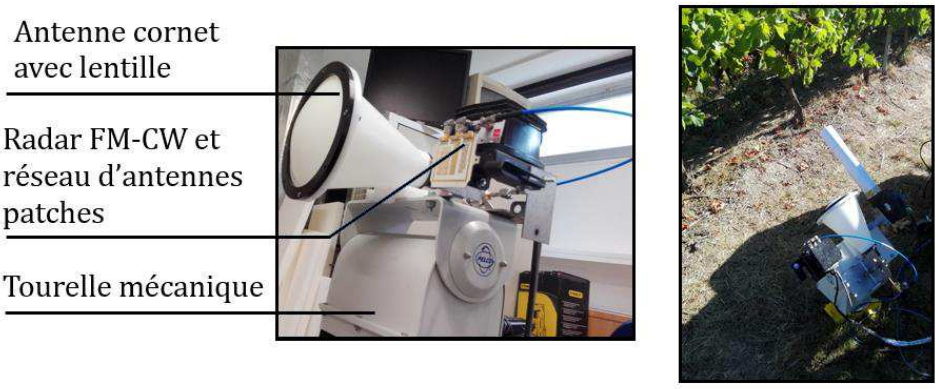
4.4.1.1. *Description du protocole de mesure*

Le radar FM-CW utilisé pour l'interrogation fonctionne à 24GHz. L'ensemble des paramètres de mesure est disponible dans le Tableau 55. La bande de modulation du radar est B=2GHz, permettant d'obtenir une résolution théorique en profondeur d égale à 7,5cm. Le signal est transmis en utilisant une antenne cornet avec lentille, d'un gain de 28dBi et d'un angle d'ouverture de 6° en azimut et élévation. Les ondes rétrodiffusées sont reçues par un réseau de 1x5 antennes patches d'un gain de 8,6dBi, et d'angles d'ouverture de 60° en azimut et 25° en élévation. La puissance transmise est de 20dBm (100mW). Les antennes et le radar sont solidaires d'une tourelle contrôlée par ordinateur. Cet ordinateur synchronise l'acquisition du radar et le mouvement des antennes en azimut et en élévation. Le système radar est placé au sol entre les rangées à 1m des pieds de vigne, et l'antenne de transmission se situe à environ 50cm du sol. En face de chaque pied que l'on souhaite analyser, un balayage en trois dimensions est effectué par la tourelle mécanique, avec des angles de ±30° en azimut, et de -10° à 30° en élévation avec une résolution angulaire de 1°. Des photographies du système radar utilisé pour cette campagne de mesure sont disponibles sur la Figure 107. Six pieds de vignes de deux variétés différentes sont analysés pour cette étude : trois pieds consécutifs de variété Grenache et trois pieds consécutifs de variété Merlot (l'article associé à cette campagne comporte une erreur et indique deux autres variétés). Les mesures sont effectuées respectivement le 20 septembre et le 28 septembre 2016 lorsque les grappes sont à maturation. Des photographies des pieds de vignes des deux variétés sont disponibles sur la Figure 108. On remarque que les grappes de raisin sont en majorité cachées par les feuilles, ce qui rend une solution de détection optique des grappes impossible. Le rendement de chaque pied de vigne est disponible dans le Tableau 56.

campagne de mesure de l'été 2016	
système radar	DK-sR-1030e
fréquence porteuse	23,8 GHz
bande de modulation	2 GHz
résolution en profondeur	7,5 cm
puissance en entrée	20 dBm
(Tx) antenne	antenne cornet avec lentille [a]
(Rx1/Rx2) antennes	antennes patches 1x4 [a]
scan en azimut	-30° à 30°
résolution en azimut	1°
scan en élévation	-10° à 30°
résolution en élévation	1°
distance des pieds	1m

[a] caractéristiques disponibles en annexe

Tableau 55. Paramètres des mesures effectuées pour caractériser l'influence du vent.



(a) (b)

Figure 107. (a) Photographie du radar et des antennes montés sur la tourelle mécanique, et (b) système placé au sol entre les rangées de vignes à une distance d'environ 1m des pieds.

(a) (b)

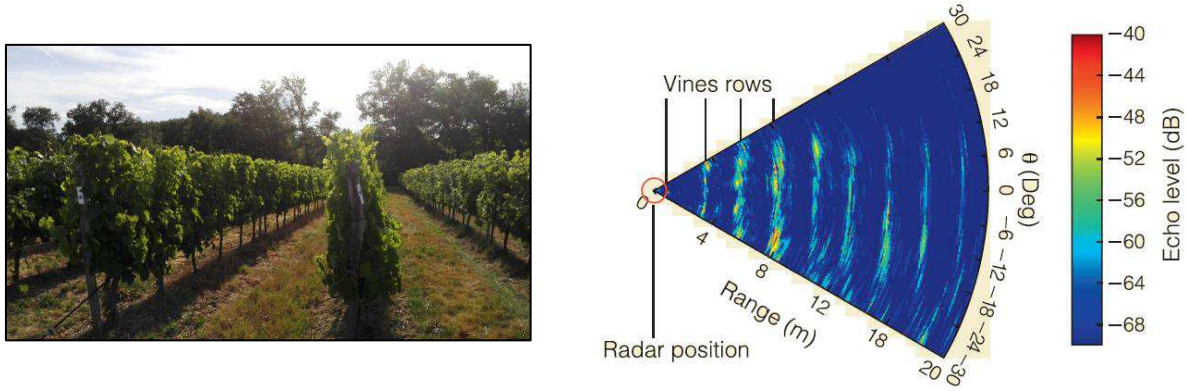
Figure 108. Photographies des pieds de vignes étudiés : (a) Merlot et (b) Grenache

Masse des grappes mesurée (kg)		
scène de mesure	**Merlot**	**Grenache**
pied n°2	5,69	1,81
pied n°3	3,49	2,22
pied n°4	2,56	1,49

Tableau 56. Masse des grappes mesurée par pied et par variété.

4.4.1.2. *Rétrodiffusion électromagnétique du vignoble*

Le vignoble est composé de plusieurs rangées de vignes espacées de 2,5m et les pieds de vigne espacés d'environ 1m. Pour chaque pied de vigne analysé, un spectre de battement est enregistré pour chacune des 2501 différentes directions d'interrogation. Une photographie des rangées de vignes étudiées, ainsi qu'une image radar 2D dans le plan (R,θ) pour une élévation φ=0° du vignoble est disponible sur la Figure 109. On distingue facilement les différentes rangées de vignes par leur géométrie caractéristique, jusqu'à environ une distance d'interrogation de 20m. En effet, les vignes rétrodiffusent de manière significative les ondes électromagnétiques car elles sont composées de feuilles, de grappes et de bois, ainsi que d'autres éléments structurants comme les tuyaux d'irrigation, les piquets et les tendeurs métalliques. Comme énoncé au début de cette partie, les grappes sont majoritairement constituées d'eau, dont la constante diélectrique relative à 20°C et à 24GHz est égale à 20-30j [183], ce qui génère de fortes réflexions électromagnétiques. On souhaite alors se focaliser sur les échos radars situés à l'intérieur du volume où se situe le pied de vigne à mesurer.



(a) (b)

Figure 109. (a) photographie du vignoble à l'IFV Sud-Ouest et (b) image radar 2D (R,θ) du vignoble dans un plan de coupe en élévation φ=0°.

4.4.1.3. *Scan en 3D des pieds de vignes*

Afin d'estimer le volume des grappes de raisin présentes sur les vignes, les niveaux d'écho de la scène dans un rang d'interrogation compris entre 0,5m et 1,5m sont analysés. Les balayages radars 3D de chaque pied de vigne sont effectués avant et après la récolte, afin d'étudier l'influence des grappes sur les échos radar. Les niveaux d'échos obtenus sont initialement en coordonnées azimut/élévation. Un changement de coordonnées est possible afin d'obtenir les niveaux d'écho en coordonnées cartésiennes et pouvoir ainsi visualiser les données en 3D avec des isosurfaces [151], représentant des surfaces de même niveau d'échos qui sont ensuite superposées. Cela permet de représenter de manière rapide et efficace le niveau d'écho du pied de vigne. Sur la Figure 110 sont représentés les échos radars d'un pied de vigne de variété Merlot, dans un volume composé de 93324 voxels en coordonnées cartésiennes. Ici, chaque voxel possède un volume (résolution volumique) égal à :

$$v_{res} = d_x \times d_y \times d \tag{10}$$

Où d_x et d_y représentent les résolutions respectivement en largeur (*x-cross-range*) et en hauteur (*y-cross-range*) fixées pour cette interpolation à 1,75cm. La résolution volumique est donc v_{res}=23cm^3. Dans l'étude faite dans cette partie, les algorithmes et estimations sont développés en coordonnées cartésiennes, ce qui n'est en réalité pas une nécessité, sauf pour un affichage des isosurfaces dans des proportions correctes. Il est même recommandé de rester en coordonnées azimut/élévation pour appliquer plus rapidement les algorithmes de contours, car le nombre de voxels en coordonnées azimut/élévation

est généralement plus faible. La région où se trouvent les échos radars des grappes se situe dans une zone entre 0,6m et 1,2m de hauteur. En-dessous de 0,6m se trouvent les échos issus du tronc du pied de vigne. Les échos radar provenant des troncs sont représentés sur la Figure 110 par les cercles noirs. L'idée est alors de discriminer chaque écho radar, afin de déterminer s'il s'agit potentiellement d'un écho d'une grappe, d'un sarment, des feuilles, ou d'un autre écho parasite (ou finalement un mélange de plusieurs cibles, comme évoqué dans la section 4.3.7).

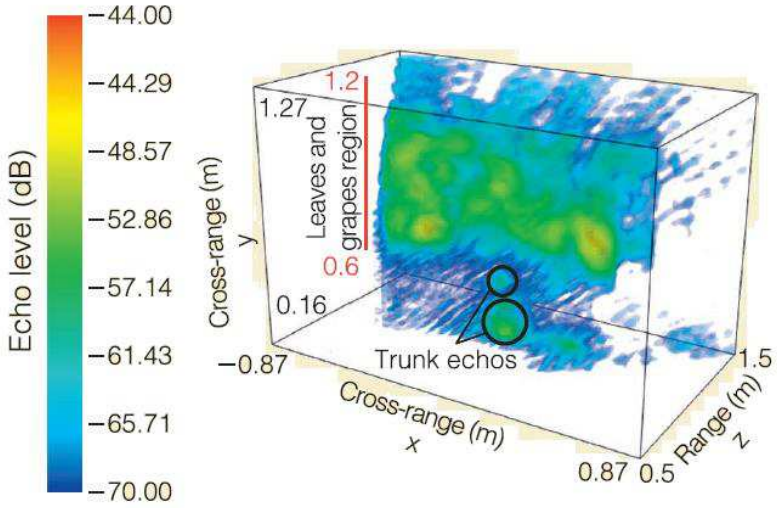


Figure 110. Echos radars d'un pied de vigne de variété Merlot représentés par isosurfaces.

4.4.1.4. *Etude de la distribution des niveaux d'écho des pieds de vigne*

L'étude de la distribution du niveau d'écho des pieds de vigne peut être un moyen de caractériser ou non la présence de grappes. Pour s'en assurer, les distributions du niveau d'écho dans le volume total obtenu par balayage 3D sont affichées sur la Figure 111 pour les variétés (a) Merlot et (b) Grenache pour les six pieds de vignes mesurés avant et après la récolte, c'est-à-dire avec et sans grappes. Pour plus de détails, les valeurs de l'estimateur $N_{e>-70dB}$ sont disponibles dans le Tableau 57. On observe pour la variété Merlot peu de variations de la distribution du niveau d'écho. Pour la variété Grenache, des variations significatives sont observées, notamment entre les mesures avec et sans grappes, mais ne sont pas corrélées à la masse des grappes. Ces effets sont probablement dus à des effets de masquage par des grappes. Lorsque les grappes sont retirées, certaines amplitudes d'écho radar sont modifiées tandis que l'écho d'autres cibles réfléchissantes est amplifié (comme celui des sarments ou des tendeurs métalliques) et est parfois plus élevé que celui des grappes. Il est en tout cas certain qu'une analyse volumique globale n'est pas la meilleure solution pour estimer le rendement des grappes dans des scènes aussi complexes, comme on pourrait le faire en laboratoire (voir section 4.3). Il est alors nécessaire d'analyser individuellement chaque écho radar au sein du volume d'étude pour rendre possible l'estimation du rendement

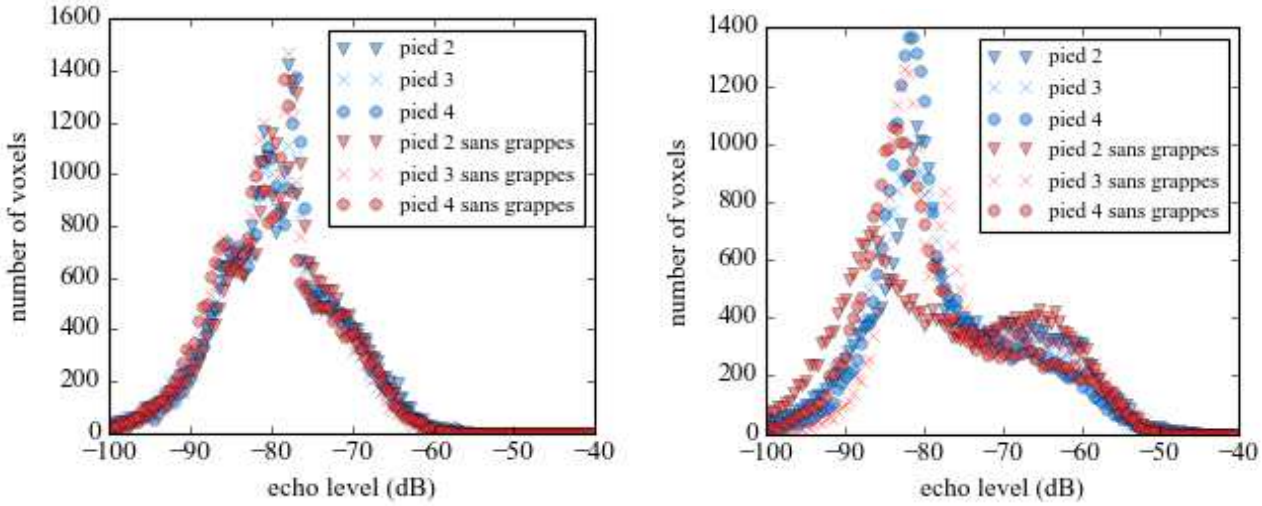


Figure 111. Distributions des niveaux d'écho pour (a) la variété Merlot et (b) la variété Grenache

estimateur $N_{e>-70dB}$ (voxels)		
scène de mesure	**Merlot**	**Grenache**
avec grappes		
pied n°2	3938	9231
pied n°3	2940	7598
pied n°4	3509	6559
sans grappes		
pied n°2	3523	9685
pied n°3	2627	9239
pied n°4	3274	7164

Tableau 57. Estimateur $N_{e>-70dB}$ calculé pour les différentes distributions

4.4.1.5. *Algorithme sélectif de génération de contours basé sur des critères surfaciques*

Un moyen simple de discriminer, c'est-à-dire d'établir une « limite » entre les échos radar, est d'appliquer un algorithme de contours. Un des plus classiques et des plus couramment utilisés est l'algorithme *marching squares* qui est la version en deux dimensions de l'algorithme *marching cubes* [150] utilisé aussi pour le calcul des isosurfaces. En deux dimensions, les contours sont simplement des *isolignes* ou des lignes de même niveau d'écho. Un exemple de l'algorithme *marching squares* appliqué sur une image radar 2D dans le plan (θ,φ) est affiché sur la Figure 112 (a). Les lignes noires entourant les échos radar représentent des isolignes pour un niveau d'écho fixé à -65dB. On se rend alors compte que les échos radars ne sont pas discriminés très clairement. Un niveau d'écho trop faible génère des contours avec des surfaces trop élevées, et un niveau d'écho trop élevé génère des contours de trop petites surfaces, au risque de perdre des informations contenues dans des voxels situés à l'extérieur des contours. On propose alors un premier algorithme sélectif qui détermine si le contour généré est correct en calculant sa surface. L'algorithme, schématisé sur la Figure 113, est composé de trois parties principales :

- Une première boucle générant des contours pour différents niveaux d'échos en utilisant l'algorithme *marching squares*.

- Une seconde boucle permettant de sélectionner les contours selon deux critères : une surface minimale s_{min} et une surface maximale s_{max}. Les contours sélectionnés sont ceux dont la surface est comprise entre s_{min} et s_{max}.
- Une dernière boucle permettant de comparer l'ensemble des contours sélectionnés pour différents niveaux d'écho. Parmi plusieurs contours qui s'entrecroisent, le contour ayant la plus grande surface est sélectionné.

Un exemple de contours générés par cet algorithme est disponible sur la Figure 112 (b). Contrairement aux contours générés pour un niveau d'écho initial fixe, les échos radars sont mieux discriminés que pour la Figure 112 (a). Ces résultats dépendent en particulier de trois paramètres initiaux à déterminer :

- Les surfaces minimales et maximales s_{min} et s_{max}.
- Le niveau d'écho initial v_{init}

Pour les mesures présentées ici, on fixe s_{min}=10cm² et s_{max}=100cm². Une surface minimale en-dessous de s_{min} générerait des contours de trop faibles dimensions (détections parasites). Des surfaces supérieures à s_{max} =100cm² générerait des contours de trop grandes dimensions, contenant plusieurs échos radar à l'intérieur. La valeur de v_{init} est fixée à la valeur moyenne du niveau d'écho radar dans l'ensemble du volume d'étude. Le problème actuel de cet algorithme sélectif basé sur des critères surfaciques reste le choix des valeurs initiales qui est pour le moment arbitraire et basé seulement sur des observations. Un nouvel algorithme, proche de celui présenté ici et basé sur une sélection de maxima locaux, sera développé dans la section 4.4.2 avec des justifications plus précises quant à l'initialisation des paramètres.

L'algorithme est appliqué sur les niveaux d'échos d'un pied de vigne de variété Merlot et les contours sont affichés sur la Figure 114 (a) dans un plan 2D (X,Y) pour z=0,825m (soit 11 fois la résolution en profondeur) et sur la Figure 40 (b) pour plusieurs plans (X,Y) successifs en différentes valeurs de z entre 0,5m et 1,5m. Une couleur a été attribuée à chaque contour en fonction de sa position par rapport à l'antenne de transmission du radar :

- En rouge sont représentés les contours du tronc du pied de vigne (échos radars centraux entre de 0,1m et 0,6m de hauteur)
- En violet les contours représentant potentiellement les grappes de raisin (entre 0,6m et 1,2m de hauteur)
- En marron les contours représentant les réflexions du sol (en dessous de 0,1m)
- En noir et pointillés les contours non étudiés (hors-zone pour des largeurs dépassant les ±0,5m) appartenant aux pieds de vignes voisins
- En vert, le reste des contours : feuilles et autres clutters.

La position des contours est calculée en calculant leur barycentre. Plusieurs paramètres peuvent en réalité être extraits des contours générés. Si l'on considère un contour $\mathcal{C}$, on peut définir les paramètres suivants:

- sa position (x_g, y_g, z_g)
- sa forme (largeur $l(\mathcal{C})$ et hauteur $h(\mathcal{C})$)
- sa surface $s(\mathcal{C})$
- la valeur moyenne du niveau d'écho à l'intérieur du contour $e_{Mean}(\mathcal{C})$
- la valeur maximale du niveau d'écho à l'intérieur du contour$e_{Max}(\mathcal{C})$
- l'écart type du niveau d'écho à l'intérieur du contour $\sigma(\mathcal{C})$

Il faut alors trouver l'estimateur le plus apte à représenter le volume des grappes de raisin et construit à partir des paramètres des contours définis précédemment.

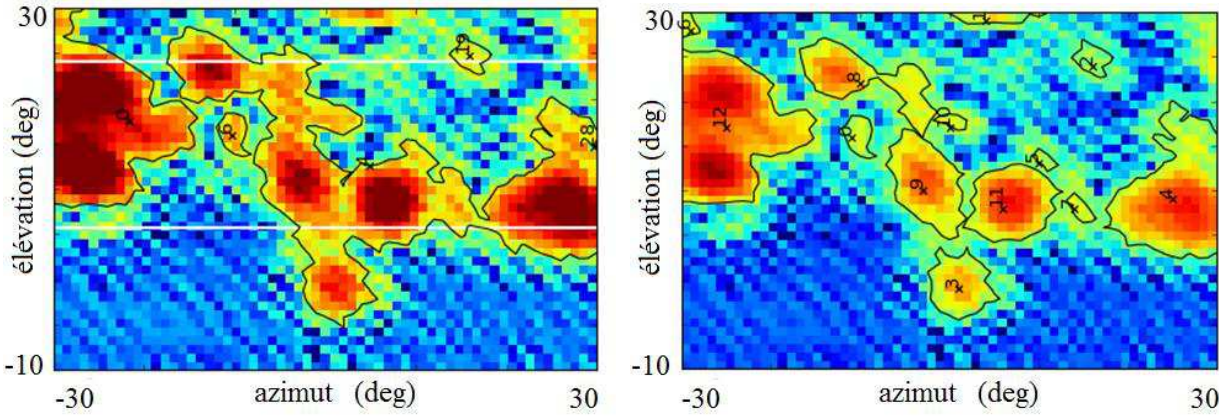


Figure 112. Image radar 2D dans le plan (θ,φ) d'un pied de vigne pour R=1,125m (soit 16 fois la résolution en profondeur *d*) avec des contours (lignes noires) générés avec l'algorithme *marching squares* pour (a) un niveau d'écho fixe à -65dB et (b) en appliquant un algorithme sélectif basé sur une sélection surfacique des contours.

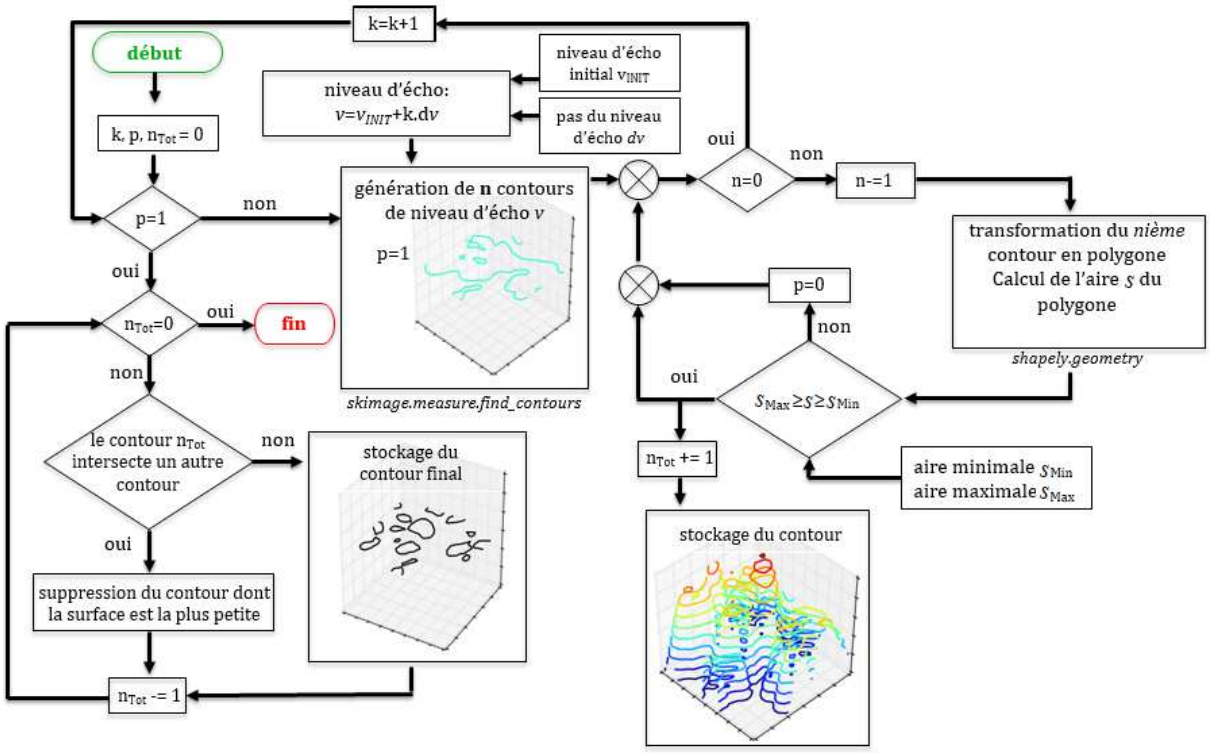
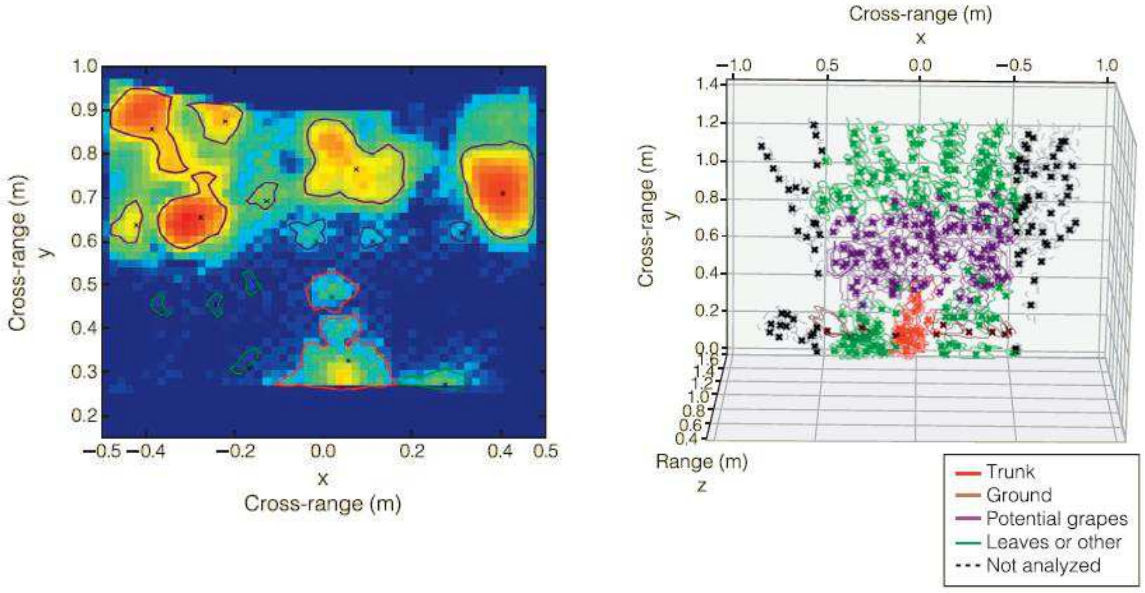


Figure 113. Description de l'algorithme sélectif de contours basé sur une sélection surfacique dans un plan 2D donné.



(a) (b)

Figure 114. (a) Image radar 2D dans le plan (X,Y) pour z=0,825m (soit 11 fois la résolution en profondeur *d*) ; (b) image radar 3D pour plusieurs plans (X,Y) ; d'un pied de vigne de variété Merlot avec des contours générés par l'algorithme sélectif basé sur une sélection surfacique.

4.4.1.6. *Première estimation du volume des grappes de raisin*

On définit ici un nouveau paramètre basé sur les valeurs d'échos des contours qualifiés comme étant potentiellement des grappes de raisins (contours représentés par la couleur violette sur la Figure 114). Cet estimateur, que nous appelerons le *facteur d'étalement* (ou *speading factor*) de l'écho [186] est donné par l'expression :

$$\chi(\mathcal{C}) = \frac{e_{Max}(\mathcal{C})}{e_{Mean}(\mathcal{C})} \tag{11}$$

$e_{Mean}(\mathcal{C})$ et $e_{Max}(\mathcal{C})$, définis dans la section 4.4.1.5, sont respectivement les valeurs moyennes et maximales de l'écho radar à l'intérieur du contour $\mathcal{C}$ en dB. Les valeurs de χ sont comprises entre 0 et 1 car les valeurs des paramètres $e_{Mean}(\mathcal{C})$ et $e_{Max}(\mathcal{C})$ en dB sont négatives (en-dessous de 0dB). Des contours ayant des valeurs du paramètre χ proches ont des distributions de niveaux d'écho similaires. Pour mettre en évidence le sens physique de ce paramètre, les distributions du nombre de contours en fonction des valeurs de $\chi(\mathcal{C})$ sont reportées dans la Figure 115 pour un pied de vigne de variété (a) Merlot et (b) Grenache. Ces valeurs sont mesurées avant la récolte (en présence de grappes, couleur bleue) et après la récolte (en absence de grappes, couleur rouge). On observe des variations maximales du paramètre $\chi(\mathcal{C})$ entre les différents situations avec/sans grappes pour $1 \geq \chi(\mathcal{C}) \geq 0{,}95$ dans le cas de la variété Merlot et $0{,}98 \geq \chi(\mathcal{C}) \geq 0{,}94$ dans le cas de la variété Grenache. Les échos radar des grappes sont donc caractérisés par des facteurs d'étalement spécifiques, mais dépendant de la variété. On définit alors un estimateur du rendement V_{EST} par l'expression :

$$V_{EST} = v_{res} \times \sum_{k=1}^{K} N(\mathcal{C}_k) \tag{12}$$

Où v_{res} est la résolution volumique définie dans la partie 4.4.1.3 et $\sum_{k=1}^{K} N(\mathcal{C}_k)$ représente la somme des N voxels des K contours $\mathcal{C}_k$ dont le facteur d'étalement répond à la condition $1 \geq \chi(\mathcal{C}) \geq 0{,}95$ pour la variété Merlot et $0{,}98 \geq \chi(\mathcal{C}) \geq 0{,}94$ pour la variété Grenache. V_{EST} est un estimateur représentant un volume, et donc une quantité de grappe répartie dans l'espace. La masse des grappes mesurée après la

récolte est tracée sur la Figure 116 en fonction de l'estimateur V_{EST} pour les six pieds de vignes des deux variétés. On observe une variation linéaire de V_{EST} avec un coefficient de détermination R^2=0,94 avec une erreur maximale de 400g sur une masse mesurée de 5,69kg (7% d'erreur), et une pente de α=0,17g/cm^3. Ces premiers résultats sont encourageants mais de nombreux points peuvent être améliorés :

- On utilise ici des plages de valeur du facteur d'étalement χ en fonction de la variété. Il faudrait pouvoir déterminer un estimateur qui ne soit pas dépendant de la variété étudiée.
- Les plages de valeurs ont été étudiées sur des mesures en présence et absence de grappes. Il faudrait pouvoir obtenir une estimation du volume de grappes sans mesure de référence.
- L'estimation est basée sur seulement six pieds de vigne. Des mesures supplémentaires sont nécessaires pour pouvoir étudier la fiabilité de l'estimation.
- Une analyse avec plusieurs couplages de polarisation est probablement nécessaire (voir section 4.3.3) et un nouvel estimateur basé sur ces couplages de polarisation doit alors être construit.

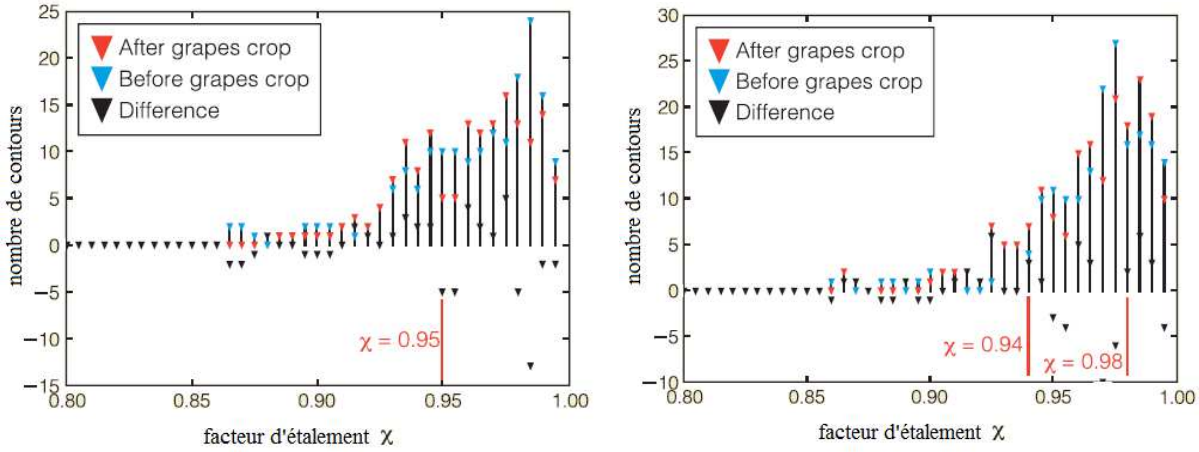


Figure 115. Nombre de contours en fonction du facteur d'étalement χavant récolte (en présence de grappe, couleur bleu) et après récolte (en absence de grappe, couleur rouge) et différence du nombre de contours avant/après récolte (couleur noire) pour un pied de vigne de variété (a) Merlot et (b) Grenache.

