HAL
open science

Etude et modélisation du comportement des gouttelettes de produits phytosanitaires sur les feuilles de vignes par imagerie ultra-rapide et analyse de texture

Thomas Decourselle

To cite this version:

Thomas Decourselle. Etude et modélisation du comportement des gouttelettes de produits phytosanitaires sur les feuilles de vignes par imagerie ultra-rapide et analyse de texture. Autre. Université de Bourgogne, 2013. Français. NNT : 2013DIJOS033 . tel-00949360

HAL Id: tel-00949360

https://theses.hal.science/tel-00949360v1

Submitted on 19 Feb 2014

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.

SPIM

Thèse de Doctorat

école doctorale **sciences pour l'ingénieur et microtechniques**

UNIVERSITÉ DE BOURGOGNE

Thèse présentée par

Thomas DECOURSELLE

Pour obtenir le titre de

Docteur de l'Université de Bourgogne

Spécialité : **Instrumentation et Informatique de l'Image**

Etude et modélisation du comportement des gouttelettes de produits phytosanitaires sur les feuilles de vigne par imagerie ultra-rapide et analyse de texture

Thèse soutenue le 23 ocotobre 2013 devant le jury composé de

Marie-France Destain	Professeur - Université de Liège	Rapporteur
Audrey Minghelli-Roman	MCF-HDR - Université de Toulon	Rapporteur
Carole Sinfort	Professeur - Montpellier SupAgro	Examinateur
Pierre Bonton	Professeur - Université de Clermont-Ferrand	Examinateur
Frédéric Cointault	MCF-HDR - AgroSup Dijon	Examinateur
Fan Yang	Professeur - Université de Bourgogne	Directeur
Ludovic Journaux	MCF - AgroSup Dijon	Encadrant

« La plus grande gloire n'est pas de ne jamais tomber, mais de se relever à chaque chute. »

Confucius

Remerciements

Il me sera très difficile de remercier tout le monde car c'est grâce à l'aide de nombreuses personnes que j'ai pu mener cette thèse à son terme. Certains lecteurs seront peut-être déçus de ne pas voir figurer leurs noms dans ces remerciements, j'espère qu'ils sauront me pardonner ces oublis.

Je tiens tout d'abord à remercier grandement mon directeur de thèse, Fan Yang, pour toute sa contribution. Je suis ravi d'avoir travaillé en sa compagnie car outre son appui scientifique dans le cadre de sa spécialité, elle a été de précieux conseils même lorsque mes interrogations concernaient des domaines annexes. Son soutien dans les moments difficiles ainsi que ses encouragements ont également contribué à l'accomplissement de cette thèse.

J'adresse de sincères remerciements à mon encadrant de thèse, Ludovic Journaux, pour toute l'attention qu'il a portée à mes travaux durant ces années de thèse. N'hésitant pas à partager ses connaissances, il me fut d'un grand secours, notamment dans l'univers des statistiques où mon savoir limité représentait un frein à l'avancement de mes travaux. L'autonomie et la confiance qu'il m'a accordées ont également été très enrichissantes et ont permis la meilleure expression de mon raisonnement scientifique.

Marie-France Destain et Audrey Minghelli-Roman m'ont fait l'honneur d'accepter le rôle de rapporteurs pour ma thèse. Elles ont analysé ce manuscrit avec beaucoup de soin malgré la période estivale et les contraintes de temps. Leurs corrections, remarques ou suggestions m'ont permis d'apporter des améliorations à la qualité de celui-ci. Pour tout cela, je les remercie.

Je remercie également Carole Sinfort et Pierre Bonton pour l'honneur qu'ils me font de participer à mon jury de thèse.

Il m'est impossible d'oublier Frédéric Cointault qui est à l'origine de cette

thèse. Sans appartenir officiellement à l'encadrement de ma thèse, il a toujours été présent. Malgré un emploi du temps surchargé, il a constamment consacré une partie de son temps à lire mes travaux, à les critiquer si besoin était. Ses remarques très souvent pertinentes ont constitué une aide considérable lors de la rédaction d'articles ou de ce manuscrit en particulier.

Je souhaite aussi exprimer toute ma gratitude envers un ami doctorant, Bastien, avec qui j'ai partagé le même bureau pendant la majorité de ces dernières années. Entre nous, le partage ne s'est pas simplement résumé à de simples locaux, il est allé bien au-delà. Nos goûts respectifs pour la gastronomie, notre passion commune pour les nouvelles technologies, l'échange réciproque de nos savoirs, le soutien mutuel dans les moments difficiles, tout cela ne pouvait que renforcer notre amitié. Tu as joué un rôle important dans cette thèse. Merci Biloute !

Merci aussi à Jean-Claude pour ses nombreux conseils et le temps qu'il a pris pour m'aider lors de mes premiers enseignements. Merci Patricia, Rachid, Paul, Christine, Jean-Pierre, Jean-Noël, Philippe, Guillaume, Romual, Bilal, Sofija, Simeng, Houda, Lucile, Marion, Claude, Jean-Luc, Vanessa, Gabriel, Benjamin, Jean-Claude, Fred, Isabelle pour votre participation sous de multiples formes à la réalisation de cette thèse. Le nombre de pages imparti aux remerciements ne me permet pas de plus mettre en valeur votre contribution indivduelle, néanmoins ce serait une maladresse de ma part que de ne pas vous citer. Une nouvelle fois, merci à vous.

Mes amis, même si parfois je n'ai eu que peu de temps à vous consacrer, sachez que votre rôle aura été prépondérant. Nico, Cyril, Marion, Tof, JB, Pierrot, Amel, Alain, Alex, Ambroise, Mathias, Sylvie, vous avoir à mes côtés a été d'un renfort inestimable. Je vous en suis infiniment reconnaissant.

Finalement, j'adresse un grand merci à toute ma famille qui a toujours été présente lorsque j'en ai eu besoin, en particulier à mon frère, à ma soeur et sa moitié, à mon père et à ma mère.

A tous, du fond du coeur, merci !

Résumé

Dans le contexte actuel de diminution des pollutions d'origine agricole, la réduction des apports d'intrants devient un enjeu primordial. En France, la viticulture est l'activité qui possède le taux le plus important de traitements phytosanitaires par unité de surface. Elle représente, à elle seule, 20% de la consommation annuelle de pesticides. Par conséquent, il est nécessaire d'étudier le devenir des pesticides appliqués afin de réduire les quantités perdues dans l'environnement. Dans le cadre de la réduction d'apport de produits phytosanitaires dans les vignes, de nombreux travaux ont été effectués sur la modélisation du comportement d'un spray de gouttelettes et sa répartition au niveau de la parcelle et de l'air environnant. Cependant, il est également important de s'intéresser au comportement de la gouttelette directement au niveau de la feuille. Les progrès dans le domaine de l'imagerie et la diminution du coût des systèmes ont rendus ces systèmes beaucoup plus attractifs. Le travail de cette thèse consiste en la mise en place d'un système d'imagerie rapide qui permet l'observation du comportement à l'impact de gouttelettes répondant aux conditions de pulvérisation. Les caractéristiques ainsi que le comportement associé de chaque gouttelette sont extraits grâce à une méthode de suivi d'objets. Une analyse statistique basée sur un nombre représentatif de résultats permet ensuite d'évaluer de manière robuste le devenir d'une goutte en fonction de ses caractéristiques. Parallèlement, un paramètre décrivant l'état de surface de la feuille est également étudié grâce à l'imagerie : la rugosité. Elle joue un rôle prédominant dans la compréhension des mécanismes d'adhésion en influençant le comportement de la goutte lors de l'impact. La validation d'une méthode d'analyse de textures permettant de caractériser la rugosité des surfaces naturelles est également proposée dans ces travaux.

Mots-clés : pulvérisation, imagerie rapide, suivi d'objets, analyse de textures

Abstract

In the domain of vineyard precision spraying research, one of the most important objectives is to minimize the volume of phytosanitary products ejected by a sprayer in order to be more environmentally respectful with more effective vine leaf treatments. Unfortunaltely, even if lot of works have been carried out at a parcel scale, mainly on losses caused by drift, less works have been carried out at the leaf scale in order to understand which parameters influence the spray quality. Since few years, recent improvements in image processing, sensitivity of imaging systems and cost reduction have increased the interest of high-speed imaging techniques. Analyzing the behavior of droplets after impact with the leaf thanks to high speed imaging technology is a relevant solution. By this way, we propose a droplets behavior analyzing process in vineyard spraying context based on high-speed acquision system combined with image processing techniques. This process allows us to extract droplets parameters. Therefore, a statistical study is processed in order to determine the effects of droplets parameters on leaf impact or to predict behavior of a single droplet. Since this behavior is strongly related to leaf surface, we also propose to validate a natural leaf roughness characterization method based on texture analysis.

Keywords : spraying, high-speed imaging, tracking, texture analysis

Table des matières

Remerciements **v**

Résumé **vii**

Abstract **ix**

Table des figures **xiii**

Liste des tableaux **xvii**

Introduction **1**

1 Contexte et problématique **5**

1.1 Problématique environnementale 6

1.1.1 L'agriculture française et la consommation de pesticides 6

1.1.2 La consommation de pesticides : un risque pour l'environnement 8

1.1.3 Vers une réduction des intrants 9

1.2 Spécialisation à la viticulture 11

1.2.1 Etat de l'art des techniques d'application 12

1.2.2 L'étude de la pulvérisation en viticulture 18

2 Analyse de texture pour l'étude de la feuille **31**

2.1 Introduction 32

2.2 La mesure de la rugosité 37

2.2.1 La mesure mécanique 39

2.2.2 La mesure optique 40

2.3 Caractérisation de la rugosité par analyse de texture 46
2.3.1 Définitions de la texture 46
2.3.2 Etat de l'art en analyse de textures 47
2.3.3 Bilan 59

3 Acquisition pour observation des gouttes 61
3.1 Description du système d'acquisition 62
3.1.1 Vue d'ensemble du système 62
3.1.2 Les contraintes liées à la pulvérisation 64
3.2 Conception du système 65
3.2.1 La caméra rapide 65
3.2.2 Le système optique 66
3.2.3 Les réglages de la caméra 74
3.2.4 Le rétro-éclairage 75
3.2.5 La surface d'impact 78
3.2.6 La génération des gouttes 78

4 Tracking pour analyse des gouttes 89
4.1 Etat de l'art en analyse de mouvement 90
4.1.1 La détection du mouvement 91
4.1.2 L'estimation du mouvement 92
4.2 Spécialisation au suivi d'objets (tracking) 99
4.2.1 Les modes de représentation de l'objet 99
4.2.2 Les méthodes de détection de l'objet 101
4.2.3 Les méthodes de mise en correspondance 105
4.2.4 La méthode de suivi proposée 112
4.3 L'analyse statistique des résultats du suivi 116

Conclusion et Perspectives 123

Bibliographie 127

Table des figures

1.1 Modes de transfert des phytosanitaires vers les eaux et l'atmosphère (source : Fédération Régionale de Défense contre les Organismes Nuisibles Poitou - Charentes) 8
1.2 Chiffres d'affaires métropole basés sur les années civiles 1997 à 2011 (en millions d'euros) selon l'UIPP 10
1.3 (a) Principe du jet projeté avec une buse à turbulence, (b) Appareil de pulvérisation à jet projeté, source : Institut Français de La Vigne et du Vin (IFV) 13
1.4 (a) Principe du jet porté avec une buse à turbulence, (b) Appareil de pulvérisation à jet porté (Source : IFV) 14
1.5 (a) Principe de la pulvérisation pneumatique, (b) Appareil de pulvérisation pneumatique (Source : IFV) 15
1.6 Détail et module de pulvérisation centrifuge (Source : IFV) . . 16
1.7 Pulvérisation par hélicoptère (photo Dominique Barras) 17
1.8 Les 6 clés de l'efficacité des pulvérisations [Deveau et al., 2009] 19
1.9 Ramassage des collecteurs aux différentes distances étudiées suite au passage du pulvérisateur (source IFV, Sébastien Codis) 21
1.10 Collecteur plastique disposé dans la vigne en vue d'évaluer la qualité de la pulvérisation (source IFV, Sébastien Codis) . . . 21
1.11 Aspect d'un papier hydrosensible après passage d'un pulvérisateur avec de l'eau (photo : B. Alban) 22
1.12 Interprétation des résultats sur papier hydrosensible (source : Chambre d'Agriculture de la Côte-d'Or) 23
1.13 Test de pulvérisation à la fluorescéine (source : `http://www3.syngenta.com`) 24
1.14 Schéma du PDPA [Schick, 2008] 25

1.15 Schéma du LDA [Schick, 2008] 26
1.16 Schéma du OAP [Schick, 2008] 26
1.17 Schéma du PDIA [Schick, 2008] 28

2.1 Les différentes phases lors de l'impact (a) la phase cinématique, (b) la phase d'étalement, (c) la phase de recul, (d) la phase finale [Roisman et al., 2002] 32
2.2 Les comportements possibles d'une goutte lors de l'impact . . 33
2.3 Ligne de contact et angle de contact 34
2.4 Angles et diamètres d'avancée et de reculée (θ_{adv}, d_a, θ_{rec}, d_r) [Rioboo et al., 2002] 35
2.5 Selon [Quéré and Reyssat, 2008], les modèles de Cassie-Baxter (a) et de Wenzel (b) 35
2.6 Quelques paramètres de rugosité 38
2.7 Effet du rayon de courbure du diamant sur l'erreur de mesure 39
2.8 Principe du dispositif de Michelson avec l'objectif O, la surface de référence R (miroir fixe), le prisme diviseur P et la surface de l'objet S [Mathieu et al., 2003] 40
2.9 Principe du dispositif de Mirau avec l'objectif O, la surface de référence R, le miroir diviseur M et la surface de l'objet S [Mathieu et al., 2003] 40
2.10 Rugosimètre interférométrique de l'IUT de Chalon sur Saône . 41
2.11 Mesures de rugosité sur la feuille de vigne en lumière blanche (a), lumière verte (b) avec un grossissement de 5.0 X 43
2.12 Mesures de rugosité sur la feuille de vigne en lumière blanche (a), lumière verte (b) avec un grossissement de 30.3 X 44
2.13 Microscope électronique à balayage FEI ESEM-XL30 45
2.14 Image représentant un échantillon de la surface d'une feuille de vigne acquise au MEB 45
2.15 La construction du Descripteur Généralisé de Fourier 53
2.16 Exemple de calcul du DGF (a) Image originale, (b) Transformée de Fourier, (c) Allure du vecteur caractéristique ou DGF . . . 53
2.17 Le phénomène de Hughes d'après [Journaux et al., 2006] . . . 54