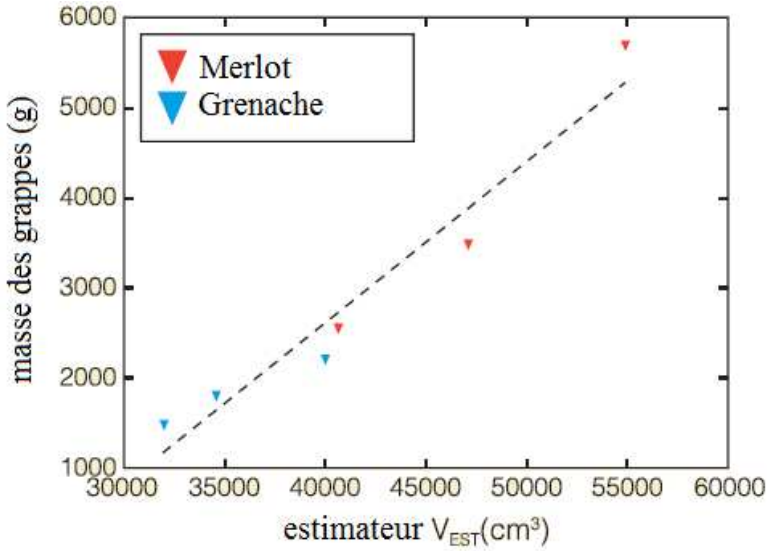


Figure 116. Masse des grappes récoltées des six pieds de vignes (Merlot : rouge ; Grenache : bleu) en fonction de l'estimateur V_{EST}.

4.4.1.7. *Répétabilité des mesures en présence de vent*

Dans cette section sont étudiés les niveaux d'écho d'une scène (pieds n°2 n°3 et n°4, variété Merlot) mesurée trois fois en présence de vent générant un mouvement des feuilles. Dans chaque direction d'interrogation, deux acquisitions successives sont effectuées, et cela pour les deux canaux de transmissions. On peut donc considérer que la scène a été mesurée 12 fois consécutives (en considérant que les réseaux d'antennes patches des canaux Rx1 et Rx2 offrent des mesures très similaires). Pour simuler la présence d'un vent constant sur les vignes, un ventilateur (déjà présenté en section 4.3.5) est utilisé pour produire un souffle dans la direction d'interrogation de l'antenne de transmission. Les écarts-types σ de différents estimateurs sont étudiés dans l'ensemble du volume d'étude et sont répertoriés dans le Tableau 58. On y trouve :

- $\sigma(e_{Max})$ l'écart-type du niveau d'écho maximal mesuré dans le volume d'étude. On observe d'importantes variations dépassant 1dB, car les feuilles peuvent atténuer ou non la rétrodiffusion d'une cible en fonction de leurs orientations.
- $\sigma(e_{Mean})$ et $\sigma(e_W)$ les écarts-types des valeurs moyennes arithmétiques et pondérées des niveaux d'échos, qui varient beaucoup moins (entre 0,2 et 0,3dB) en fonction de l'orientation des feuilles par l'effet de moyenne sur l'ensemble du volume d'étude.
- $\sigma(N_{e>-70dB})$ l'écart-type du nombre de voxels supérieurs à un niveau d'écho de -70dB, exprimé ici relativement par rapport à la valeur moyenne des 12 mesures effectuées. La valeur de cet estimateur varie entre 5% et 7%
- $\sigma(N_{\mathcal{C}})$ l'écart-type du nombre de contours générés par l'algorithme de contours sélectifs à partir d'un niveau d'écho initial v_{init}= -75dB. Une variation maximale de 38 contours est observée (indépendamment de leur surface).
- $\sigma(\sum_{k=1}^{N_{\mathcal{C}}} s(\mathcal{C}_k))$ l'écart-type de la somme totale des surfaces $s(\mathcal{C}_k)$ (en pixels²) des contours. On observe une variation maximale de la surface totale des échos de l'ordre de ±90 pixels².

Note : l'algorithme sélectif de contours utilisé pour mesurer l'écart-type est légèrement différent de celui présenté plus tôt dans cette partie. La sélection se base ici sur la détection de maxima locaux (expliquée dans la section 4.4.2).

Lorsqu'on observe les valeurs de $\sigma(\sum_{k=1}^{N_{\mathcal{C}}} s(\mathcal{C}_k))$, on peut supposer que dans le pire des cas (avec des mouvements amples de feuilles) l'estimation du volume des grappes de raisin V_{EST}, qui se base sur le nombre de pixels ou la surface des contours, peut varier quasiment de ±10%. Cette variation de surface dépend en réalité de la surface du contour étudié, comme illustrée sur la Figure 117. Sur cette figure est représenté $\sigma(\sum_{k=1}^{N_{\mathcal{C}}} s(\mathcal{C}_k))$ en pixels² en fonction de la surface des contours. Les contours les plus grands ont une surface qui varie moins avec le vent (±10 pixels), alors que les petits contours offrent de plus grandes variations (±35 pixels). Ce phénomène s'explique car les petits contours sont souvent des échos parasites générés par les feuilles. On peut désormais définir l'erreur maximale provoquée par le vent sur l'estimation de la masse par :

$$\varepsilon_{Vent} = \alpha \cdot v_{res} \cdot \sigma(\sum_{k=1}^{N_{\mathcal{C}}} s(\mathcal{C}_k)) \quad (13)$$

On considère un voxel avec un volume de résolution v_{res}=23cm³, une variation maximale de la surface d'un contour $\sigma(\sum_{k=1}^{N_{\mathcal{C}}} s(\mathcal{C}_k))$=±90 pixels², et une pente α=0,17g/cm³ de l'estimateur V_{EST} (défini dans la section 4.4.1.6), on obtient dans le pire cas une erreur sur l'estimation de la masse des grappes à cause du vent ε_{Vent}=±0,35kg.

scène de mesure	σ(e_{Max}) (dB)	σ(e_{Mean}) (dB)	σ(e_W) (dB)	σ($N_{e>-70dB}$) (%)	σ(N_c)	σ($\sum_{k=1}^{N_c} s(C_k)$) (pixels²)
Merlot pied n°2	0,9	0,3	0,2	5,2	33	108
Merlot pied n°3	0,6	0,3	0,2	5,8	23	125
Merlot pied n°4	1,0	0,3	0,3	7,9	38	187

Tableau 58. Ecart-types des valeurs de différents estimateurs en présence d'un vent générant un mouvement des feuilles.

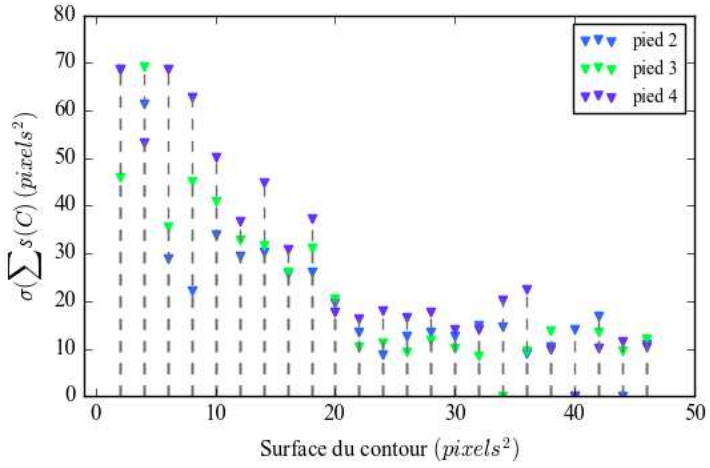


Figure 117. Ecart-type de la somme des surfaces des contours $\sigma(\sum_{k=1}^{N_c} s(C_k))$ en fonction de la surface des contours pour les trois pieds de variété Merlot.

4.4.2. Campagne de mesure de l'été 2017

Dans cette section sont reportés les résultats de la dernière campagne de mesure effectuée au V'innopôle de l'IFV Sud-Ouest durant l'année 2017. Des images radar en trois dimensions des pieds de vignes sont obtenues par un balayage mécanique de la scène, avec trois radars FM-CW différents fonctionnant à 24GHz, 77GHz et 122GHz. Les mesures sont effectuées sur une période allant de Mai à Septembre, et des estimations du rendement à maturation sont proposées sur une étude portant sur 25 pieds de vigne de 5 variétés différentes. Les estimateurs proposés sont définis à partir des mesures de polarisation et d'amplitude des échos radar.

4.4.2.1. *Description du vignoble et des variétés de grappe*

Le vignoble, tout comme dans la section 4.4.1, est situé près de Gaillac et les mesures sont effectuées dans une parcelle alternant les rangées de vignes de différentes variétés. Les rangées sont espacées de 2,2m et le terrain ne présente pas de pente significative. Les pieds de vignes sont séparés les uns des autres d'un distance d'environ 1m. On prend garde d'effectuer les mesures en dehors des jours de pluie, mais aucune précaution n'est prise pour les autres conditions météorologiques (temps nuageux, ensoleillé, venteux, humide, présence de rosée). Cinq variétés de grappes de raisin noir sont étudiées pour analyser les performances de la méthode d'estimation proposée : Mourvèdre (MO), Gamay (GA), Merlot (ME), Grenache (GR) et Alicante-Bouschet (AB). Pour chaque variété, le rendement des pieds de vigne (de fin Août à mi-Septembre) est obtenu par la masse totale des grappes. Une balance d'une précision de ±1g est utilisée pour mesurer la masse de chaque grappe et sert de mesure de référence pour l'estimation du rendement. Les masses de chaque grappe récoltée sont reportées sur la Figure 118 ainsi que dans le Tableau 59 pour chaque variété. On observe une variation significative de la distribution de la masse des

grappes pour chaque variété. Avec une masse moyenne de 170g, MO possède les grappes les plus lourdes tandis que GA est plutôt caractérisé par des grappes de masse plus légères et homogènes, avec une masse moyenne par grappe de 63g et un écart-type de 26g. Cette hétérogénéité entre variétés sera utilisée comme argument de flexibilité pour l'estimation du rendement présenté plus loin dans cette section. Les masses inférieures à 20g sont considérées comme des grains résiduels issus des grappes principales, mais ne sont pas négligées pour l'estimation du rendement.

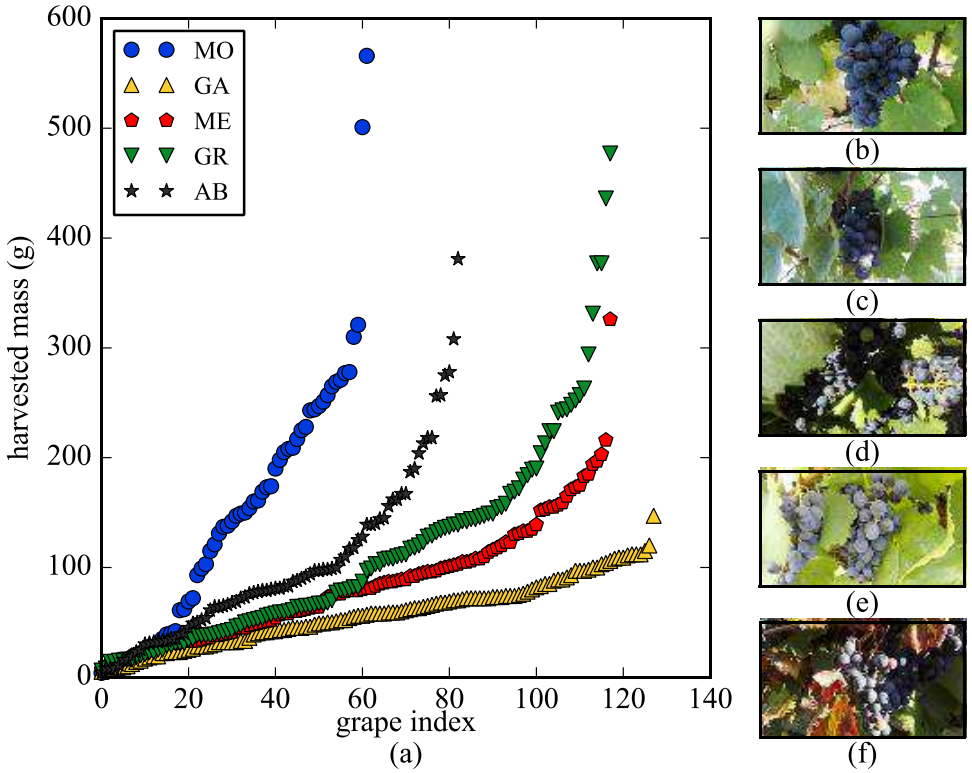


Figure 118. (a) Masse des grappes récoltées à maturation pour cinq pieds de vigne consécutifs de cinq variétés. Photographie des grappes à maturations pour les variétés (b) Mourvèdre, (c) Gamay, (d) Merlot, (e) Grenache and (f) Alicante-Bouschet.

variété	**MO**	**GA**	**ME**	**GR**	**AB**
numéro de rangée	10	9	8	5	3
numéro de pied de vigne	14,15,16,17,18	2,3,4,5,6	2,3,4,5,6	1,2,3,4,5	2,3,4,5,6
date de la récolte	25/08/17	01/09/17	05/09/17	13/09/17	15/09/17
rendement total [a] (g)	9124	7465	9994	13157	8378
nombre de grappes [b]	53	114	110	108	75
masse moyenne d'une grappe [b] (g)	170	63	89	120	110
écart-type [b] (g)	110	26	52	90	73

[a] calculé pour cinq pieds de vigne consécutifs
[b] calculé pour cinq pieds de vigne consécutifs sans grains résiduels (de masse <20g)

Tableau 59. Information sur le rendement des cinq variétés de grappe étudiées.

4.4.2.2. *Protocole de mesure*

On utilise ici trois radars FM-CW en ondes micro-ondes et millimétriques en tant que capteurs de proximité (*proximal sensors*) pour l'estimation des grappes de raisin. Afin de permettre aux ondes électromagnétiques d'interagir fortement avec les grains de raisins, la longueur d'onde ne doit pas être plus grande que le diamètre d'un grain de raisin (environ 2cm). L'utilisation des hautes fréquences porteuses au lieu de basses fréquences pour cette détection de proximité offre plusieurs avantages :

- Lorsque la longueur d'onde est plus petite que le diamètre d'un grain de raisin (pour des fréquences supérieures à 15GHz), les interactions électromagnétiques avec les grappes sont plus fortes et par conséquence, la détection des petites cibles dans la scène interrogée est possible.
- Comme la bande modulation peut atteindre éventuellement 10% de la fréquence porteuse, des plus larges bandes, et donc des plus fines résolutions en profondeur, sont réalisables en hautes-fréquences.

Les radars FM-CW micro-ondes et millimétriques suivants ont donc été choisis pour les mesures :
- Le radar *DK-sR-1030e* de IMST GmbH fonctionnant à 24GHz [187]
- Le radar *RBK_8* de INRAS GmbH fonctionnant à 77GHz [188]
- Le radar *EasyRadar* de Silicon Radar GmbH fonctionnant à 122 GHz [189]

Un résumé des caractéristiques techniques de ces trois radars est disponible dans le Tableau 60. Les caractéristiques détaillées de ces radars sont disponibles en annexe. Le choix de radar FM-CW plutôt que d'autres systèmes, tels que les radars pulse-doppler, est leur capacité à pouvoir détecter des cibles sur de courtes distances, leur faible coût (≤$1000), avec une faible puissance de transmission.

L'eau est le constituant principal (environ 90%) des grappes de raisin. À une température de 20°C, la constante diélectrique de l'eau est de 20-30j à 24GHz, 10-15j à 77GHz et 8-10j à 122GHz [183] et par conséquent, la réflexion électromagnétique des grappes à ces fréquences peut être utilisée avantageusement pour leur détection. Cette détection peut être effectuée, du moins en théorie, en illuminant la scène par un champ électromagnétique micro-onde ou millimétrique et en analysant l'écho radar résultant. Cependant, d'autres réflecteurs naturels ou artificiels sont présents dans la scène et interférent avec les échos des grappes. Un des défis pour l'estimation de la quantité de grappes repose sur l'atténuation, voire la suppression des perturbations de ces échos indésirables, qualifiés de *clutters*.

Pour chaque radar FM-CW, les mesures sont conduites de la manière suivante. Premièrement le radar est positionné en face du pied de vigne à mesurer, à une distance de 1,5m. L'antenne de transmission (Tx) du radar est directive (avec un angle d'ouverture de quelques degrés) et permet la transmission des *chirps*, autrement dit des signaux de transmission dont la fréquence est modulée triangulairement, dans une direction d'interrogation donnée. Les *chirps* sont réfléchis par la scène et l'énergie électromagnétique rétrodiffusée est collectée par les antennes de réception (Rx). Dans chaque direction d'interrogation, le spectre de battement est obtenu en calculant la transformée de Fourier rapide (FFT) des signaux de transmission et réceptions en sortie du mélangeur. La résolution en profondeur est définie par l'expression $d=c/2B$, où c et B représentent respectivement la vitesse de la lumière dans le vide et la bande de modulation. Le scan angulaire de l'antenne de transmission aboutit à une cartographie 3D de la rétrodiffusion du pied de vigne.

Le balayage mécanique est effectué mécaniquement à 24GHz et 122GHz en utilisant une tourelle mécanique. Le balayage angulaire va de 0° à 30° en élévation (indiqué par φ) et de -20° à 20° en azimut (indiqué par θ), avec un pas angulaire de 1°. Le balayage mécanique et la transmission des *chirps* sont

synchronisés par ordinateur. À 77GHz, le radar *RBK_8* effectue un beamforming numérique en azimut en utilisant sa configuration MIMO (Multiple Inputs, Multiple Outputs), tandis qu'en élévation, un balayage mécanique est appliqué entre 0° et 30°. Une fois ce balayage effectué le système radar se déplace latéralement de 1m (manuellement dans ces mesures) et effectue le balayage 3D du pied de vigne suivant. Un schéma du protocole de mesure ainsi qu'une photographie du système sont disponible sur la Figure 119.

Modèle	DK-sR-1030[e]	RBK_8	EasyRadar
Entreprise	IMST GmbH	INRAS GmbH	Silicon Radar GmbH
puissance en sortie	20 dBm (100mW)		
fréquence porteuse f	23,8 GHz	77,5 GHz	125,4 GHz
longueur d'onde porteuse λ	12,6 mm	3,8 mm	2,4 mm
bande de modulation B	2,0 GHz	3,0 GHz	6,8 GHz
résolution en profondeur d	7,5 cm	5,0 cm	2,2 cm
Tx[a] antenne(s)	cornet circulaire avec lentille	4 réseaux d'antennes patches (2x6)	antenne patche avec lentille
Tx[a] gain d'antenne(s)	28 dBi	17,2 dBi	0 dBi
Rx[b] antenne(s)	cornet rectangulaire	8 réseaux d'antennes patches (1x6)	antenne patche avec lentille
Rx[b] gain d'antenne(s)	20 dBi	15,8 dBi	0 dBi
Tx[a] largeur de faisceau verticale	6°	13,2°	8°
Tx[a] largeur de faisceau horizontale	6°	51°	8°
couplage de polarisation	VV – VH – HV – HH	VV (MIMO)	VV
variétés analysées	MO, GA, ME, GR, AB		ME, GR, AB
scan en élévation	φ = 0° to 30°	φ = -5° to 25°	φ = 0° to 30°
scan en azimut	θ = -20° to 20°	digital beamforming	θ = -20° to 20°

[a] Tx : transmission
[b] Rx : réception

Tableau 60. Principales caractéristiques des trois radars FM-CW utilisés pour ces mesures, ainsi que les angles minimaux et maximaux en azimut et en élévation du balayage mécanique.

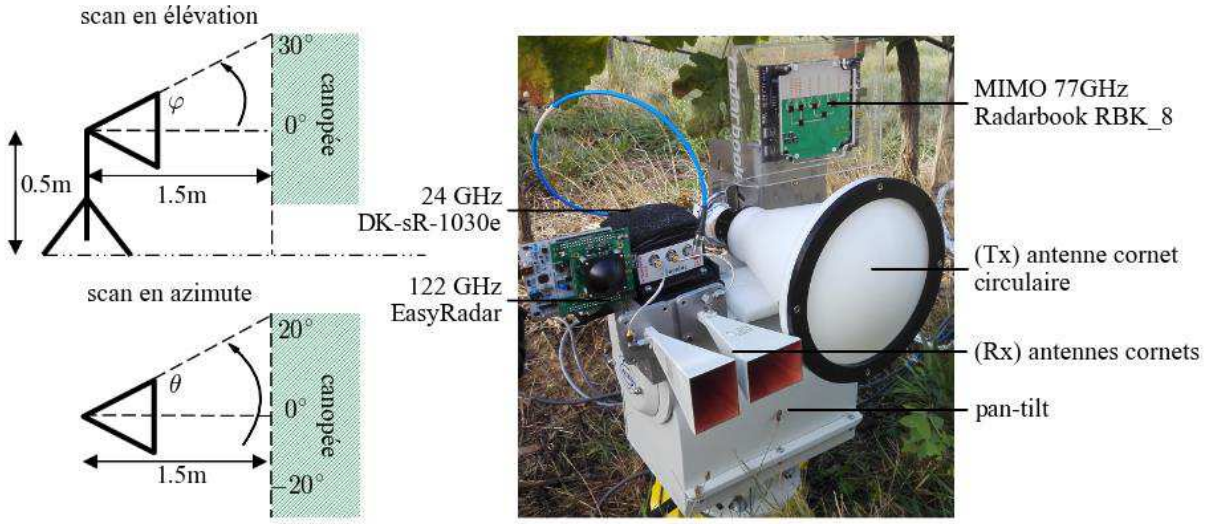


Figure 119. (a) Protocole de mesure des balayages en azimut (pour les radars 24GHz et 122GHz) et en élévation. (b) Photographie du système de mesure avec les trois radars FM-CW à 24GHz, 77GHz et 122GHz.

4.4.2.3. *Représentation tri-dimensionnelle de la rétrodiffusion électromagnétique des pieds de vignes*

Pour chaque pied de vigne, le balayage radar génère une image en trois dimensions à partir de laquelle la masse des grappes doit être retrouvée. Ces images sont composées de cellules 3D dénommées *voxels*. Le volume d'un voxel (ou résolution volumique) de l'image est donnée par l'expression :

$$v_{res}(R) = \left(2dR^2 + \frac{d^3}{6}\right) \times d_\theta \times \sin\frac{d_\varphi}{2} \quad (14)$$

R représente la distance d'interrogation radar-voxel, d_θ et d_φ les résolutions angulaires en azimut et en élévation, et d la résolution en profondeur. Pour le radar *DK-sR-1030e* fonctionnant à 24 GHz, la résolution volumique à une distance de 2m du radar est de 91cm^3. Pour le radar *EasyRadar* fonctionnant à 122GHz, cette résolution est réduite car la bande de modulation B est trois fois plus élevée : à la même distance, la résolution volumique est égale à 27cm^3. Pour le radar *RBK_8* fonctionnant à 77GHz, la résolution azimutale est celle adoptée durant le calcul du beamforming numérique, c'est-à-dire ici de 1,4°. On a donc à la même distance R=2m, et pour d=5cm une résolution volumique égale à 85cm^3. Pour chaque voxel de coordonnées (R_0, θ_0, φ_0), le niveau d'écho radar est représenté une échelle de couleur (bleu pour les faibles niveaux d'écho et rouge pour les forts niveaux d'écho). Un changement des coordonnées azimut/élévation vers les coordonnées cartésiennes peut être appliqué pour des affichages dans des dimensions à la bonne échelle. Ce niveau d'écho est ensuite affiché en utilisant des isosurfaces [151] déjà décrites dans les autres sections précédentes, afin de représenter de manière pratique la rétrodiffusion en trois dimension du pied de vigne. Un exemple d'une telle image est visible sur la Figure 120 (a) pour le pied de vigne GR n°3 et une photographie du pied de vigne GR n°3 interrogé est visible sur la Figure 120 (b) où la majorité des grappes est cachée par les feuilles. La canopée est facilement distinguable sur cette image, mais prétendre que seules les grappes génèreraient ces échos radars est mauvaise interprétation qui aboutirait à une estimation erronée du rendement. Comme expliqué dans les sections précédentes, les échos radars sont générés par de multiples cibles différentes naturelles et artificielles (grappes, bois, feuilles, tendeurs et poteaux métalliques). Il est alors nécessaire de discriminer chaque écho radar, et de déterminer s'ils sont à l'origine d'une rétrodiffusion d'une grappe, d'une cible parasite ou des deux à la fois. Pour cela, on propose un algorithme sélectif de génération de contours basé sur le calcul des maxima locaux des échos radars. Un exemple de contours générés avec cet algorithme est disponible sur la Figure 120 (c) et l'algorithme est décrit de manière plus précise dans la section suivante.

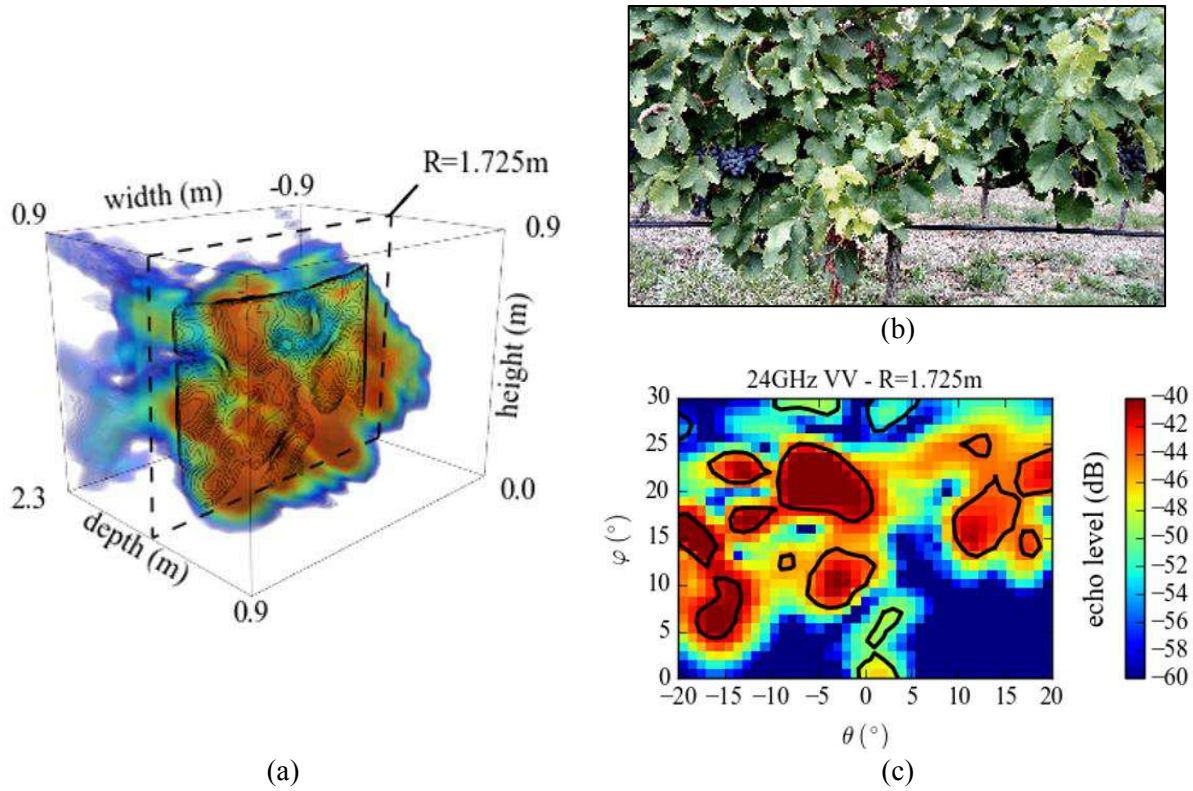


Figure 120. (a) Représentation tri-dimensionnelle par isosurfaces de la rétrodiffusion d'un pied de vigne (GR n°3) mesurée avec le radar 24GHz en couplage de polarisation VV. Echelle : -60dB (bleu) à -40dB (rouge). (b) Photographie du pied de vigne GR n°3, où la majorité des grappes est masquée par les feuilles. (c) Image radar 2D dans le plan (θ,φ) du pied de vigne GR n°3 pour R=1,725m (soit 23 fois la résolution en profondeur *d*) et contours générés à partir d'un algorithme sélectif basé sur le calcul des maxima locaux.

4.4.2.4. *Algorithme sélectif de génération de contours basé sur la détection des maxima locaux*

Pour séparer les échos radar des grappes et du clutter, on propose d'analyser la distribution du niveau d'écho dans le plan (θ,φ) sur de multiples distances R entre 1,0m et 2,0m. On génère premièrement des contours par l'intermédiaire de l'algorithme *marching squares* [150]. Il s'agit *d'isolignes*, autrement dit des délimitations séparant les voxels ayant un niveau d'écho identique. Une représentation de ces isolignes pour différents niveaux d'écho est disponible sur la Figure 136 (a). Pour un niveau d'écho trop bas, les contours générés sont trop larges pour discriminer les cibles. Pour un niveau d'écho trop élevé, certains échos radars ne sont plus inclus à l'intérieur des contours, d'où une perte d'information. On propose alors un algorithme sélectif capable de discriminer correctement chaque écho radar à partir du calcul de maxima locaux. La base de l'algorithme est identique à celle présentée dans la section 4.4.1.5, la différence étant que les critères de sélection ne sont pas surfaciques. On part ici du principe qu'une cible génère un écho radar possédant un unique maximum local, accompagné d'un étalement et une atténuation de cet écho autour de ce maximum local. Le fonctionnement de l'algorithme est alors le suivant :

- On définit un niveau d'écho initial v_{init} à partir duquel on commence à appliquer l'algorithme *marching squares* sur chaque image radar dans le plan (θ,φ).
- Pour chaque contour ainsi généré, on calcule le nombre de maximum locaux des niveaux d'échos présents à l'intérieur des contours générés.
- Si un seul maximum local est détecté, le contour et ses paramètres sont sauvegardés.
- Sinon, on augmente le niveau d'écho et on itère la première étape.

Le calcul des maximum locaux (environnement Python 2.7, fonction *peak_local_max* [190] de la bibliothèque *scipy.ndimage.filters.peak_utils*) s'effectue après l'application d'un filtre de recherche de maximum (fonction *maximum_filter* [149] de la bibliothèque *scipy*). Ce filtre de recherche de maxima dépend d'un paramètre noté δ représentant la taille d'entrée du filtre (en pixel). Plus δ est élevé, plus le motif du filtre appliqué sur l'image sera grand, et plus le bruit de l'image sera réduit. En revanche, la précision de la localisation du maximum local sera plus faible. Cet effet est illustré sur la Figure 122 en appliquant le filtre de maxima pour des motifs de différentes tailles sur une image composée de 16 maxima locaux en présence de bruit. Lorsque les dimensions de δ sont trop faibles, des maxima locaux supplémentaires (points rouges) sont détectés à cause du bruit. Lorsque les dimensions de δ sont trop élevées, des erreurs apparaissent sur la position des maxima locaux. Le choix optimal de la valeur de δ dépend donc du rapport signal sur bruit des images radars acquises. D'après les mesures acquises avec les trois radars, les valeurs de la taille d'entrée du filtre choisies sont δ=3 à 24GHz et 77GHz, et δ=10 à 122GHz car le rapport signal sur bruit du système *EasyRadar* est plus faible que celui des deux autres radars. Sur la Figure 121 (b) sont affichés les contours générés en sortie de l'algorithme sélectif, où chaque contour (en rouge) contient un écho radar d'une cible individuelle. Cette discrimination plus précise des échos radars peut permettre une estimation du rendement avec moins d'erreur. Un résumé de l'algorithme sélectif basé sur la détection des maxima locaux est disponible sur la Figure 123. Plusieurs paramètres peuvent être extraits d'un contour $\mathcal{C}$ donné avec par exemple :

- sa surface $s(\mathcal{C})$ en pixels² ou m²
- son nombre de pixels $N(\mathcal{C})$.
- son volume $Vol(\mathcal{C}) = s(\mathcal{C}).d = N(\mathcal{C}).v_{res}$ en voxels^3 ou m^3
- sa position calculée à partir de son barycentre $R(\mathcal{C})$,$\theta(\mathcal{C})$, $\varphi(\mathcal{C})$
- le niveau d'écho à partir duquel le contour est généré $v(\mathcal{C})$
- le niveau d'écho maximal mesuré à l'intérieur du contour $e_{Max}(\mathcal{C})$
- le niveau d'écho moyen mesuré à l'intérieur du contour $e_{Mean}(\mathcal{C})$
- l'écart-type du niveau d'écho mesuré à l'intérieur du contour $\sigma(\mathcal{C})$

L'idée est alors de construire des estimateurs basés sur ces paramètres, capables de décrire le plus justement le rendement des vignes.

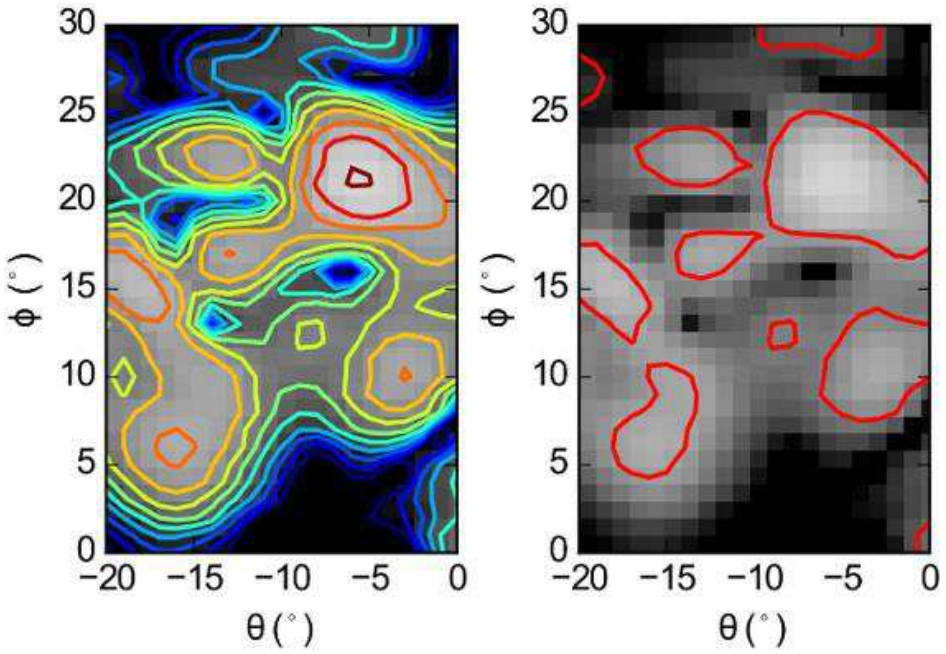


Figure 121. (a) Contours générés pour différents niveaux d'échos initiaux de -60dB (bleu) à -30dB (rouge) et (b) contours générés en appliquant l'algorithme sélectif basé sur le calcul des maximum locaux.
Image radar 2D dans le plan (θ,φ), en R=1,725m (soit 23 fois la résolution en profondeur *d*) générée avec le radar 24GHz en couplage de polarisation VV.

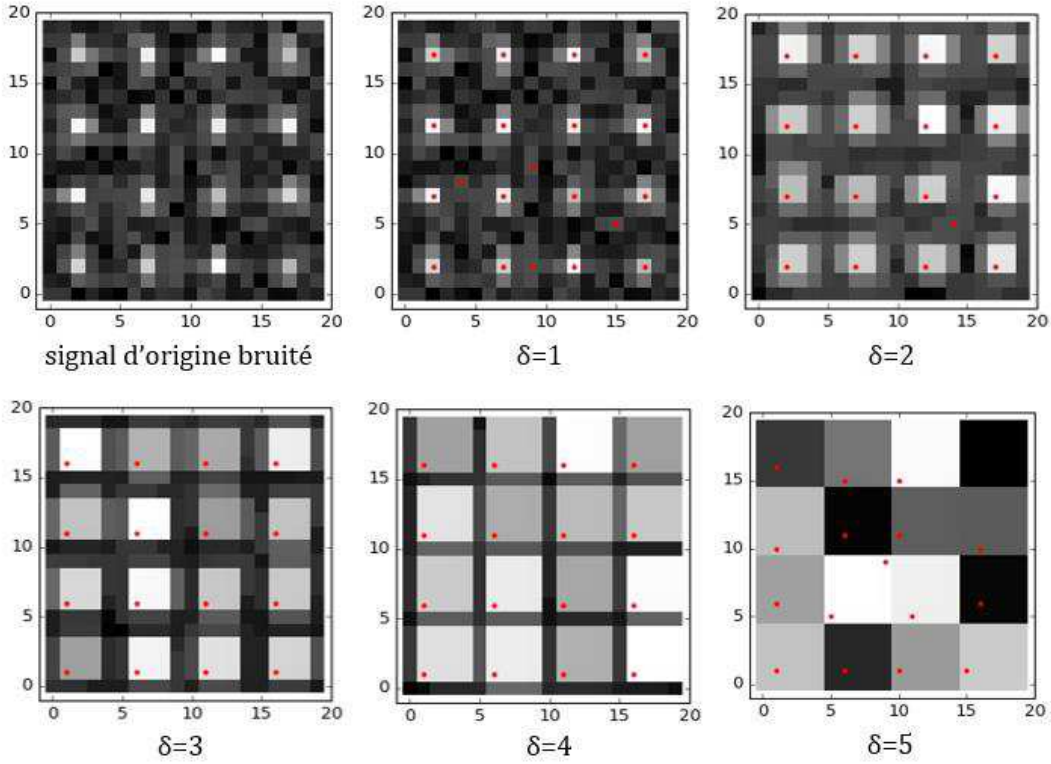


Figure 122. Mise en évidence de l'influence de la taille d'entrée δ du filtre de maximum pour la détection de maximum locaux. Le filtre est appliqué sur une zone de test composée de 16 maxima locaux sur une image bruité. Les points rouges représentent les maxima locaux détectés.

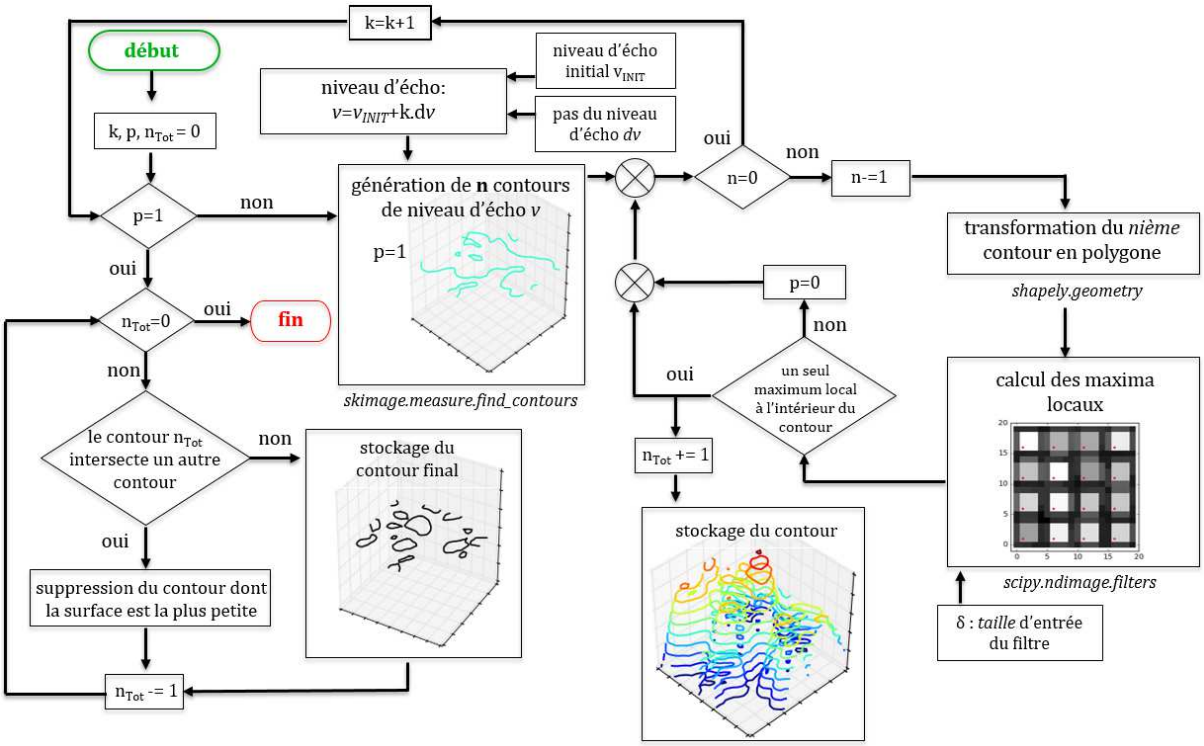


Figure 123. Description de l'algorithme sélectif de contours basé sur une détection du nombre de maxima locaux dans un plan 2D donné.

4.4.2.5. *Choix du niveau d'écho initial*

Le niveau d'écho initial v_{init} à partir duquel les contours sont calculés doit être choisi judicieusement. La valeur de v_{init} doit être suffisamment basse pour prendre en compte les échos radars de faible amplitude. En revanche, si la valeur de v_{init} est trop basse, le temps de calcul de l'algorithme est inutilement rallongé. On se propose de trouver une valeur optimale v_{init} en définissant les paramètres suivants :

- n_C le nombre de contours générés à partir d'une scène 3D mesurée pour un niveau d'écho donné.
- n_M le nombre maxima locaux détectés dans l'image 3D à l'intérieur des contours

Les paramètres n_C et n_M sont affichés pour une même scène de mesure (pied de vigne ME n°3) sur la Figure 124 interrogée avec les radars (a) 24GHz, (c) 77GHz et (e) 122GHz en couplage de polarisation VV et en fonction du niveau d'écho initial v_{init}. On remarque deux propriétés communes pour les trois fréquences :

- un maximum global des deux paramètres aux alentours de la valeur moyenne de la scène e_{Mean}.
- une diminution des valeurs des deux paramètres vers 0 lorsque les valeurs de v_{init} sont trop élevées car le nombre de contours et la surface des contours diminuent avec l'augmentation du niveau d'écho.
- une diminution des valeurs des deux paramètres vers 0 lorsque les valeurs de v_{init} sont trop faibles car les contours générés sont dans des zones très peu réfléchissantes en dessous du niveau d'écho moyen.

On définit alors le paramètre η comme étant le ratio entre le nombre de contours sur le nombre de maximum locaux :

$$\begin{cases} \eta = \frac{n_C}{n_M}, n_M \neq 0 \\ \eta = 1, n_M = 0 \end{cases} \quad (15)$$

En théorie, l'objectif recherché est d'avoir un maximum local par contour, autrement dit $\eta = 1$. On a cependant montré dans la section précédente que les échos radars possèdent des niveaux d'écho différents et cette condition ne peut pas être atteinte pour une valeur d'écho unique. L'algorithme doit donc être initialisé pour une valeur de v_{init} avant que η ne commence à fortement augmenter pour des niveaux d'écho élevés. De la même manière, la valeur de v_{init} doit être initialisée après que η a terminé sa décroissance à des niveaux d'écho faible. On a donc un intervalle dans lequel la valeur de v_{init} peut être choisie. Pour définir cet intervalle, on définit $\frac{\partial \eta}{\partial v}$ la variation de η par rapport au niveau d'écho. Sur Figure 124 sont affichés les paramètres η et $\frac{\partial \eta}{\partial v}$ pour les radars (b) 24GHz, (d) 77GHz et (f) 122GHz en couplage de polarisation VV et en fonction du niveau d'écho initial v_{init}. Un filtre passe-bas (Butterworth d'ordre 2) a été appliqué sur η afin de supprimer quelques variations erratiques indésirables. Des plages de valeurs de v_{init} sont alors proposées aux minima locaux ($\frac{\partial \eta}{\partial v}$=0) entre la forte croissance (valeur maximale de v_{init}) de η et après la forte décroissance (valeur minimale de v_{init}) de η observée aux trois fréquences. Le milieu de l'intervalle est choisi ici pour initialiser l'algorithme sélectif.

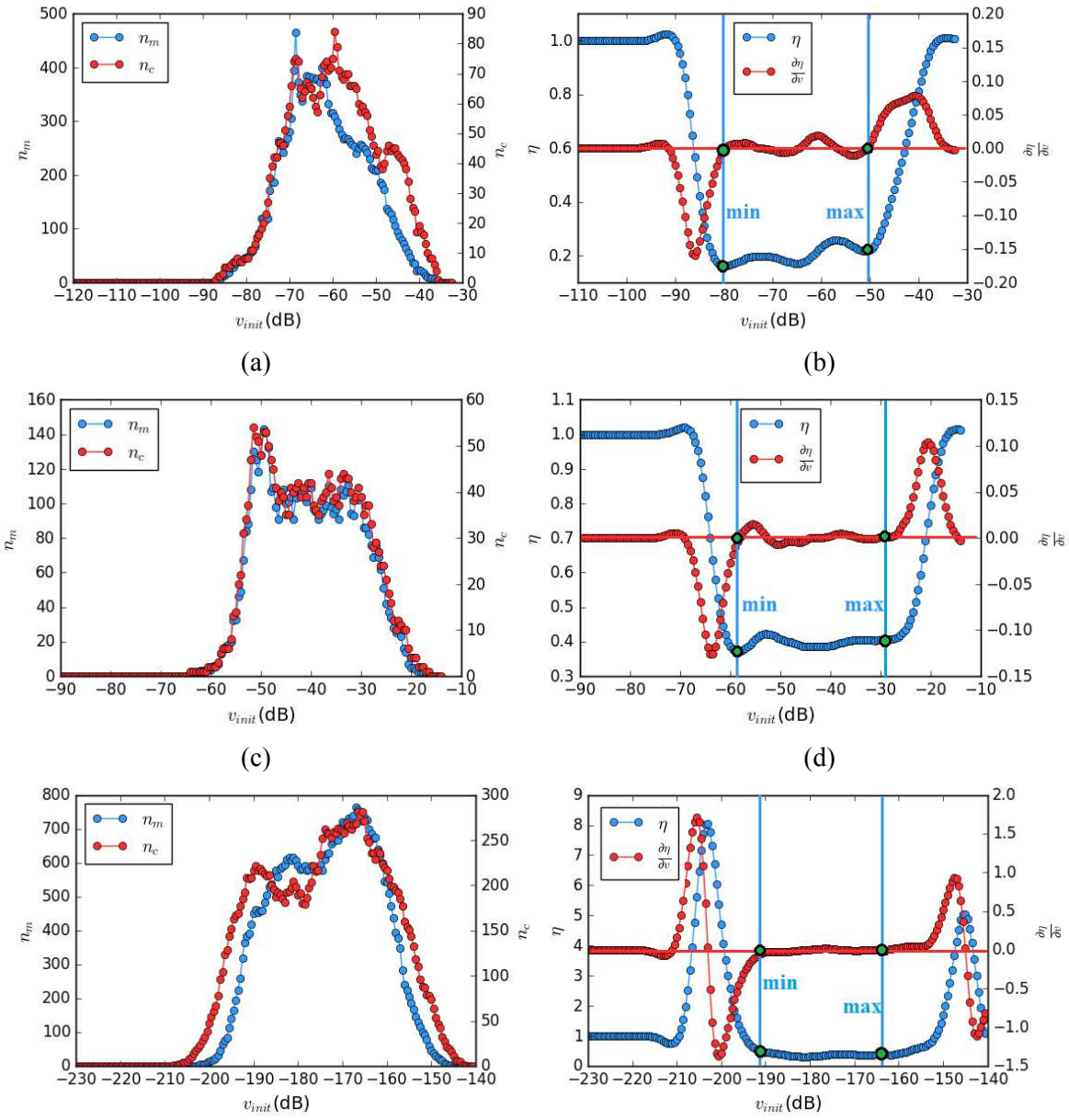


Figure 124. Nombre de contours n_C et nombre de maxima locaux n_M du pied de vigne ME n°8 calculés pour différents niveaux d'écho avec les radars (a) 24GHz, (c) 77GHz et (e) 122GHz en couplage de polarisation VV. Les valeurs du rapport $\eta = \frac{n_C}{n_M}$ et de la dérivée $\frac{\partial \eta}{\partial v}$ permettent de déterminer un intervalle de valeurs pour choisir v_{init} et générer les contours aux fréquences des radars (b) 24GHz, (d) 77GHz et (f) 122GHz en couplage de polarisation VV.

4.4.2.6. *Estimation du rendement par analyse polarimétrique*

Dans cette section on étudie la faisabilité d'estimer le rendement des vignes à l'aide du radar FM-CW à 24GHz en utilisant les combinaisons de couplage de polarisation VV, VH, HV et HH. Comme observée dans la section 4.3.3, l'analyse polarimétrique permet la discrimination de cibles de formes différentes, et l'on avait remarqué le caractère dépolarisant des grappes de raisin. On peut alors espérer définir des estimateurs plus flexibles que celui définit en utilisant un seul couplage VV lors de la précédente campagne de mesure (voir section 4.4.1). On propose ici de résoudre un problème inverse en émettant l'hypothèse que la masse des grappes (ou le volume en considérant une masse volumique constante) peut être estimée à partir d'une combinaison linéaire de surfaces d'écho radar à différents couplages. Pour cette raison, on définit le paramètre de dépolarisation χ_q^p associé au k^{ième} contour $\mathcal{C}_{p,k}$ issu de l'algorithme sélectif (décrit dans la section 4.4.1.5) et aux couplages p et q, où p=VV, VH, HV où HH et $q \neq p$. Cette dépolarisation est donnée par l'expression :

$$\chi_q^p(\mathcal{C}_{p,k}) = \frac{e_{Max}^p(\mathcal{C}_{p,k})}{e_{Max}^q(\mathcal{C}_{p,k})} \tag{16}$$

Le paramètre $e_{Max}^p(\mathcal{C}_{p,k})$ est le niveau d'écho maximal à l'intérieur du contour $\mathcal{C}_{p,k}$ en couplage p. En supposant qu'un nombre total de $n\mathcal{C}_p$ sont générés en couplage p pour un pied de vigne donné, on définit alors l'estimateur de la quantité de grappe de raisin présent sur le pied de vigne par :

$$E_{Pol}[n] = \sum_p \sum_{q \neq p} \frac{a_q^p}{s_{REF}^p} \sum_{k=1}^{K\mathcal{C}_p} s_k^p(\mathcal{C}_{p,k}) \cdot \chi_q^p(\mathcal{C}_{p,k})[n] \tag{17}$$

Le paramètre $s_k^p(\mathcal{C}_{p,k})$ représente la surface en pixels² à l'intérieur du contour $\mathcal{C}_{p,k}$, a_q^p est un coefficient réel à déterminer pour les couplages p et q, avec $q \neq p$. s_{REF}^p est une surface de référence qui est utilisée ici pour normaliser l'estimateur et réduire par compensation l'influence de paramètres sur l'estimation, comme par exemple des variations du niveau d'écho ou de la résolution volumique. Le but est alors de retrouver la valeur des coefficients a_q^p qui forment la solution de l'équation :

$$Y = A\overline{X} \tag{18}$$

avec
$$\begin{cases} Y = [y_1 \quad y_2 \quad \dots \quad y_n \quad \dots \quad y_N]^T \\ A = [\beta \quad \alpha.a_{VH}^{VV} \quad \dots \quad \alpha.a_{HV}^{HH}]^T \\ \overline{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,1} & \dots & x_{1,p} & \dots & x_{1,P} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n,1} & \dots & x_{n,p} & \dots & x_{n,P} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{N,1} & \dots & x_{N,p} & \dots & x_{N,P} \end{bmatrix} \end{cases} \tag{19}$$

Le vecteur Y représente la masse estimée des grappes de raisins pour N mesures effectuées. $\overline{X}$ est une matrice $P \times (N+1)$ composée des éléments $x_{n,p} = \frac{1}{s_{REF}^p} \sum_{k=1}^{K\mathcal{C}_p} s_k^p(\mathcal{C}_{p,k}) \cdot \chi_q^p(\mathcal{C}_{p,k})[n]$ issus du couple de couplages (p,q) et de la mesure n. Les coefficients réels α et β sont respectivement la pente et l'interception en zéro de l'estimateur telles que la masse estimée y_m est égale à :

$$y_n = \alpha E_{Pol}[n] + \beta \tag{20}$$

Le vecteur A solution de l'équation (17) est obtenu par la relation :

$$A = \overline{X}^{\dagger} Y + \left[I - \overline{X}^{\dagger} \overline{X} \right] u \tag{21}$$

$\overline{X}^{\dagger}$ représente la matrice pseudo-inverse de $\overline{X}$, I la matrice identité et u un vecteur arbitraire. La linéarité de l'estimateur E_{Pol} augmente avec la réduction du terme d'erreur $\left[I - \overline{X}^{\dagger}\overline{X}\right]u$.

Les coefficients du vecteur A sont calculés à partir des mesures des masses de grappes récoltées pour les cinq variétés (MO, GA, ME, GR, AB). Seul 9 des 12 coefficients a_q^p sont utilisés pour composer le vecteur A. Les trois autres coefficients restants (a_{VV}^{VH}, a_{VV}^{HV} et a_{HH}^{HV}) ont de faibles valeurs et surestiment le rendement. Les masses qui constituent le vecteur Y sont les suivantes :

- Les masses de cinq pieds de vignes pour chaque variété, soit 25 masses de grappes
- Les combinaisons de masses de grappes de pieds de vignes situés côte-à-côte, soit 50 mesures supplémentaires.

Puisque l'on ajoute des combinaisons linéaires de masses déjà existantes, le rang de la matrice $\overline{X}$ reste inchangé, mais on peut ainsi analyser l'erreur commise sur une masse estimée plus élevée de grappes de raisin. La représentation de ces combinaisons est disponible sur la Figure 125 (a) et indique pour les figures suivantes le code de couleur des combinaisons de masses :

- Masse des grappes d'un pied de vigne seul : **noir**.
- Masse des grappes de deux pieds de vigne consécutifs : **rouge**.
- Masse des grappes de trois pieds de vigne consécutifs : **bleu**.
- Masse des grappes de quatre pieds de vigne consécutifs : **violet**.
- Masse des grappes de cinq pieds de vigne consécutifs : **vert**.

Les paramètres et performances de l'estimation sont disponibles dans le Tableau 61 et les masses des grappes estimées sont visibles sur la Figure 125 (b). Les lettres associées aux points représentent permettent de distinguer les différentes variétés. Le coefficient de détermination R^2=0,97 met en évidence la grande linéarité de l'estimation. On définit ensuite l'erreur commise par l'estimation du rendement par :

$$\varepsilon = \frac{|m_{harv} - m_{est}|}{m_{est}} \qquad (22)$$

Les paramètres m_{harv} et m_{est} représentent respectivement la masse réelle récoltée et la masse estimée. Cette erreur commise est généralement au-dessus de 10% lorsque le rendement est estimé manuellement [191]. D'après la Figure 125 (c), l'erreur commise par l'estimateur E_{Pol} est en-dessous de 10% pour une masse de grappe mesurée supérieure à 7kg. On observe effectivement une décroissance de l'erreur commise avec l'augmentation de la masse des grappes estimée, qui peut être expliquée par deux raisons :

- Une partie des grappes de raisin est localisée à la limite entre deux pieds de vignes. Il est alors possible que la grappe de raisin soit détectée deux fois dans deux mesures différentes. Cet effet de bord diminue lorsque les pieds de vignes sont combinés entre eux.
- Le faisceau de l'antenne de transmission est en réalité composé d'un lobe principal ainsi que de lobes secondaires qui peuvent aussi générer des rétrodiffusions latérales. Cet effet s'estompe lorsque l'on combine les mesures de pied de vignes successifs.
- Ceci explique aussi pourquoi l'erreur commise sur la variété MO est plus élevée que pour les autres variétés : les mesures de MO ont été effectuées en milieu de parcelle, générant plus de rétrodiffusions parasites que pour les mesures des autres variétés, qui ont été effectuées en bord de parcelle.

La masse totale estimée (toutes variétés confondues) est de 48,6kg, alors que la masse réelle récoltée est de 48,1kg, ce qui correspond à une erreur commise par l'estimation du rendement ε=1,0%.

Les coefficients a_q^p reportés dans le Tableau 61 indiquent de quelle manière les grappes rétrodiffusent les ondes électromagnétiques :

- D'après la forte valeur positive de a_{VH}^{HH} la rétrodiffusion horizontale des grappes est davantage générée par une interrogation des grappes en polarisation horizontale que verticale.
- La forte valeur positive de a_{HV}^{VH} indiquent que les grappes dépolarisent davantage les ondes polarisées verticalement qu'horizontalement.
- La forte valeur négative de a_{VH}^{VV} suggère que les cibles ne dépolarisant pas les ondes polarisées verticalement ne sont pas des grappes.
- De même pour la forte valeur négative de a_{HV}^{HH}, les cibles ne dépolarisant pas les ondes polarisées horizontalement ne sont pas des grappes.

Pour vérifier si la construction de l'estimateur E_{Pol} est basé sur une détection directe des grappes de raisin ou bien d'un paramètre du pied de vigne corrélé au rendement, les mêmes balayages 3D des pieds de vigne sont effectuées après la récolte (c'est-à-dire en absence de grappes de raisin). L'estimation du rendement est alors affichée sur la Figure 125 (d). On note une forte dégradation de l'estimation, avec un coefficient de détermination R^2=0,73. En revanche, la masse estimée ne diminue pas jusqu'à 0kg. Il est alors probable que l'estimateur E_{Pol} ne soit pas totalement construit sur une estimation directe du volume des grappes, mais que d'autres paramètres corrélés soient pris en compte, comme la densité du feuillage ou la vigueur du pied de vigne.

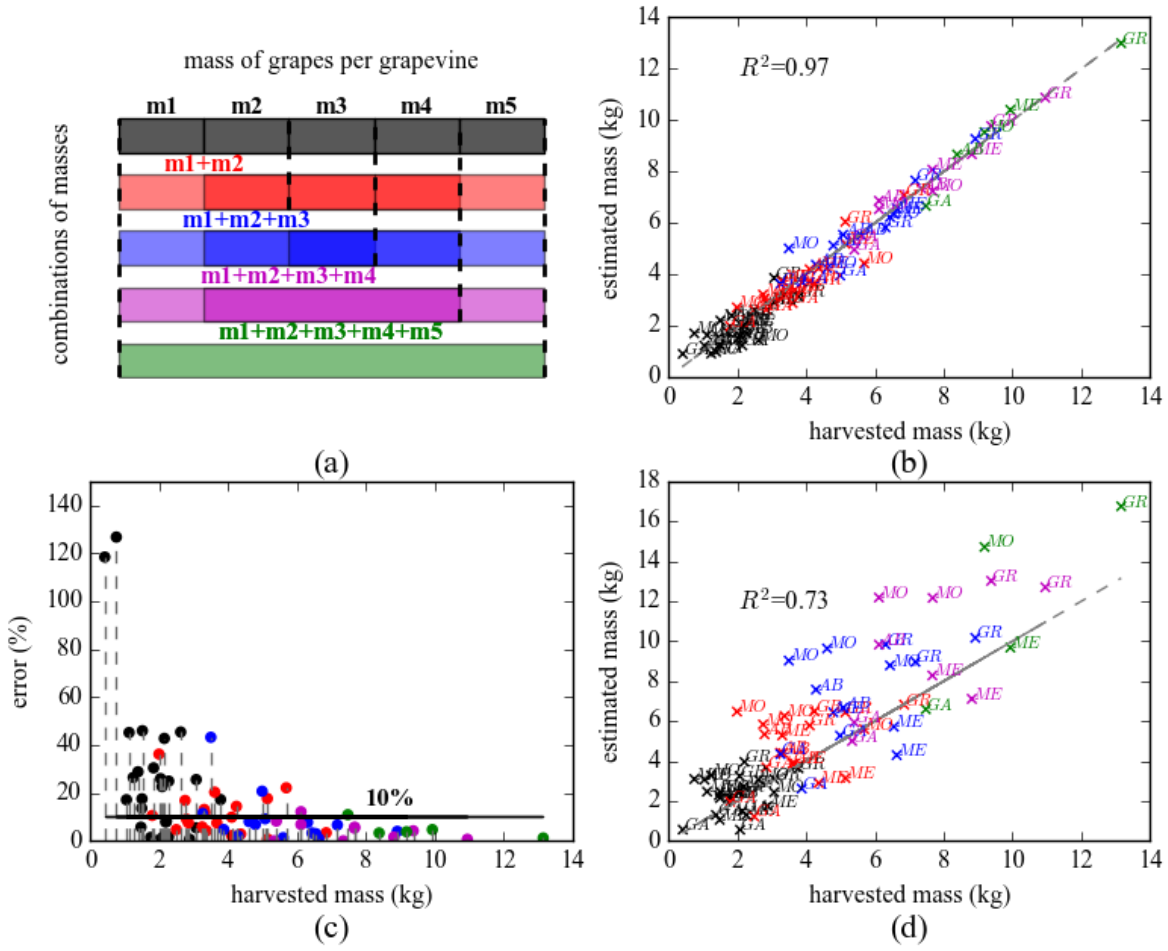


Figure 125. (a) Combinaison des masses de grappes effectuée pour chaque variété. (b) Masse estimée par E_{Pol} en fonction de la masse réelle récoltée. (c) Erreur commise sur l'estimation de la masse en fonction de la masse réelle récoltée. (d) Masse estimée par E_{Pol} après la récolte (sans grappes) en fonction de la masse récoltée.

E_{Pol} – estimation polarimétrique			
caractéristiques		**paramètres**	
m_{harv} totale (kg)	48,1	α (g)	3,03E-5
m_{est} totale (kg)	48,6	β (g)	2,9E-3
R^2	0,97	a_{VH}^{VV}	-0,42
precision (kg) [a]	0,50	a_{HV}^{VV}	-0,09
ε (m>6kg) [b]	4,5 %	a_{HH}^{VV}	0,04
		a_{VV}^{VH}	-0,03
		a_{HV}^{VH}	0,23
		a_{VH}^{HV}	-0,06
		a_{VV}^{HH}	-0,02
		a_{VH}^{HH}	0,77
		a_{HV}^{HH}	-0,37

[a] précision du modèle linéaire
[b] erreur moyenne de l'estimation du rendement pour une masse estimée supérieure à 6kg

Tableau 61. Caractéristiques et paramètres de l'estimateur E_{Pol}, avec une surface de référence $s_{REF\ p}$ calculée pour le pied de vigne MO n°14

4.4.2.7. *Estimation du rendement au cours du développement de la grappe*

Pour compléter l'analyse polarimétrique, des balayages 3D de cinq pieds de vignes de la variété Grenache ont été effectués à différentes périodes de développement de la grappe :

- En fin de débourrement (éclatement du bourgeon) avec quelques petites feuilles éparses.
- À la floraison avec la croissance des sarments et des feuilles.
- À mi-période de la nouaison après la fertilisation des fleurs.
- En fin de nouaison.
- À la véraison, lorsque la grappe s'est refermée et change de couleur
- À maturation

L'estimation des masses présentes aux différentes périodes est représentée sur la Figure 126 (a) ainsi que des photographies de la grappe aux différents stades de développement sur la Figure 126 (b)-(f). L'estimation est effectuée en calculant E_{Pol} en utilisant les mêmes valeurs des coefficients a_q^p reportées dans le Tableau 61. On observe une augmentation de la masse estimée des grappes de début Juillet à Septembre 2017, ce qui peut correspondre au développement de la grappe de raisin, ainsi que d'autres paramètres corrélés comme le développement des feuilles et des sarments. Avant Juillet, il semblerait que les grappes ne soient pas assez développées pour estimer précisément le rendement. La construction d'un nouvel estimateur avec des nouvelles valeurs des coefficients a_q^p serait alors préférable pour des estimations plus précoces du rendement. La masse totale estimée pour les différents stades de développement est disponible dans le Tableau 62. En revanche, les masses des grappes n'ont pas été mesurées pendant ces périodes, ces valeurs ne sont donc données qu'à titre indicatif sans analyse de l'erreur commise.