2.18 Base d'images agronomiques utilisée par [Journaux et al., 2008] (tomate, ray grass, blé mûr, pois, blé jeune, prêle) 56
2.19 Images bruitées selon cinq niveaux de bruit (écart-type : 0, 0.03, 0.08, 0.12, 0.16, 0.19) 57

3.1 Schéma du système d'acquisition 63
3.2 Acquisition avec une caméra standard d'une goutte illuminée par une lumière d'appoint sur fond noir (a) ou par rétro-éclairage (b) 64
3.3 Caméra Redlake's MotionPro HS-3 65
3.4 Exemples d'ouvertures relatives 70
3.5 (a) Mire à damiers (b) Orientations de la mire 73
3.6 Modèle complet de distorsion de l'objectif de 50 mm 73
3.7 Projecteur halogène d'une puissance de 500 W 75
3.8 Système d'illumination à LED de puissance avec dissipateur thermique 76
3.9 La surface d'impact 78
3.10 Système piézo-électrique de génération de gouttes (1 : buse en verre, 2 : composant piézo-électrique, chambre d'éjection, 3 : pince, 4 : tuyaux transparents en plastique souple) photo S. Vulgarakis 79
3.11 Paramètres d'éjection en mode à la demande 80
3.12 Buses en verre de diamètre : 50, 100, 150 et 200 µm (de gauche à droite) photo S. Vulgarakis 81
3.13 Séquence acquise avec la buse d'orifice 200 µm ($t_p = 0.1$ et $t_a = 5$ ms) 82
3.14 Pulvérisateur industriel « Brard et Sarran » 84
3.15 Buses « Nozal » de type AFX (de gauche à droite : modèles n°015, 02, 06, 08) 85
3.16 Schéma du système de protection et de filtrage 86
3.17 Système complet 87
3.18 Séquence acquise avec le pulvérisateur 87

4.1 Soustraction d'arrière-plan (Images de Vincent Veilleux Gaboury, Université de Sherbrooke) 92
4.2 Principe d'appariement par correspondance de blocs 93
4.3 Illustration du problème d'ouverture 96
4.4 Exemple de calcul de flot optique (a) image à $t = 0$, (b) image à $t = 1$, (c) flot optique calculé avec la méthode de Lucas et Kanade 98
4.5 Illustration du détecteur de Harris [Chetverikov and Kropatsch, 1993] 102
4.6 Application du filtre de Canny sur l'image de Lena [Maini and Aggarwal, 2009] 103
4.7 Illustration de la mise en correspondance de formes entre deux images (a) image à l'instant t, (b) image à l'instant $t + 1$ . . . 107
4.8 (a) Précédent contour affiché en bleu sur une portion de l'image courante, (b) image représentant l'énergie externe, (c) image représentant l'évolution du snake en vert (d) Contour actuel affiché en rouge dans l'image courante 112
4.9 Schéma explicatif de l'algorithme de suivi des gouttes 113
4.10 Séquence d'impact de goutte avec adhésion 115
4.11 Séquence d'impact de goutte avec rebond 115
4.12 Séquence d'impact de goutte avec éclatement 116
4.13 Illustration du comportement des gouttes par projection des scores factoriels 117
4.14 Pourcentages d'inertie des axes 118
4.15 Illustration de l'influence de la vitesse sur le comportement (vitesse en $m.s^{-1}$) 119
4.16 Illustration de l'influence du diamètre sur le comportement (diamètre en μm) 119
4.17 Illustration de l'influence du nombre de Weber sur le comportement 121

Liste des tableaux

1.1 Produits phytosanitaires utilisés en Europe en 2001 en tonnes de matières actives selon l'ECPA, SAU selon les données FAOSTAT. 7
1.2 Occupation du territoire et consommation de pesticides pour quelques espèces (source UIPP) 11
1.3 Tableau récapitulatif des principales techniques de pulvérisation en viticulture 18

2.1 Caractéristiques des méthodes de RD sélectionnées 55
2.2 Taux d'erreur de classification (en %) sur la base de Brodatz en fonction du bruit et de la méthode de RD 57
2.3 Taux d'erreur de classification (en %) sur la base d'images naturelles en fonction du bruit et de la méthode de RD 58
2.4 Temps de calcul moyen (en s) pour chaque méthode de RD . . 59

3.1 Distances de travail théoriques pour différents objectifs 67
3.2 Allonges théoriques et nouvelles distances de mise au point pour différents objectifs 69
3.3 Ouvertures relatives des différents objectifs et profondeurs de champs calculées 71
3.4 Récapitulation des caractéristiques du dispositif optique sélectionné 72
3.5 Combinaisons de t_p et de t_a conduisant à la génération de gouttes uniques 82
3.6 Vitesses et diamètres moyens pour les buses 50 et 100 µm et combinaison (t_a, t_p) 83

3.7 Vitesses et diamètres moyens pour les buses 150 et 200 µm et combinaison (t_a, t_p) 83
3.8 Débits théoriques en fonction de la buse et de la pression . . . 85

4.1 Mise en correpondance de forme basée sur l'aire et la circularité 106

Introduction

Dans le contexte actuel de diminution des pollutions d'origine agricole, la réduction des apports d'intrants devient un enjeu primordial et notamment en viticulture où le taux de traitements est très élevé. Dans le cadre de la réduction d'apport de produits phytosanitaires dans les vignes, de nombreux travaux ont été effectués sur la modélisation du comportement d'un spray de gouttelettes et sa répartition au niveau de la parcelle et de l'air environnant. Cependant, il est également important de s'intéresser au comportement de la gouttelette directement à l'échelle de la feuille, ce qui est l'objectif de ces travaux de recherche. En effet, cette analyse était réalisée de façon empirique et donc subjective jusqu'à aujourd'hui par l'utilisation de papiers hydrosensibles. Ces derniers fournissent une mauvaise représentation de l'état de surface de la feuille et présentent un coût temporel élevé lors de l'acquisition des données. Pour éviter ce lourd travail de terrain et les problèmes qui en découlent, il est possible d'avoir recours à des techniques plus innovantes pour étudier la pulvérisation, et plus particulièrement l'impact des gouttes, c'est le cas de l'imagerie.

Les objectifs principaux à atteindre sont la mise en place d'un système d'acquisition permettant l'observation des gouttes juste avant et lors de l'impact ainsi que le développement d'une méthode de traitement permettant l'extraction des caractéristiques de la goutte ainsi que de son comportement. Un objectif secondaire consiste en l'extraction de paramètres permettant de rendre compte de l'état de surface de la feuille.

Ce manuscrit s'articule ainsi autour de quatre chapitres :

Chapitre 1 : Contexte et problématique

Le premier chapitre expose le contexte général d'utilisation des produits phytosanitaires et le risque de pollution engendré par l'utilisation intensive de ces produits. Puis une spécialisation au domaine de la viticulture est réalisée. Les différents modes de pulvérisation sont détaillés ainsi que leurs caractéristiques. Un état de l'art sur les techniques permettant d'analyser la qualité d'une pulvérisation est également effectué. Face aux limites des techniques existantes, il en ressort que l'imagerie semble être une solution adaptée pour analyser le processus de pulvérisation.

Chapitre 2 : Analyse de texture pour l'étude de la surface de la feuille

Le second chapitre est entièrement consacré à l'extraction de paramètres de surface jouant un rôle important dans le comportement de la goutte lors de l'impact. Un paramètre prédominant dans le mécanisme d'adhésion des gouttes concerne la rugosité. La mesure de la rugosité est un problème complexe dans le cas de surfaces naturelles, notamment car les techniques les plus courantes (mesure de contact avec un palpeur) ne peuvent être utilisées car elles déteriorent la surface étudiée. Une approche basée sur l'analyse de textures pour caractériser la rugosité est alors proposée.

Chapitre 3 : Acquisition pour observation des gouttes

Le comportement des gouttes n'est pas seulement lié à la surface de la feuille, il est également lié aux caractéristiques de la goutte. Ce chapitre vise à proposer la mise en place d'un système d'acquisition adapté permettant l'observation du comportement des gouttes et l'extraction de ses caractéristiques. La difficulté réside dans le fait que les gouttes observées dans les conditions de pulvérisation sont de petites tailles et peuvent atteindre des vitesses importantes.

Chapitre 4 : Tracking pour analyse des gouttes

Ce chapitre traite de l'analyse des informations contenues dans les images acquises par le système mis au point. Un état de l'art des techniques permettant l'étude du mouvement à partir de séquence d'images est réalisé. Une approche de suivi d'objets est proposée. Elle permet de répondre aux difficultés observées dans les séquences d'images, à savoir les vitesses et les déformations importantes des gouttes. Cette technique permet l'extraction des caractéristiques de la gouttes ainsi que de son comportement. L'influence de ces paramètres est finalement étudiée grâce à une analyse statistique.

Cette dernière étape validera les méthodes d'analyse d'images mise en place pour l'extraction des caractéristiques de goutte et de surface ainsi que le système d'acquisition mis en place pour observer l'impact.

1 Contexte et problématique

Ce chapitre est essentiellement consacré au développement de la problématique liée à ces travaux de thèse. A partir des questions environnementales soulevées par l'utilisation intensive de produits phytosanitaires dans un contexte général, la réduction de la quantité d'intrants est au centre des préoccupations. Afin de parvenir à cet objectif, le perfectionnement des techniques d'application ainsi que l'amélioration des produits sont des pistes possibles. Plus particulièrement en viticulture, la mise en place d'outils permettant d'analyser la pulvérisation est nécessaire. Dans cette optique, nous proposons d'utiliser l'imagerie et des techniques de traitement d'image associées afin d'observer le processus de pulvérisation et d'extraire les paramètres pertinents dont dépend la qualité de la pulvérisation.

1.1 Problématique environnementale

1.1.1 L'agriculture française et la consommation de pesticides

L'agriculture moderne utilise de grandes quantités d'intrants chimiques et énergétiques pour garantir des rendements relativement élevés, pour la fertilisation ou pour la lutte contre les nuisibles. La plupart des ravageurs et des maladies est traitée avec des bouillies de pulvérisation, contenant ce qui est communément appelé des pesticides, également connus sous le nom de produits phytosanitaires ou phytopharmaceutiques. Ces derniers sont regroupés en 3 catégories : les herbicides (lutte contre le développement de plantes adventices, c'est-à-dire les mauvaises herbes), les fongicides (lutte contre les maladies et les champignons) et les insecticides (lutte contre les insectes). Les pesticides sont majoritairement utilisés pour des usages agricoles (plus de 90%) mais aussi pour l'entretien des espaces publics, des infrastructures de transport et le jardinage par les particuliers.

Le thème de la consommation des pesticides est très peu abordé dans la littérature scientifique classique. Pour le traiter, il est nécessaire de se rapporter à des rapports d'études publiés par différents organismes tels que l'European

Crop Protection Association [1] (ECPA), l'Union des Industries de la protection des plantes [2] (UIPP), les Ministères, la Food and Agriculture Organization [3] (données FAOSTAT). Selon les rapports de l'UIPP, la France est en 2011 le 4ème consommateur mondial de pesticides après le Brésil, les Etats-Unis et le Japon et le 1er utilisateur en Europe en volume total. En 2001, la consommation française représentait 34% des consommations de l'Europe des 15 comme présenté dans le Tableau 1.1, ce qui plaçait la France à la première place européenne en termes de consommation, mais aussi à la troisième position derrière le Portugal et les Pays-Bas si l'on rapporte la consommation à la Surface Agricole Utile (SAU).

	Fongicides		Herbicides		Insecticides		Divers		Total	% (a)	SAU/ SAU UE 15 (b)	Ratio (a)/(b)
	Tonnes	%	Tonnes	%	Tonnes	%	Tonnes	%				
France	54130	54,3%	32122	32,2%	2487	2,5%	10896	10,9%	99635	34,3%	21,0%	**1.6**
Italie	23288	51,8%	8191	18,2%	9747	21,7%	3741	8,3%	44967	15,5%	11,0%	**1.4**
Espagne	13790	33,7%	10374	25,4%	11631	28,4%	5099	12,5%	40894	14,1%	21,1%	0.7
Allemagne	8418	32,1%	13337	50,9%	868	3,3%	3601	13,7%	26224	9,0%	12,1%	0.7
Portugal	13915	56,0%	6399	25,7%	2616	10,5%	1926	7,7%	24856	8,5%	2,9%	**2.9**
Royaume Uni	3628	18,0%	11817	58,6%	857	4,2%	3874	19,2%	20176	6,9%	12,0%	0.6
Grèce	4860	43,7%	2650	23,9%	2638	23,7%	963	8,7%	11111	3,8%	6,0%	0.6
Pays Bas	3628	46,1%	2172	27,6%	227	2,9%	1840	23,4%	7867	2,7%	1,4%	**1.9**
Belgique/Lux.	1595	31,5%	2345	46,3%	560	11,1%	566	11,2%	5066	1,7%	1,1%	**1.5**
Autriche	1088	38,6%	1317	46,7%	94	3,3%	322	11,4%	2821	1,0%	2,4%	0.4
Danemark	511	19,5%	1925	73,5%	66	2,5%	116	4,4%	2618	0,9%	1,9%	0.5
Suede	339	18,2%	1462	78,4%	24	1,3%	40	2,1%	1865	0,6%	2,2%	0.3
Finlande	192	13,4%	1120	78,2%	42	2,9%	78	5,4%	1432	0,5%	1,6%	0.3
Irlande	410	30,7%	795	59,6%	84	6,3%	45	3,4%	1334	0,5%	3,1%	0.2
Europe des 15	129792	44,6%	96026	33,0%	31941	11,0%	33107	11,4%	290866	100%	100%	

Tableau 1.1: Produits phytosanitaires utilisés en Europe en 2001 en tonnes de matières actives selon l'ECPA, SAU selon les données FAOSTAT.

La consommation de pesticides occupe donc une place prépondérante dans l'agriculture française. L'accroissement de la productivité des exploitations agricoles est inévitable, les pesticides remplissent parfaitement leur fonction première, mais est-ce la seule conséquence de leur utilisation ?