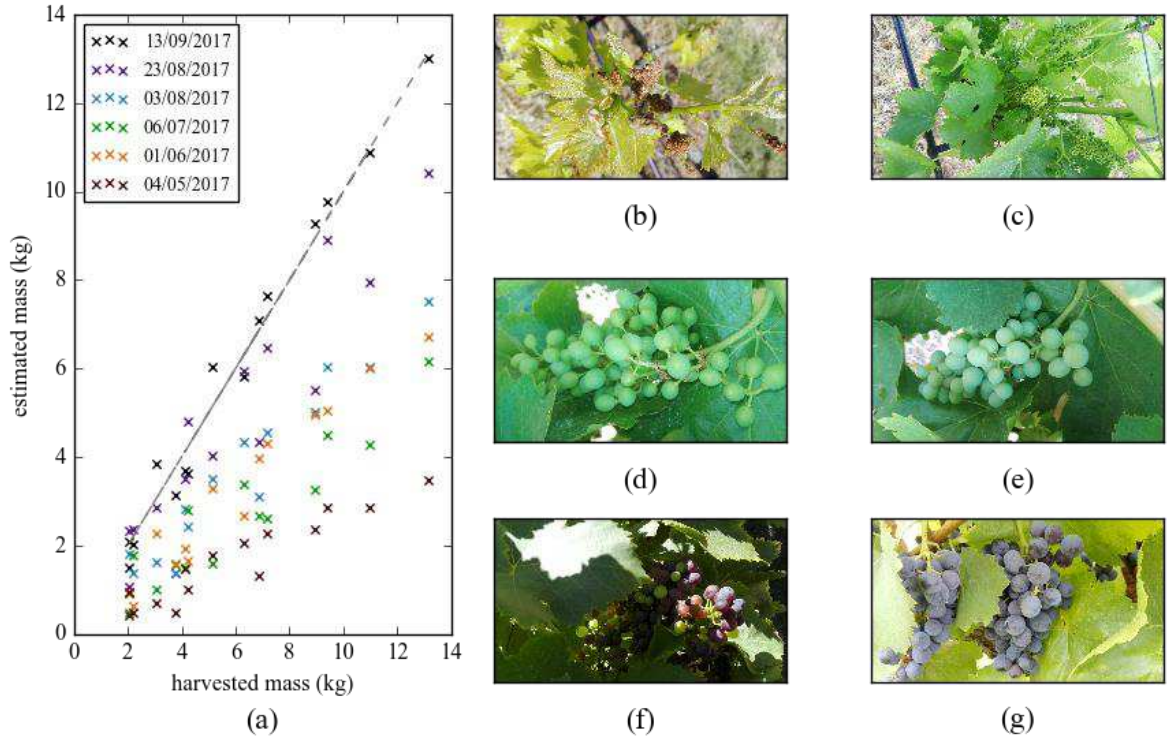


Figure 126. (a) Estimation de la masse des grappes de la variété GR à différents stades de développement de la grappe. (b) Fin du débourrement, 04/05/2017 (c) Floraison, 01/06/17. (d) Mi-période de nouaison, 06/07/17. (e) Fin de nouaison, 03/08/17. (f) Véraison, 23/08/17. (g) Maturation, 13/09/17.

stade de développement	masse totale estimée (kg)
fin de débourrement; 04/05/17 [a]	3,4
floraison; 01/06/17 [a]	6,7
nouaison à mi-période; 06/07/17	6,1
fin de la nouaison; 03/08/17	7,5
véraison; 23/08/17	10,4
maturation; 13/09/17	12,9

[a] à ces périodes, la construction d'un nouvel estimateur est suggérée car aucune grappe n'est développée.

Tableau 62. Masses totales estimées des 5 pieds de vignes GR avec l'estimateur E_{Pol} à différents stades de développement, avec une surface de référence $s_{REF\,p}$ calculée pour le pied de vigne MO n°14

4.4.2.8. *Flexibilité de l'estimation par analyse polarimétrique*

Dans cette section sont reportées les performances de l'estimateur E_{Pol} en faisant varier quelques paramètres extérieurs, comme le niveau d'écho initial v_{init}, les limites en élévations et la taille d'entrée du filtre δ. On revient premièrement sur le paramètre s^{p}_{REF} qui intervient dans la définition de l'estimateur E_{Pol} dans l'équation (17). Cette surface de référence sert à compenser des effets que pourrait produire une variation externe de v_{init}. Pour illustrer son utilité, on représente sur la Figure 127 la surface totale des contours générés par l'algorithme sélectif pour les 25 pieds de vignes, dans chaque combinaison de polarisation, en fonction de la variation du niveau d'écho initial Δv_{init}. On observe une variation linéaire

de la surface totale, dont les caractéristiques sont disponibles dans le Tableau 63. On définit alors la surface de référence $s_{REF\,p}$ pour un couplage p par l'expression :

$$s_{REF\,p} = s_{0\,REF\,p} + \alpha_{REF\,p} \cdot \Delta v_{init} \quad (23)$$

Le paramètre $\alpha_{REF\,p}$ représente la sensibilité de la surface totale des contours d'un pied de vigne face aux variations de Δv_{init} en couplage p, et $s_{0\,REF\,p}$ une surface de référence arbitraire, comme par exemple la surface totale des contours du pied de vigne MO n°14 qui a été utilisée pour calculer les coefficients a_q^p dans la section 4.4.2.6. En connaissant la variation Δv_{init} , on peut donc compenser la diminution ou l'augmentation de la surface des contours en normalisant l'estimation par $s_{REF\,p}$.

La flexibilité de l'estimateur E_{Pol} pour différentes valeurs de Δv_{init} est affichée sur le Tableau 64 avec les mêmes coefficients a_q^p que dans la section 4.4.2.6. On constate une dégradation de l'estimation à partir de $\Delta v_{init} = +3dB$ malgré la normalisation. Cet effet est probablement dû à un v_{init} qui n'est plus dans l'intervalle optimal de l'algorithme de sélection (voir section 4.4.2.5).

La flexibilité de l'estimateur E_{Pol} pour différentes valeurs de δ (taille d'entrée du filtre de maxima, voir section 4.4.2.4) est affichée dans le Tableau 65 avec les mêmes coefficients a_q^p que dans la section 4.4.2.6. Au vu des dégradations des performances de l'estimation, il est préférable de recalculer les coefficients a_q^p si l'on change la valeur de δ.

Pour finir, on étudie la flexibilité de l'estimateur E_{Pol} en fonction des angles minimaux φ_{Min} et maximaux φ_{Max} en élévation, affichée sur le Tableau 66. On remarque peu d'influence de l'angle minimal en élévation sur les performances de l'estimateur, car peu de grappes de raisin se trouvent dans la zone inférieure (seulement le tronc). En revanche, on observe une forte dégradation des performances de E_{Pol} lorsque φ_{Max} ce qui signifient que des échos radars situés dans la zone d'élévation entre 25° et 30° sont assimilés à des grappes de raisin, ce qui n'est pas réellement le cas : ce sont surtout des feuilles qui sont présentes dans cette zone. On peut donc penser que l'estimateur E_{Pol} est influencé par d'autres échos radars non générés par les grappes de raisin.

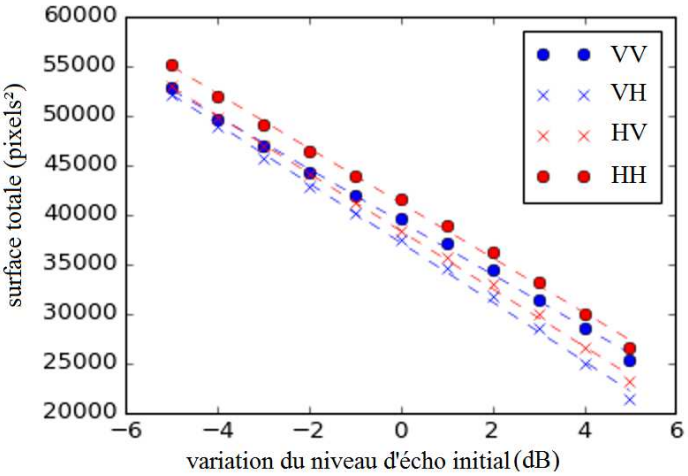


Figure 127. Variation de la surface totale des contours des 25 pieds de vignes pour les combinaisons de couplages VV, VH, HV et HH en fonction de la variation du niveau d'écho initial Δv_{init}.

couplage	VV	VH	HV	HH
R²	0,998	0,998	0,999	0,999
pente [a] α_{REF} (pixels²/dB)	106	119	116	110
interception [a] β_{REF} (pixels²)	1570	1485	1532	1645

[a] calculé pour un pied de vigne – moyenne sur 25 pieds de vigne

Tableau 63. Caractéristiques linéaires de la variation de la surface totale des contours en fonction de Δv_{init}.

Δv_{init} (dB)	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5
précision[a] (kg)	0,75	0,60	0,57	0,59	0,52	**0,38**	0,56	0,70	0,92	1,12	1,45
ε pour m>6kg (%)	10,8	7,8	6,6	7,1	5,0	**2,4**	5,2	6,9	8,8	13,4	21,0
R²	0,93	0,95	0,95	0,95	0,96	**0,97**	0,95	0,93	0,90	0,86	0,80

Tableau 64. Variation des performances de E_{Pol} en fonction de Δv_{init}.

δ (pixels)	2	3	4	5	10
précision[a] (kg)	0,87	**0,38**	0,66	1,06	2,87
ε pour m>6kg (%)	9,7	**2,4**	9,1	15,3	53,3
R²	0,92	**0,97**	0,95	0,90	0,88

Tableau 65. Variation des performances de E_{Pol} en fonction de δ.

φ_{Max}(deg)	30	29	28	27	26	25
précision[a] (kg)	**0,38**	0,50	0,75	1,03	0,75	1,77
ε pour m>6kg (%)	**2,4**	4,5	11,8	17,6	9,8	33,4
R²	**0,97**	0,96	0,96	0,95	0,93	0,86
φ_{Min}(deg)	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
précision[a] (kg)	**0,38**	0,51	0,51	0,49	0,54	0,63
ε pour m>6kg (%)	**2,4**	4,5	4,5	3,3	4,3	6,3
R²	**0,97**	0,96	0,96	0,96	0,95	0,94

Tableau 66. Variation des performances de E_{Pol} en fonction des angles limites minimaux φ_{Min} et maximaux φ_{Max} en élévation.

4.4.2.9. *Estimation du rendement par analyse des amplitudes d'échos radar*

La seconde estimation proposée dans cette section se base uniquement sur l'analyse des échos radars dans une seule combinaison de couplages (en l'occurrence VV). Cette estimation sera appliquée aux mesures effectuées avec les trois systèmes radars à 24GHz, 77GHz et 122GHz. On émet cette fois-ci l'hypothèse que la masse des grappes peut être estimée par une combinaison linéaire de paramètres issus de l'amplitude des échos radars, à savoir le niveau d'écho maximal e_{max}, le niveau d'écho moyen e_{mean}et l'écart-type des niveaux d'écho σ. On définit pour cela l'estimateur d'amplitude E_{Mag} donné par l'expression :

$$E_{Mag} = \frac{1}{s_{REF}} \sum_{k=1}^{n\mathcal{C}} s_k \cdot [a_{max} \cdot e_{max}(\mathcal{C}_k) + a_{mean} \cdot e_{mean}(\mathcal{C}_k) + a_\sigma \cdot \sigma(\mathcal{C}_k)] \qquad (24)$$

Les paramètres $e_{max}(\mathcal{C}_k)$, $e_{mean}(\mathcal{C}_k)$ et $\sigma(\mathcal{C}_k)$ représentent respectivement la valeur maximale, la moyenne et l'écart-type des niveaux d'écho à l'intérieur du k^{ème} contour $\mathcal{C}_k$ de surface s_k. Le paramètre $n\mathcal{C}$ représente le nombre total de contours générés et s_{REF} une surface de normalisation de référence (voir section 4.4.2.8). La même méthode est appliquée que celle de la section 4.4.2.6 pour retrouver la valeur des coefficients a_{max}, a_{mean}, and a_σ. Les valeurs de ces coefficients, ainsi que les caractéristiques de l'estimateur E_{Mag} sont disponibles à 24GHz, 77GHz et 122GHz dans le Tableau 67. La surface de référence utilisée est celle du pied de vigne ME n°2.

Les résultats de l'estimation du rendement avec le radar 24GHz sont affichés sur la Figure 128 (a). Avec un coefficient de détermination R^2=0,79 et une précision de 1,4kg, la linéarité et la précision de l'estimation est beaucoup moins bonne que l'estimation par analyse polarimétrique (section 4.4.2.6). D'après la Figure 128 (b), l'erreur commise sur l'estimation du rendement ne passe pas sous la barre des 10%. Ceci est explicable par le calcul de E_{Mag} (avec les mêmes valeurs des coefficients a) après récolte (en absence de grappes) dont l'estimation est affichée sur la Figure 128 (c). Les valeurs de E_{Mag} ont peu changé, signifiant une perturbation de l'estimation par la présence des clutters. Les échos générés par les grappes de raisin ne sont donc pas correctement discriminés. On observe des résultats similaires pour les autres combinaisons de couplages. La masse totale estimée (toutes variétés confondues) est de 56,7kg, alors que la masse réelle récoltée est de 48,1kg, ce qui correspond à une erreur commise par l'estimation du rendement ε=17,8%.

La même estimation est effectuée avec le radar à 77GHz. Le scan en azimut est effectué numériquement, ce qui permet d'obtenir des balayages environ 2,5 plus rapidement que pour un balayage mécanique. En revanche, la résolution en azimut est plus faible que pour une antenne directive (angle d'ouverture de 51°), ce qui engendre une dégradation de la qualité de l'image radar. L'estimation du rendement avec E_{Mag} est affichée sur la Figure 129 (a). Le coefficient de détermination R^2=0,86 et la décroissance de l'erreur commise sur le rendement ε sur la Figure 129 (b) indique une estimation correcte de la masse des grappes compte tenu des antennes peu directives en azimut utilisées. Une erreur moyenne de 12,3% est obtenue pour une estimation de la masse de grappes supérieures à 6kg. La masse estimée après récolte (en absence de grappes) est affichée sur la Figure 129 (c). Contrairement à l'interrogation radar à 24GHz, on observe une diminution de la masse des grappes estimée (les valeurs négatives de E_{Mag} obtenues sont mises à zéro). Cela signifie que l'estimateur E_{Mag} est partiellement construit à partir d'échos radar uniquement générés par des grappes de raisin. La masse totale estimée (toutes variétés confondues) est de 52,9kg, alors que la masse réelle récoltée est de 48,1kg, ce qui correspond à une erreur commise par l'estimation du rendement ε=9,9%.

Les derniers résultats mettent en évidence l'estimation de la masse des grappes de raisin effectuée par un balayage 3D du radar à 122GHz, dont la résolution en profondeur est beaucoup plus fine (2,2cm). Beaucoup plus de contours sont alors générés par pied de vigne. Cependant, le rapport signal sur bruit est beaucoup plus faible. La taille d'entrée δ du filtre de maxima (voir section 4.4.2.4) est fixée à 10 pixels. D'après les résultats affichés sur les Figure 130 (a) et (b), la linéarité et l'erreur de l'estimateur E_{Mag} sont très satisfaisantes, avec un coefficient de détermination R^2=0,97 et une erreur moyenne commise sur l'estimation de 2,3% pour des masses de grappes récoltées supérieures à 6kg. La masse estimée après récolte, représentée sur la Figure 130 (c) est négative, ce qui signifie qu'aucune grappe n'est détectée (la valeur de l'estimateur est mise à zéro pour des valeurs négatives). Cela signifie que l'estimateur E_{Mag} est construit sur à partir d'écho radar uniquement générés par les grappes de raisin, et non un paramètre corrélé (densité foliaire ou vigueur de la vigne). La masse totale estimée (toutes variétés confondues) est de 31,1kg, alors que la masse réelle récoltée est de 31,4kg, ce qui correspond à une erreur commise par l'estimation du rendement ε=0,9%.

	E_{Mag} – analyse d'amplitude			
	caractéristiques		**paramètres**	
24 GHz	m_{harv} totale (kg)	48,1	α (g/dB)	3,4E-4
	m_{est} totale (kg)	56,7	β (g/dB)	3,5E-2
	R^2	0,79	a_{max}	-0,55
	précision (kg) [a]	1,37	a_{mean}	0,52
	ε (m>6kg) [b]	20,1%	a_{std}	0,64
	caractéristiques		**paramètres**	
77 GHz	m_{harv} totale (kg)	48,1	α (g/dB)	8,2E-4
	m_{est} totale (kg)	52,9	β (g/dB)	5,2E-1
	R^2	0,86	a_{max}	-0,20
	précision (kg) [a]	1,05	a_{mean}	-0,02
	ε (m>6kg) [b]	12,3%	a_{std}	-0,97
	caractéristiques		**paramètres**	
122 GHz	m_{harv} totale (kg)	31,4	α (g/dB)	1,3E-4
	m_{est} totale (kg)	31,1	β (g/dB)	1,4E-2
	R^2	0,97	a_{max}	-0,38
	précision (kg) [a]	0,47	a_{mean}	0,39
	ε (m>6kg) [b]	2,3%	a_{std}	0,83

[a] précision du modèle linéaire
[b] erreur moyenne commise sur le rendement pour une masse récoltée supérieure à 6kg

Tableau 67. Paramètres et caractéristiques de l'estimateur E_{Mag} à 24GHz, 77GHz et 122GHz (S_{REF} est calculé pour le pied de vigne ME n°2)

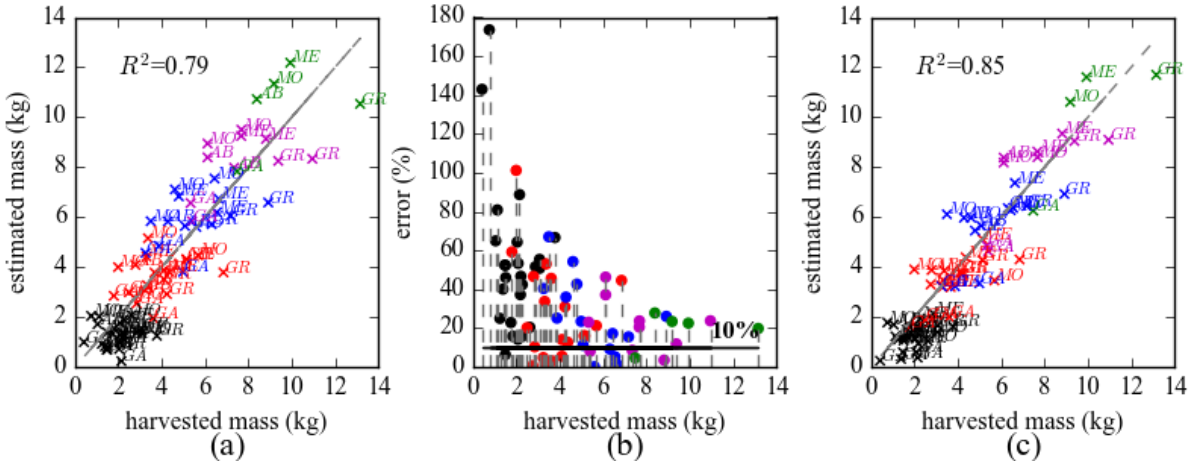


Figure 128. (a) Estimation du rendement avec l'estimateur E_{Mag} pour les variétés MO, GA, ME, GR et AB à 24GHz en couplage de polarisation VV. (b) Erreur commise sur l'estimation du rendement ε en fonction de la masse des grappes récoltées. (c) Estimation du rendement avec l'estimateur E_{Mag} en l'absence de grappes à 24GHz.

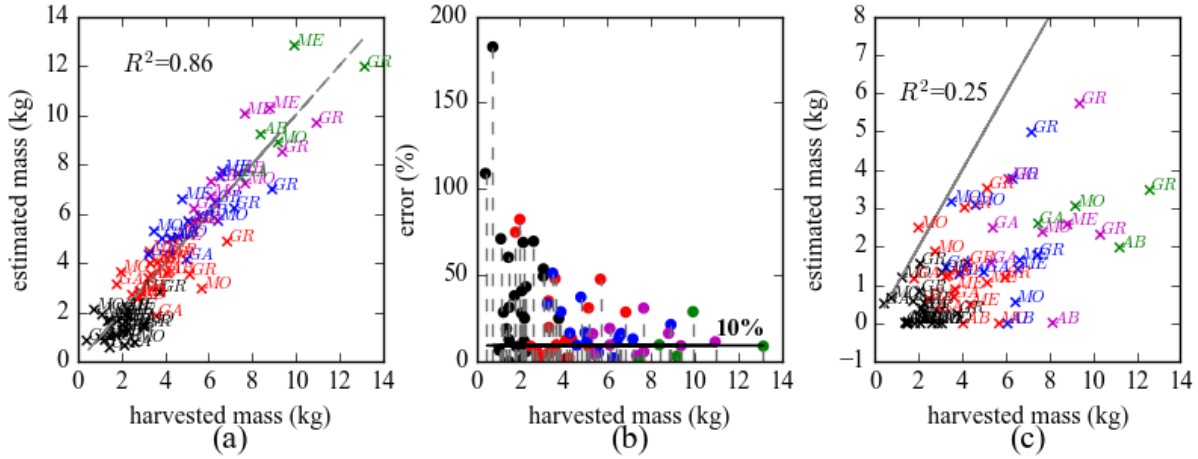


Figure 129. (a) Estimation du rendement avec l'estimateur E_{Mag} pour les variétés MO, GA, ME, GR et AB à 77GHz en couplage de polarisation VV. (b) Erreur commise sur l'estimation du rendement ε en fonction de la masse des grappes récoltées. (c) Estimation du rendement avec l'estimateur E_{Mag} en l'absence de grappes à 77GHz. Les valeurs négatives de E_{Mag} sont affichées à la valeur zéro.

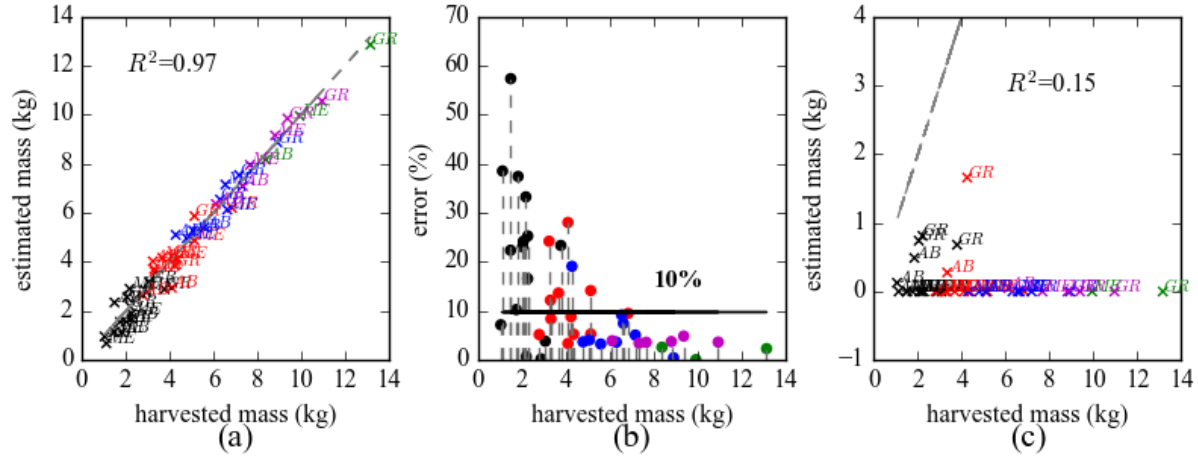


Figure 130. (a) Estimation du rendement avec l'estimateur E_{Mag} pour les variétés ME, GR et AB à 122GHz en couplage de polarisation VV. (b) Erreur commise sur l'estimation du rendement ε en fonction de la masse des grappes récoltées. (c) Estimation du rendement avec l'estimateur E_{Mag} en l'absence de grappes à 122GHz. Les valeurs négatives de E_{Mag} sont affichées à la valeur zéro.

4.4.2.10. *Flexibilité de l'estimation par analyse d'amplitude à 122GHz*

Dans cette section (comme dans la section 4.4.2.8), on étudie la flexibilité de l'estimateur E_{Mag} à 122GHz. Tout comme pour les sommes des surfaces des contours à 24GHz, lorsque l'on applique une variation du niveau d'écho initial Δv_{init}, on observe que cette somme varie linéairement, comme montré sur la Figure 131. Le coefficient de détermination est de R^2=0,999 et la sensibilité par pied de vigne est de α_{REF}= -352 pixel²/dB. On peut donc utiliser une surface de référence pour compenser les variations de Δv_{init}. Dans le Tableau 68 sont reportées les performances de E_{Mag} en fonction de Δv_{init}. On observe des performances correctes de l'estimateur pour Δv_{init}=±2dB. Au-delà de ces valeurs, l'erreur commise sur l'estimation de la masse des grappes augmente de manière significative.

L'analyse répertoriée dans le Tableau 69 révèle que l'estimateur E_{Mag} à 122GHz subit très peu l'influence des angles limites minimaux φ_{Min} et maximaux φ_{Max} en élévation. Ce résultat est prévisible car très peu de grappes de raisin se situent dans les zones d'élévations [0°,5°] et [25°,30°].

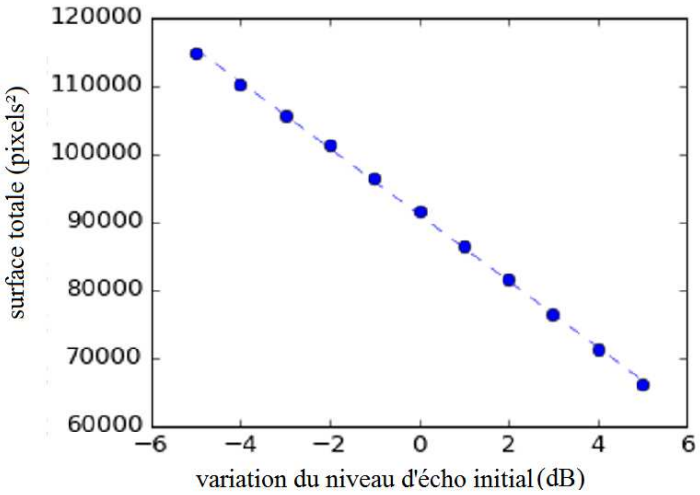


Figure 131. Variation de la surface totale des contours des 15 pieds de vignes à 122GHz en fonction de la variation du niveau d'écho initial Δv_{init}.

Δv_{init} (dB)	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5
précision[a] (kg)	0,98	0,80	0,68	0,61	0,51	**0,46**	0,50	0,54	0,56	0,61	0,63
ε pour m>6kg (%)	19,4	14,0	10,4	8,3	4,3	**2,2**	2,9	4,3	5,2	6,0	5,2
R²	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	**0,97**	0,97	0,96	0,96	0,95	0,95

Tableau 68. Variation des performances de E_{Mag} en fonction de Δv_{init} à 122GHz.

φ_{Max}(deg)	**30**	**29**	**28**	**27**	**26**	**25**
précision[a] (kg)	**0,46**	0,46	0,49	0,52	0,64	0,74
ε pour m>6kg (%)	**2,2**	2,2	2,3	2,9	5,4	6,9
R²	**0,97**	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96
φ_{Min}(deg)	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
précision[a] (kg)	**0,46**	0,48	0,60	0,68	0,78	0,91
ε pour m>6kg (%)	**2,2**	2,1	4,6	7,0	7,8	9,8
R²	**0,97**	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97

Tableau 69. Variation des performances de l'estimateur E_{Mag} en fonction des angles limites minimaux φ_{Min} et maximaux φ_{Max} en élévation.

4.4.2.11. *Effet de « regroupement » ou « dispersion » des échos radars*

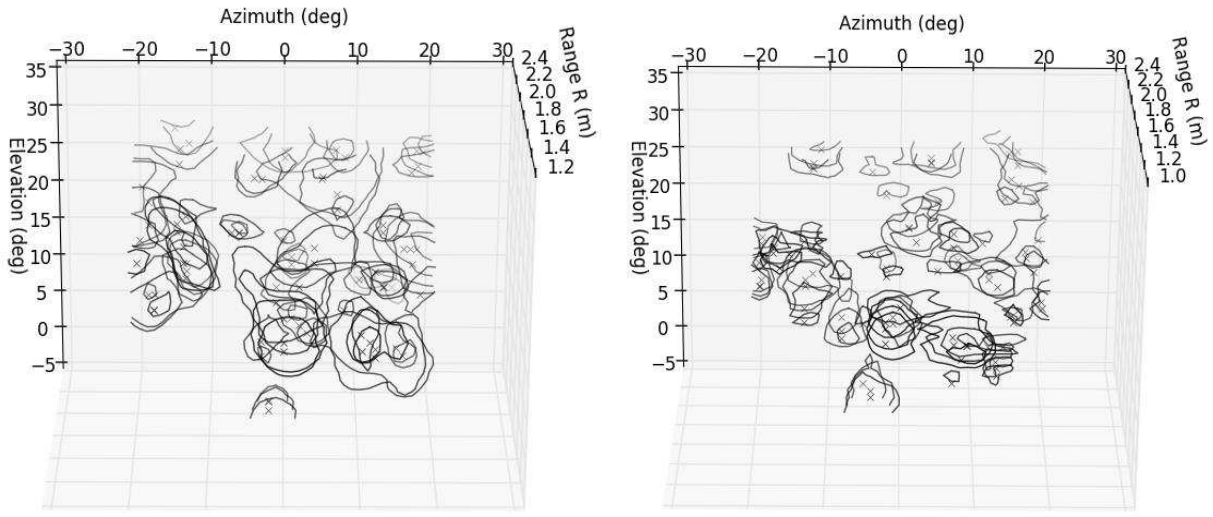
On a montré dans les sections précédentes que des différences notables étaient observées entre les valeurs des estimateurs avant et après récolte (avec et sans grappes) sans pour autant étudier les effets sur la rétrodiffusion. On se propose ici d'étudier le nombre de contours et leur surface pour chaque pied de vigne interrogé avant et après récolte. À titre d'exemple, les contours générés par l'algorithme sélectif à 24GHz en couplage de polarisation VV du pied GR n°3 sont affichés sur la Figure 132 (a) avant récolte et (b) après récolte. On remarque que lorsque les grappes sont présentes, les contours générés sont plus grands et moins nombreux, alors qu'en absence de grappes, les contours sont plus petits et dispersés. On peut décrire ces observations comme un phénomène de « regroupement » ou à l'inverse de « dispersion » des échos radars généré par une scène de rétrodiffusion plus ou moins homogène. Pour mettre en évidence ce phénomène sur l'ensemble des mesures qui ont été effectuées, on définit deux nouveaux paramètres :

- s_{Mean} la surface moyenne des contours (pixels²) calculée pour un pied de vigne avant récolte
- $\overline{s_{Mean}}$ la surface moyenne des contours (pixels²) calculée pour un pied de vigne après récolte

On caractérise donc le phénomène de « regroupement » ou « dispersion » des échos radar générés par les grappes de raisin par l'expression :

$$\Delta s = s_{Mean} - \overline{s_{Mean}} \tag{25}$$

Lorsque $\Delta s > 0$, on observe à un phénomène de regroupement des échos radars due à la présence des grappes. Et inversement, lorsque $\Delta s < 0$, un phénomène de dispersion des échos radars est généré par la présence des grappes. L'indicateur Δs est affiché pour les fréquences de 24GHz, 77GHz et 122GHz sur la Figure 133 pour chaque pied de vigne mesuré. On remarque la majorité des valeurs sont positives, ce qui signifie que les grappes de raisin participent bien à ce phénomène de regroupement des échos radars. Les quelques valeurs négatives, notamment à 77GHz, sont probablement dues à une résolution dégradée des images radars causée par des angles d'ouverture d'antennes plus large. On note d'autre part que la totalité des pieds de vignes mesurés à 122GHz génère un effet de regroupement des échos radar. En revanche, la valeur de Δs n'est absolument pas corrélée avec le rendement des vignes.



(a) (b)

Figure 132. Contours générés en couplage de polarisation VV à 24GHz après balayage 3D du pied de vigne GR n°3 (a) avant la récolte et (b) après la récolte.

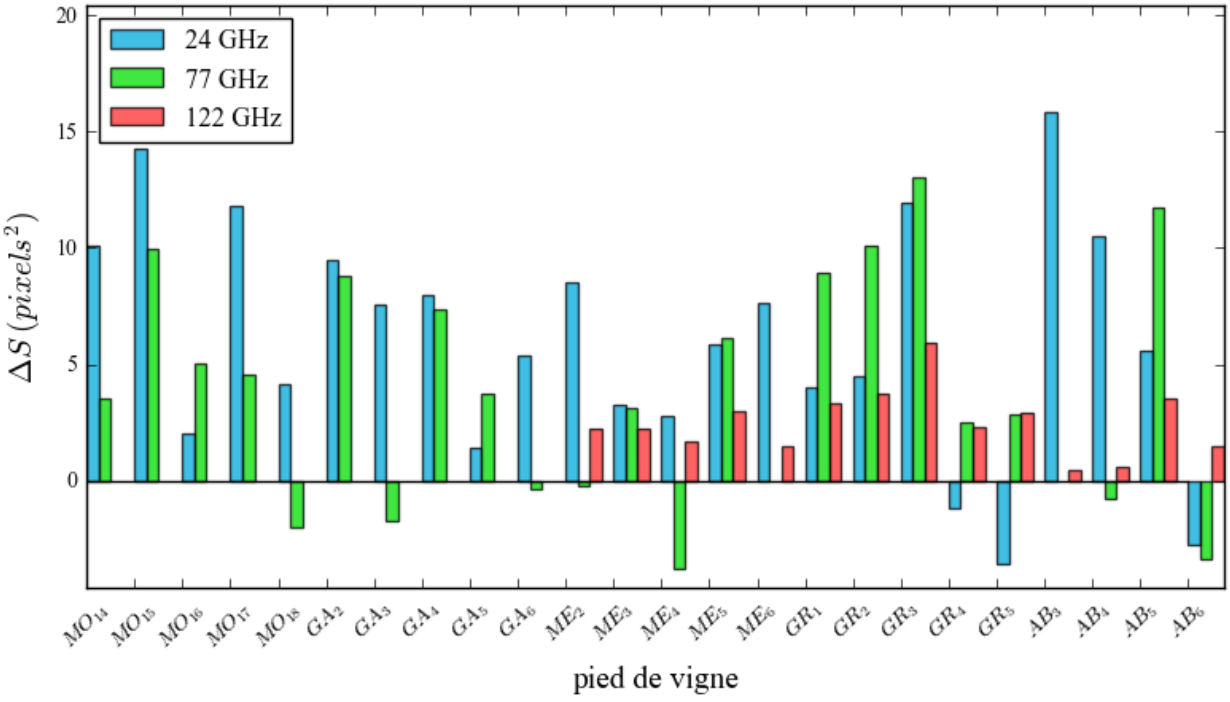


Figure 133. Mise en évidence du phénomène de regroupement des échos radars généré par les grappes à 24GHz, 77GHz et 122GHz.

4.4.2.12. *Représentation des contours en 3D*

Il est possible de visualiser la structure et le développement des pieds de vignes en effectuant des combinaisons géométriques de contours en différents couplages de polarisation mesurés à 24GHz. Sur la Figure 134 sont affichés les contours des cinq pieds de vigne de la variété Grenache à différents stades de développement. Deux combinaisons de contours sont proposées :

- $\mathcal{C}^{VV} \cup \mathcal{C}^{HH}$ l'union des surfaces de contours en couplages de polarisation VV et HH, représentée en couleur **noire**.
- $\{\mathcal{C}^{VH} \cap \mathcal{C}^{HV}\} D \{\mathcal{C}^{VV} \cup \mathcal{C}^{HH}\}$ la différence entre les surfaces communes des couplages de polarisation VH et HV, et l'union des surfaces de contours en couplages VV et HH, représentée en couleur **verte**.

Ces combinaisons de contours sont facilement effectuées avec *shapely* [192]. Cette bibliothèque permet de transformer les contours en une classe d'objet géométrique appelée *Polygon* et facilite l'utilisation des relations logiques entre les contours d'échos radar de plusieurs couplages de polarisations, comme par exemple les unions $\cup$, intersections $\cap$ et les différences D. Les contours de couleur noire sont plutôt des indicateurs de la structure des pieds de vigne (bois, sarments, fils métalliques et grappes de raisin qui rétrodiffusent sans forcément générer beaucoup de dépolarisation), alors que les contours verts représentent des rétrodiffusions issues de la dépolarisation des ondes et sont générés par les feuilles et partiellement par les grappes, d'où l'augmentation importante des contours verts avec le stade de développement de la vigne. On peut quantifier cette augmentation en calculant les sommes des surfaces des contours $S(\mathcal{C}^{VV} \cup \mathcal{C}^{HH})$ et $S(\{\mathcal{C}^{VH} \cap \mathcal{C}^{HV}\} D \{\mathcal{C}^{VV} \cup \mathcal{C}^{HH}\})$ disponibles dans le Tableau 70. On note alors une augmentation de 158% des contours noirs et de 326 % des contours verts entre l'éclatement des bourgeons (04/05/2017) et la nouaison à mi-période (06/07/2017). En revanche, on note une diminution de l'ensemble des surfaces des contours (d'environ 33%) quelle que soit la polarisation en fin de nouaison (lorsque la grappe commence à se refermer). Cet effet est peut-être dû à un masquage provoqué par les

grappes lors de leur croissance, et une atténuation du signal générée par les grappes elles-mêmes. Cette atténuation à 24GHz est caractérisée par l'angle de perte de l'eau $\tan(\delta_e) = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{30}{20} = 1{,}5$. Les surfaces des contours augmentent de nouveau à partir de la véraison, où la rétrodiffusion des grappes prend le dessus sur l'atténuation.

De la même manière, on peut représenter les contours générés à 122GHz pour le couplage VV en trois dimensions et visualiser leur contribution sur le rendement total estimé. Sur la Figure 135 sont affichés ces contours pour cinq pieds de vignes de la variété Grenache à maturation avant la récolte (en présence de grappes) et après la récolte (sans les grappes). Pour chaque contour l'estimateur E_{Mag} est calculé (voir section 4.4.2.9) et la masse estimée représentée par la couleur violette ente 0g et 50g. Les masses estimées négatives sont représentées par la couleur verte. On remarque alors une différence significative du nombre de contours représentant des grappes avant et après la récolte. Quelques contours indiquent néanmoins des masses de grappes positives après récolte (il devrait en théorie n'y en avoir aucun), mais ces erreurs sont finalement compensées lorsque l'on estime le rendement sur la surface totale des cinq pieds de vignes.

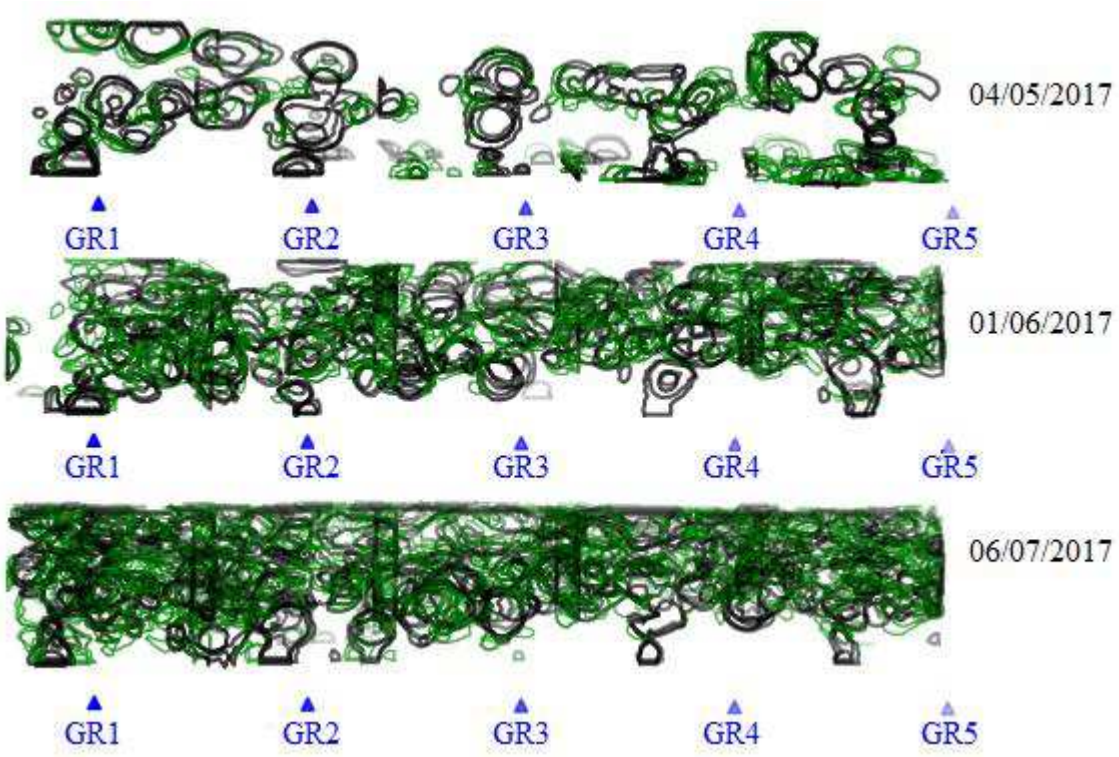


Figure 134. Contours générés à 24GHz pour cinq pieds de vignes de la variété Grenache à trois stades de développement. La couleur noire représente l'union des contours VV et HH. La couleur verte représente la différence entre l'intersection des contours VH et HV et l'union des contours VV et HH.

stade de développement	$S(C^{VV} \cup C^{HH})$	$S(\{C^{VH} \cap C^{HV}\} D \{C^{VV} \cup C^{HH}\})$
fin de débourrement; 04/05/17	5765 pixels²	1836 pixels²
floraison; 01/06/17	9836 pixels²	5654 pixels²
nouaison à mi-période; 06/07/17	14902 pixels²	7835 pixels²
fin de la nouaison; 03/08/17	11342 pixels²	5583 pixels²
véraison; 23/08/17	12814 pixels²	7176 pixels²
maturation; 13/09/17	14007 pixels²	8229 pixels²

Tableau 70. Surfaces des combinaisons de contours $C^{VV} \cup C^{HH}$ et $\{C^{VH} \cap C^{HV}\} D \{C^{VV} \cup C^{HH}\}$ à différents stades de développement. On observe une diminution des surfaces en fin de nouaison.

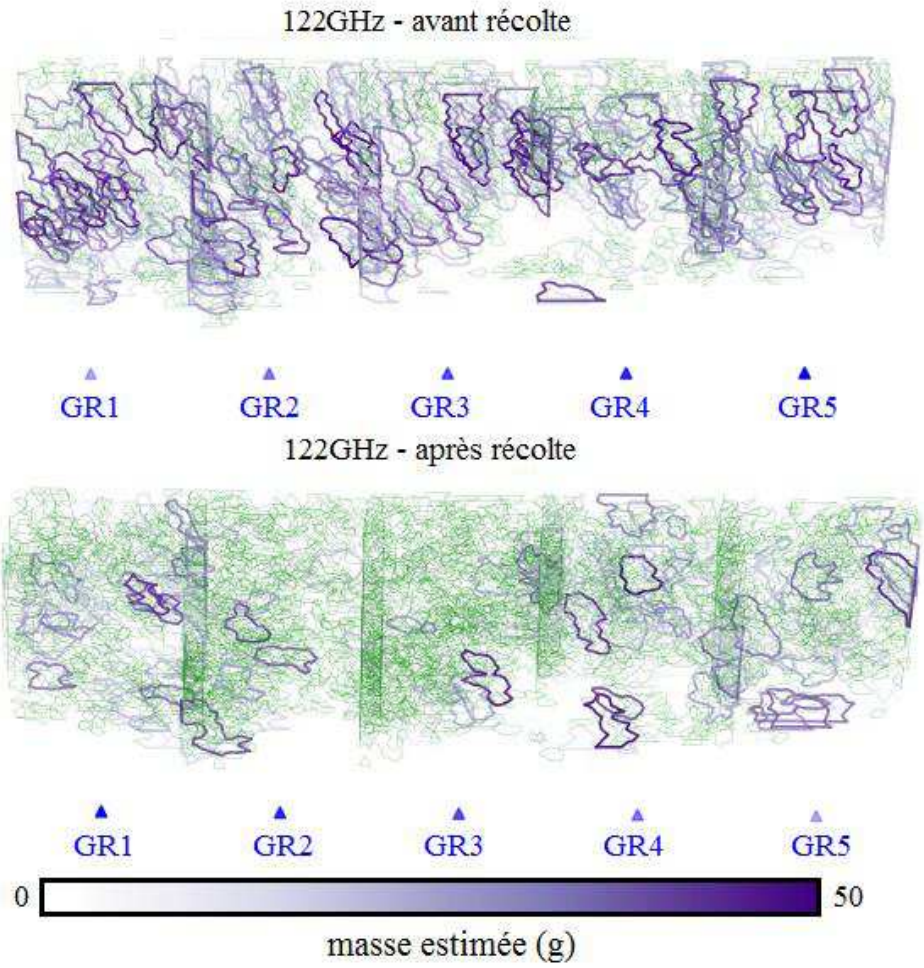
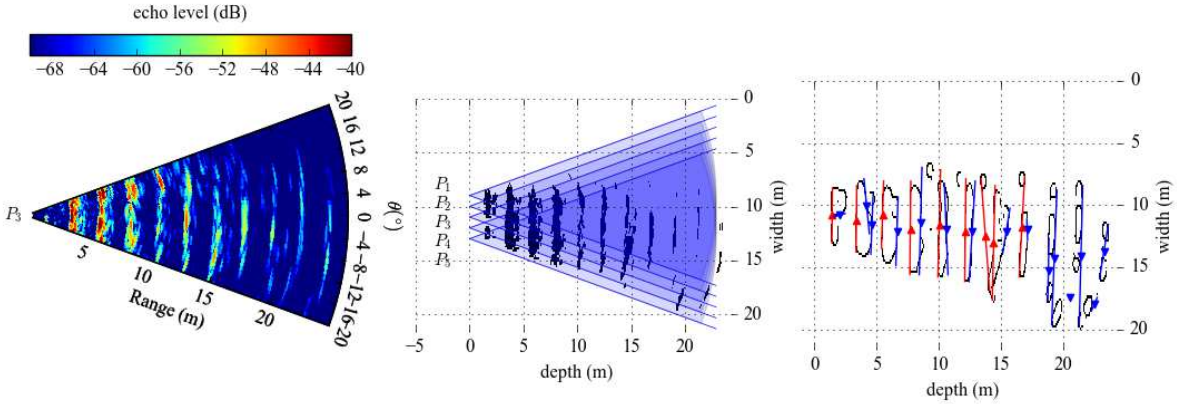


Figure 135. Contours générés à 122GHz pour cinq pieds de vignes de la variété Grenache avant la récolte (présence de grappes) et après la récolte (sans les grappes). Les contours violets indiquent une masse plus ou moins importante de grappes (estimée avec E_{Mag}). Les contours verts indiquent une absence de grappes (valeurs négatives de l'estimation).

4.4.2.13. *Orientation des rangées de vignes*

Dans cette section on propose une méthode simple de détection et d'orientation des rangées de vignes à partir du balayage 3D effectué avec le radar 24GHz. Pour cela, on utilise comme exemple la représentation en deux dimensions des échos radar dans le plan (R,θ) pour une élévation φ=7° mesuré à l'emplacement du pied de vigne GR n°3, représenté par la position P3 sur la Figure 136 (a). Comme remarqué dans la section 4.4.1.2, les rangées de vignes sont facilement détectables, du moins jusqu'à une certaine distance (environ 20m dans cet exemple). Afin de mettre en évidence les échos radars générés par les vignes, on procède à un seuillage (par exemple -60dB), et seuls les niveaux d'écho radar supérieurs à ce seuil sont conservés. On procède de la même manière à différentes positions P1, P2… P5 par déplacement latéral dans la parcelle. Ici, un déplacement latéral de 1m est effectué pour se retrouver pour chaque balayage devant les pieds de vignes GR n°1, GR n°2, … GR n°5. Un changement des coordonnées azimut/élévation vers les coordonnées cartésiennes est effectué, et les niveaux d'échos radars conservés par seuillage sont superposés, comme illustré sur la Figure 136 (b). Une détection de contours est ensuite appliquée en utilisant un filtre de Canny [193]. La réduction de bruit par filtrage gaussien est effectuée avec un écart-type σ_G=3. Afin de déterminer l'orientation des grappes, une transformation de Hough [194] est appliquée sur ces contours sur une fenêtre glissante en profondeur de 1m. Cette transformation permet

de détecter les droites présentes sur une image, et de déterminer leur orientation. Les contours et l'orientation des rangées de vignes sont visibles sur la Figure 136 (c). Les lignes sur l'image représentent les droites passant les plus fréquemment par les pixels qui forment les contours. Une ligne rouge correspond au début de la rangée, et une ligne bleue à la fin de la rangée (relativement à la position du radar). Les fins et débuts des rangées sont déterminés en calculant la valeur moyenne du niveau d'écho de part et d'autre de la droite sur une fenêtre de 0,5m. Si le niveau d'écho moyen est plus élevé dans la zone la plus proche du radar que dans la zone plus lointaine, alors il s'agit de la fin de la rangée de vigne, et inversement.



(a) (b) (c)

Figure 136. (a) Image radar 2D dans un plan de coupe (R,θ) en élévation φ=7° obtenue à 24GHz en couplage de couplage VV devant le pied de vigne GR n°3 représenté par le point P3 (b) Les niveaux d'échos supérieurs à -60dB (pixels noirs) sont superposés après cinq balayages aux positions P1,P2,P3,P4 et P5. (c) Les orientations des rangées de vignes calculées par une transformée de Hough sont représentées par les lignes rouges (début de rangée) et les lignes bleus (fin de rangée). Les lignes noires représentent les contours de l'image radar après seuillage détectés par un filtre de Canny.

4.5. Autre application : le comptage de pommes sur les pommiers

4.5.1. Contexte : Projet régional PRESTIGE

L'objectif est de comptabiliser le nombre de pommes présentes sur des pommiers en fusionnant des données issues des imageries radar en ondes millimétriques et celles issues de capteurs optiques, dans le cadre du projet régional PRESTIGE. Les travaux effectués par le LAAS-CNRS (groupe MINC et groupe RAP) ont été menés en laboratoire et dans des pommeraies gérées par QUALISOL, à des dates prédéfinies entre mars et août 2018. Le groupe MINC s'est focalisé sur les données issues de radar en ondes millimétriques tandis que le groupe RAP a étudié les données issues de capteurs optiques. L'avantage de la détection par optique est la distinction précise de cibles ainsi que la rapidité des mesures En revanche, l'interrogation par radar micro-onde permet une détection de cibles cachées par d'autres obstacles. Les données issues des deux différents capteurs sont conjointement utilisées pour effectuer une fusion des données radar / optique et de tirer profits de leurs différents avantages.

4.5.2. Système utilisé

On utilise pour ces mesures le radar FM-CW à 24GHz monté sur un trépied dont les caractéristiques sont disponibles dans le Tableau 71. La fréquence porteuse de 23,8 GHz permet une distinction de cible dont la taille minimale détectable correspond à la longueur d'onde de cette fréquence (entre 1 et 2cm). La bande de modulation de 2GHz permet une distinction de deux cibles séparées d'une distance 7,5 cm dans une même direction d'interrogation. Le système radar représenté sur la Figure 137 est monté sur une plateforme afin de procéder un balayage mécanique et obtenir une image en trois dimensions en obtenant les informations d'écho en azimut et en élévation. En réception, des antennes cornets classiques sont utilisées.

projet PRESTIGE – comptage des pommes	
système radar	DK-sR-1030e
fréquence porteuse	23,8 GHz
bande de modulation	2 GHz
résolution en profondeur	7,5 cm
puissance en entrée	20 dBm
(Tx) antenne	antenne cornet avec lentille [a]
(Rx1/Rx2) antennes	antennes cornets [a]

[a] caractéristiques disponibles en annexe

Tableau 71. Paramètres des mesures effectuées pour le comptage des pommes

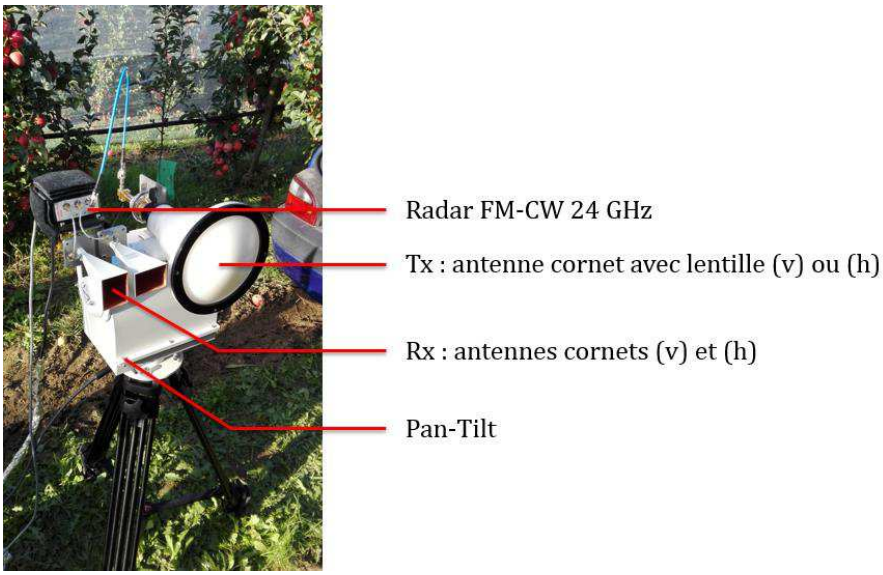


Figure 137. Système de mesure radar utilisé pour le comptage des pommes

4.5.3. Protocole de mesure

Un protocole de mesure basé sur le balayage mécanique du système radar est proposé en trois étapes afin d'établir un comptage des pommes sur un pommier dans une zone bien définie.

- Etape n°1 : Le système radar doit être placé en face d'un pommier à une distance R au minimum de la moitié de la largeur de la rangée et à une hauteur H par rapport au sol.
- Etape n°2 : On effectue un balayage radar avec des limites angulaires en élévation et en azimut de sorte que la zone d'étude soit entièrement illuminée par l'antenne radar en transmission. Exemple : On veut illuminer une zone contenant un pommier d'une hauteur D=1,8m depuis le sol et d'une largeur L=1,0m (voir sur la Figure 138). Le radar se trouve à une distance R=2,6m avec une hauteur H=1,1m par rapport au sol. Les angles limites d'interrogation en élévation φ_{Lim} et azimut θ_{Lim} sont :

$$\varphi_{Lim} = \tan^{-1}\frac{D}{2R} = \pm 20° \text{ et } \theta_{Lim} = \tan^{-1}\frac{L}{2R} = \pm 12°$$

- Etape n°3 : Une fois le balayage terminé on déplace latéralement le système radar pour effectuer une mesure sur un nouveau pommier (voir la Figure 139).

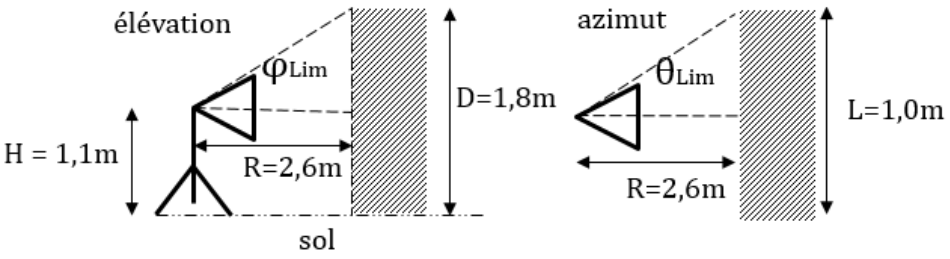


Figure 138. Exemple d'angles limites en élévation et en azimut à définir pour une zone d'interrogation d'une hauteur de 1,8m et d'une largeur de 1,0m.

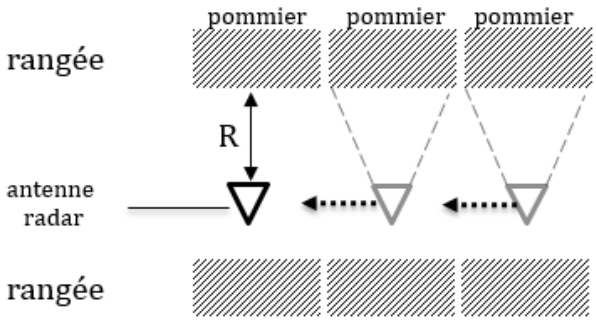


Figure 139. Déplacement latéral du système radar.

4.5.4. Mesures effectuées sur le terrain

Les mesures radars et optiques ont été programmées à différentes dates dans des pommeraies gérées par la coopérative QUALISOL près de Montauban. Trois pommiers photographiés sur Figure 140 ont été analysés à quatre périodes différentes de l'année 2017 (27 mars, 27 avril, 5 juillet et 18 août). Les deux premiers stades (27 mars et 27 avril) correspondent à l'apparition et au développement des bourgeons. Pouvoir estimer la quantité de bourgeons à distance permet de maîtriser la quantité nécessaire de produits à utiliser pour l'éclaircissage (généralement un l'éclaircissage chimique de fruits trop nombreux pour un bon développement de pommes de plus grandes tailles). L'interrogation des pommiers aux deux derniers stades (5 juillet et 18 août) permet d'analyser l'efficacité de la détection des pommes pour des tailles intermédiaires et finales. Les bourgeons et les pommes ont ensuite été comptés manuellement par QUALISOL sur une hauteur allant de 0m à 2m pour les trois pommiers. Les comptages sont répertoriés dans le Tableau 72.

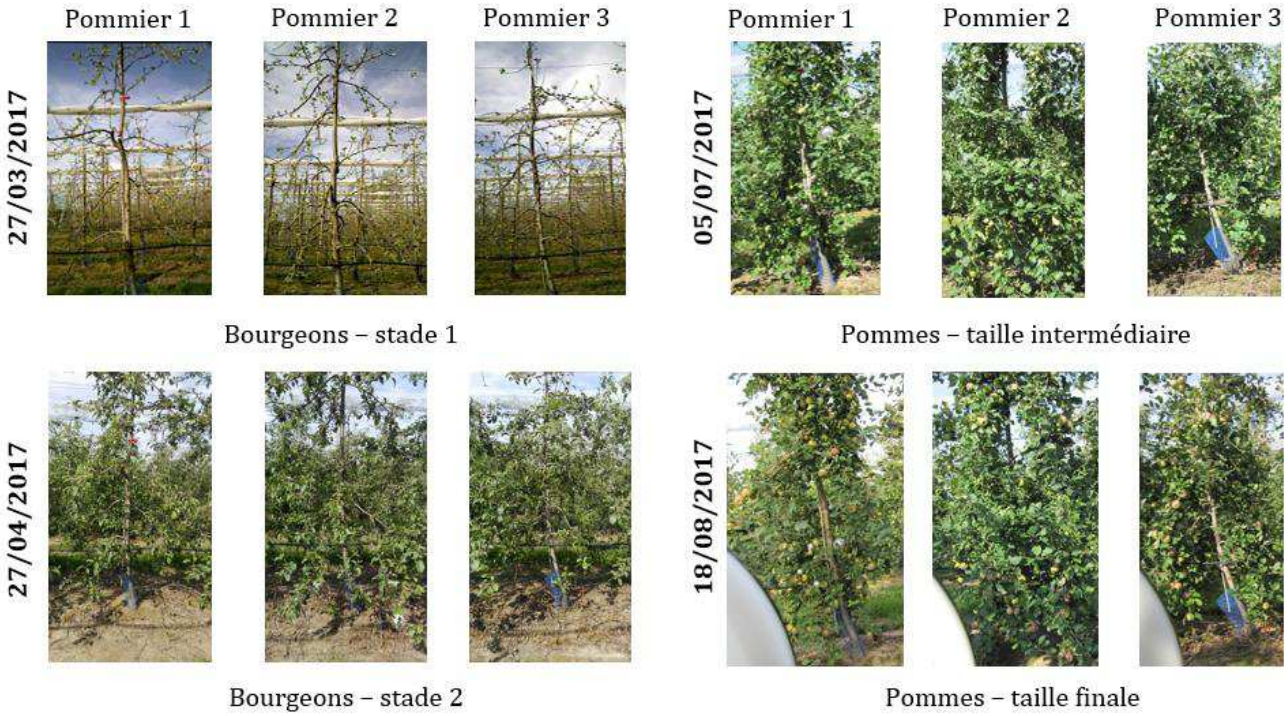


Figure 140. Stade de développement des trois pommiers mesurés au cours de l'année 2017

Arbre	Nombre de bourgeons	Nombre de pommes
pommier 1	217	174
pommier 2	246	206
pommier 3	173	154

Tableau 72. Comptage des bourgeons et de pommes sur trois pommiers, dans une zone comprise entre 0m et 2m de hauteur

4.5.5. Calibration entre la caméra et le radar

Pour fusionner les données radar et optique, une calibration entre le système radar et la caméra est effectuée en laboratoire à l'aide de sphères métalliques de différents diamètres, dont les positions sont facilement reconnaissables à la fois par les systèmes optiques et microondes. Les 7 sphères et leurs échos radars respectifs sont représentés sur la Figure 141. Les positions de ces mêmes sphères sont répertoriées dans le Tableau 73 ci-dessous pour différents repères (image optique, image radar en coordonnées cartésiennes et image radar en coordonnées azimut/élévation).

Le but est de construire une matrice de calibration optique vers radar afin de corréler les positions des pommes détectées avec la caméra avec les positions des échos mesurés par le radar FM-CW. Pour ce faire, on définit les vecteurs élévation $\vec{\varphi} = [\varphi_1 \quad \cdots \quad \varphi_N]$ et azimute $\vec{\theta} = [\theta_1 \quad \cdots \quad \theta_N]$ ainsi que les vecteurs abscisses et ordonnées $\overrightarrow{X_0} = [x_1 \quad \cdots \quad x_N]$ et $\overrightarrow{Y_0} = [y_1 \quad \cdots \quad y_N]$. Ces vecteurs représentent les positions de N sphères de référence en coordonnées radar sphérique (2D) et en vision. La matrice de calibration **M** optique vers radar (sphérique) est la solution de l'équation :

$$[\overrightarrow{X_0} \quad \overrightarrow{Y_0} \quad \vec{C}] \times \boldsymbol{M} = [\vec{\theta} \quad \vec{\varphi} \quad \vec{C}] \tag{26}$$

$\vec{C} = [1 \quad \cdots \quad 1]$ est un vecteur unitaire et $\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix}$. La position d'une cible (x_p, y_p) enregistrée en vision aura donc un écho radar sphérique (θ_p, φ_p) :

$$\begin{cases} \theta_p = ax_0 + by_0 + c \\ \varphi_p = dx_0 + ey_0 + f \end{cases}$$

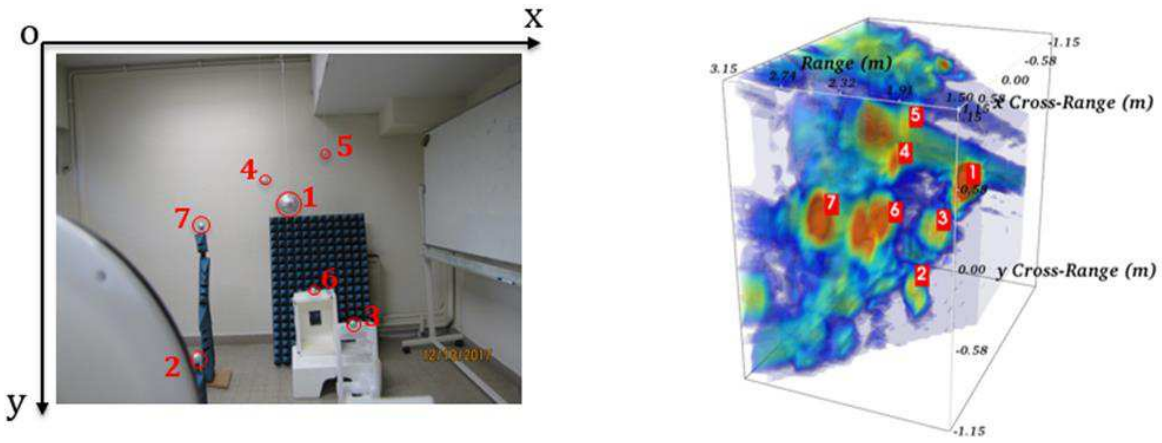
Le même raisonnement s'applique pour le passage en coordonnées visions vers les coordonnées cartésiennes du radar.

Afin de tester l'influence de la position de la caméra par rapport à la position du radar, 6 positions différentes de caméra sont testées et 9 positions (P_1, …, P_9) sur l'image sont analysées. Ces positions génèrent des vecteurs (V_1, …, V_9) en coordonnées radars azimut/élévation et cartésiennes et sont affichées sur la Figure 142. Les écarts maximaux de position de ces vecteurs sont représentés dans le Tableau 74. Des erreurs de positions de l'ordre ±1,5° (en coordonnées sphérique) ou ±6cm (en coordonnées cartésiennes) apparaissent pour des translations des points de références de ±3% en ordonnées et ±1,6% en abscisse.

À partir de l'erreur de position angulaire de ±1,5°, la distance tangentielle correspondante est calculée en fonction de la distance R d'interrogation et affichée sur la Figure 143. On remarque alors que l'erreur de ±6cm (12cm) obtenue en coordonnées radar cartésiennes est atteinte pour une distance d'interrogation de 2,3m. Au-delà de cette distance, il est donc préférable d'utiliser les coordonnées cartésiennes pour effectuer la fusion de données vision/radar. En deçà de cette distance d'interrogation, les erreurs de positionnement seront plus faibles en utilisant les coordonnées azimut/élévation du radar.