1. http ://www.ecpa.eu/
2. http ://www.uipp.org/
3. http ://www.fao.org/index_fr.htm

1.1.2 La consommation de pesticides : un risque pour l'environnement

L'opinion publique semble prendre conscience de la relation entre les doses de pesticides appliquées d'une part, et les risques pour la santé et l'environnement d'autre part. En effet, compte tenu de l'utilisation importante des pesticides, des résidus de pesticides peuvent être retrouvés dans les différents compartiments environnementaux (eaux, sols, air et dans les denrées alimentaires) selon la Fédération Régionale de Défense contre les Organismes Nuisibles Poitou - Charentes. Lors de l'application d'une substance, de nombreux paramètres influencent son transfert vers l'environnement : météorologie, propriétés intrinsèques de la substance (mobilité, dégradation, solubilité, volatilité...), type de sol, végétation, topographie... Les modes de transferts dominants sont représentés sur la Figure 1.1.

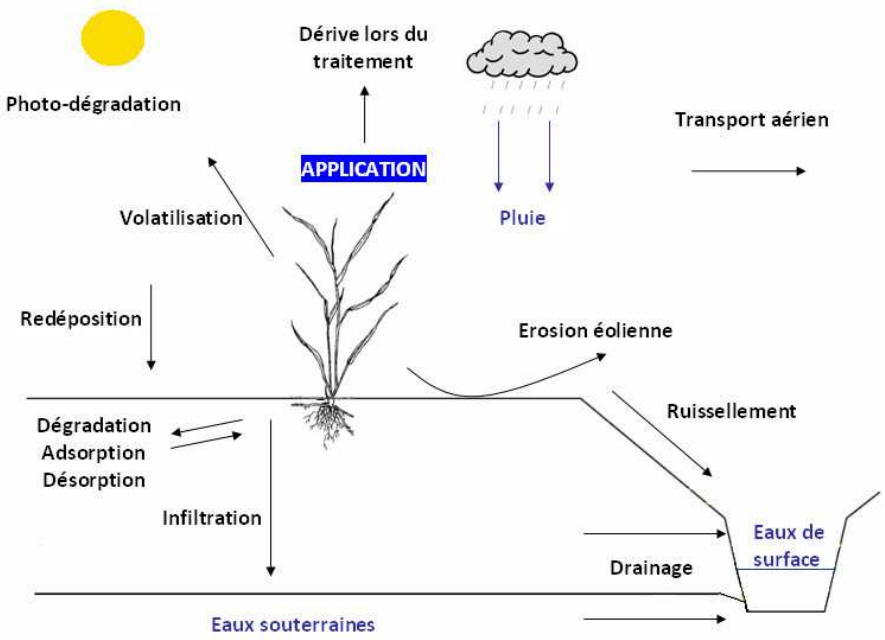


Figure 1.1: Modes de transfert des phytosanitaires vers les eaux et l'atmosphère (source : Fédération Régionale de Défense contre les Organismes Nuisibles Poitou - Charentes)

Les pesticides épandus au sein des agrosystèmes se diffusent à la fois dans l'air, l'eau et le sol par ces différents processus de transfert. La volatilisation représente la transformation des pesticides sous forme liquide (ou solide) en gaz seulement quelques heures après leur application.. Elle entraîne leur transport dans l'atmosphère par le vent. Ils peuvent ainsi se déposer plus en aval des versants, loin de la zone d'épandage initiale. Le vent joue également un rôle important, avec l'évaporation, dans le transport des pesticides sous leur forme initiale (liquide ou solide) en dehors de la zone traitée au cours de l'application, il s'agit du phénomène de dérive. Des pertes dans l'atmosphère se produisent sous l'effet de la photo-dégradation. Le mécanisme de photo-dégradation représente la décomposition des produits phytosanitaires par le rayonnement solaire. Le ruissellement, l'érosion, l'infiltration dans le sol sont quant à eux responsables de la diffusion des produits phytosanitaires vers les eaux de surface et souterraines.

En France, selon l'Institut Français de l'Environnement, neuf rivières sur dix ont été contrôlées en 2005 comme présentant un ou plusieurs produits phytosanitaires. 91% des rivières et 55% des eaux souterraines contiendraient des produits phytosanitaires toujours selon cette même source [4].

1.1.3 Vers une réduction des intrants

Par conséquent, la question environnementale doit être intégrée au cœur des pratiques agricoles. L'Union Européenne a, depuis le début des années 80, décidé d'encadrer l'utilisation des produits phytosanitaires afin de réduire leur impact avéré sur l'environnement et la santé humaine. Cet encadrement s'est fait par exemple à l'aide de normes instaurant des teneurs maximales en pesticides pour l'eau potable et les aliments. Encore plus récemment, le contexte réglementaire qui encadre les pratiques agricoles en Europe a évolué, notamment par l'adoption, le 13 janvier 2009 par le Parlement européen et le 24 septembre 2009 par les ministres de l'Union Européenne, du "paquet pesticide". Au niveau de la France, ce contexte s'est traduit notamment par la mise

4. http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/145/1108/pesticides-eaux-donnees-2005.html

en oeuvre du plan Ecophyto 2018 [5].

Le Plan Ecophyto a été mis en place par le Ministère de l'alimentation, de l'agriculture et de la Pêche, à la suite du Grenelle de l'environnement qui a fait émerger, avec les agriculteurs qui sont les premiers exposés aux risques induits par l´application de produits phytosanitaires, un consensus sur la nécessité d´une politique ambitieuse de réduction de l´usage des produits phytosanitaires. Le plan Ecophyto vise à réduire et améliorer l'usage des produits phytosanitaires. Il ne s'agit pas de proscrire tout emploi de produits phytosanitaires mais de réduire de façon notable leur utilisation. En effet, l'emploi des produits phytosanitaires reste encore nécessaire. Les actions du plan Ecophyto doivent permmettre de mettre en oeuvre les outils permettant de limiter le recours aux produits phytosanitaires des exploitations agricoles tout en maintenant un niveau satisfaisant de production agricole, en quantité et en qualité. Les objectifs sont ainsi de réduire de 50 % d'ici 2018, si possible, les quantités de produits phytosanitaires utilisés en agriculture.

La volonté de réduction des intrants est donc principalement lié à un intérêt environnemental et sanitaire, mais ce n'est pas tout. En effet, cette réduction présente un enjeu économique évident si on regarde les chiffres d'affaires dévoilés par les rapports de l'IUPP et présentés dans la Figure 1.2.

Figure 1.2: Chiffres d'affaires métropole basés sur les années civiles 1997 à 2011 (en millions d'euros) selon l'UIPP

5. http ://agriculture.gouv.fr/ecophyto

Il est clair qu'avec un chiffre d'affaires annuel de l'ordre de 2 milliards d'euros, une réduction significative de l'utilisation des pesticides, comme souhaitée par le plan Ecophyto, représenterait un gain important au niveau économique, ceci en diminuant de façon conséquente les dépenses liées aux pesticides. Les enjeux de la réduction sont donc multiples et touchent aussi bien le domaine de l'environnement que de l'économie, ce qui souligne vraiment l'importance de parvenir à une diminution de la quantité de pesticides utilisés.

Pour atteindre ces objectifs, l'amélioration de l'efficacité des produits phytosanitaires, aussi bien que des techniques d'application des doses, semblent être des pistes possibles. Ceci doit passer par une bonne compréhension des phénomènes qui limitent une application efficace des bouillies agricoles. Cependant, les applications dépendant très largement des cultures traitées, une étude globale prenant en compte tous les types de cultures ne peut être envisagée. Il semble ainsi nécessaire de faire du cas par cas.

1.2 Spécialisation à la viticulture

Dans mes recherches, c'est le domaine de la viticulture qui a été retenu. Ce choix se justifie par le fait que la viticulture est une source importante de consommation de pesticides en France. Elle fait partie d'un groupe restreint de cultures qui occupent moins de 40% de la SAU nationale et utilisent, à elles seules, près de 80% des pesticides vendus en France chaque année (Tableau 1.2).

Cultures	%SAU (arrondi)	%Consommation pesticides
Céréales à paille	24	40
Maïs	7	10
Colza	4	9
Vigne	4	20
Ensemble	39	79

Tableau 1.2: Occupation du territoire et consommation de pesticides pour quelques espèces (source UIPP)

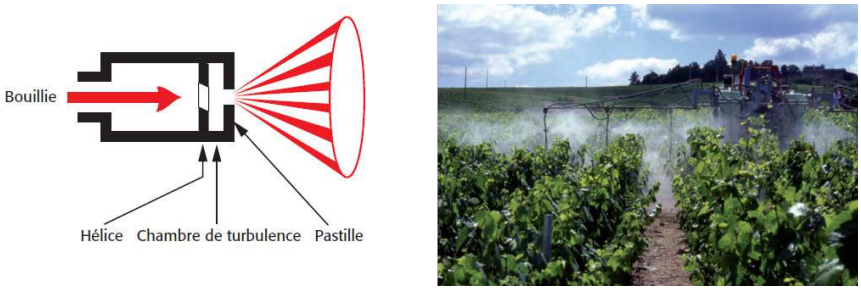
La vigne qui représente très peu en surface (860000 ha soit seulement 3,7% de la SAU) participe pour 20% à la consommation nationale de produits phytosanitaires. Cela s'explique par un nombre élevé de traitements phytosanitaires réalisés par unité de surface. En effet, les traitements réalisés en viticulture sont caractérisés notamment par un usage important de soufre et de cuivre qui sont deux matières actives utilisées à des doses par hectare élevées (par exemple 10 kg/ha pour le traitement de l'oïdium).

1.2.1 Etat de l'art des techniques d'application

Le choix du domaine de la vitculture comme domaine d'étude ayant été justifié, je vais maintenant présenter les principales techniques d'application des pesticides dans ce domaine. Cette section est uniquement destinée à dresser un inventaire rapide des procédés utilisés, des mécanismes mis en jeux et de leurs limites respectives. Elle est indispensable à une bonne compréhension des sources de dispersion des pesticides et des progrès technologiques possibles.

1.2.1.1 La pulvérisation par jet projeté

La pulvérisation par jet projeté est le procédé actuellement le plus répandu. Le jet projeté constitue le système de pulvérisation le plus simple. Une pression de liquide à l'entrée d'une buse assure la mise en vitesse et la rupture de la nappe qui se forme en sortie. En général, les buses sont constituées d'une hélice qui met le liquide en rotation dans la chambre de turbulence avant d'être éjecté par l'orifice de la pastille calibrée (Figure 1.3), on parle de buse à turbulence. La fragmentation donne naissance à un nuage de gouttes de différentes tailles et vitesses. C'est l'énergie cinétique, seule, qui permettra aux gouttes d'atteindre leur cible.



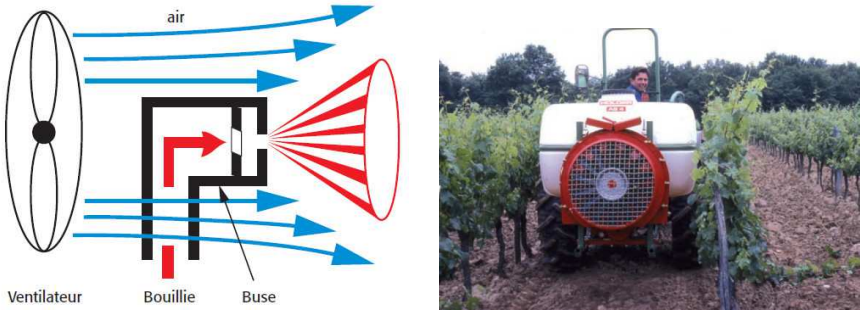
(a) (b)

Figure 1.3: (a) Principe du jet projeté avec une buse à turbulence, (b) Appareil de pulvérisation à jet projeté, source : Institut Français de La Vigne et du Vin (IFV)

La forme et la composition du spray dépendent à la fois du type de buse utilisé et des caractéristiques physiques de la préparation liquide. Ici, il faut noter qu'un certain nombre de buses ou d'adjuvants sont apparus sur le marché avec pour ambition de limiter le nombre des gouttes les plus fines : ces dispositifs qui permettent de limiter considérablement les phénomènes de dérive peuvent toutefois occasionner des problèmes de surdosages locaux. Les performances de ce procédé sont bonnes, à très bonnes, à condition de respecter une distance raisonnable entre la buse et la cible à atteindre afin d'avoir un recouvrement suffisant des sprays.

1.2.1.2 La pulvérisation par jet porté

Le jet projeté se révèle limité en matière de pénétration de la végétation à cause de la faible énergie cinétique acquise par les gouttes. Pour pallier ce défaut, les pulvérisateurs à jet porté ont été élaborés. La pulvérisation de la bouillie est obtenue par un système à pression similaire à celui de la catégorie précédente, constitué d'une pompe et de buses à turbulence sauf qu'ici les buses sont disposées dans un flux d'air comme illustré dans la Figure 1.4.



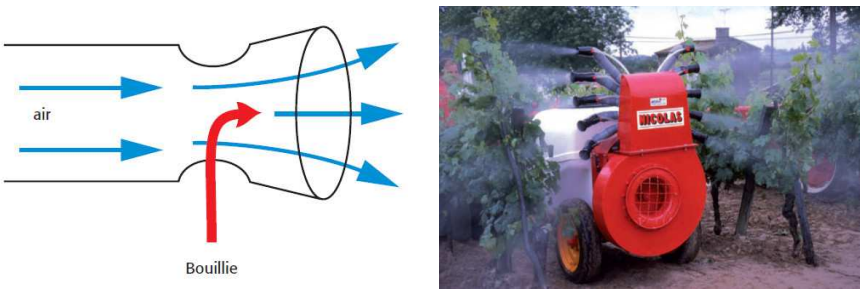
(a) (b)

Figure 1.4: (a) Principe du jet porté avec une buse à turbulence, (b) Appareil de pulvérisation à jet porté (Source : IFV)

L'assistance d'air permet de guider les sprays en sortie de buse et d'accroître la turbulence du flux afin d'améliorer la pénétration et le dépôt. Elle permet a priori de réduire l'importance des conditions externes (vent notamment) et de faciliter la pénétration dans la végétation. Cependant, cette technique s'accompagne de pertes certaines vers le sol et l'atmosphère. Les différences de vitesse entre l'air et les gouttes peuvent par ailleurs favoriser l'évaporation. Les pertes de produits dans l'environnement sont ainsi multipliées et plus ou moins importantes suivant la configuration de la végétation. Pour une végétation développée et un appareil bien réglé, on évalue ainsi les pertes dans l'air entre 10% et 20% et les pertes au sol entre 20% et 30%. C'est pourquoi le respect des réglages par rapport à la vitesse d'avancement de la machine, la proximité de la végétation et la pression d'alimentation des buses sont les enjeux de la qualité de l'application. Certains dispositifs de traitement face par face et à très faible distance diminuent ainsi très fortement les pertes.