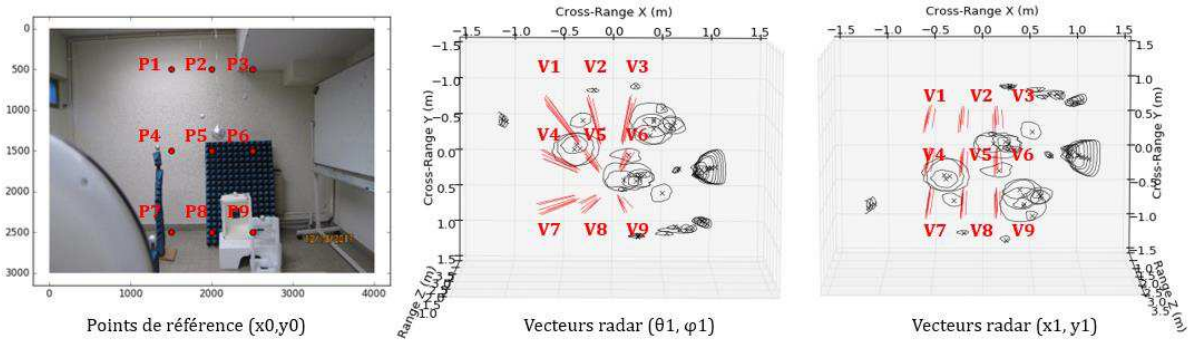
sphère	x_0 | y_0 (pixels)		x_1 | y_1 | z_1 (m)			ϕ_1 (°) |	θ_1 (°) | R_1 (m)	
# 1	1990	1828	0,19	0,13	1,875	3,9	5,7	1,8
# 2	1199	2603	-0,31	-0,56	2,100	-14,3	-8,0	2,1
# 3	2554	2310	0,56	-0,48	2,250	-11,4	13,3	2,3
# 4	1788	1076	0,07	0,27	2,400	6,3	1,6	2,4
# 5	2318	834	0,47	0,44	2,475	9,7	10,4	2,5
# 6	2212	2023	0,39	-0,40	2,625	-8,4	8,2	2,6
# 7	1244	1469	-0,34	-0,08	2,850	-1,5	-6,7	2,8

Tableau 73. Positions des différentes sphères métalliques pour différentes coordonnées : vision (x_0, y_0), radar cartésiennes (x_1, y_1, z_1) et radar azimut/élévation (ϕ_1, θ_1, R_1).



(a) (b)

Figure 141. (a) 7 sphères métalliques sont disposées à différentes coordonnées. (b) L'écho et la position des sphères sont facilement reconnaissables sur l'image radar en trois dimensions. Echelle : -60dB (bleu) à -40dB (rouge)



(a) (b) (c)

Figure 142. (a) Les positions de 9 points de références sont testées pour 6 différentes positions de caméra. Les vecteurs radars affichés en rouge sont générés en coordonnées (b) azimut/élévation et (c) cartésiennes.

Vecteurs	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	# 6	# 7	# 8	# 9
Δθ1|Δϕ1	1,6|2,4	2,1|2,6	1,1|2,4	1,7|2,2	2,2|2,4	1,2|2,2	1,5|2,5	2,0|2,8	1,0|2,5
Δx1|Δy1	7,2|10,6	9,2|11,0	5,2|10,2	7,6|9,9	9,6|10,3	5,6|9,5	6,7|11,3	8,7|11,7	4,7|10,9

Tableau 74. Ecarts maximaux de positions des différents vecteurs en degrés (Δθ1|Δϕ1) et centimètres (Δx1|Δy1)

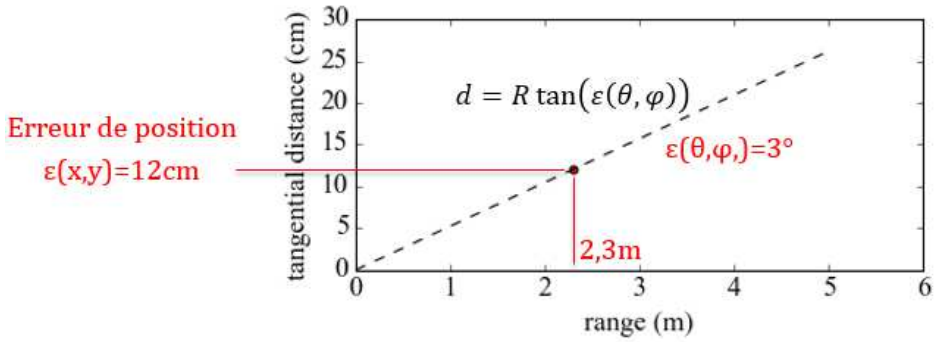


Figure 143. Distance tangentielle calculée pour une erreur angulaire de ±1,5°. L'erreur commise en coordonnées radar cartésiennes est équivalente à celle commise en coordonnées radar azimut/élévation pour une distance d'interrogation estimée à 2,3m.

4.5.6. Génération des contours radar en trois dimensions

Afin d'estimer correctement le nombre de pommes présentes dans une zone de pommier donnée, il est nécessaire de définir un niveau d'écho radar à partir duquel les données en trois dimensions doivent être générée par l'intermédiaire de contours. Cette problématique, illustrée sur Figure 144, est représentée par des contours générés pour différents niveaux d'écho enregistrés dans une pommeraie. Lorsque le niveau d'écho est trop faible, les contours générés sont trop grands en ne discriminent pas suffisamment les différentes cibles (autrement dit, plusieurs cibles sont inclues à l'intérieur d'un même contour). Inversement, lorsque le niveau d'écho est trop élevé, certaines cibles se retrouvent à l'extérieur des contours. Le critère pour choisir le niveau d'écho initial optimal se base sur le nombre de maxima locaux d'amplitude d'écho générés à l'intérieur de chaque contour. Un algorithme itératif est alors appliqué à partir de ce niveau d'écho initial pour générer l'ensemble des contours de manières optimal en discriminant le plus grand nombre de cibles potentielles. Les contours sont alors générés en faisant varier un niveau d'écho adaptatif représenté sur la Figure 145. On remarque que cette adaptation permet à la fois de discriminer des cibles à des niveaux d'écho aussi bien faibles qu'élevés.

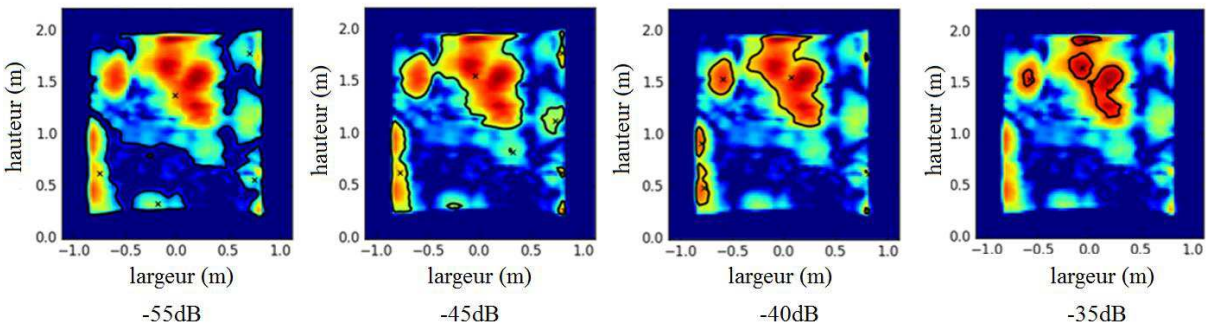


Figure 144. Contours générés dans un plan de coupe z=2,325m pour différents niveaux d'écho initial. Echelle : -60dB (bleu) à -30dB (rouge)

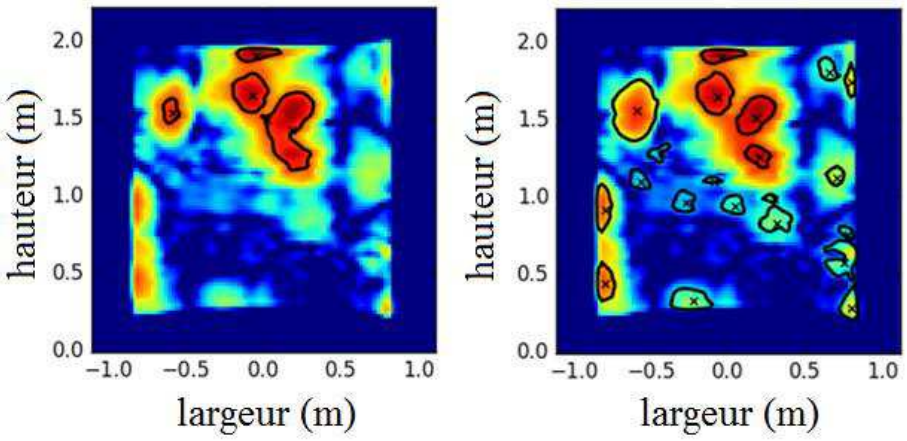


Figure 145. Contours générés dans un plan de coupe z=2,325m pour (a) un niveau d'écho initial de -35dB et (b) après optimisation du niveau d'écho initial et l'application d'un niveau adaptatif.
Echelle : -60dB (bleu) à -30dB (rouge)

4.5.7. Détection de groupements de pommes et fusion des données optique/radar

La fusion des données optique/radar peut être utilisée pour assurer la détection de groupement pommes à la place d'autres cibles (par exemple le tronc, les branches ou les feuilles). Les algorithmes de détection développés par le groupe RAP (Dore *et al* [195]) permettent sans difficulté de détecter individuellement une pomme sous sa taille finale ainsi que la présence de pommes ou non dans son entourage. Un exemple de détection de groupement de pommes est illustré pour le pommier #1 le 18 août 2017 et affiché sur la Figure 146. Trois groupes de pommes sont pris en considération (points bleus, rouge et vert) et la construction de la matrice de calibration permet de créer les vecteurs en coordonnées radar cartésiennes. En parallèle, on procède à un balayage mécanique à 2,6m du pommier #1 avec des angles de ±20° en azimut et ±20° en élévation. Les premières intersections (c'est-à-dire les plus proches du radar) entre les vecteurs et les contours générés définissent les échos représentant les groupements de pommes. Ces intersections sont représentées par des points sur la Figure 147. Plusieurs cas sont alors possibles :

- Le contour considéré représente uniquement l'écho radar du groupe de pommes : cas idéal.
- Le contour considéré représente l'écho radar du groupe de pomme ainsi que celui d'autres cibles (feuilles, tronc ou branches) : cas le plus courant.
- Le contour considéré n'est pas celui représentant le groupe de pommes : erreur commise. Les erreurs sont généralement dues à des problèmes de calibration.

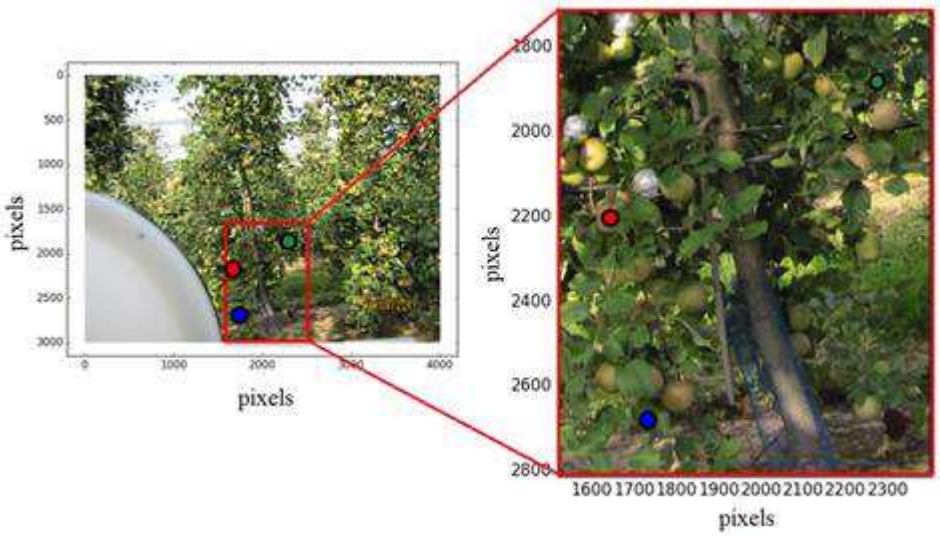


Figure 146. Exemple de trois pommes détectées par vision (positions en rouge, vert et bleu) entourées d'un nombre important de pommes.

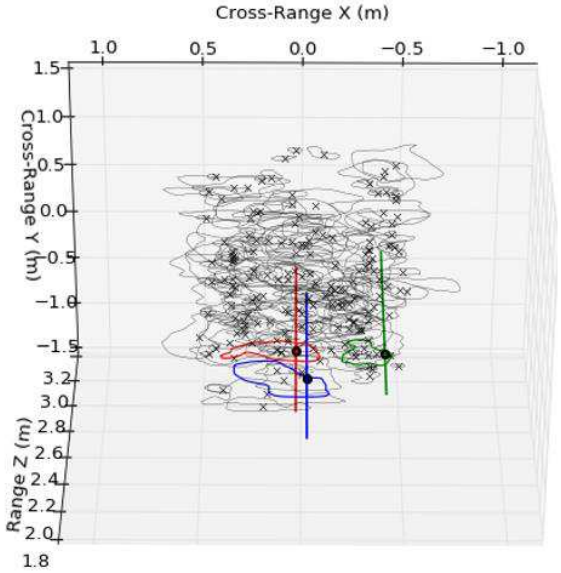
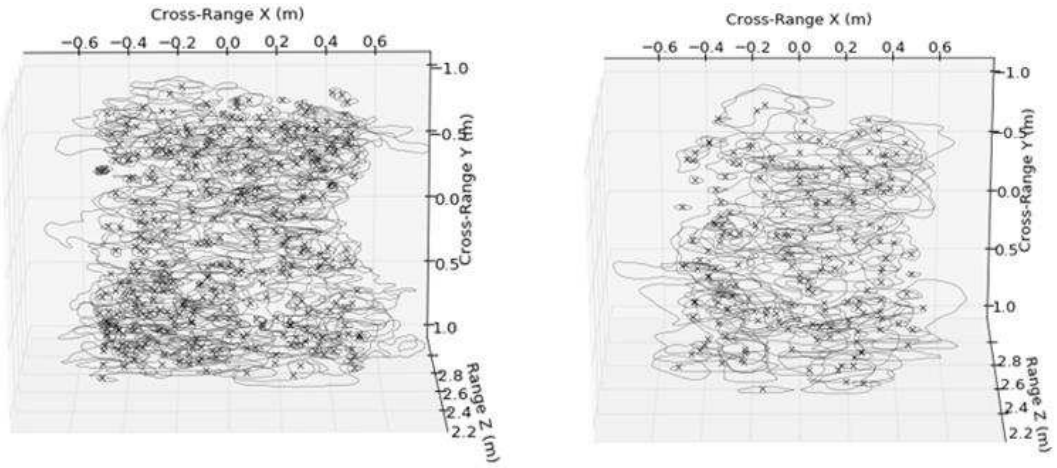


Figure 147. Les positions des groupements de pommes détectées par vision sont retranscrites en coordonnées cartésiennes du radar (vecteurs en rouge, vert et bleu). En noir sont affichés les contours générés par le balayage radar. Les contours de même couleur intersectionnent ces vecteurs (points en rouge, vert et bleu) à la plus courte distance d'interrogation.

4.5.8. Présence de pommes et effet de *regroupement* des échos radar

L'effet de « regroupement » des échos radar est un phénomène observé lors des différentes mesures effectuées sur le terrain. On observe que sur les trois pommiers étudiés de mars à août, la surface moyenne par contour varie de manière significative. De mars à juillet, la croissance des feuilles génère de multiples échos ayant de petites surfaces. De juillet à août lors de la croissance des pommes, les échos se « regroupent » pour former des contours de plus grande surface comme illustré sur Figure 148. La surface moyenne par contour est donc un indicateur de la présence de feuilles ou de pommes. Cet effet est mis en évidence pour les trois pommiers dans le Tableau 75.



(a) (b)

Figure 148. Echos générés par le balayage radar 3D du pommier 1 (a) le 05/07/17 avec pommes de tailles intermédiaires et (b) le 18/08/2017 avec pommes de plus grande taille. L'effet de regroupement des échos est visible entre les deux périodes.

Pommier #1	**27/03/17**	**27/04/17**	**05/07/17**	**18/08/17**
Nombre de contours	127	259	369	174
Surface total des contours (pixels²)	20075	24909	25184	21778
Surface moyenne par contour (pixels²)	**158**	**96**	**68**	**125**
Pommier #2	**27/03/17**	**27/04/17**	**05/07/17**	**18/08/17**
Nombre de contours	192	274	299	197
Surface total des contours (pixels²)	22600	26861	25665	24364
Surface moyenne par contour (pixels²)	**117**	**98**	**85**	**123**
Pommier #3	**27/03/17**	**27/04/17**	**05/07/17**	**18/08/17**
Nombre de contours	168	199	411	174
Surface total des contours (pixels²)	17782	22820	24977	21778
Surface moyenne par contour (pixels²)	**105**	**114**	**60**	**125**

Tableau 75. Nombre de contours et surface totale des contours pour les trois pommiers étudiés, entre mars et août 2017.

4.5.9. Estimation du nombre de bourgeons ou de pommes

L'estimation du nombre de bourgeons ou de pommes suivant la période de l'année est effectuée en estimant une surface moyenne par cibles dans un seul couplage de polarisation (ici verticale/verticale). Les résultats de cette estimation pour les trois pommiers sont reportés dans le Tableau 76. On remarque que l'erreur commise est inférieure à 10% pour les mesures effectuées le 18/08/17 si l'on considère une surface de 9 pixels² par pomme (pommes de tailles finales). En revanche l'erreur commise augmente pour des dates antérieures : cela signifie qu'entre mars et juillet, on ne peut plus considérer les échos radars comme étant majoritairement générés par les pommes et des erreurs d'estimation apparaissent. Alors qu'une estimation du rendement semble envisageable sur un nombre de pommes déjà présentes sur l'arbre, d'autres estimateurs plus développés sont nécessaires s'il l'on veut estimer un nombre de bourgeons avant éclaircissage avec une erreur inférieure à 10%. Les erreurs commises par pommier en fonction du stade de développements sont affichées sur la Figure 149.

Pommier #1	27/03/17	27/04/17	05/07/17	18/08/17
Nombre de bougeons/pommes	217	217	174	174
Surface estimée par cible (pixels²)	11	13	18	9
Estimation du nombre de bourgeons/pommes	158	184	131	183
Erreur commise	40%	28%	24%	**5%**
Pommier #2	**27/03/17**	**27/04/17**	**05/07/17**	**18/08/17**
Nombre de bougeons/pommes	246	246	206	206
Surface estimée par cible (pixels²)	11	13	18	9
Estimation du nombre de bourgeons/pommes	191	202	122	208
Erreur commise	36%	30%	40%	**1%**
Pommier #3	**27/03/17**	**27/04/17**	**05/07/17**	**18/08/17**
Nombre de bougeons/pommes	173	173	154	154
Surface estimée par cible (pixels²)	11	13	18	9
Estimation du nombre de bourgeons/pommes	303	256	218	165
Erreur commise	43%	25%	41%	**7%**

Tableau 76. Estimation du nombre de pommes ou de bourgeons en se basant sur une surface estimée par cible avec l'erreur commise sur cette estimation.

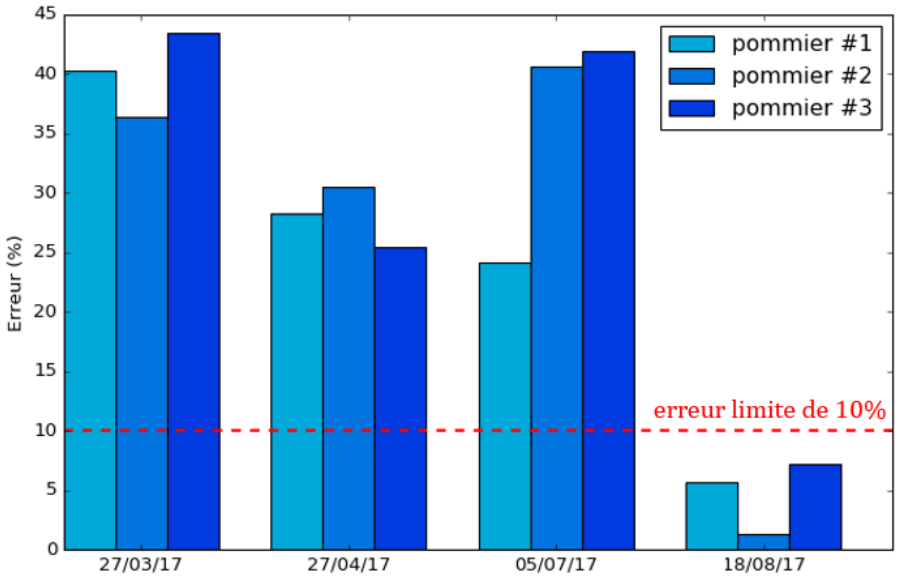


Figure 149. Erreur commise sur l'estimation du nombre de pommes, basée sur une surface calculée identique pour toutes les pommes. Cette estimation est efficace pour une présence de pommes en taille finale (erreur inférieure à 10%)

4.5.10. Perspectives pour le comptage de pommes

Les résultats présentés ici ont montré la possibilité d'estimer le nombre de pommes présentes sur les pommiers avec une erreur inférieure à 10%. Cette estimation est possible pour des pommes ayant atteint leur taille finale avec des méthodes simples utilisant le couplage des polarisations VV. Ceci est rendu possible par la présence majoritaire des pommes par rapport à d'autres cibles (tronc, branches ou feuilles). En revanche, cette méthode n'est pas suffisante pour estimer la quantité de fruits ou de bourgeons à des dates antérieures. Le développement de nouvelles méthodes est probablement nécessaire pour une estimation précise du nombre de bourgeons présents (par exemple en utilisant de manière plus intensive la fusion de données optique et radar ou en développant des estimateurs construits à partir d'un plus grand nombre de mesures). De manière générale, la présence de pommes et la croissance des feuilles ou des bourgeons sont aussi détectables en analysant la surface moyenne des échos par pommier au cours du temps.

4.6. Synthèse et perspectives

L'utilisation des radars FM-CW millimétriques et micro-ondes pour l'estimation du rendement en viticulture montre des résultats plutôt prometteurs. Les expériences menées en laboratoire permettent d'une part de comprendre la manière dont sont rétrodiffusées les ondes électromagnétiques en fonction des différentes cibles, et d'autre part, de mettre en évidence les problèmes que l'on peut rencontrer pour estimer correctement le rendement. Si l'on se concentre uniquement sur la rétrodiffusion à 24GHz, l'un des points fondamentaux que l'on peut retenir est la propriété dépolarisante des grappes de raisin. Cette dépolarisation, permet de discriminer son écho radar de la grappe de ceux générés par les sarments ou d'autres éléments présents dans le vignoble.

Néanmoins, il est montré que l'estimation du rendement par une analyse des échos des grappes est perturbée par de nombreux facteurs. Le premier est l'atténuation générée par les feuilles de vignes. Cette atténuation dépend de l'orientation des feuilles et peut atteindre -3dB. Si les feuilles sont réparties de manière homogène sur l'ensemble des pieds de vigne, les estimateurs construits peuvent s'adapter à la scène de mesure. Contrairement aux sphères métalliques étudiées dans la partie précédente, la rétrodiffusion des grappes seules peut provoquer des interférences ou des résonances, et perturber l'estimation du volume, comme montré dans la section 4.3.4 avec l'estimation du nombre de grains présents sur la grappe. Des petites grappes dans certaines configurations rétrodiffusent alors autant d'énergie que des grappes de raisin ayant un volume deux fois plus important. On espère alors que ces phénomènes s'estompent si la grappe se retrouve en contact avec des sarments (il y alors suppression des résonances en modifiant les dimensions de la cible) ou derrière des feuilles (suppressions d'interférences constructives).

Certaines conditions météorologiques peuvent aussi entraîner des erreurs dans l'estimation du rendement. Le vent peut par exemple provoquer du mouvement dans les feuilles et modifier les échos radars. D'après les mesures de répétabilité effectuées durant l'été 2016, on peut estimer la contribution du vent sur l'erreur d'estimation du rendement à ±350g par pied de vigne. La rosée génère aussi des atténuations mesurées de l'ordre de 1dB, et cette atténuation doit probablement varier (à vérifier) en fonction de l'orientation des feuilles de vignes. L'influence de la pluie n'a pas été testée ici mais mériterait d'être étudiée.

La première campagne de mesure en été 2016 était très perfectible, mais elle a eu le mérite de montrer qu'une solution flexible à 24GHz en un seul couplage de polarisation VV n'était pas envisageable pour estimer précisément (erreur <10%) le rendement d'une parcelle. En effet, malgré la bonne linéarité de l'estimateur V_{EST} (section 4.4.1.6), ce dernier était calculé en fonction d'une plage changeante de valeurs d'un paramètre (facteur d'étalement $\chi(\mathcal{C})$) en fonction de la variété. Cette plage de valeur est déterminée par rapport à des mesures de référence sans grappes, ce qui n'est pas désirable pour une estimation flexible sans calibration.

Les comparaisons de la distribution des niveaux d'échos avec et sans grappes (section 4.4.1.4) n'ont montré aucune corrélation avec le rendement des pieds de vigne, ce qui rend une analyse globale du niveau d'écho de la scène peu envisageable, contrairement à ce que l'on a pu montrer dans la partie 3 avec les capteurs passifs. Le développement d'un algorithme de sélection d'échos radar est alors indispensable si l'on veut pouvoir analyser séparément la rétrodiffusion de chaque cible. Celui développé à partir de critères surfaciques est fonctionnel (voir section 4.4.1.5), mais le choix des surfaces minimales et maximales rend l'algorithme dépendant de la scène de mesure et ne séparent pas les échos radars issus de deux cibles proches. La modification apportée sur cet algorithme (4.4.2.4) en calculant le nombre de maxima locaux par contour apporte plus de flexibilité. La taille d'entrée du filtre de maxima δ dépend du rapport signal sur bruit du lecteur (donc reste inchangée quel que soit la scène de mesure avec cibles

immobiles), et le choix du niveau d'écho initial v_{init} se justifie sur une plage de valeurs relativement large (voir section 4.4.2.5).

La deuxième (et dernière) campagne de mesure en été 2017 montre les résultats les plus encourageants. L'apport de l'analyse polarimétrique des mesures effectuées à 24GHz améliore grandement l'estimation du rendement, en définissant un estimateur E_{Pol} (voir section 4.4.2.6) basé sur des contours et des paramètres des quatre couplages de polarisation VV, VH, HV et HH. La résolution d'un problème inverse en supposant une combinaison linéaire de paramètres de dépolarisation et de surfaces de contours s'avère efficace avec une erreur estimée sur la masse finale de 1,0%. L'estimateur reste flexible car (i) les mesures ont été effectuées sur cinq variétés avec des répartitions de grappes différentes (voir section 4.4.2.1) et (ii) les dégradations des performances sont faibles lorsqu'on fait varier les valeurs de paramètres extérieurs (voir section 4.4.2.8). L'estimation se base par contre sur des mesures effectuées sur des grappes de raisin dans un environnement spécifique, composé, en plus des grappes, de nombreuses feuilles. Il est possible que pour une scène différente, avec des grappes très isolées et très peu de feuilles, l'estimateur E_{pol} doit être construit avec d'autres valeurs de coefficients (cette hypothèse doit être vérifiée par des mesures dans des conditions environnementales différentes).

Les mesures effectuées à 24GHz pour une unique polarisation sont en revanche à écarter, car la distinction entre le clutter et les grappes reste difficile. Il semblerait cependant que cette distinction soit moins problématique lorsque l'on augmente la fréquence porteuse du signal transmis. L'estimation basée sur l'amplitude des niveaux d'échos E_{Mag} (voir section 4.4.2.9) effectuée avec le radar MIMO 77GHz utilisé offre de meilleurs résultats, malgré des antennes de transmission moins directives et l'utilisation du beamforming numérique à la place du balayage mécanique en azimut. On obtient à 77GHz une erreur sur l'estimation de la masse totale de 9,9% (contre 17,8% à 24GHz). Cette tendance se confirme avec le balayage radar 3D effectué à 122GHz, où l'erreur sur la masse totale estimée atteint 0,9%, avec des flexibilités tout aussi bonnes que l'estimateur E_{Pol} (voir section 4.4.2.10). L'utilisation du radar FM-CW à 122GHz pour ce type d'application doit être retenue car ce système est à la fois beaucoup plus petit que le système à 24GHz et ne requiert aucune matrice de polarisation. Les avantages et les inconvénients des trois systèmes radars étudiés sont résumés dans le Tableau 77. L'estimateur qui demeure finalement le plus performant est celui calculé à partir des amplitudes des niveaux d'écho mesurées avec le radar à 122GHz. Ces performances sont expliquées par l'utilisation d'une fréquence porteuse plus élevée et une bande de modulation de 6,8GHz, soit plus de trois fois la bande de modulation du radar à 24GHz. Il en résulte l'analyse d'échos radar trois fois plus nombreux pour un même volume d'étude et des estimations plus précises.

Modèle	**DK-sR-1030E**	**RBK_8**	**EasyRadar**
Entreprise	IMST GmbH	INRAS GmbH	Silicon Radar GmbH
fréquence porteuse *f*	23,8 GHz	77,5 GHz	125,4 GHz
avantages	• Bon rapport signal sur bruit. • Deux canaux de réception indépendants. • Interrogation longue portée	• PRI faible • Balayage 3D plus rapide • Modulation reconfigurable	• Large bande de modulation • Faibles dimensions • Alimentation par câble USB (5V)
inconvénients	• Dimension élevée de l'antenne Tx • Nécessite une analyse de la matrice de polarisation • Alimentation externe 12V	• Faible résolution en azimut et en élévation • Alimentation externe 24V	• Portée faible • Rapport signal sur bruit dégradé • Un seul canal TX et RX

Tableau 77. Avantages et inconvénients des trois radars FM-CW utilisés pour les mesures en viticulture.

D’autres applications et observations, non forcément liées à la mesure du rendement, sont à noter. Le phénomène de *regroupement* et *dispersion* des échos radar est particulièrement intéressant (voir section 4.4.2.11) et visible avec les trois systèmes radars étudiés dans cette partie (voir même les quatre radars avec les observations préliminaires effectuées avec le radar FM-CW à 30GHz dans la section 4.2). Ce phénomène pourrait être utilisé pour détecter ou non la présence de fruits, ou étudier l’homogénéité de la rétrodiffusion générée par la scène. L’utilisation du radar FM-CW 24GHz avec plusieurs couplages de polarisation peut trouver son intérêt pour étudier la structure et le développement de la surface foliaire des pieds de vigne (voir section 4.4.2.12) ou bien pour détecter et visualiser l’orientation des rangées de vignes (voir section 4.4.2.13) dans des problématiques de navigation et de cartographie.

L’un des principaux points à développer dorénavant est l’intégration du système radar sur un véhicule circulant à travers les rangées de vignes (tracteur ou robot). Des études doivent alors être menées pour définir à quelle vitesse doit circuler le véhicule en fonction du temps de répétition du radar, afin d’obtenir des images avec une résolution suffisante en azimut et en élévation pour ne pas dégrader les performances de l’estimation. Le balayage ne se ferait plus de manière sphérique en un point fixe, mais plutôt à la manière d’un balayage SAR de proximité, avec les problématiques associées au SAR (effets Doppler, *range cell migration*).

Conclusion générale

Quand il s'agit d'interroger par radar FM-CW une cible isolée pour en estimer sa surface équivalente radar, il est possible d'analyser la distribution des niveaux d'écho, et d'en déduire des estimateurs optimaux en termes de linéarité ou de précision. Ces estimations se basent aussi bien sur des valeurs de niveau d'écho que sur des analyses volumiques et permettent ainsi, en fonction de l'application, d'estimer un volume (cible canonique) ou une grandeur physique (capteurs passifs ou charge variable) à des distances d'interrogations importantes (distance de 58m reportée ici).

En revanche, dès que la scène de mesure se complexifie (présence de clutters, plusieurs cibles à distinguer et à analyser), il est impératif d'établir des classifications d'échos radar pour retrouver la grandeur physique d'intérêt, en l'occurrence le volume des grappes de raisin. Ces classifications nécessitent l'utilisation d'algorithme afin d'extraire les propriétés de chaque écho radar. Ces propriétés peuvent être à la fois spatiales (position, forme) ou électromagnétiques (niveau d'écho, dépolarisation). De ces propriétés, le choix d'un estimateur linéaire avec une bonne précision (s'il existe) doit être fait. Cela nécessite, dans les cas les plus simples montrés dans ce manuscrit, la résolution d'un système linéaire.

Une fois les bons estimateurs définis, on constate que l'utilisation de la technologie radar FM-CW pour l'estimation du rendement s'avère très encourageante. L'objectif initial, qui était d'estimer le rendement des grappes avec une erreur inférieure à 10% est rempli, en tout cas pour les 25 pieds de vignes mesurés. Il s'agit maintenant de savoir quelle est la meilleure méthode et le meilleur système radar à adopter pour estimer le rendement à l'échelle d'une parcelle entière. Le radar fonctionnant à 122GHz semble être le plus flexible et le plus facilement intégrable à un véhicule passant à travers les rangées de vignes. Dans un objectif futur d'automatisation, il est certain que des concessions doivent être faîtes entre la précision ou la rapidité des mesures, c'est-à-dire entre le temps d'acquisition du radar et la vitesse de déplacement entre les rangées. Pour valider les estimateurs de rendement, les tests devront être effectués dans beaucoup plus de conditions différentes : avec des cépages plus ou moins feuillues ou vigoureux, sous différentes conditions météorologiques, et surtout, à différents stades de développement.