1.2.1.3 La pulvérisation pneumatique

Dans un procédé pneumatique, l'éjection de la nappe liquide est assurée par un flux d'air générant une dépression dans un venturi (Figure 1.5). L'effet venturi est le nom donné à un phénomène de la dynamique des fluides dans lequel il y a formation d'une dépression dans une zone où les particules de fluides sont accélérées.



(a) (b)

Figure 1.5: (a) Principe de la pulvérisation pneumatique, (b) Appareil de pulvérisation pneumatique (Source : IFV)

Ce système est robuste et permet d'obtenir un spectre de gouttes plus fin et plus homogène qu'avec les techniques précédentes. Le fait que les gouttes aient un diamètre plus faible permet de limiter les volumes par hectare mais rend aussi la pulvérisation plus sensible à la dérive. Considéré en France comme très efficace en terme de dépôts, ce procédé est quasiment banni dans les pays d'Europe du nord car a priori générateur de plus de pertes dans l'air (les vitesses d'air sont plus élevées que sur le jet porté). Les pertes dans l'environnement peuvent en effet être très importantes suivant les configurations et atteindre 80%. Toutefois, comme précédemment, il est tout à fait possible de réduire fortement ces phénomènes par un réglage adapté des appareils. Seul l'usage de buses à injection d'air est ici impossible.

1.2.1.4 La pulvérisation centrifuge

La pulvérisation centrifuge utilise les forces centrifuges pour fragmenter la bouillie qui est injectée, sans pression, près de l'axe de rotation d'un disque tournant à haute vitesse (Figure 1.6). Le liquide se fragmente à la périphérie du disque entraîné par un moteur électrique.

Figure 1.6: Détail et module de pulvérisation centrifuge (Source : IFV)

La taille des gouttes peut être ajustée, soit par le débit de liquide, soit par la vitesse de rotation du disque. Le principal avantage de cette technologie est la bonne maîtrise du diamètre des gouttes de pulvérisation dont le spectre est très homogène. Les diamètres médians des gouttes sont très faibles ce qui rend cette technique particulièrement adaptée à des traitements manuels, localisés et à très faible volume/ha. Son utilisation sur des machines motorisées est toutefois limitée pour des raisons de coûts et d'encombrement : il n'est pratiquement utilisé que pour le désherbage. D'autres systèmes ont été proposés, mais aucun d'eux n'a connu, jusqu'à présent, un développement significatif sur les appareils de traitement terrestres.

1.2.1.5 La pulvérisation électrostatique

Quel que soit le dispositif de pulvérisation, l'usage de dispositifs électrostatiques permet a priori d'accroître considérablement la part de produits arrivant sur les feuilles [Giles et al., 1996]. Le système de pulvérisation électrostatique fournit un flux de gouttelettes à charge électrostatique. Ces gouttelettes sont poussées vers la cible au moyen de l'air. Dans l'appareil, un objet chargé positivement ou négativement est placé relativement au fluide. L'objet chargé induit une charge dans le fluide avant que le fluide atteigne la zone de formation des gouttelettes et au moment où celui-ci atteint ladite zone. Par conséquent, le fluide se charge négativement ou positivement. L'intérêt de ce procédé est toutefois nuancé par son domaine d'utilisation car plusieurs paramètres peuvent fortement atténuer son efficacité : type de végétal, surface des

feuilles, conditions hygrométriques... Concrètement, les dispositifs qui existent sont majoritairement utilisés en maraîchage et très rarement en viticulture.

1.2.1.6 Les traitements aériens

Les traitements aériens constituent un cas un peu à part mais à considérer comme incontournables dans certains cas : sols non porteurs, cultures inaccessibles, traitements sur surfaces aquatiques, forêts... L'hélicoptère et l'avion sont utilisés et tous deux sont équipés de rampes à jet projeté comme illustré dans la Figure 1.7.

Figure 1.7: Pulvérisation par hélicoptère (photo Dominique Barras)

Le principal inconvénient de cette technique est l'importance du phénomène de dérive. Afin de limiter celle-ci, les passages se font à basse vitesse et à très faible altitude. De récents travaux montrent que celà ne suffit pas et qu'il faut équiper les appareils de buses limitant la dérive ou d'adjuvants "alourdisseurs" pour accroître le diamètre des gouttes. Des essais récents réalisés avec ces buses anti-dérive ont permis de réduire cette dérive mais les pertes dans le milieu restent importantes et bien supérieures que lors d'applications terrestres. En viticulture par exemple, Viret cite des pertes totales allant de 70 à 95% [Viret et al., 2003] ce qui ne répond pas aux préoccupations environnementales actuelles de diminution des contaminations dûes aux produits

phytosanitaires. En conséquence, on privilégiera un autre type de traitement et l'hélicoptère sera strictement limité aux contextes particuliers.

1.2.1.7 Synthèse des principales techniques de pulvérisation en viticulture

Cette partie relate les 3 techniques les plus utilisées en viticulture. Le Tableau 1.3 dresse un bilan des avantages et inconvénients de chaque technique ainsi que de leur cadre d'utilisation.

	Jet projeté	Jet porté	Pneumatique
Volumes générés (en L/ha)	500 à 600	150 à 300	60 à 150
Diamètre des gouttes (en µm)	100 à 500	100 à 400	100 à 150
Avantages	Intéressant pour les traitements nécessitant un fort mouillage du végétal	Meilleure pénétration qu'avec un jet projeté Application dirigée sur feuillage évitant les grappes	Excellente pénétration dans végétation dense Bonne répartition du fait de la turbulence
Inconvénients	Mauvaise pénétration car faible énergie de transport des gouttes Dérive	Dérive à cause du faible diamètre des gouttes	Risques de séchage et de dérive accrus par le faible diamètre des gouttes
Utilisation	Vignoble étroit ou végétation peu dense	Tout type de vignoble	Végétation dense

Tableau 1.3: Tableau récapitulatif des principales techniques de pulvérisation en viticulture

1.2.2 L'étude de la pulvérisation en viticulture

1.2.2.1 Les objectifs

La bonne gestion des traitements phytosanitaires est devenue une exigence pour les agriculteurs et les diverses sociétés de production de produits phytosanitaires et de fabrication de machines agricoles dans la politique actuelle de réduction des intrants. Les produits phytopharmaceutiques doivent être

utilisés de manière raisonnée : quand cela s'avère nécessaire, au bon moment et à la juste dose. Pour cette raison et du fait de la diversité des technologies utilisées sur le terrain, il est nécessaire de mettre en place des outils pour évaluer l'efficacité des pulvérisateurs.

Une bonne pulvérisation est le résultat croisé d'un ensemble de facteurs, 6 au total, comme illustré dans la Figure 1.8.

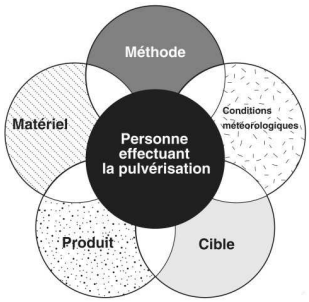


Figure 1.8: Les 6 clés de l'efficacité des pulvérisations [Deveau et al., 2009]

Par exemple le pulvérisateur se doit d'être adapté, entretenu et réglé en fonction de l'application prévue, ses buses doivent être en bon état, la dose de produit doit correspondre aux normes et adaptée à l'infestation de la parcelle cultivée et, enfin, les conditions climatiques sont extrêmement importantes et doivent être prises en compte pour obtenir une pulvérisation optimale. La qualité de la pulvérisation est également définie par la taille des gouttelettes, trop petites (diamètre inférieur à 150 µm) celles-ci seront trop sensibles à la dérive et à l'évaporation [Nuyttens et al., 2009], trop grosses (diamètre supérieur à 300 µm) elles impliqueront un phénomène de lessivage et de ruissellement [Deveau et al., 2009]. Enfin, de nombreux travaux montrent par ailleurs toute l'importance de l'adéquation du volume de pulvérisation au stade de développement de la végétation. Du fait des différents stades végétatifs par lesquels passe la vigne sur une saison, la variabilité de la surface végétale à traiter est très forte. Par exemple, la surface de feuilles d'une vigne étroite (rangs distants de 1,2 m) traitée en pleine végétation sera de l'ordre de 15 fois supérieure à celle d'une vigne large (rangs distants de 2,5 m) traitée en début de végétation (source IFV). Des systèmes automatiques sont proposées pour

répondre à ce problème [Balsari et al., 2003]. Les gains évoqués sont alors importants : pulvérisation de ½ ou ¼ de dose avec des niveaux d'efficacité maintenus.

Afin d'évaluer au mieux l'efficacité de la pulvérisation, il faut distinguer différentes échelles d'analyse qui permettront de rendre compte de l'influence de certains paramètres propres à chaque échelle. Ainsi, le phénomène de dérive sera exclusivement étudié à partir d'une analyse au niveau de la parcelle, tandis qu'une étude au niveau de la feuille permettra davantage d'obtenir les informations concernant la fraction des gouttes qui atteint la cible. Une analyse plus fine, au niveau microscopique, est destinée à l'analyse du processus d'absorption des pesticides par la feuille et pourra servir à l'élaboration de nouvelles substances actives plus efficaces. Cette dernière échelle ne sera pas détaillée dans notre étude car elle est plutôt réservée à un public de biochimistes ou microbiologistes.

Dans la partie suivante, un état de l'art des travaux permettant d'évaluer l'efficacité du protocole de pulvérisation est présenté.

1.2.2.2 Etat de l'art des travaux existants

Au niveau de la parcelle, les essais dérive s'appuient sur une méthodologie normalisée au niveau international. Il s'agit de la norme ISO 22866 intitulée «Mesurage de la dérive du jet au champ». La méthode consiste à pulvériser sur la parcelle d'essai (dite «zone d'application directe») un produit de concentration connue et de recueillir à différentes distances du bord de la parcelle (dans une zone attenante située sous le vent, appelée «zone de collecte») les embruns de pulvérisation.

La dérive est alors définie comme le rapport entre la quantité de produit retrouvée par unité de surface sur la zone de collecte et la quantité de produit appliquée par unité de surface sur la zone d'application directe. Afin de caractériser la dérive, 5 distances sont étudiées : 5 m, 10 m, 20 m, 30 m et 50 m. Pour chacune de ces distances d'étude, 20 collecteurs d'embruns (boîtes de Pétri) sont disposés avec un espacement régulier (Figure 1.9). Les essais sont réalisés dans des conditions de direction de vent perpendiculaire à l'orienta-

tion des rangs de vignes. Pour vérifier ces conditions, des mesures de vent sont effectuées en parallèle.

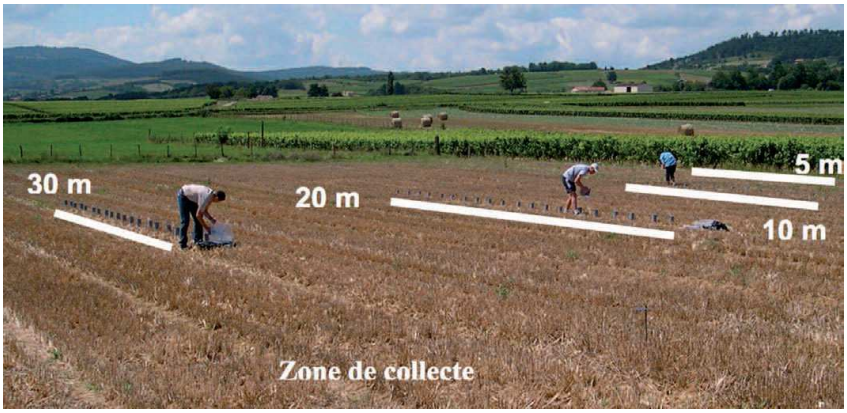


Figure 1.9: Ramassage des collecteurs aux différentes distances étudiées suite au passage du pulvérisateur (source IFV, Sébastien Codis)

Les collecteurs ne sont pas seulement utilisés pour la mesure de la dérive. Conformément au protocole défini dans la norme ISO 22522 : 2007 (ISO 2007), d'autres essais consistent à pulvériser un traceur sur la vigne et à disposer au sein de la végétation des cibles artificielles (Figure 1.10).

Figure 1.10: Collecteur plastique disposé dans la vigne en vue d'évaluer la qualité de la pulvérisation (source IFV, Sébastien Codis)

Ces cibles sont constituées de collecteurs plastiques doubles, de 5 x 4 cm, qui permettent d'échantillonner à la fois le dessus et le dessous des feuilles de vigne (soit 40 cm^2 au total). Des collecteurs peuvent également être placés au sol afin de déterminer les pertes.

Cette évaluation de la qualité d'application est basée sur le principe selon lequel la quantité de dépôt de traceur par unité de surface sur les collecteurs est représentative de la pulvérisation et de la performance de l'application. Ces essais se déroulent en général en quatre étapes successives :

1. pose des collecteurs dans la végétation selon un protocole précis,
2. pulvérisation,
3. collecte des lots de collecteurs,
4. et enfin, analyse en laboratoire des collecteurs au spectrophotomètre.

Cette méthode s'inscrit dans le cadre du projet collaboratif ECOSPRAYVITI entre l'IFV et l'Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA, anciennement Cemagref), dont l'objectif est d'évaluer les performances agronomiques et environnementales des différentes techniques de pulvérisation utilisées en viticulture.

Il existe une technique très similaire à celle des collecteurs mais plus facile à mettre en oeuvre car elle ne nécessite pas l'utilisation d'un spectrophotomètre. Il s'agit de la méthode faisant appel aux papiers hydrosensibles. Au niveau de la feuille, pour avoir une vision de l'efficacité du traitement, le papier hydrosensible reste l'outil le plus simple d'utilisation. Il permet de décrire la pulvérisation de manière qualitative malgré quelques contraintes pratiques d'utilisation. Il permet, comme sur les collecteurs décrits précédemment, d'effectuer une analyse physique de la pulvérisation : nombre d'impacts, taille des gouttes. Le papier hydrosensible est un petit morceau de papier de couleur jaune. Il vire au bleu ou au marron aux endroits où a lieu l'impact du produit.

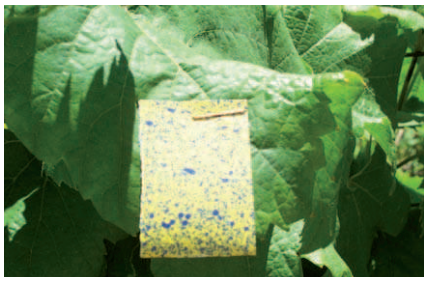
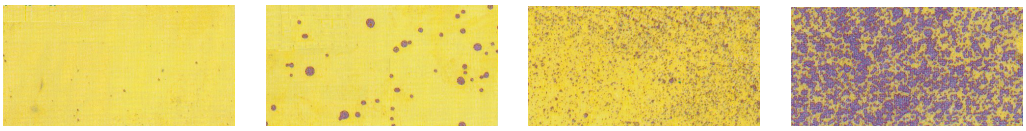


Figure 1.11: Aspect d'un papier hydrosensible après passage d'un pulvérisateur avec de l'eau (photo : B. Alban)

Le papier hydrosensible permet d'identifier l'ordre de grandeur de la taille des gouttes, de juger de l'uniformité de la répartition sur la feuille. La mise en place de ces papiers ne s'effectue pas de manière aléatoire et demande de prendre un temps de pose dans le vignoble de manière stratégique. Il est conseillé de les placer sur les faces inférieures et supérieures des feuilles de la vigne (en les pliants en deux autour de la feuille), en haut au milieu et en bas de la vigne sur toutes les surfaces traitées, sur une bonne dizaine de mètres en début et en fin de trajet. Une fois la pulvérisation effectuée, il suffit de relever les échantillons et d'interpréter les projections reçues par les papiers hydrosensibles. L'interprétation (Figure 1.12) se fait soit directement sur pied, soit en retirant les papiers hydrosensibles avec des gants et en les classant sur un support en respectant leur position.



Classe A | Classe B | Classe C | Classe D

Figure 1.12: Interprétation des résultats sur papier hydrosensible (source : Chambre d'Agriculture de la Côte-d'Or)

Le classement des papiers hydrosensibles est effectué selon 4 classes. La classe A regroupe les papiers où l'absence d'impacts est observée tandis que la classe B est caractérisée par une densitée insuffisante d'impacts. La classe C rassemble les résultats positifs avec une densité d'impacts suffisante (plus de 50 impacts/cm^2), qui est considérée comme optimale pour des densités allant de 50 à 70 impacts/cm^2. Finalement, la classe D est constituée des papiers où la densité d'impacts est trop importante, et où par conséquent le phénomène de lessivage se produit.

Par le passé et c'est encore le cas de nos jours, les tests de pulvérisation sont habituellement réalisés avec des papiers hydrosensibles du fait de la relative simplicité de leur utilisation, relative simplicité car celà nécessite néanmoins une fastidieuse mise en place. Aussi bien la technique des collecteurs que celle des papiers hydrosensibles permet une analyse du dépôt ainsi qu'une estima-

tion de la taille des gouttes. Ces techniques peuvent être regroupées dans la classe des techniques intrusives. Le principal inconvénient de ces méthodes est la modification, plus ou moins grande, du comportement des gouttes pendant leur transport vers la feuille. L'autre inconvenient majeur est la modification du comportement de la goutte lorsqu'elle atteint la cible du fait de la texture de la cible qui n'est pas conforme à la texture de vraies feuilles de vigne.

C'est pourquoi de nouvelles techniques, qualifiées de non-intrusives ont vu le jour. C'est le cas des tests de pulvérisation à la fluoresceïne, mis en place par Syngenta, société suisse spécialisée dans la chimie et l'agroalimentaire. Le test de pulvérisation à la fluorescéïne se réalise de nuit car cette dernière a la propriété d'être fluorescente. De ce fait, elle permet de visualiser rapidement la qualité de pulvérisation. Dans l'essai conduit par Syngenta, des lampes torches violettes ont été utilisées pour repérer les impacts de pulvérisation.

Figure 1.13: Test de pulvérisation à la fluorescéine (source : http://www3.syngenta.com)

L'inconvénient de cette méthode, outre le fait que les tests doivent se réaliser la nuit, est qu'elle ne permet qu'une analyse du dépôt et une estimation de la taille des gouttes, tout comme les techniques dites intrusives décrites précédemment. Il manque toujours l'estimation d'un des paramètres essentiels à l'étude de la pulvérisation : la vitesse des gouttes.

Le développement récent d'ordinateurs puissants, ainsi que la parfaite maîtrise de l'émission de différentes sources de lumière, notamment les lasers, permettent la création de nouvelles méthodes suceptibles de pallier ce manque.

Ces nouvelles techniques peuvent être regroupées dans la classe des techniques optiques basées sur la diffusion de rayons lumineux. Le Phase Doppler Particle Analyzer (PDPA) en fait partie. La Figure 1.14 représente une vue d'ensemble de ce système.

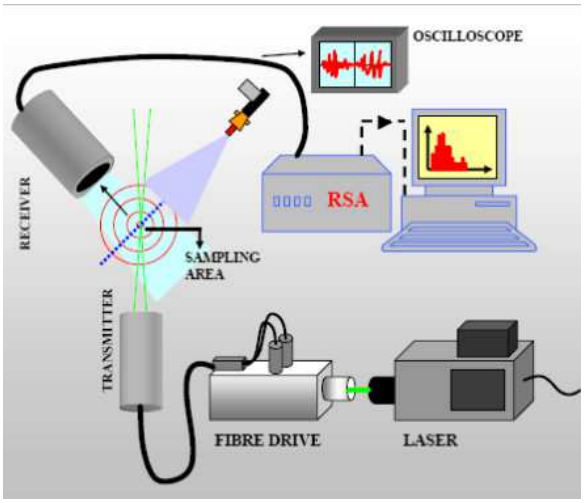


Figure 1.14: Schéma du PDPA [Schick, 2008]

2 faisceaux laser sont émis et s'intersectent en un point de mesure. La réfraction des 2 faisceaux sur une goutte produit 2 faisceaux qui vont atteindre le récepteur en des endroits différents, où ils interfèrent et forment une frange, c'est le principe d'interférométrie. L'amplitude et le décalage de phases des signaux obtenus au niveau du récepteur seront utilisés afin d'obtenir la taille mais aussi la vitesse de la goutte.

Une autre méthode de la classe des techniques optiques basées sur la diffusion de rayons lumineux est le Laser Diffraction Analyzer (LDA). Un schéma illustrant cette méthode est présenté dans la Figure 1.15. Le principe est basé sur la mesure de la diffusion de l'intensité lumineuse causée par les gouttes traversant la zone d'étude. Cette diffusion est mesurée grâce à des photodiodes présentes dans le récepteur. Cette technique souffre de deux défauts conséquents. D'une part, il est impossible de calculer les vitesses des gouttes. D'autre part, si le flux de gouttes est trop important, le faisceau peut être dispersé par plusieurs gouttes avant d'atteindre le détecteur, ce qui peut causer

des erreurs dans le calcul des tailles de gouttes [Schick, 2008].

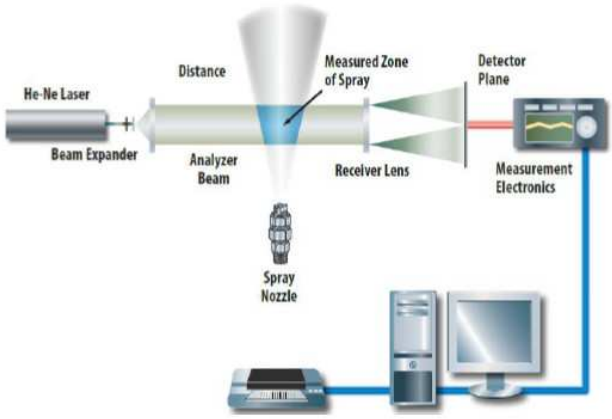


Figure 1.15: Schéma du LDA [Schick, 2008]

Enfin, une dernière méthode de la classe des techniques optiques basées sur la diffusion de rayons lumineux est l'utilisation des Optical Array Probes (OAP). Le matériel mis en jeu ici est composé d'une source de lumière (laser basse puissance), d'un ensemble optique, d'un tableau de photodiodes et d'un ordinateur. La Figure 1.16 indique la disposition du matériel.

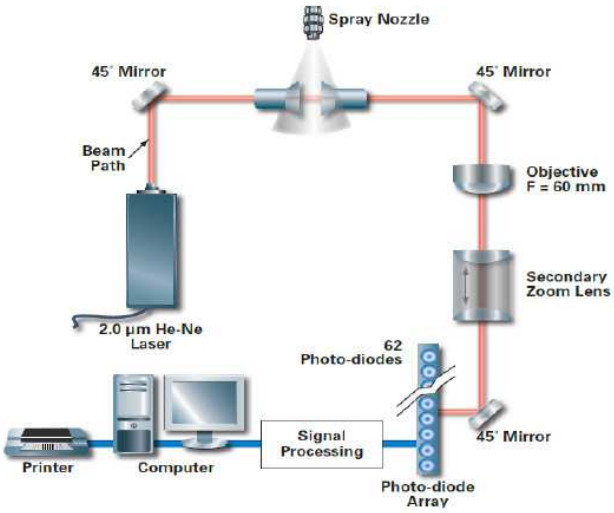


Figure 1.16: Schéma du OAP [Schick, 2008]

Quand les gouttes passent par le plan d'étude, elles sont mesurées, comptées et fournissent les informations nécessaires au calcul de la vitesse. La collection de données est basée sur la mesure de la quantité de lumière dans les zones d'ombres provoquées par les gouttes.

Ainsi, parmi les dernières techniques présentées, deux sont capables d'estimer la vitesse des gouttes, ce qui représente une réelle avancée par rapport aux études précédentes. Cependant, certaines difficultés sont rencontrées. Par exemple, avec des paramètres de pulvérisation fixés, ces techniques peuvent fournir des résultats relativement différents [Nuyttens et al., 2007] notamment dans l'estimation du diamètre des gouttes. Ceci provient du fait que les gouttes n'ont pas toujours une forme parfaitement sphérique [Kashdan et al., 2007]. Ces systèmes sont également complexes et coûteux à mettre en place, c'est pourquoi récemment, une dernière famille de techniques s'est particulièrement développée dans le but de caractériser le processus de pulvérisation : il s'agit des techniques optiques combinées à des systèmes d'imagerie numérique.

1.2.2.3 L'imagerie, une solution efficace et moins coûteuse

Les progrès dans le domaine de l'imagerie ont été très importants ces dernières années. Ce progrès presque quotidien a également permis une radicale diminution du coût des appareils, ce qui les a rendus beaucoup plus attractifs. Récemment, des recherches s'appuyant sur l'imagerie ont été entreprises pour caractériser des flux de gouttes dans des applications non-agricoles [Brady et al., 2009].

On peut distinguer plusieurs types de techniques optiques se basant sur l'imagerie. Parmi elles, on peut citer le Particle/Droplet Analyzer (PDIA) qui analyse automatiquement les images numériques représentant le flux de gouttes (Figure 1.17). Un rapide flash de lumière rétro-éclaire l'objet à étudier, ici le flux de gouttes. Une caméra numérique, équipée d'un système optique choisi en fonction du grossissement désiré, réalise des captures du flux de gouttes. Un logiciel de traitement d'images est ensuite utilisé afin d'analyser les images obtenues et d'en extraire les tailles ainsi que les formes des gouttes. L'information de vitesse peut être récupéré en produisant 2 flashs consécutifs dans

un intervalle de temps réduit et en mesurant le déplacement de la goutte entre ces flashs. Un modèle classique de PDIA est le Visispray développé par Oxford Laser et utilisé par [Kashdan et al., 2007].

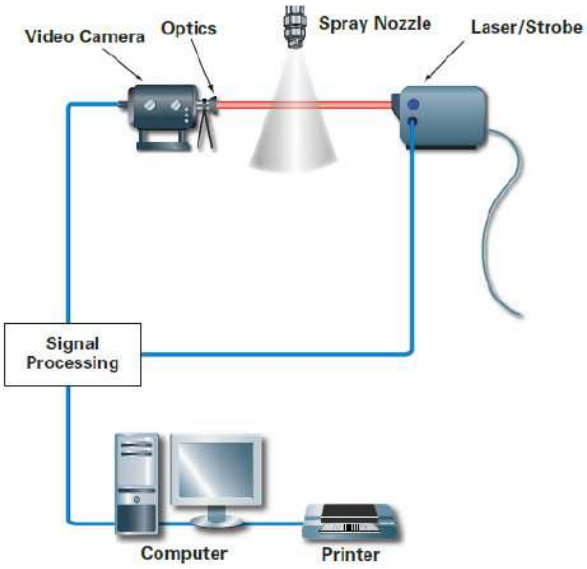


Figure 1.17: Schéma du PDIA [Schick, 2008]

Une des méthodes « référence » est la Particle Image Velocimetry (PIV). Le flux à étudier est chargé de particules traçantes. Grâce à l'utilisation d'un laser (ou stroboscope) et d'une caméra déclenchés par un contrôleur, des images de ces particules en mouvement dans le flux sont prises à différents instants. Un champ 2D de vecteurs vitesses est alors construit. Cependant, cette méthode ne permet pas le suivi de particules du fait de la densité trop importante de particules. Afin de réaliser un suivi, c'est une faible densité de particules qui doit être placée dans le flux, on parle alors de Particle Tracking Velocimetry (PTV).

Une autre technique majeure est la Laser Induced Fluorescence [J. K. Lee, 2008] (LIF). C'est une méthode spectroscopique où les particules à examiner sont excitées avec un laser. Les particules excitées reviennent à leur état initial après un très court instant, de l'ordre de la µs, et émettent alors une lumière

à une longueur d'onde supérieure à la longueur d'onde d'excitation. Cette lumière, appelée fluorescence, est mesurée. En suivant la tâche de couleur grâce à une caméra imagerie rapide et en analysant les images obtenues, la vitesse des particules peut être déterminée [Mavros, 2001].