L'interrogation par radar FM-CW semble offrir d'autres informations en plus du rendement des vignes. Les images radars prises à différents stades de développement laissent supposer que l'on peut obtenir des informations sur la vigueur des pieds, ainsi que le développement de la surface foliaire. Ces suppositions sont à confirmer, mais l'hypothèse de pouvoir utiliser un unique instrument pour l'analyse de différents paramètres physiologiques de la vigne est intéressante.

A. Annexes

A.1. Radar FM-CW 24GHz DK-sR-1030E (IMST GmbH)

Il s'agit du radar FM-CW le plus souvent utilisé dans les mesures présentées dans ce manuscrit. Sa fréquence porteuse est autour de 24GHz. Son un canal de transmission (Tx) et ses deux canaux de réception (Rx1) et (Rx2) sont capables de recevoir plusieurs types d'antennes par des connecteurs coaxiaux de type K, ce qui en fait un système assez flexible. Les paramètres de ce radar issus de la datasheet sont disponibles dans le Tableau 78. La bande de modulation de radar B et le temps de montée T de la rampe de modulation sont paramétrables.

Figure 150. Illustration du radar FM-CW DK-sR-1030E (IMST GmbH)

Radio
Operating Bands: K-Band, 24 GHz ISM
Frequency Range: 24,00 GHz … 24,25 GHz
Output Power: 20 dBm (100 mW) EIRP, max.
Radar Method: FMCW with DDS Ramp Generation
Transmit-Channel (Tx): 1
Receive-Channels (Rx): 2 (I/Q Data for each Channel)
Frequency Ramp Duration*1: 1 ms to 20 ms
Frequency Ramp Resolution*1: 10 Hz
Detection
Min. Range*2: typ. 10 cm
Max. Range*2: typ. 250 m (in Sky) or 30 m (Human Tracking)
Distance Accuracy: cm-range
Distance Resolution: dm-range (depending on Bandwidth)
Angular Resolution: <50 cm @ 15 m Distance (Time of Arrival Principle)
Measurements Interval: Ramp duration (1 … 20ms) + Processing (10 … 25ms) + Transfer to PC (5 … 50ms) + GUI (PC dependent)
Data Interface
Interface: SPI/ USB
Data Rate: max. 12,5 Mbit
General
Operating Voltage: 10,5 V … 13 V
Standby Power: 1,2 W
CW Operation: 5 W max.
Dimension (L x W x H): 95,4 mm x 84,5 mm x 35,6 mm (Housing)
133,7 mm x 84,5 mm x 35,6 mm (incl. Connector)
Mounting: 4 Mounting Holes (Ø 5mm)
Cable Exit: 12-Pin Buccaneer Connector

Tableau 78. Caractéristiques du radar FM-CW DK-sR-1030E (IMST GmbH) extrait de la datasheet

A.2. Radar FM-CW 77GHz RBK_8 (INRAS GmbH)

Le radar RBK_8 de INRAS GmbH est un radar FM-CW fonctionnant à 77GHz pouvant intégrer un front-end MIMO (Multiple Inputs Multiple Outputs) comportant 4 antennes de transmission (réseau de 2x6 antennes patches) et 8 antennes de réception (réseau de 1x6 antennes patches), permettant ainsi l'acquisition quasi instantanée de l'information azimutale en effectuant un balayage numérique. Les paramètres des antennes sont reportés dans le Tableau 79 et une photographie du système est disponible sur Figure 151. La bande de modulation *B* peut en théorie atteindre 4GHz, le temps de montée de la rampe de modulation *T* et le *PRI* sont modifiables.

Figure 151. Photographie du radar FM-CW RBK_8 (INRAS GmbH)

antenna parameters	
Realized gain (Rx)	-15,8dBi
Sidelobe suppression (Rx)	-18 dB
Horizontal 3dB beamwidth (Rx)	76,5°
Vertical 3dB beamwidth (Rx)	12,8°
Realized gain (Tx)	17,2 dBi
Sidelobe suppression (Tx)	-14 dB
Horizontal 3dB beamwidth (Tx)	51°
Vertical 3dB beamwidth (Tx)	13,2°

Tableau 79. Caractéristiques des antennes du radar FM-CW 77GHz RBK_8 (INRAS GmbH) extrait de la datasheet

A.3. Radar FM-CW 122GHz EasyRadar (Silicon Radar GmbH)

Le radar FM-CW à 122GHz permet de transmettre des chirps avec une bande de modulation radar pouvant atteindre 6,8GHz. Le module est contrôlable par WiFi. Les antennes de transmissions et réceptions sont des antennes patches intégrées dans la puce dont les caractéristiques de rayonnement issues de la datasheet sont affichées sur la Figure 152. Une lentille visible sur la Figure 153 permet d'obtenir un angle d'ouverture de 8°. La bande de modulation maximale que l'on peut obtenir avec ce radar est B=6,8GHz, c'est-à-dire une résolution en profondeur d=2,2cm.

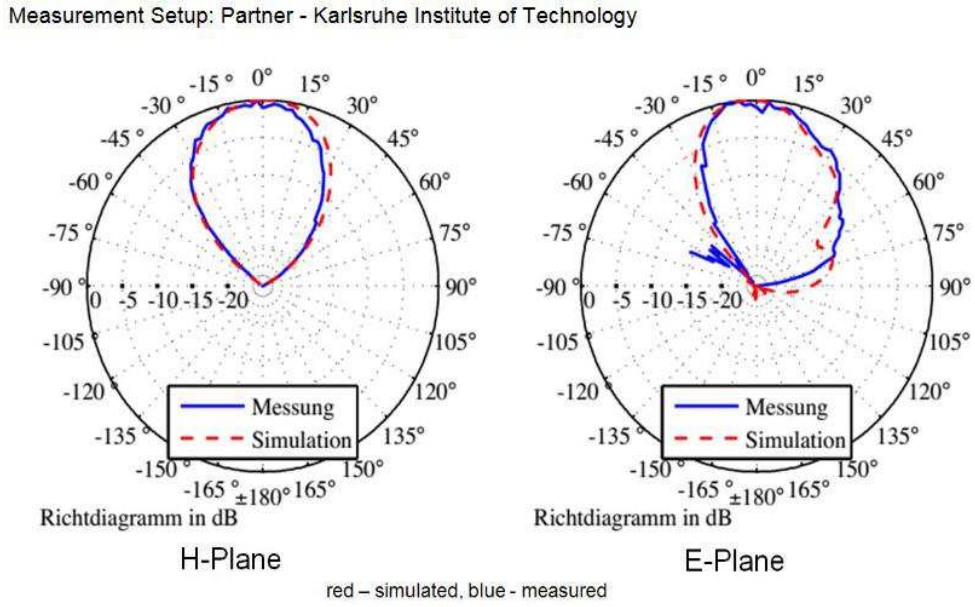


Figure 152. Diagramme de rayonnement des antennes patches du radar FM-CW EasyRadar (Silicon Radar GmbH). Données issues de la datasheet.

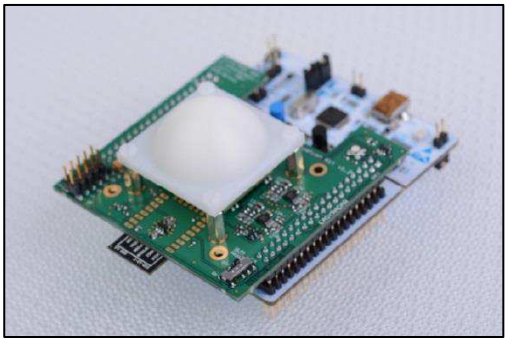


Figure 153. Photographie du radar FM-CW EasyRadar (Silicon Radar GmbH)

A.4. Antennes patches Tx/Rx à 24GHz (IMST GmbH)

Les antennes patches fournies avec le radar 24GHz de IMST GmbH (voir la Figure 154) ont des caractéristiques de rayonnement affichées sur la Figure 155 et résumées dans le Tableau 80.

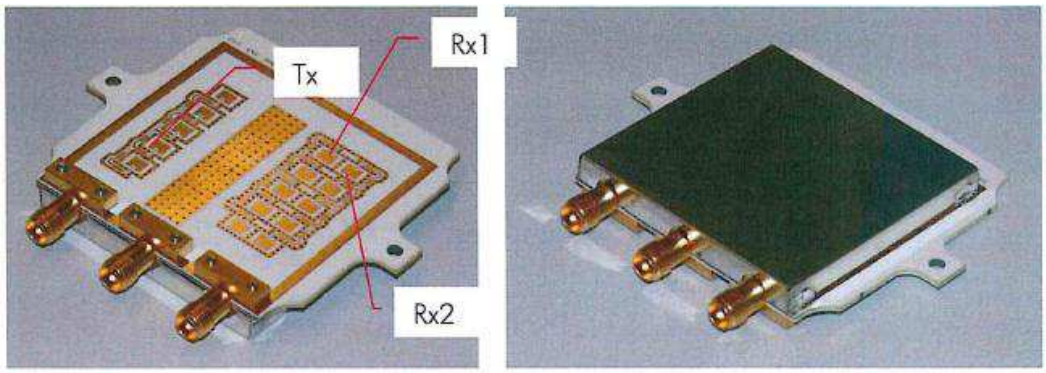
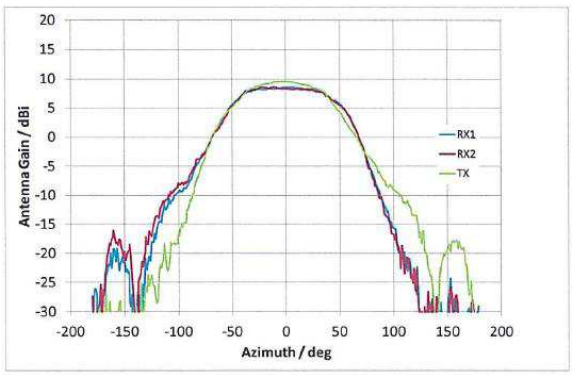
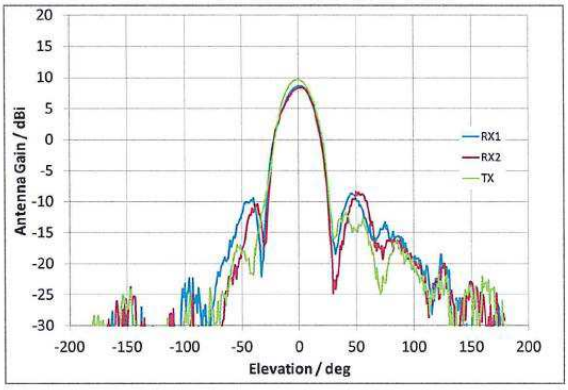


Figure 154. Antennes patches du radar FM-CW DK-sR-1030E (IMST GmbH)



Antenna Gain (w/o Housing), f= 24.125GHz, 0° Elevation



Antenna Gain (w/o Housing), f= 24.125GHz, 0° Azimuth

Figure 155. Diagramme de rayonnement des antennes patches du radar FM-CW DK-sR-1030E (IMST GmbH)

Antennes	θ_{3dB}	φ_{3dB}	gain
Rx1	60°	25°	10 dBi
Rx2	70°	25°	9dBi
Tx	55°	22°	11dBi

Tableau 80. Caractéristiques des antennes du radar FM-CW DK-sR-1030E (IMST GmbH) extraits de la datasheet

A.5. Antenne parabolique (Satimo)

L'antenne parabolique (Satimo) est utilisée pour l'interrogation radar à 24GHz. Ces caractéristiques de rayonnement sont reportées dans le Tableau 81.

Polarization	Dual linear
Frequency band (GHz)	2-32
Return loss (dB)	<-7,5, VSWR<2,5
XPD on axis	>35dB
Polarization orientation	<1° on entire frequency band
Gain performance	> 14 dBi at 2 GHz > 28 dBi at 8 GHz > 32 dBi at 17 GHz > 35 dBi at 26 GHz > 34 dBi at 32 GHz

Tableau 81. Caractéristiques de l'antenne parabolique utilisée en transmission à 24GHz (datasheet Satimo)

A.6. Antenne cornet avec lentille ALC-42240628-01 (Ducommun)

Cette antenne de transmission est un cornet circulaire avec une lentille, qui est utilisée à la place de l'antenne parabolique pour diminuer la distance de Fraunhofer (car ses dimensions sont plus petites). La distance de Fraunhofer de cette antenne est estimée à 4m (contre 39,5m pour l'antenne parabolique). En revanche, son angle d'ouverture est plus grand (6°).

Frequency range	22GHz-25GHz
Gain	28 dBi
3dB beamwidth	6°

Tableau 82. Caractéristiques de rayonnement de l'antenne cornet utilisée en transmission à 24GHz (datasheet Ducommun)

Figure 156. Antenne cornet avec lentille utilisée en transmission à 24GHz (datasheet Ducommun)

A.7. Antennes cornets QSH-SL-18-26-S-20 (Q-PAR Antennas, Steatite)

Ces antennes cornets (voir la Figure 157) sont utilisées par paires en réception du radar 24GHz en polarisations linéaires croisées, ou bien comme antennes pour les capteurs passifs et les charges variables interrogées à distance. Les caractéristiques de ces antennes sont reportées dans le Tableau 83.

Figure 157. Antenne cornet (Q-PAR Antennas, Steatite)

Frequency	18 to 26,5GHz
Connector type	SMA type jack (27GHz version)
Power Handling	20 Watt c.w.
VSWR	Typically <1.4:1
Gain	18 to 20,9dBi
Antenna Factor	37,3 to 37,8 dB/m
3dB beamwidth	14 to 21 degrees
10dB beamwidth	25 to 39 degrees
Weight	250g nominal
Maximum size	53mm x 41mm external aperture x 124mm long

Tableau 83. Caractéristiques de rayonnement de l'antenne cornet utilisée en réception à 24GHz (datasheet Q-PAR Antennas, Steatite).

Bibliographie

[1] P. Zwaenepoel et J. M. Le Bars, « L'agriculture de précision », *Ingénieries - E T*, nº 12, p. 67‑79, 1997.

[2] J. V. Stafford, « Spatially variable field operations », *Comput. Electron. Agric.*, vol. 14, nº 2, p. 99‑100, févr. 1996.

[3] J. V. Stafford et B. Ambler, « In-field location using GPS for spatially variable field operations », *Comput. Electron. Agric.*, vol. 11, nº 1, p. 23‑36, oct. 1994.

[4] D. Goense, J. W. Hofstee, et J. van Bergeijk, « An information model to describe systems for spatially variable field operations », *Comput. Electron. Agric.*, vol. 14, nº 2, p. 197‑214, févr. 1996.

[5] J. K. Schueller, « Impediments to spatially-variable field operations », *Comput. Electron. Agric.*, vol. 14, nº 2, p. 249‑253, févr. 1996.

[6] « Pedology: The Science of Soil Development », in *Opportunities in Basic Soil Science Research*, vol. acsesspublicati, Soil Science Society of America, 1992.

[7] P. Robert, D. Mulla, B. Larson, D. Rust, et H. H. Cheng, *Precision Agriculture Center*. University of Minnesota, 1995.

[8] Springler US, *Precision Agriculture*, 18 vol. 1999.

[9] J. Schieffer et C. Dillon, « The economic and environmental impacts of precision agriculture and interactions with agro-environmental policy », *Precis. Agric.*, vol. 16, nº 1, p. 46‑61, févr. 2015.

[10] E. Bünemann, G. Schwenke, et L. Van Zwieten, « Impact of agricultural inputs on soil organisms - A review », *Aust. J. Soil Res.*, vol. 44, p. 379‑406, janv. 2006.

[11] G. W. Randall, « Best Management Practices for Efficient Nitrogen Use in Minnesota », *Proc. Soil Specif. Crop Manag.*, vol. acsesspublicati, nº proceedingsofso, p. 257‑268, janv. 1993.

[12] D. J. Mulla, « Using geostatistics and GIS to manage spatial patterns in soil fertility », 1991.

[13] M. Sposari et S. Flis, « 4R framework implementation: precision ag adoption by farmers and dealers », *Crops Soils*, vol. 50, nº 5, p. 24‑26, 10/01 2017.

[14] « Welcome to the ACSESS Digital Library | Digital Library ». [En ligne]. Disponible sur: https://dl.sciencesocieties.org/. [Consulté le: 04-janv-2018].

[15] « Agricultural Retail and technology news », *CropLife*. [En ligne]. Disponible sur: http://www.croplife.com/. [Consulté le: 04-janv-2018].

[16] B. E. | J. Lowenberg-DeBoer, « 2017 Precision Dealership Survey: Making the Turn Toward Decision Agriculture », *CropLife*, 01-juin-2017. .

[17] D. A. Tyler, « Positioning Technology (GPS) », *Proc. Soil Specif. Crop Manag.*, vol. acsesspublicati, nº proceedingsofso, p. 159‑165, janv. 1993.

[18] « CNH Industrial - CNH Industrial brands reveal concept autonomous tractor development ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.cnhindustrial.com/en-us/media/press_releases/2016/august/Pages/CNH_Industrial_brands_reveal_concept_autonomous_tractor_development.aspx. [Consulté le: 08-janv-2018].

[19] R. P. van Zuydam, « Centimeter-Precision Guidance Of Agricultural Implements In The Open Field By Means Of Real Time Kinematic Dgps », *Precis. Agric.*, vol. acsesspublicati, nº precisionagric4b, p. 1023‑1034, 1999.

[20] R. Rouveure, P. Faure, et M.-O. Monod, « PELICAN: Panoramic millimeter-wave radar for perception in mobile robotics applications, Part 1: Principles of FMCW radar and of 2D image construction », *Robot. Auton. Syst.*, vol. 81, nº Supplement C, p. 1‑16, juill. 2016.

[21] M. Jaud, R. Rouveure, P. Faure, et M.-O. Monod, « Methods for FMCW radar map georeferencing », *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 84, nº Supplement C, p. 33‑42, oct. 2013.

[22] J. A. Guerrero, M. Jaud, R. Lenain, R. Rouveure, et P. Faure, « Towards LIDAR-RADAR based terrain mapping », in *2015 IEEE International Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO)*, 2015, p. 1‑6.

[23] K. Kurashiki, T. Fukao, J. Nagata, K. Ishiyama, T. Kamiya, et N. Murakami, « Laser-based Vehicle Control in Orchard », *IFAC Proc. Vol.*, vol. 43, nº 26, p. 127‑132, janv. 2010.

[24] S. A. Hiremath, G. W. A. M. van der Heijden, F. K. van Evert, A. Stein, et C. J. F. ter Braak, « Laser range finder model for autonomous navigation of a robot in a maize field using a particle filter », *Comput. Electron. Agric.*, vol. 100, nº Supplement C, p. 41‑50, janv. 2014.
[25] V. Subramanian, T. F. Burks, et A. A. Arroyo, « Development of machine vision and laser radar based autonomous vehicle guidance systems for citrus grove navigation », *Comput. Electron. Agric.*, vol. 53, nº 2, p. 130‑143, sept. 2006.
[26] J. Backman, T. Oksanen, et A. Visala, « Navigation system for agricultural machines: Nonlinear Model Predictive path tracking », *Comput. Electron. Agric.*, vol. 82, nº Supplement C, p. 32‑43, mars 2012.
[27] F. Auat Cheein, G. Steiner, G. Perez Paina, et R. Carelli, « Optimized EIF-SLAM algorithm for precision agriculture mapping based on stems detection », *Comput. Electron. Agric.*, vol. 78, nº 2, p. 195‑207, sept. 2011.
[28] S. Hiremath, F. K. van Evert, C. ter Braak, A. Stein, et G. van der Heijden, « Image-based particle filtering for navigation in a semi-structured agricultural environment », *Biosyst. Eng.*, vol. 121, nº Supplement C, p. 85‑95, mai 2014.
[29] M. A. Juman, Y. W. Wong, R. K. Rajkumar, et L. J. Goh, « A novel tree trunk detection method for oil-palm plantation navigation », *Comput. Electron. Agric.*, vol. 128, nº Supplement C, p. 172‑180, oct. 2016.
[30] U. Weiss et P. Biber, « Plant detection and mapping for agricultural robots using a 3D LIDAR sensor », *Robot. Auton. Syst.*, vol. 59, nº 5, p. 265‑273, mai 2011.
[31] D. B. Coombs et J. Thie, « The Canadian Land Inventory System », *Plan. Uses Manag. Land*, vol. agronomymonogra, nº planningtheuses, p. 909‑933, janv. 1979.
[32] E. S. Oyarzabal, A. P. Mallarino, et P. N. Hinz, « Using Precision Farming Technologies for Improving Applied On-Farm Research », *Precis. Agric.*, vol. acsesspublicati, nº precisionagricu3, p. 379‑387, 1996.
[33] S. W. Lee et L. Kerschberg, « A methodology and life cycle model for data mining and knowledge discovery in precision agriculture », in *1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 1998*, 1998, vol. 3, p. 2882‑2887 vol.3.
[34] Z. Chuanyuan, H. Dongjian, et Q. Yongliang, « Identification method of multi-feature weed based on multi-spectral images and data mining », *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.*, vol. 2013, nº 2, févr. 2013.
[35] W. Xiaoqin, W. Qinmin, S. Xiaoming, L. Feilong, et Z. Xiaoling, « Rice field mapping and monitoring using ASAR data based on principal component analysis », *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.*, vol. 2008, nº 10, oct. 2008.
[36] A. Ramcharan, T. Hengl, D. Beaudette, et S. Wills, « A Soil Bulk Density Pedotransfer Function Based on Machine Learning: A Case Study with the NCSS Soil Characterization Database », *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 0, nº 0, oct. 2017.
[37] N. K. C. Twarakavi, J. Šimůnek, et M. G. Schaap, « Development of Pedotransfer Functions for Estimation of Soil Hydraulic Parameters using Support Vector Machines All rights reserved. », *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 73, nº 5, p. 1443‑1452, sept. 2009.
[38] C. Yuehua, H. Xiaoguang, et Z. Changli, « Algorithm for segmentation of insect pest images from wheat leaves based on machine vision », *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.*, vol. 2007, nº 12, déc. 2007.
[39] S. Yihuan, R. Xiuqin, et Y. Yibin, « Apple stem/calyx and defect discrimination using DT-CWT and LS-SVM », *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.*, vol. 2012, nº 9, sept. 2012.
[40] D. J. Mulla, « Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps », *Biosyst. Eng.*, vol. 114, nº 4, p. 358‑371, avr. 2013.
[41] P. C. Doraiswamy, S. Moulin, P. W. Cook, et A. Stern, « Crop yield assessment from remote sensing », *Pe&rs*, p. 665–674, 2003.
[42] D. W. Franzen, L. Reitmeier, J. F. Giles, et A. C. Cattanach, « Aerial Photography and Satellite Imagery to Detect Deep Soil Nitrogen Levels in Potato and Sugarbeet », *Precis. Agric.*, vol. acsesspublicati, nº precisionagric4a, p. 281‑290, 1999.
[43] A. K. Tilling *et al.*, « Remote sensing of nitrogen and water stress in wheat », *Field Crops Res.*, vol. 104, nº 1, p. 77‑85, oct. 2007.

[44] K. R. Thorp et L. F. Tian, « A Review on Remote Sensing of Weeds in Agriculture », *Precis. Agric.*, vol. 5, nº 5, p. 477‑508, oct. 2004.
[45] A. Estrada-Peña et J. M. Venzal, « High-resolution predictive mapping for Boophilus annulatus and B. microplus (Acari: ixodidae) in Mexico and Southern Texas », *Vet. Parasitol.*, vol. 142, nº 3, p. 350‑358, déc. 2006.
[46] D. G. Sullivan, J. N. Shaw, et D. Rickman, « IKONOS Imagery to Estimate Surface Soil Property Variability in Two Alabama Physiographies », *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 69, nº 6, p. 1789‑1798, nov. 2005.
[47] J. Kim, S. Grunwald, R. G. Rivero, et R. Robbins, « Multi-scale Modeling of Soil Series Using Remote Sensing in a Wetland Ecosystem », *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 76, nº 6, p. 2327‑2341, nov. 2012.
[48] J. W. Rouse, « Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS », 1974.
[49] M. S. Moran, D. C. Hymer, J. Qi, et Y. Kerr, « Radar Imagery for Precision Crop and Soil Management », *Precis. Agric.*, vol. acsesspublicati, nº precisionagric4b, p. 1423‑1434, 1999.
[50] H. Vereecken, L. Weihermüller, F. Jonard, et C. Montzka, « Characterization of Crop Canopies and Water Stress Related Phenomena using Microwave Remote Sensing Methods: A Review », *Vadose Zone J.*, vol. 11, nº 2, mai 2012.
[51] G. I. Metternicht, « Fuzzy classification of JERS-1 SAR data: an evaluation of its performance for soil salinity mapping », *Ecol. Model.*, vol. 111, nº 1, p. 61‑74, août 1998.
[52] J. Álvarez-Mozos, J. Casalí, M. González-Audícana, et N. E. C. Verhoest, « Correlation between Ground Measured Soil Moisture and RADARSAT-1 derived Backscattering Coefficient over an Agricultural Catchment of Navarre (North of Spain) », *Biosyst. Eng.*, vol. 92, nº 1, p. 119‑133, sept. 2005.
[53] H. Lievens et N. E. C. Verhoest, « Spatial and temporal soil moisture estimation from RADARSAT-2 imagery over Flevoland, The Netherlands », *J. Hydrol.*, vol. 456‑457, nº Supplement C, p. 44‑56, août 2012.
[54] S. R. Herwitz *et al.*, « Imaging from an unmanned aerial vehicle: agricultural surveillance and decision support », *Comput. Electron. Agric.*, vol. 44, nº 1, p. 49‑61, juill. 2004.
[55] T. Zhenkun, F. Yingying, L. Suhong, et L. Name, « Rapid crops classification based on UAV low-altitude remote sensing », *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.*, vol. 2013, nº 7, juill. 2013.
[56] J. S. Schepers, D. D. Francis, M. Vigil, et F. E. Below, « Comparison of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings », *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, vol. 23, p. 2173‑2187, nov. 2008.
[57] « SPAD-502 - KONICA MINOLTA Europe ». [En ligne]. Disponible sur: https://www.konicaminolta.eu/en/measuring-instruments/products/colour-measurement/discontinued-products/spad-502.html. [Consulté le: 08-janv-2018].
[58] L. M Carter, J. D Rhoades, et J. H Chesson, « Mechanization of soil salinity assessment for mapping », présenté à ASAE Winter Meeting, Chicago, Illinois, 1993, vol. Paper 931557.
[59] J. A. Huisman, S. S. Hubbard, J. D. Redman, et A. P. Annan, « Measuring Soil Water Content with Ground Penetrating Radar », *Vadose Zone J.*, vol. 2, nº 4, p. 476‑491, nov. 2003.
[60] R. W. Johnson, R. Glasscum, et R. Wojtasinski, « Application of Ground Penetrating Radar to Soil Survey », *Soil Horiz.*, vol. 23, nº 3, p. 17‑25, 1982.
[61] M. Hongzhang, L. Qinhuo, W. Heshun, et X. Qing, « Soil dielectric characteristic determination based on microwave interferometry theory », *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.*, vol. 2011, nº 9, sept. 2011.
[62] I. Oz, R. Arav, S. Filin, S. Assouline, et A. Furman, « High-Resolution Measurement of Topographic Changes in Agricultural Soils », *Vadose Zone J.*, vol. 16, nº 12, déc. 2017.
[63] R. M. Hoff, R. E. Mickle, et F. A. Froude, « A Rapid Acquisition Lidar System for Aerial Spray Diagnostics », *Trans. ASAE*, vol. 32, nº 5, p. 1523, 1989.
[64] Y. Noyman et I. Shmulevich, « Ground surface sensing through plant foliage using an FM-CW radar », *Comput. Electron. Agric.*, vol. 15, nº 3, p. 181‑193, août 1996.

[65] B. A. M. Bouman et H. W. J. van Kasteren, « Ground-based X-band (3-cm wave) radar backscattering of agricultural crops. I. Sugar beet and potato; backscattering and crop growth », *Remote Sens. Environ.*, vol. 34, nº 2, p. 93‑105, nov. 1990.
[66] B. A. M. Bouman et H. W. J. van Kasteren, « Ground-based X-band (3-cm wave) radar backscattering of agricultural crops. II. Wheat, barley, and oats; the impact of canopy structure », *Remote Sens. Environ.*, vol. 34, nº 2, p. 107‑119, nov. 1990.
[67] K. Banerjee, P. Krishnan, et N. Mridha, « Application of thermal imaging of wheat crop canopy to estimate leaf area index under different moisture stress conditions », *Biosyst. Eng.*, vol. 166, nº Supplement C, p. 13‑27, févr. 2018.
[68] D. M. Bulanon, T. F. Burks, et V. Alchanatis, « Image fusion of visible and thermal images for fruit detection », *Biosyst. Eng.*, vol. 103, nº 1, p. 12‑22, mai 2009.
[69] B. L. Blad et N. J. Rosenberg, « Measurement of Crop Temperature by Leaf Thermocouple, Infrared Thermometry and Remotely Sensed Thermal Imagery1 », *Agron. J.*, vol. 68, nº 4, p. 635‑641, 8/01 1976.
[70] W. Strothmann, A. Ruckelshausen, J. Hertzberg, C. Scholz, et F. Langsenkamp, « Plant classification with In-Field-Labeling for crop/weed discrimination using spectral features and 3D surface features from a multi-wavelength laser line profile system », *Comput. Electron. Agric.*, vol. 134, nº Supplement C, p. 79‑93, mars 2017.
[71] « Ecorobotix – Passez au désherbage intelligent », *Ecorobotix*. [En ligne]. Disponible sur: https://www.ecorobotix.com/fr/. [Consulté le: 09-janv-2018].
[72] « SeedCommand® | Products | Ag Leader Technology ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.agleader.com/products/seedcommand/. [Consulté le: 09-janv-2018].
[73] « Système Field-IQ de Gestion des Intrants - Overview | Débit par Section & Commande | New Holland (FR) ». [En ligne]. Disponible sur: http://agriculture1.newholland.com/eu/fr-fr/plm-agriculture-de-precision/produits/debit-par-section-commande/systeme-field-iq-de-gestion-des-intrants. [Consulté le: 09-janv-2018].
[74] « Precision Farming - EASY | CLAAS ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.claas.fr/produits/easy/precision-farming/pflanzensensor. [Consulté le: 09-janv-2018].
[75] R. G. V. Bramley et A. P. . Proffitt, « Managing variability in viticultural production », *Aust. N. Z. Grapegrow. Winemak.*, nº 427, p. 11‑16, 1999.
[76] R. L. Wample, L. Mills, et J. R. Davenport, « Use of Precision Farming Practices in Grape Production », *Precis. Agric.*, vol. acsesspublicati, nº precisionagric4a, p. 897‑905, 1999.
[77] A. Brasa Ramos, F. Montero Riquelme, F. J. Montero Garcia, L. Orozco, et J. J. Roncero, *Precision viticulture using a Wireless Sensor Network*, vol. 931. 2012.
[78] F. J. Montero Garcia, A. Brasa Ramos, et F. Montero Riquelme, *Wireless Sensor Networks to Monitor Microclimate Variability for Precision Viticulture in Castilla-La Mancha*. 2018.
[79] T. De Filippis, L. Rocchi, E. Fiorillo, A. Matese, S. Di Gennaro, et L. Genesio, *SmartVineyard: an Open Source Web-GIS Application for Precision Viticulture*, vol. 978. 2012.
[80] A. Matese *et al.*, *Intercomparison of UAV, Aircraft and Satellite Remote Sensing Platforms for Precision Viticulture*, vol. 7. 2015.
[81] C. Manuel Lopes *et al.*, « Using an Unmanned Ground Vehicle to Scout Vineyards for Non-Intrusive Estimation of Canopy Features and Grape Yield », présenté à 20th GiESCO International Meeting, Mendoza, Argentina, 2017.
[82] R. Chamelat, E. Rosso, A. Choksuriwong, C. Rosenberger, H. Laurent, et P. Bro, « Grape Detection By Image Processing », in *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, 2006, p. 3697‑3702.
[83] R. Berenstein, O. B. Shahar, A. Shapiro, et Y. Edan, « Grape clusters and foliage detection algorithms for autonomous selective vineyard sprayer », *Intell. Serv. Robot.*, vol. 3, nº 4, p. 233‑243, oct. 2010.
[84] M. Reis *et al.*, *Automatic Detection of White Grapes in Natural Environment Using Image Processing*, vol. 87. 2011.
[85] M. Reis *et al.*, *A Low-Cost System to Detect Bunches of Grapes in Natural Environment from Color Images*. 2011.