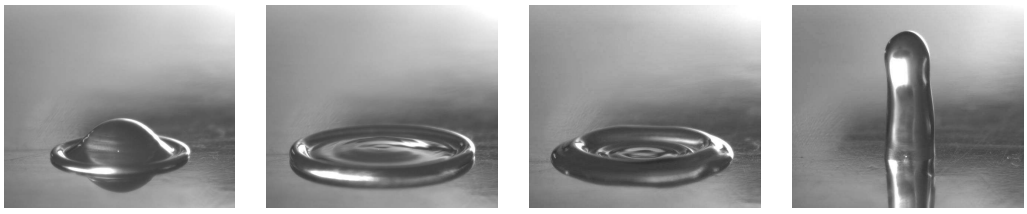
Finalement, 2 dernières techniques se démarquent en proposant, comme dans le cas de la PTV, l'extraction de la trajectoire de la particule. Cette information sera essentielle à la prédiction du comportement des gouttes. La première technique est basée sur l'utilisation d'une caméra standard et d'un stroboscope. Elle se rapproche du PDIA. La différence avec le PDIA réside dans le fait qu'une seule frame est acquise. Le nombre de positions d'un objet dans l'image sera déterminé par le nombre de flashs pendant lequel l'objet sera dans le champ de vue. A partir de ces positions déterminées par traitement d'images, la trajectoire sera extraite. L'autre technique est quant à elle basée sur l'utilisation d'une caméra imagerie rapide et d'un très puissant système de rétro-éclairage nécessaire à cause du très faible temps d'exposition, caractéristique des systèmes à imagerie rapide. Grâce à l'importante fréquence d'acquisition, le suivi des gouttes est possible et donc l'extraction de la trajectoire dans le même temps. De plus, ce système possède un avantage indéniable par rapport aux autres méthodes : il permet l'observation du comportement des gouttes lors de l'impact avec la cible [Massinon and Lebeau, 2012], ce qui constitue un indicateur pertinent de la qualité de pulvérisation.

Par conséquent, l'utilisation d'un système d'imagerie combiné à des techniques de traitements d'image semble être de nos jours la solution idéale pour analyser la qualité du processus de pulvérisation, étude primordiale dans le contexte actuel de réduction des intrants. Elle permet d'extraire des paramètres pertinents concernant les gouttes (taille, vitesse, trajectoire, comportement à l'impact), chose qui n'était pas possible avec les techniques précédemment décrites. Mais ce n'est pas tout, l'imagerie permet également de fournir des informations importantes sur l'état de surface des feuilles, paramètre important dans l'étude du comportements des gouttes lors de l'impact. Cet aspect sera détaillé dans le chapitre suivant.

2 Analyse de texture pour l'étude de la feuille

2.1 Introduction

La compréhension des mécanismes d'adhésion des gouttes nécessite la connaissance des différentes phases se déroulant lors de l'impact et des énergies mises en jeu. Le processus d'impact se déroule en quatre phases, comme illustrées dans la Figure 2.1.



(a) (b) (c) (d)

Figure 2.1: Les différentes phases lors de l'impact (a) la phase cinématique, (b) la phase d'étalement, (c) la phase de recul, (d) la phase finale [Roisman et al., 2002]

La phase cinématique correspond à la première étape. Au moment où la goutte entre en contact avec la surface, la goutte possède une énergie cinétique dépendante de sa taille et de la vitesse acquise pendant sa chute [Reyssat et al., 2006]. Cette énergie cinétique s'exprime selon la relation suivante :

$$E_{kin} = \frac{\rho \pi D_0^3 v^2}{12} \tag{2.1}$$

avec ρ (en kg/m^3) la masse volumique du liquide, D_0 (en m) le diamètre de la goutte supposée sphérique et v (en m/s) la vitesse de la goutte lors de l'impact.

A l'impact, une partie de l'énergie cinétique est transformée en énergie de surface. Cette dernière est la responsable des transformations subies par la goutte pendant les différentes phases (déformation, étalement, recul). L'énergie de surface intiale peut être décrite de la façon suivante [Roisman et al.,

2002] :

$$E_s = \sigma \pi D_0^2 \tag{2.2}$$

avec σ (en N/m) la tension de surface du liquide, D_0 (en m) le diamètre initial de la goutte supposée sphérique.

L'énergie cinétique et l'énergie de surface ne sont cependant pas les seules énergies mises en jeu. Ainsi, toujours selon [Roisman et al., 2002], l'équilibre énérgétique total de la goutte peut s'écrire :

$$E_{kt} + E_{st} = E_{k0} + E_{s0} + E_\theta - E_D \tag{2.3}$$

avec E_{kt} et E_{st} respectivement l'énergie cinétique et l'énergie de surface de la goutte à un instant t, E_{k0} l'énergie cinétique initiale, E_{s0} l'énergie de surface initiale, E_D un terme représentant la dissipation visqueuse, enfin E_θ le travail des forces radiales appliquées par la surface d'impact au niveau de la ligne de contact.

Selon [Mercer and Sweatman, 2006], en fonction des rapports entre ces différentes énergies, l'impact d'une goutte sur une surface peut produire différents résultats comme l'adhésion, le rebond ou l'éclatement (Figure 2.2).

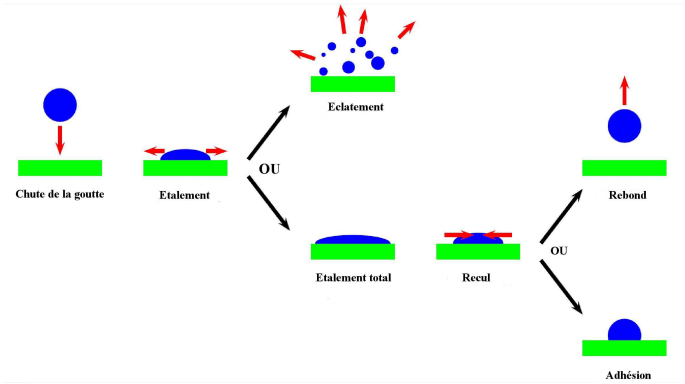


Figure 2.2: Les comportements possibles d'une goutte lors de l'impact

Ceci complète les résultats de [Yarin, 2006] qui montraient que le résultat de l'impact d'une goutte sur une surface dépend à la fois de la nature de la surface, de sa structure ainsi que des paramètres intrinsèques de la goutte (taille, vitesse, direction, composition). Dans ce chapitre, le focus est mis sur la surface d'impact et son influence sur le comportement de la goutte par le biais du terme E_θ de l'Équation 2.3. Les études de l'énergie cinétique et de l'énergie de surface propres à la goutte seront quant à elles développées dans le chapitre 4.

Le terme E_θ est, selon [Roisman et al., 2002], directement lié au paramètre θ_C appelé angle de contact à l'équilibre. Ce paramètre qui est important dans les différentes phases d'impact est défini par la relation de Young [Young, 1805] :

$$\cos\theta_C = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LG}} \tag{2.4}$$

avec γ_{SG} la tension interfaciale solide/gaz, γ_{SL} la tension interfaciale solide/liquide et γ_{LG} la tension interfaciale liquide/gaz (ou tension de surface).

Ce paramètre représente l'angle entre l'interface liquide/solide et l'interface liquide/gaz comme illustré dans la Figure 2.3.

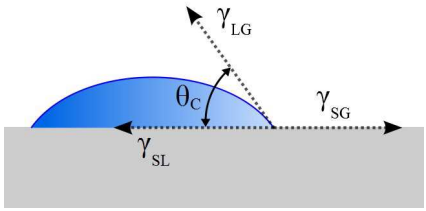


Figure 2.3: Ligne de contact et angle de contact

A l'équilibre, cet angle possède une valeur spécifique à chaque surface et est indépendante de la taille de la goutte. Il décrit alors le caractère hydrophile ou hydrophobe de la surface, c'est à dire sa mouillabilité. Autrement dit, elle caractérise la facilité avec laquelle une goutte de liquide s'étale sur une surface solide.

Cependant la relation de Young n'est valable que pour des surfaces planes et homogènes, ce qui est rarement le cas des surfaces naturelles comme les feuilles de vigne. Sur des surfaces présentant une rugosité et/ou des hétérogénéités chimiques, l'angle de contact apparent, noté θ^*, diffère de celui mesuré sur la surface idéale correspondante (θ_C). Cet angle de contact apparent varie entre deux valeurs extrêmes, l'angle d'avancée θ_{adv} et l'angle de reculée θ_{rec} qui sont présentés dans la Figure 2.4. Ce phénomène est appelé hystérésis de l'angle de contact. L'angle d'avancée correspond à l'angle de contact établi pendant la phase cinématique [Yarin, 2006]. Ensuite l'angle de contact va diminuer progressivement pendant la phase d'étalement pour finalement atteindre une valeur minimale lorsque le diamètre d'étalement de la goutte sera maximal [Quéré, 2005]. Cette valeur minimale correspond à l'angle de reculée.

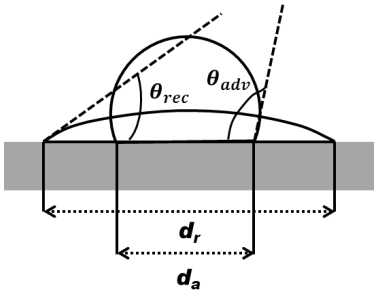


Figure 2.4: Angles et diamètres d'avancée et de reculée (θ_{adv}, d_a, θ_{rec}, d_r) [Rioboo et al., 2002]

Dans la litterature, deux modèles sont proposés par Wenzel et Cassie-Baxter (Figure 2.5) pour calculer θ^* dans le cas de surfaces rugueuses et hétérogènes.

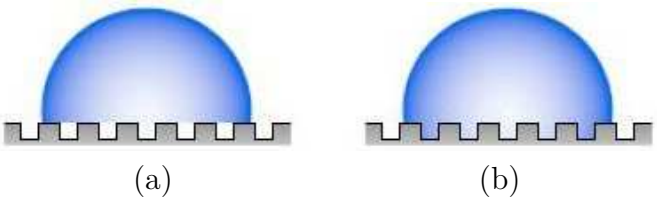


Figure 2.5: Selon [Quéré and Reyssat, 2008], les modèles de Cassie-Baxter (a) et de Wenzel (b)

Le modèle de Cassie-Baxter se base sur une surface hétérogène. Dans ce modèle, la surface de contact consiste en une alternance de matières supposées homogènes possédant des caractéristiques de mouillabilité différentes. Considérant deux matières homogènes dont les mouillabilités sont définies par les angles de contact à l'équilibre θ_1 et θ_2 et considérant les fractions f_1 et f_2 de la goutte en contact avec chaque surface ($f_1 + f_2 = 1$), l'angle de contact apparent de la surface hétérogène, θ^*, s'obtient de la façon suivante :

$$\cos\theta^* = f_1.\cos\theta_1 + f_2.\cos\theta_2 \tag{2.5}$$

Dans le cas de surfaces très rugueuses, il est par exemple possible que la goutte ne repose que sur le haut des aspérités de la surface. Des poches d'air sont alors piégées sous la goutte entre les sillons de la surface rugueuse. Ces surfaces sont dites superhydrophobes. Le modèle de Cassie-Baxter peut s'appliquer en considérant une surface composée de solide et d'air. Soient f_s la fraction de surface solide en contact avec la goutte, $f_{air} = 1 - f_s$ la fraction surfacique d'air sous la goutte, et sachant que l'angle de contact sur de l'air vaut 180°, l'angle de contact apparent, θ^*, est défini par :

$$\cos\theta^* = f_s.\cos\theta - f_{air} = f_s.(\cos\theta + 1) - 1 \tag{2.6}$$

Le modèle de Wenzel se base quant à lui sur une surface rugueuse mais homogène. Dans ce modèle, la goutte épouse le relief de la surface. Soit r la rugosité de la surface définie comme le rapport de l'aire de la surface réelle sur l'aire de la surface projetée (par construction, $r > 1$). Soit θ_C l'angle de contact à l'équilibre mesuré sur une surface plane formée de la même matière. L'angle de contact apparent, θ^*, peut être calculé de la façon suivante :

$$\cos\theta^* = r.\cos\theta_C \tag{2.7}$$

Ainsi, la rugosité étant supérieure à 1, elle a pour effet de rendre une surface hydrophobe plus hydrophobe et une surface hydrophile plus hydrophile.

Dans le cas de surfaces rugueuses, la rugosité a un effet important sur le phénomène d'hystérésis, c'est à dire sur les valeurs des angles d'avancée et de reculée, ce qui va jouer un rôle considérable dans le comportement de la goutte lors de l'impact et principalement lors des phases d'étalement et de recul, ce qui a été vérifié par [Šikalo et al., 2002] et [Rioboo et al., 2002].

Ainsi, comme l'avait constaté [Forster et al., 2005], la rugosité représente un paramètre prédominant dans le mécanisme d'adhésion de la goutte à la feuille. Dans la suite de ce chapitre, les différentes techniques permettant de mesurer la rugosité d'une surface seront exposées et nous justifierons le choix de celle sélectionnée dans le cadre de nos recherches.

2.2 La mesure de la rugosité

S'il est un paramètre que chacun peut facilement appréhender, c'est bien la rugosité d'une surface. Ce paramètre est lié à une notion sensorielle (une surface lisse est plus luisante, plus douce au toucher...) mais également à des critères fonctionnels : la rugosité d'une surface explique par exemple les propriétés d'adhérence d'une surface. Cependant, mesurer la rugosité dans le cas de textures naturelles est une problématique complexe.

La mesure de la rugosité est une tentative de chiffrage d'un état de surface. Dans le domaine des sciences de l'ingénieur, le terme « rugosité » est utilisé pour représenter les paramètres qui décrivent qualitativement ou quantitativement le caractère irrégulier d'une surface. En effet, une surface rugueuse, c'est-à-dire n'étant pas parfaitement lisse, présente de nombreuses irrégularités, micro-géométriques ou macro-géométriques. Ces irrégularités sont définies par comparaison avec une ligne moyenne et sont classées en deux catégories : des pics et des creux. L'ensemble de ces défauts de surface constitue la rugosité.

Une surface rugueuse pouvant être considérée comme un phénomène aléatoire, une approche statistique est dès lors souvent utilisée pour étudier et modéliser

la rugosité. La détermination de paramètres statistiques évalués à partir de la distribution des hauteurs $p(y)$ rend possible l'analyse du profil de surface. Or, la littérature fournit cependant un grand nombre de paramètres différents (Figure 2.6) pour décrire l'état d'une surface et donc, autant de définitions de la rugosité.

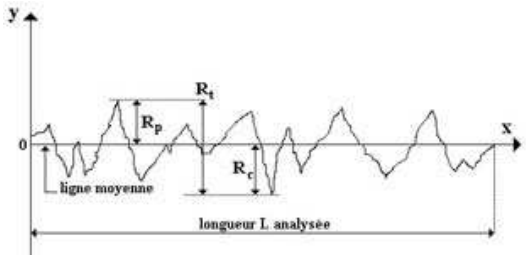


Figure 2.6: Quelques paramètres de rugosité

R_p correspond au pic maximal observé sur la longueur analysée, L. Si on pose un repère cartésien dont l'axe des abscisses est aligné sur la ligne moyenne de la surface à mesurer, le pic maximal, lu sur l'axe des ordonnées, pourra également être noté $R_p = y_{max}$. R_c correspond au creux maximal observé sur la longueur analysée ($R_c = |y_{min}|$). R_t représente la rugosité totale et est égale à la somme du pic maximal et du creux maximal observés sur la longueur analysée.

Un des paramètres les plus utilisés est le paramètre R_a défini comme l'écart moyen de rugosité. R_a correspond à la moyenne arithmétique des distances absolues entre creux et pics successifs par rapport à la ligne moyenne observés sur une longueur L :

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| \, dx \tag{2.8}$$

Ce paramètre « moyen » permet de donner une indication générale résumant les autres paramètres de rugosité d'une surface donnée. Par conséquent, il est fréquemment utilisé.

Le paramètre R_q, l'écart quadratique de rugosité, est l'autre paramètre fréquemment utilisé. Il est défini comme la moyenne quadratique des distances entre creux et pics successifs observés sur une longueur L. De par sa définition, R_q est plus sensible aux pics et aux creux que R_a.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L}\int_0^L y^2(x)dx} \tag{2.9}$$

Afin de calculer ces paramètres et donc d'analyser le profil de la surface, il est nécessaire de disposer de la fonction de distribution des hauteurs décrivant le relief de la surface. Il existe différentes façons d'obtenir ces informations dont l'approche mécanique et l'approche optique.

2.2.1 La mesure mécanique

Les informations de rugosité peuvent par exemple être obtenues à l'aide d'un capteur mécanique, le palpeur, qui suit la topographie de la surface. Le palpeur à base de stylet est la technique classiquement utilisée pour mesurer le relief d'une surface. La plupart des stylets sont de simples diamants façonnés de manière à présenter un angle de cône et un rayon de courbure bien définis. La surface de l'échantillon est explorée par la pointe en diamant de forme sphérique.

Cette technique présente plusieurs inconvénients. Tout d'abord, le profil de rugosité mesuré ne constitue pas une représentation parfaite du profil réel de la surface. Il représente la convolution de la forme de la pointe sur celle du relief. L'erreur commise dans les creux à cause du rayon de courbure du diamant est illustrée dans la Figure 2.7.

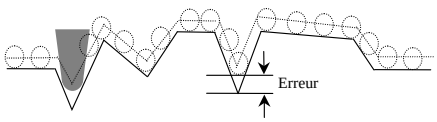


Figure 2.7: Effet du rayon de courbure du diamant sur l'erreur de mesure

L'autre inconvénient majeur de cette technique est dû à la force d'appui de la pointe. Si cette force est trop faible, le stylet ne peut pas suivre correctement le relief de la surface. Si cette force est trop importante, elle peut entraîner la déterioration de la surface de l'échantillon, voire de la pointe. C'est pour cette raison que cette technique est principalement utilisée dans le cas de surfaces métalliques et qu'elle n'est pas du tout adaptée aux surfaces naturelles dont il est question dans le cadre de ces travaux de recherche.

2.2.2 La mesure optique

Il existe un autre moyen d'obtenir le relief d'une surface tout en évitant les contacts, il s'agit de la mesure optique. La caractérisation de la topographie de la surface peut être effectuée grâce au principe d'interférence de la lumière. Plusieurs méthodes sont disponibles pour mesurer l'interférence de la lumière. Les plus connues sont les méthodes de Michelson et de Mirau illustrées dans les Figure 2.8 et Figure 2.9.

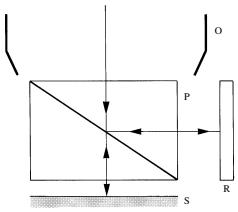


Figure 2.8: Principe du dispositif de Michelson avec l'objectif O, la surface de référence R (miroir fixe), le prisme diviseur P et la surface de l'objet S [Mathieu et al., 2003]

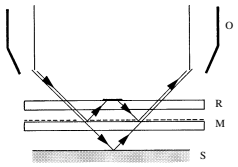


Figure 2.9: Principe du dispositif de Mirau avec l'objectif O, la surface de référence R, le miroir diviseur M et la surface de l'objet S [Mathieu et al., 2003]

Ces dispositifs se distinguent par le fait qu'on évite tout contact avec l'échantillon en utilisant respectivement un prisme P ou un miroir diviseur M pour créer deux rayons. Le premier est réfléchi sur la surface de référence R tandis que le second est réfléchi sur la surface S de l'échantillon à analyser.

En pratique, on met en interférence deux faisceaux cohérents provenant de la division d'un unique faisceau de lumière monochromatique de longueur d'onde λ. Les interférences dûes à ces deux faisceaux de lumière sont utilisées pour mesurer les différences de niveau. Ces interférences forment à travers l'objectif O des images en franges d'interférences. L'écartement entre deux franges voisines est alors représentatif d'une différence de niveau égale à $\lambda/2$. L'analyse des images en franges d'interférences permet alors la reconstruction de la topographie de la surface.

Le réel avantage de cette technologie réside dans le fait qu'elle permet d'effectuer des mesures de rugosité sans contact, ce qui est une nécessité dans le cas d'études de surfaces naturelles. Cependant cette technologie est assez récente et son coût reste important, constituant un frein à l'utilisation de celle-ci ; ce qui explique peut-être le peu de réferences trouvées dans la littérature concernant son utilisation pour mesurer la rugosité de surfaces naturelles.

Néanmoins, grâce au financement du Grand Chalon, de la région Bourgogne et de l'Europe (120000€ au total), une telle technologie est aujourd'hui disponible à l'IUT de Chalon-sur-Saône (Figure 2.10).

Figure 2.10: Rugosimètre interférométrique de l'IUT de Chalon sur Saône

Ainsi, l'IUT de Chalon-sur-Saône a proposé de mettre ce rugosimètre interférométrique à ma disposition, ce qui m'a permis d'effectuer des tests avec les feuilles de vigne. Ce rugosimètre est capable d'utiliser deux techniques d'interférométrie microscopiques différentes basées sur l'exploitation des franges d'interférence.

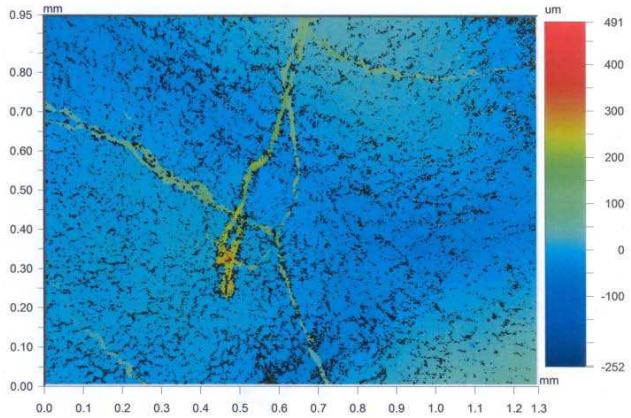
La première technique correspond à celle décrite précédemment. Elle utilise une source de lumière monochromatique verte ($\lambda = 550nm$). Cette technique est également appelée microscopie à saut de phase [Stahl, 1991].

La seconde technique, appelée microscopie à sonde de faible cohérence, repose sur le principe d'interférométrie en lumière blanche et non monochromatique comme dans le cas de la première technique. Au lieu de calculer la phase à partir d'un traitement d'images (comme pour la microscopie à saut de phase), l'enveloppe des franges est utilisée comme plan de sonde virtuel. En déplaçant l'échantillon à travers cette frange, on arrive à reconstituer la topographie du relief [Larkin, 1996].

Afin de ne mesurer que la rugosité de la feuille, il est indispensable de s'affranchir du phénomène d'ondulation. Celui-ci est représenté par les basses fréquences du signal, tandis que la rugosité est plutôt représentée par les hautes fréquences du signal. Des techniques de post-traitement consistant à éliminer les basses fréquences existent et permettent d'isoler la partie du signal définissant la rugosité. Cependant, du fait de la technique d'acquisition employée (l'interférométrie), bien que la précision des mesures soit importante (de l'ordre du nm), l'amplitude maximale du signal est limitée à quelques microns dans le cas de l'interférométrie en lumière monochromatique et à quelques dizaines de microns dans le cas de l'interférométrie en lumière blanche. Dans le but de limiter l'amplitude du signal lors de l'acquisition, le phénomène d'ondulation est éliminé physiquement. Pour y parvenir, l'échantillon de feuille de vigne est posé délicatement, afin de préserver la rugosité, sur la surface adhésive d'un support parfaitement plat. Lors de l'acquisition, nous avons testé les deux techniques d'interférométrie (à lumière blanche et à lumière monochromatique) et utilisé deux grossissements différents (5.0 X et 30.3 X). Les images obtenues ont une résolution de 640 par 480 pixels. Quelques images acquises sont présentées Figure 2.11 et Figure 2.12. Les valeurs de rugosité

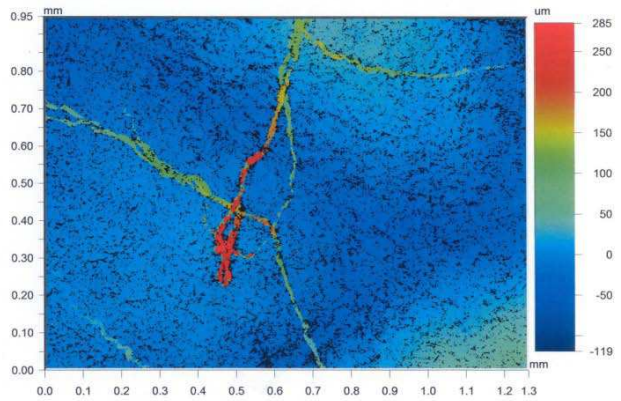
R_a, R_q, R_t extraites à partir de ces images sont également indiquées.

(a)



$$\begin{aligned} R_a &= 19.37\,\mu m \\ R_q &= 33.35\,\mu m \\ R_t &= 743.24\,\mu m \end{aligned}$$

(b)

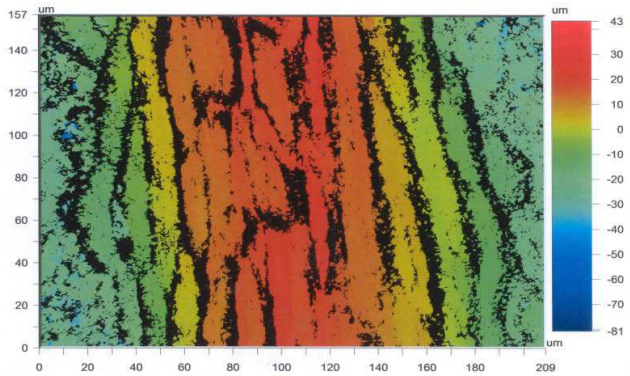


$$\begin{aligned} R_a &= 18.98\,\mu m \\ R_q &= 32.88\,\mu m \\ R_t &= 403.96\,\mu m \end{aligned}$$

Figure 2.11: Mesures de rugosité sur la feuille de vigne en lumière blanche (a), lumière verte (b) avec un grossissement de 5.0 X

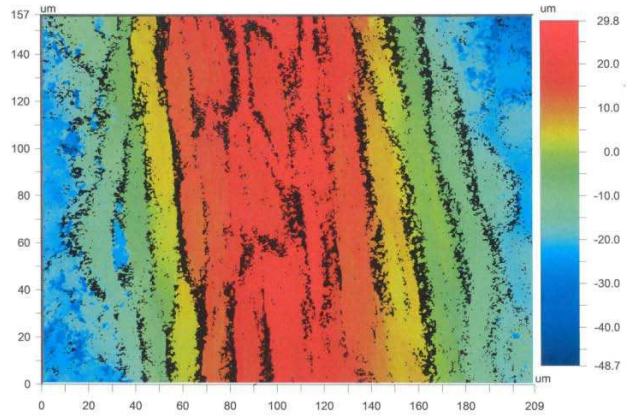
Les résultats montrent que les écarts moyens et les écarts quadratiques de rugosité (R_a, R_q) ne varient que très peu en fonction de la technique utilisée (lumière blanche ou monochromatique). Cependant, la rugosité totale (R_t) peut varier d'un rapport de presque 2 en fonction de la technique employée, ce qui représente une incertitude importante quant aux mesures effectuées. De plus, cette incertitude est susceptible de s'accroître à cause des nombreuses valeurs indéterminées présentes dans l'image qui sont représentées par des pixels noirs. Celles-ci sont plus nombreuses dans le cas de la lumière blanche

(a)



$$R_a = 13.74\,\mu m$$
$$R_q = 15.38\,\mu m$$
$$R_t = 123.85\,\mu m$$

(b)



$$R_a = 13.69\,\mu m$$
$$R_q = 15.28\,\mu m$$
$$R_t = 78.46\,\mu m$$

Figure 2.12: Mesures de rugosité sur la feuille de vigne en lumière blanche (a), lumière verte (b) avec un grossissement de 30.3 X

mais restent toutefois non négligeables dans le cas de la lumière verte. L'incertitude liée aux résultats représente dès lors un réel problème pour l'utilisation de ces techniques.

Toutefois, les méthodes d'observation décrites jusque maintenant et que l'on peut qualifier de quantitatives ne sont pas les seules techniques possibles. Il existe d'autres techniques, comme celles que l'on emploie en microscopie optique qui elles permettent d'obtenir une information qualitative de la surface.

Un microscope électronique à balayage (MEB) permet par exemple d'obtenir des images en relief des objets observés. Ceci est possible grâce à la grande

profondeur de champ qui est une des caractéristiques de ce type d'appareils. Ces appareils de mesure sont capables de mesurer des détails très fins pour des portions de surface allant de quelques microns à plusieurs centimètres carrés. Un tel dispositif est accessible à l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) de Dijon. Le modèle utilisé dans le cadre de ces travaux est présenté dans la Figure 2.13. Il s'agit d'un MEB environnemental. L'intérêt de ce genre d'appareil est de ne plus nécessiter la métallisation de l'échantillon (possibilité d'observer des objets hydratés) et de l'observer sous un environnement expérimental donné en terme de pression, de température et de composition de gaz.

Figure 2.13: Microscope électronique à balayage FEI ESEM-XL30

Un exemple d'image représentant la surface d'une feuille de vigne est présenté dans la Figure 2.14.