[86] S. Nuske, S. Achar, T. Bates, S. Narasimhan, et S. Singh, « Yield estimation in vineyards by visual grape detection », in *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2011, p. 2352‑2358.
[87] M.-P. Diago, C. Correa, B. Millán, P. Barreiro, C. Valero, et J. Tardaguila, « Grapevine yield and leaf area estimation using supervised classification methodology on RGB images taken under field conditions », *Sensors*, vol. 12, nº 12, p. 16988‑17006, déc. 2012.
[88] R. Roscher, K. Herzog, A. Kunkel, A. Kicherer, R. Töpfer, et W. Förstner, « Automated image analysis framework for high-throughput determination of grapevine berry sizes using conditional random fields », *Comput. Electron. Agric.*, vol. 100, p. 148‑158, janv. 2014.
[89] S. Liu, M. Whitty, et S. Cossell, « Automatic grape bunch detection in vineyards for precise yield estimation », in *2015 14th IAPR International Conference on Machine Vision Applications (MVA)*, 2015, p. 238‑241.
[90] S. Liu et M. Whitty, « Automatic grape bunch detection in vineyards with an SVM classifier », *J. Appl. Log.*, vol. 13, nº 4, Part 3, p. 643‑653, déc. 2015.
[91] P. Škrabánek et T. Runarsson, *DETECTION OF GRAPES IN NATURAL ENVIRONMENT USING SUPPORT VECTOR MACHINE CLASSIFIER*. 2015.
[92] P. Škrabánek et F. Majerík, *Simplified Version of White Wine Grape Berries Detector Based on SVM and HOG Features*. 2016.
[93] P. Dolezel, P. Skrabanek, et L. Gago, « Detection of grapes in natural environment using feedforward neural network as a classifier », in *2016 SAI Computing Conference (SAI)*, 2016, p. 1330‑1334.
[94] A. Aquino, B. Millan, S. Gutiérrez, et J. Tardáguila, « Grapevine flower estimation by applying artificial vision techniques on images with uncontrolled scene and multi-model analysis », *Comput. Electron. Agric.*, vol. 119, p. 92‑104, nov. 2015.
[95] M. Herrero-Huerta, D. González-Aguilera, P. Rodriguez-Gonzalvez, et D. Hernández-López, « Vineyard yield estimation by automatic 3D bunch modelling in field conditions », *Comput. Electron. Agric.*, vol. 110, p. 17‑26, janv. 2015.
[96] N. Behroozi-Khazaei et M. R. Maleki, « A robust algorithm based on color features for grape cluster segmentation », *Comput. Electron. Agric.*, vol. 142, nº Part A, p. 41‑49, nov. 2017.
[97] D. S. Pérez, F. Bromberg, et C. A. Diaz, « Image classification for detection of winter grapevine buds in natural conditions using scale-invariant features transform, bag of features and support vector machines », *Comput. Electron. Agric.*, vol. 135, p. 81‑95, avr. 2017.
[98] A. Aquino, B. Millan, M.-P. Diago, et J. Tardaguila, « Automated early yield prediction in vineyards from on-the-go image acquisition », *Comput. Electron. Agric.*, vol. 144, p. 26‑36, janv. 2018.
[99] M. Cunha, A. R. S. Marçal, et L. Silva, « Very early prediction of wine yield based on satellite data from VEGETATION », *Int. J. Remote Sens.*, vol. 31, nº 12, p. 3125‑3142, juin 2010.
[100] L. Sun *et al.*, « Daily mapping of Landsat-like LAI and correlation to grape yield », in *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2016, p. 7157‑7160.
[101] M. Gatti *et al.*, « MECS-VINE®: A New Proximal Sensor for Segmented Mapping of Vigor and Yield Parameters on Vineyard Rows », *Sensors*, vol. 16, nº 12, p. 2009, nov. 2016.
[102] S. Paloscia, P. Pampaloni, et S. Sigismondi, « The microwave backscattering of vineyards », in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1995. IGARSS '95. « Quantitative Remote Sensing for Science and Applications », International*, 1995, vol. 1, p. 222‑223 vol.1.
[103] A. Burini, A. Minchella, et D. Solimini, « SAR in agriculture: sensitivity of backscattering to grapes », in *Proceedings. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS '05.*, 2005, vol. 3, p. 1542‑1545.
[104] G. Schiavon, D. Solimini, et A. Burini, « Sensitivity of multi-temporal high resolution polarimetric C and L-band SAR to grapes in vineyards », in *2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2007, p. 3651‑3654.
[105] A. Burini, G. Schiavon, et D. Solimini, « Fusion of High Resolution Polarimetric SAR and Multi-Spectral Optical Data for Precision Viticulure », in *IGARSS 2008 - 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2008, vol. 3, p. III-1000-III‑1003.

[106] F. André *et al.*, « High-resolution imaging of a vineyard in south of France using ground-penetrating radar, electromagnetic induction and electrical resistivity tomography », *J. Appl. Geophys.*, vol. 78, nº Supplement C, p. 113‑122, mars 2012.
[107] J. D. Ballester-Berman, J. M. Lopez-Sanchez, I. Garmendia-Lopez, et V. J. Mangas-Martin, « Incoherent electromagnetic model for vineyards at C-band », in *2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2012, p. 5689‑5692.
[108] F. D. Frate, D. Latini, M. Picchiani, G. Schiavon, et C. Vittucci, « A neural network architecture combining VHR SAR and multispectral data for precision farming in viticulture », in *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2014, p. 1508‑1511.
[109] R. E. Smart, J. K. Dick, I. M. Gravett, et B. M. Fisher, « Canopy Management to Improve Grape Yield and Wine Quality - Principles and Practices », *South Afr. J. Enol. Vitic.*, vol. 11, nº 1, p. 3‑17, 1990.
[110] R. g. v. Bramley, « Understanding variability in winegrape production systems 2. Within vineyard variation in quality over several vintages », *Aust. J. Grape Wine Res.*, vol. 11, nº 1, p. 33‑42, avr. 2005.
[111] B. Tisseyre et J. Taylor, « An overview of methodologies and technologies for implementing precision agriculture in viticulture », janv. 2005.
[112] L. F. Johnson, D. E. Roczen, S. K. Youkhana, R. R. Nemani, et D. F. Bosch, « Mapping vineyard leaf area with multispectral satellite imagery », *Comput. Electron. Agric.*, vol. 38, nº 1, p. 33‑44, janv. 2003.
[113] « GreenSeeker Crop Sensing System | Trimble Ag », *Trimble Ag Field Solutions*. .
[114] C. Gée, *« On-the-go » multispectral imaging system to characterize the development of vineyard foliage*. 2015.
[115] R. Sanz, J. R. Rosell, J. Llorens, E. Gil, et S. Planas, « Relationship between tree row LIDAR-volume and leaf area density for fruit orchards and vineyards obtained with a LIDAR 3D Dynamic Measurement System », *Agric. For. Meteorol.*, vol. 171–172, p. 153‑162, avr. 2013.
[116] S. Priori, E. Martini, E. Costantini, et R. Gilkes, *Three proximal sensors for mapping skeletal soils in vineyards*. 2010.
[117] « Geocarta -Technologie ARP® ». [En ligne]. Disponible sur: http://geocarta.net/html/Technologie-Viti.html. [Consulté le: 02-févr-2018].
[118] R. Rossi *et al.*, *Using an Automatic Resistivity Profiler Soil Sensor On-The-Go in Precision Viticulture*, vol. 13. 2013.
[119] M. C. Andrenelli, S. Magini, S. Pellegrini, R. Perria, N. Vignozzi, et E. A. C. Costantini, « The use of the ARP© system to reduce the costs of soil survey for precision viticulture », *J. Appl. Geophys.*, vol. 99, p. 24‑34, déc. 2013.
[120] « Geonics EM38-MK2 Ground Conductivity Meter ». [En ligne]. Disponible sur: http://geonics.com/html/em38.html. [Consulté le: 08-janv-2018].
[121] M. Trought *et al.*, *The impact of differences in soil texture within a vineyard on vine vigour, vine earliness and juice composition*, vol. 42. 2008.
[122] J. R. Rodríguez-Pérez, R. E. Plant, J.-J. Lambert, et D. R. Smart, « Using apparent soil electrical conductivity (ECa) to characterize vineyard soils of high clay content », *Precis. Agric.*, vol. 12, nº 6, p. 775‑794, déc. 2011.
[123] M. Weiss et B. Frederic, *Using 3D Point Clouds Derived from UAV RGB Imagery to Describe Vineyard 3D Macro-Structure*, vol. 9. 2017.
[124] F. Mazzetto, A. Calcante, A. Mena, et A. Vercesi, *Integration of optical sensors for monitoring canopy health and vigour in precision viticulture*, vol. 11. 2010.
[125] M. Ferreiro-Armán, J.-P. Da Costa, S. Homayouni, et J. Martín-Herrero, *Hyperspectral Image Analysis for Precision Viticulture*. 2006.
[126] C. Karakizi, M. Oikonomou, et K. Karantzalos, *Spectral Discrimination and Reflectance Properties of Various Vine Varieties from Satellite, UAV and Proximate Sensors*, vol. XL-7/W3. 2015.
[127] L. Serrano, C. González-Flor, et G. Gorchs, « Assessing vineyard water status using the reflectance based Water Index », *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 139, nº 4, p. 490‑499, déc. 2010.

[128] H. G. Jones, « Application of Thermal Imaging and Infrared Sensing in Plant Physiology and Ecophysiology », in *Advances in Botanical Research*, vol. 41, Academic Press, 2004, p. 107‑163.
[129] I. F. García-Tejero *et al.*, « Thermal data to monitor crop-water status in irrigated Mediterranean viticulture », *Agric. Water Manag.*, vol. 176, p. 80‑90, oct. 2016.
[130] A. Soliman, R. Heck, A. Brenning, R. Brown, et S. Miller, *Remote Sensing of Soil Moisture in Vineyards Using Airborne and Ground-Based Thermal Inertia Data*, vol. 5. 2013.
[131] J. A. Martínez-Casasnovas et M. C. Ramos, *Analysis of the relationship between the volumetric soil moisture content and the NDVI from high resolution multi-spectral images for definition of vineyard management zones to improve irrigation*, vol. 11. 2009.
[132] L. Pichon, A. Ducanchez, H. Fonta, et B. Tisseyre, *Quality of Digital Elevation Models obtained from Unmanned Aerial Vehicles for Precision Viticulture*, vol. 50. 2016.
[133] F. Norzahari *et al.*, *Spatially Smart Wine – Testing Geospatial Technologies for Sustainable Wine Production*. 2011.
[134] A. De Castro, J. M. Peña-Barragán, J. Torres-Sánchez, F. Jiménez-Brenes, et F. López-Granados, *Mapping Cynodon dactylon in vineyards using UAV images for site-specific weed control*, vol. 8. 2017.
[135] P. J. Zarco-Tejada *et al.*, « Assessing vineyard condition with hyperspectral indices: Leaf and canopy reflectance simulation in a row-structured discontinuous canopy », *Remote Sens. Environ.*, vol. 99, nº 3, p. 271‑287, nov. 2005.
[136] R. Retzlaff *et al.*, *UAS-based multi-angular remote sensing of the effects of soil managment strategies on grapevine*, vol. 49. 2015.
[137] « MULTIPLEX® RESEARCH – ForceA ». .
[138] P. Pinelli, A. Romani, E. Fierini, et G. Agati, « Prediction models for assessing anthocyanins in grape berries by fluorescence sensors: Dependence on cultivar, site and growing season », *Food Chem.*, vol. 244, p. 213‑223, avr. 2018.
[139] L. Tuccio, G. Agati, et G. Grassini, « Non-destructive fluorescence sensing for applications in precision viticulture », in *2015 International Conference on BioPhotonics (BioPhotonics)*, 2015, p. 1‑4.
[140] M. Milien, A.-S. Renault-Spilmont, S. J. Cookson, A. Sarrazin, et J.-L. Verdeil, « Visualization of the 3D structure of the graft union of grapevine using X-ray tomography », *Sci. Hortic.*, vol. 144, nº Supplement C, p. 130‑140, sept. 2012.
[141] B. A. Atayants, V. M. Davydochkin, V. V. Ezerskiy, V. S. Parshin, et S. M. Smolskiy, *Precision FMCW short-range radar for industrial applications*. ARTECH HOUSE, 2014.
[142] S. O. Piper, « Receiver frequency resolution for range resolution in homodyne FMCW radar », in *Conference Proceedings National Telesystems Conference 1993*, 1993, p. 169‑173.
[143] I. M. Milosavljević, Đorđe P. Glavonjić, D. P. Krčum, L. V. Saranovac, et V. M. Milovanović, « A highly linear and fully-integrated FMCW synthesizer for 60 GHz radar applications with 7 GHz bandwidth », *Analog Integr. Circuits Signal Process.*, vol. 90, nº 3, p. 591‑604, mars 2017.
[144] N. Pohl, T. Jaeschke, et M. Vogt, « Ultra high resolution SAR imaging using an 80 GHz FMCW-radar with 25 GHz bandwidth », in *EUSAR 2012; 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, 2012, p. 189‑192.
[145] S. Thomas, C. Bredendiek, T. Jaeschke, F. Vogelsang, et N. Pohl, « A compact, energy-efficient 240 GHz FMCW radar sensor with high modulation bandwidth », in *2016 German Microwave Conference (GeMiC)*, 2016, p. 397‑400.
[146] A. Meta, P. Hoogeboom, et L. Ligthart, « Range Non-linearities Correction in FMCW SAR », in *2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, p. 403‑406.
[147] M. I. Skolnik, *Radar Handbook, Third Edition*. McGraw-Hill Education, 2008.
[148] « Spline », *Wikipédia*. 01-mars-2018.
[149] *scipy: Scipy library main repository*. SciPy, 2018.
[150] W. E. Lorensen et H. E. Cline, « Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm », in *Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, New York, NY, USA, 1987, p. 163–169.

[151] P. Ramachandran et G. Varoquaux, « Mayavi: 3D Visualization of Scientific Data », *Comput. Sci. Eng.*, vol. 13, nº 2, p. 40‑51, mars 2011.
[152] T. T. Thai *et al.*, « A novel passive ultrasensitive RF temperature transducer for remote sensing and identification utilizing radar cross sections variability », in *2010 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2010, p. 1‑4.
[153] « Moindres carrés non linéaires », *Wikipédia*. 01-août-2017.
[154] F. J. M. Jr, « The Kolmogorov-Smirnov Test for Goodness of Fit », *J. Am. Stat. Assoc.*, vol. 46, nº 253, p. 68‑78, mars 1951.
[155] M. A. Stephens, « EDF Statistics for Goodness of Fit and Some Comparisons », *J. Am. Stat. Assoc.*, vol. 69, nº 347, p. 730‑737, sept. 1974.
[156] S. Nadarajah, « The skew logistic distribution », *AStA Adv. Stat. Anal.*, vol. 93, nº 2, p. 187‑203, juin 2009.
[157] « Fonction d'erreur », *Wikipédia*. 01-nov-2017.
[158] K. Pearson, « On the Criterion that a Given System of Deviations from the Probable in the Case of a Correlated System of Variables is Such that it Can be Reasonably Supposed to have Arisen from Random Sampling », in *Breakthroughs in Statistics*, Springer, New York, NY, 1992, p. 11‑28.
[159] W. Hergert et T. Wriedt, *The Mie Theory: Basics and Applications*. Springer, 2012.
[160] S. Prahl, *miepython: Mie scattering of a plane wave by a sphere*. .
[161] A. J. Wixted, P. Kinnaird, H. Larijani, A. Tait, A. Ahmadinia, et N. Strachan, « Evaluation of LoRa and LoRaWAN for wireless sensor networks », in *2016 IEEE SENSORS*, 2016, p. 1‑3.
[162] A. Dongare *et al.*, « OpenChirp: A Low-Power Wide-Area Networking architecture », in *2017 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, 2017, p. 569‑574.
[163] D. C. Malocha, J. Humphries, J. A. Figueroa, M. Lamothe, et A. Weeks, « 915 MHz SAW wireless passive sensor system performance », in *2016 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, 2016, p. 1‑4.
[164] D. Hotte, R. Siragusa, Y. Duroc, et S. Tedjini, « A Concept of Pressure Sensor Based on Slotted Waveguide Antenna Array for Passive MMID Sensor Networks », *IEEE Sens. J.*, vol. 16, nº 14, p. 5583‑5587, juill. 2016.
[165] D. Henry, P. Pons, et H. Aubert, « 3D scanning radar for the remote reading of passive electromagnetic sensors », in *2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, 2015, p. 1‑4.
[166] D. Henry, P. Pons, et H. Aubert, « 3D microwave imaging system for the remote detection and reading of passive sensors », in *2015 European Microwave Conference (EuMC)*, 2015, p. 259‑262.
[167] D. Henry, H. Aubert, et P. Pons, « Wireless passive sensors interrogation technique based on a three-dimensional analysis », in *2016 46th European Microwave Conference (EuMC)*, 2016, p. 49‑52.
[168] D. Henry, H. Aubert, et P. Pons, « 3D scanning and sensing technique for the detection and remote reading of a passive temperature sensor », in *2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 2016, p. 1‑4.
[169] D. Henry, H. Aubert, P. Pons, J. Lorenzo, A. Lázaro, et D. Girbau, « Technique for wireless reading of passive microfluidic sensors », *Electron. Lett.*, vol. 54, nº 3, p. 150‑151, 2018.
[170] J. G. D. Hester et M. M. Tentzeris, « Inkjet-Printed Flexible mm-Wave Van-Atta Reflectarrays: A Solution for Ultralong-Range Dense Multitag and Multisensing Chipless RFID Implementations for IoT Smart Skins », *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 64, nº 12, p. 4763‑4773, déc. 2016.
[171] D. Henry, J. G. D. Hester, H. Aubert, P. Pons, et M. M. Tentzeris, « Long-Range Wireless Interrogation of Passive Humidity Sensors Using Van-Atta Cross-Polarization Effect and Different Beam Scanning Techniques », *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 65, nº 12, p. 5345‑5354, déc. 2017.
[172] R. F. Harrington, « Theory of loaded scatterers », *Proc. Inst. Electr. Eng.*, vol. 111, nº 4, p. 617‑623, avr. 1964.

[173] S. Bouaziz, F. Chebila, A. Traille, P. Pons, H. Aubert, et M. M. Tentzeris, « Novel Microfluidic Structures for Wireless Passive Temperature Telemetry Medical Systems Using Radar Interrogation Techniques in Ka-Band », *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 11, p. 1706‑1709, 2012.
[174] J. G. D. Hester et M. M. Tentzeris, « Inkjet-printed Van-Atta reflectarray sensors: A new paradigm for long-range chipless low cost ubiquitous Smart Skin sensors of the Internet of Things », in *2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 2016, p. 1‑4.
[175] A. Meta, P. Hoogeboom, et L. P. Ligthart, « Signal Processing for FMCW SAR », *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 45, nº 11, p. 3519‑3532, nov. 2007.
[176] F. Belfiori, W. van Rossum, et P. Hoogeboom, « Application of 2D MUSIC algorithm to range-azimuth FMCW radar data », in *2012 9th European Radar Conference*, 2012, p. 242‑245.
[177] « Appellations viticoles Françaises : AOC, AOP, IGP - Vin-Vigne.com ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.vin-vigne.com/appellation/. [Consulté le: 02-mars-2018].
[178] « Vino Veritas: la guida vini online dal 2008 », *Vino Veritas*. [En ligne]. Disponible sur: http://www.vinoveritas.it/. [Consulté le: 02-mars-2018].
[179] T. Dufourcq, L. Gontier, E. Serrano, et N. Ollat, « Rapport surface foliaire et poids de recolte: incidences sur l'alimentation hydrique de la vigne, la qualite du mout, la qualite du vin de quatre cepages de midi-pyrenees », août 2005.
[180] « l'éclaircissage chimique ou physiologique ». [En ligne]. Disponible sur: https://vignevin-sudouest.com/publications/fiches-pratiques/eclaircissage-chimique.php#ancre7. [Consulté le: 21-mars-2018].
[181] P. Škrabánek et P. Doležel, *Robust Grape Detector Based on SVMs and HOG Features*, vol. 2017. 2017.
[182] M. Gatti, A. Garavani, A. Vercesi, et S. Poni, *Ground-truthing of remotely sensed within-field variability in a cv. Barbera plot for improving vineyard management: Vigour mapping and vineyard management*. 2017.
[183] J. B. Hasted, « Liquid Water: Dielectric Properties », in *The Physics and Physical Chemistry of Water*, Springer, Boston, MA, 1972, p. 255‑309.
[184] F. Chebila, « Lecteur radar pour capteurs passifs à transduction radio fréquence », phdthesis, Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2011.
[185] T. Veronese, D. Henry, et H. Aubert, « Systeme et procédé d'estimation du rendement d'une parcelle cultivée », WO/2016/174248, 04-nov-2016.
[186] D. Henry, H. Aubert, T. Veronese, et E. Serrano, « Remote estimation of intra-parcel grape quantity from three-dimensional imagery technique using ground-based microwave FMCW radar », *IEEE Instrum. Meas. Mag.*, vol. 20, nº 3, p. 20‑24, juin 2017.
[187] « Products – IMST Radar ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.radar-sensor.com/products/. [Consulté le: 16-mars-2018].
[188] « INRAS Products - Radarbook ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.inras.at/en/products/radarbook.html. [Consulté le: 16-mars-2018].
[189] E. Ozturk *et al.*, « Measuring Target Range and Velocity: Developments in Chip, Antenna, and Packaging Technologies for 60-GHz and 122-GHz Industrial Radars », *IEEE Microw. Mag.*, vol. 18, nº 7, p. 26‑39, nov. 2017.
[190] *scikit-image: Image Processing SciKit (Toolbox for SciPy)*. Image Processing Toolbox for SciPy, 2018.
[191] E. Serrano, S. Roussel, L. Gontier, et T. Dufourcq, « Early Estimation of Vineyard Yield : Correlation Between the Volume of a Vitis vinifera Bunch During its Growth and its Weight at Harvest », présenté à FRUITIC 05, Montpellier, France, 2005.
[192] *Shapely: Manipulation and analysis of geometric objects*. Toblerity, 2018.
[193] J. Canny, « A Computational Approach to Edge Detection », *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. PAMI-8, nº 6, p. 679‑698, nov. 1986.
[194] R. O. Duda et P. E. Hart, « Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures », *Commun ACM*, vol. 15, nº 1, p. 11–15, janv. 1972.
[195] A. Dore, M. Devy, et A. Herbulot, « Détection d'objets en milieu naturel : application à l'arboriculture », in *Proceedings of Journées Francophones des Jeunes Chercheurs en Vision par Ordinateur*, Colleville-sur-mer, France.

Publications

- **Articles dans des revues internationales à comité de lecture**

1.D. HENRY, H.AUBERT, T.VÉRONÈSE, É.SERRANO, "Remote Estimation of Intra-Parcel Grapes Quantity From Three-Dimensional Imagery Technique Using Ground-based Microwave FMCW Radar," IEEE Instrumentation and Measurement Magazine, Vol. 20, Issue 3, pp. 20-24, January 2017.

2. D. HENRY, J.G.D. HESTER, H. AUBERT, P. PONS AND M.-M. TENTZERIS, "Long Range Wireless Interrogation of Passive Humidity Sensors using Van-Atta Cross-Polarization Effect and Different Beam Scanning Technique," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 65, Issue 12, pp. 5345-5354, December 2017.

3. D. HENRY, H. AUBERT, P. PONS, J. LORENZO, A. LÁZARO, D. GIRBAU, "Novel technique for the wireless reading of passive microfluidic sensors," accepted for publication in Electronics Letters, 8 November 2017.

- **Brevet**

T. VERONESE, D. HENRY, H. AUBERT, System and method for estimating the yield of a cultivated plot, Reference : WO 2016/174248. Date de priorité : 30 avril 2015 (Reference: FR1553929).

- **Communications dans des conférences internationales à comité de lecture et actes publiés**

1. D.HENRY, P.PONS, H.AUBERT, "3D Scanning Radar for the Remote Reading of Passive Electromagnetic Sensors," IEEE International Microwave Symposium, Phoenix, USA, 17-22 May 2015.

2. D. HENRY, P. PONS, H. AUBERT, "3D Microwave Imaging System for the Remote Detection and Reading of Passive Sensors," European Microwave Conference, Paris, France, 7-10 September 2015.

3. D.HENRY, H.AUBERT, P.PONS, "3D Scanning and Sensing Technique for the Detection and Remote Reading of a Passive Temperature Sensor," IEEE International Microwave Symposium, San Francisco, California, USA, 22-27 May 2016.

4. D.HENRY, H.AUBERT, P.PONS, "Wireless Passive Sensors Interrogation Technique Based on a Three-Dimensional Analysis," European Microwave Conference, London, UK, 3-7 October 2016.

5. D. HENRY, J. HESTER, H. AUBERT, M. TENTZERIS, P. PONS, "Long Range Wireless Interrogation of Passive Humidity Sensors using Van-Atta Cross-Polarization Effect and 3D Beam Scanning Analysis," IEEE International Microwave Symposium, Honolulu, Hawaii, USA, 4-9 June 2017.

6. J. PHILIPPE, C. ARENAS, D. HENRY, A. COUSTOU, A. RUMEAU, H. AUBERT, P. PONS, "Passive and chipless packaged sensor for the wireless pressure monitoring in harsh environment," Eurosensors 2017, Paris, France, 3-6 September 2017.

7. C. ARENAS, J. PHILIPPE, D. HENRY, A. RUMEAU, H. AUBERT, P. PONS, "Wireless and Passive Nuclear Radiation Sensors," European Microwave Conference, Nuremberg, Germany, 9-13 October 2017.

- **Communications dans des conférences nationales à comité de lecture et actes publiés**

1.D.HENRY, H. AUBERT, P.PONS, “Imagerie Radar 3D en onde millimétrique pour la détection et la lecture des capteurs passifs et sans puce, ” Journées Nationales Microondes, Bordeaux, France 3-5 Juin 2015.

2. D. HENRY, H. AUBERT, P. PONS, “Méthode d’estimation pour l’interrogation et la lecture sans fil de capteurs passifs,” Journées Nationales Microondes, Saint-Malo, France 17-19 Mai 2017.

- **Communications invitées**

1. D. HENRY, A.RIFAI, P. PONS, H. AUBERT, “Millimetre-wave Scanning Radar for the Detection and Remote Reading of Passive Electromagnetic Sensors,” 9th European Conference on Antennas & Propagation, Convened Session on Chipless. Lisbon, Portugal, 12-17 April 2015.

2. H. AUBERT, P. PONS AND D. HENRY, “Wireless Detection, Identification and Reading of Passive Electromagnetic Sensors based on Beam-Steering FMCW RADAR,” 1st URSI Atlantic Radio Science Conference (URSI AT-RASC), Gran Canaria, 18-22 May 2015.

3. H. AUBERT, D. HENRY, “3D Active Imagery Technique Using Ground-based Microwave FMCW Radar for the Remote Estimation of Intra-Parcel Fruit and Vegetable Quantity,” invited talk to International Conference on Computing, Wireless and Communication Systems, Larache, Marocco, Nov. 14-16 (not presented due to last-minute visa issue).

4. H. AUBERT, D. HENRY, P. PONS, "Recent advances in the Wireless Reading of Passive Sensors," IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference (NMDC), session "Materials and devices for RF microsensors," Singapore, 2-4 October 2017.

- **Présentations lors de journées de recherche**

1. Poster lors de l’Assemblée Générale du GDR ONDES « Interférences d’Ondes », Lyon, 19 au 21 octobre 2015 : D. HENRY, H. AUBERT, P. PONS, “Interrogation sans fil et localisation de capteurs passifs sans puce par balayage radar 3D en environnement contraint”

2. Poster lors de l’Assemblée Générale du GDR ONDES, Nice, 23-25 Octobre 2017 : D. HENRY, H. AUBERT, T.VERONESE, E. SERRANO, “Estimation de la quantité intra-parcellaire de grappes de raisin par imagerie microonde 3D”

Imagerie radar en ondes millimétriques appliquée à la viticulture

Mots-clés : *Capteurs passifs, Imagerie radar, Radar micro-ondes, Télédétection, Viticulture de précision*

Avec l'expansion des exploitations agricoles, le principe d'homogénéité du rendement (céréales, fruits…) devient de moins en moins pertinent. Ce phénomène de variabilité spatiale implique des conséquences économiques et environnementales avec le développement de nouveaux concepts agricoles comme les « *site-specific management* » (gestion spécifique des parcelles). Les traitements tels que les fertilisants, les intrants et autres pesticides doivent être utilisés de manière différente en les appliquant au bon endroit, à la bonne période et au bon taux. Cette nouvelle façon de penser l'agriculture fait partie de l'agriculture de précision (PA) et se concentre en quatre domaines technologiques : (i) la télédétection, (ii) la navigation et guidage, (iii) la gestion des données et (iv) les technologies à taux variable. Initiée à la fin des années 1990, la viticulture de précision (PV) est une branche particulière de la PA, caractérisée par des problématiques spécifiques à la viticulture.

Les travaux effectués durant cette thèse entrent dans le cadre de la télédétection (ou détection proche) appliquée à la PV. Ils se focalisent sur une nouvelle méthode d'estimation de la quantité de grappes (masse ou volume) directement sur les plants de vignes. Pouvoir estimer le rendement des vignes plusieurs semaines avant la récolte offre de nombreux avantages avec des impacts économiques et qualitatifs, avec par exemple : (i) l'amélioration du rapport rendement/qualité en supprimant au plut tôt une partie de la récolte, (ii) l'optimisation des ressources humaines et la logistique à la récolte, (iii) un remboursement le plus équitable par les assurances en cas d'intempéries qui endommageraient les pieds de vignes. La méthode proposée ici repose sur l'imagerie microondes (à 24GHz ou des fréquences plus élevées) générée par un radar FM-CW. Elle implique la mise en place d'un système d'interrogation intra-parcellaire « pied par pied » à distance basé au sol, et en particulier : (i) l'évaluation de la précision des mesures et les limites du système, (ii) le développement d'algorithmes spécifiques pour l'analyse de données tridimensionnelles, (iii) la construction d'estimateurs pour retrouver le volume des grappes, et finalement (iv) l'analyse des données recueillies pendant les campagnes de mesures. Dû au caractère saisonnier des récoltes, les mesures sont en premier lieu effectuées sur des cibles canoniques, des charges variables et des capteurs passifs en laboratoire. Pour mettre en avant la flexibilité de cette interrogation radar, le même système est utilisé en parallèlement dans le cadre du projet régional PRESTIGE, pour compter à distance le nombre de pommes présentes sur les pommiers en verger.

Ces travaux ont été financés par l'entreprise Ovalie-Innovation et l'ANRT (Agence Nationale de la Recherche Technologique).

Millimeter-wave radar imagery for viticulture application

Keywords: *Millimeter-wave radar, Passive sensors, Precision viticulture, Radar imagery, Remote sensing*

With the expansion of farm operations, the principle of homogeneity of crop yields (cereals, fruits …) becomes less and less relevant. This observation of spatial variabilities implies economic and environmental consequences with the development of new arrangements of agricultural works such as "site-specific management". Treatments such as fertilizers, nutrients and pesticides must be used differently by applying them at the right time, right place and right rate. This new way to think the agriculture is called precision agriculture (PA) and gathers four technological fields: (i) remote sensing, (ii) navigation and guidance, (iii) data management and (iv) variable-rate technologies. Precision viticulture (PV) is an application of PA which was initiated in the late 90's and is characterized by issues specific to viticulture.

Work carried out during this thesis is a direct application of remote sensing (or proximal sensing) applied to PV. It focuses on a new method of remote sensing of grapes quantity (mass or volume) directly on vine plants. Estimating the quantity of grapes several weeks before harvesting offers many advantages with qualitative and economic impacts such as: (i) improving the yield / quality ratio with an early removal of a part of the harvest, (ii) optimizing human resources and equipment during the grape harvest, and (iii) be fairly compensated by insurances in case of severe weather conditions that damaged the vine plants. The method proposed here relies on microwave imagery (24 GHz and higher) generated by a FM-CW radar. It implies the set-up of ground-based remote reading system for a plant-by-plant intra-parcel analysis and particularly: (i) evaluating the measurement accuracy, precision and limits of the system, (ii) developing specific algorithms in order to analyze three-dimensional volume data, (iii) building statistical estimators for retrieving the volume of grapes and finally (iv) analyzing data acquired during field measurements. Because of the seasonality of the grape harvest, measurements are firstly performed on canonic targets, variable loads and passive sensors in laboratory. To enlighten the flexibility of the radar interrogation technique, the same system is also used as part of the regional project PRESTIGE to remotely count the number of apples on trees in orchards.

This work has been funding by the company Ovalie-Innovation and the ANRT (Agence Nationale de la Recherche Technologique).