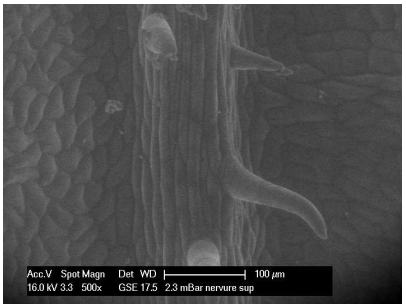


Figure 2.14: Image représentant un échantillon de la surface d'une feuille de vigne acquise au MEB

Dans le cadre de ces acquisitions, il semble que l'utilisation de méthodes d'analyse de texture appliquées aux images permette alors de caractériser la rugosité de la surface. Face aux difficultés rencontrées avec les techniques de description quantitative de la rugosité, le choix d'une description qualitative de la rugosité grâce à des outils d'analyse de texture s'est imposé.

2.3 Caractérisation de la rugosité par analyse de texture

Avant de se concentrer sur les différentes techniques existantes en analyse de textures, il est nécessaire de se pencher au préalable sur le problème de la définition d'une texture. En effet, il n'existe pas de définition précise de la texture [Haralick et al., 1973], et ce malgré son omniprésence dans le domaine de l'analyse d'images.

2.3.1 Définitions de la texture

Donner une définition précise et universelle de la notion de texture est un problème difficile qui n'a toujours pas été résolu. Le terme texture admet des significations différentes selon le domaine dans lequel il est utilisé (géologie, textile, agro-alimentaire,...). En outre, au sein d'un même domaine, et, particulièrement en traitement d'images, il n'existe pas de véritable consensus en ce qui concerne la définition d'une texture.

Le manque crucial d'une définition exploitable de la notion de texture est, en partie, dû à la difficulté de comprendre et de modéliser le système de perception visuelle humain. C'est pourquoi les recherches effectuées pendant les dernières décennies ont principalement conduit à des solutions adaptées à une application précise, ou, tout au moins, à une famille d'images.

En terme de définition de la notion de texture, on trouve d'abord celle donnée par le dictionnaire, qui précise simplement que la texture peut être définie comme la répétition spatiale d'un même motif dans différentes directions de

l'espace. Une autre définition plus fine considère une texture comme un phénomène à 2 dimensions [Haralick, 1979]. La première dimension concerne la description d'éléments de base ou primitives à partir desquels est formée la texture. La seconde dimension est relative à la description des relations spatiales entre ces primitives.

Selon les primitives et les règles de placement, 2 types de textures peuvent être observés : les macrotextures (ou textures structurées) pour lesquelles il est facile d'extraire visuellement le motif de base et les lois d'assemblage des primitives entre elles, et les microtextures (ou textures aléatoires) qui présentent un aspect plus chaotique, plus désorganisé, mais dont l'impression visuelle reste globalement homogène.

Les textures naturelles, contenant les informations à partir desquelles il est possible de caractériser la rugosité, présentent en général des dispositions aléatoires. Il sera donc plus judicieux de se concentrer sur les techniques d'analyse des microtextures afin d'extraire les paramètres les plus discriminants pour caractériser la rugosité. Dans l'objectif de choisir la méthode la plus adaptée, un bref récapitulatif des techniques existantes est proposé.

2.3.2 Etat de l'art en analyse de textures

L'objectif principal de l'analyse de textures réside dans l'extraction de paramètres mathématiques représentatifs des caractéristiques de la texture. Dans la littérature, une large variété de techniques ont été proposées et testées en pratique afin d'extraire ces paramètres de texture. Dans ce contexte, [Tuceryan and Jain, 1993] ont distingué quatre familles de paramètres de texture :

- les attributs géométriques
- les attributs basés sur la modélisation spatiale des textures
- les attributs spatio-fréquentiels
- les attributs statistiques

Le type de texture à analyser conditionne le choix des attributs à utiliser. Ainsi, autant une texture régulière sera mieux décrite par des attributs géométriques, autant une texture irrégulière sera mieux caractérisée par des attributs statistiques.

La description dite géométrique d'une texture tient compte de l'information structurelle et contextuelle de l'image. En effet, la description de la texture est réalisée, lors d'un prétraitement, par l'extraction explicite des primitives (régions, contours, motifs élémentaires...) appelés attributs géométriques, puis par la définition des règles de placement de ces primitives. Cependant, comme ces attributs sont sensibles à la régularité des motifs texturés présents dans l'image, ils conviennent parfaitement aux macrotextures mais ne permettent pas de caractériser des textures irrégulières comme celles présentes dans la majorité des images naturelles. Cette famille d'attributs ne présente donc aucun intérêt pour caractériser la rugosité des feuilles de vigne.

Dans le cadre de ces travaux, la famille des attributs statistiques est à privilégier au vu du caractère aléatoire des textures analysées. En effet, ces méthodes s'appuient sur une description des propriétés locales des textures, ce qui sous-entend que les relations de placement au sein des microtextures se situent à faible échelle. A l'intérieur de cette famille d'attributs, il est possible de distinguer deux sous-familles. La première exploite directement les propriétés statistiques de la texture (matrices de coocurrences, matrices de longueurs de plages...) afin d'extraire la signature la plus discriminante de la texture, tandis que la seconde exploite les propriétés statistiques à partir d'un plan transformé dans lequel on réécrit l'image de texture (transformation de Fourier par exemple).

2.3.2.1 Les méthodes statistiques à partir de l'image de texture

Les méthodes statistiques étudient les relations entre un pixel et ses voisins. Elles sont utilisées pour caractériser des structures fines, sans régularité apparente. Plus l'ordre de la statistique est élevé et plus le nombre de pixels (1 à n) mis en jeu est important.

Dans les méthodes de premier ordre, qui correspondent à une description de l'histogramme des niveaux de gris, il n'y a pas d'informations sur la localisation du pixel. Il est donc nécessaire d'utiliser des méthodes d'ordre supérieur pour une analyse plus précise de la texture.

Les matrices de cooccurrence estiment des propriétés des images relatives à

des statistiques de second ordre [Haralick et al., 1973]. Cette approche est devenue la plus connue et la plus utilisée pour extraire des caractéristiques de textures. La texture est alors définie comme la distribution spatiale des niveaux de gris. Ces matrices contiennent des moyennes de l'espace du second ordre.

Une matrice de cooccurrence est une matrice de taille $N \times N$, où N est le nombre de niveaux de gris de l'image de texture. Pour un déplacement d (translation), un élément (i, j) de la matrice est défini par le nombre de pixels de l'image de niveau de gris j situés à une distance d d'un pixel de niveau de gris i. Formellement, la matrice de cooccurrence relative à un déplacement d est définie de la manière suivante :

$$M_d(i, j) = card(\{((r, s), (t, v)) \ : \ I(r, s) = i, I(t, v) = j\}) \tag{2.10}$$

avec d un vecteur de déplacement (dx, dy) et $(r, s), (t, v)$ sont les coordonnées de l'image avec $(t, v) = (r + dx, s + dy)$.

Chaque terme $M_d(i, j)$ estime donc la probabilité conjointe qu'un pixel de niveau de gris i soit associé par d à un niveau de gris j. L'amplitude du déplacement n'excède pas, en général, quelques pixels, afin de ne prendre en compte qu'une information très locale de voisinage.

Afin d'extraire des attributs texturaux de ces matrices, 14 indices ont été définis par [Haralick, 1979] (moyenne, variance, énergie, contraste, corrélation, entropie parmi les principaux). Ils contiennent des informations sur la finesse, la directionnalité et la granularité de la texture. Par conséquent, ils peuvent être utilisés pour caractériser la rugosité.

Les matrices de cooccurrences mettent en évidence les relations qui existent entre les pixels à la fois par un aspect local (les niveaux de gris) et un aspect spatial (le déplacement). Cependant, ceci n'est vrai que si un nombre important de matrices sont calculées. Si on se limite au calcul de quelques matrices, en ne considérant que des déplacements composés uniquement d'une direction et plusieurs distances (ou inversement), une grosse partie de l'information est

perdue. Ceci montre que, outre l'importance du choix du déplacement, il reste à calculer un nombre assez important de matrices.

Ensuite, il est intéressant de noter que dans la pratique, les images sont altérées afin de ne considérer qu'une partie des niveaux de gris (8, 16, voire 32 niveaux de gris). Ainsi les matrices de cooccurrence obtenues ne sont pas de taille trop importante ce qui implique un temps de calcul raisonnable.

Il existe d'autres techniques d'ordre supérieur. La plus utilisée est la méthode des longueurs de plages de niveaux de gris [Galloway, 1975]. Elle permet de mettre en evidence les relations entre plusieurs pixels et non plus deux pixels comme avec une technique du second ordre. Elle consiste à compter le nombre de plages d'une certaine longueur j, de niveau de gris i dans une direction θ donnée. A chaque direction θ correspond une matrice $R(\theta)$:

$$R(\theta) = [r(i,j)/\theta] \tag{2.11}$$

avec $r(i,j)$ le nombre de plages de pixels de niveau de gris i, de longueur j et θ la direction de la plage de niveau de gris.

Une fois l'ensemble des plages présentes dans l'image déterminées, un certain nombre d'attributs statistisques caractérisant les textures sont extraits. Les trois principaux sont le poids des plages courtes, le poids des plages longues et la distribution des niveaux de gris. Ils permettent de mesurer la position et la distribution des plages dans l'image.

Cependant, comme pour les matrices de cooccurrence, le problème du choix des directions se pose. Si le nombre de matrices calculé est insuffisant, des pertes d'information plus ou moins conséquentes seront la cause de nombreuses erreurs dans le processus de classification.

Il est important de noter que les méthodes statistiques basées directement sur l'image de texture présentent un inconvénient majeur : elles sont très sensibles au bruit, ceci représente un réel handicap dans l'étude de textures naturelles. Ceci a poussé la communauté scientifique à s'intéresser aux attributs extraits à partir d'un plan transformé de l'image, notamment dans le domaine fré-

quentiel. L'intérêt de ces approches travaillant dans le domaine fréquentiel, est surtout lié à la représentation quasi-uniforme du bruit dans ce domaine, alors qu'il peut altérer, de façon importante, les variations locales d'intensité dans la représentation spatiale. La robustesse au bruit de plusieurs paramètres extraits de la Transformée de Fourier a été démontrée par [Liu and Jernigan, 1990]. La Transformée de Fourier semble donc fournir un plan parfaitement adapté à l'analyse des textures naturelles.

2.3.2.2 Les méthodes statistiques à partir de la Transformée de Fourier

L'intérêt de travailler dans l'espace de Fourier est l'extraction de caractéristiques fréquentielles de la texture. Soit f une fonction sommable dans le plan. La Transformée de Fourier s'écrit :

$$\hat{f}(\xi) = \int_{\mathbb{R}^2} f(x) \exp(-j\xi x)\, dx \tag{2.12}$$

Dans la pratique, la Transformée de Fourier discrète bidimensionnelle est appliquée du fait de la représentation discrète des données dans les images de texture [Duhamel and Vetterli, 1990]. Dans le cas d'une image discrète I de taille $M \times N$, cette transformée est donnée par l'expression suivante :

$$F(x,y) = \frac{1}{N+M} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} I(k,l) \exp 2\pi i (\frac{k}{N}x + \frac{l}{M}y) \tag{2.13}$$

avec $i^2 = -1$.

Dans ce plan, le niveau de gris d'un pixel est équivalent à la somme pondérée de fonctions exponentielles complexes correspondant à différentes fréquences spatiales. Les termes de basse fréquence représentent les variations douces des niveaux de gris dans l'image tandis que les termes de haute fréquence correspondent aux variations plus brutales.

Un critère important dans le choix des attributs de texture est leur invariance aux transformations engendrées par la modification des conditions d'observation, telles que la rotation, la translation, le changement des conditions

d'éclairage ou encore le changement de résolution spatiale. Dans ce but, [Gauthier et al., 1991] ont proposé une famille d'invariants, appelés descripteurs de mouvement. Ceux-ci s'appliquent aux images binaires et sont invariants par translation, par rotation, et insensibles à l'effet miroir, c'est le cas des Descripteurs Généralisés de Fourier (DGF). [Smach et al., 2008] a démontré la robustesse des approches basées sur les DGF dans le domaine de la reconnaissance d'objets. Ce type de descripteur semble donc présenter un grand intérêt pour la caractérisation de la rugosité de feuilles naturelles. Les DGF sont définis de la façon suivante.

En reprenant la définition de la Transformée de Fourier, si (λ, θ) sont les coordonnées polaires du point ξ, on désigne alors par $\hat{f}(\lambda, \theta)$ la Transformée de Fourier f au point (λ, θ). L'application D_f de $\mathbb{R}_+$ dans $\mathbb{R}_+$ est alors défini par :

$$D_f(\lambda) = \int_0^{2\pi} |\hat{f}(\lambda, \theta)|^2 d\theta \tag{2.14}$$

$|\hat{f}(\lambda, \theta)|^2$ est appelé le spectre de puissance au point (λ, θ) et correspond au module de la Transformée de Fourier élevé au carré. D_f représente le vecteur caractéristique, appelé DGF, qui permet de décrire l'image de texture. Sa construction est illustrée dans la Figure 2.15.

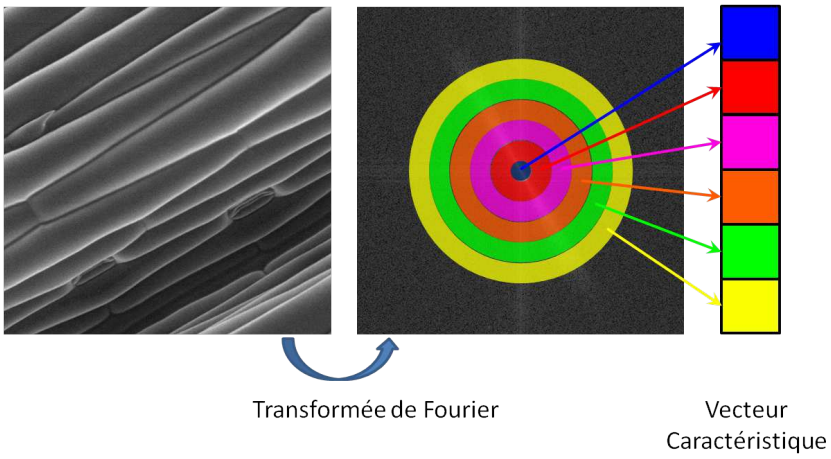


Figure 2.15: La construction du Descripteur Généralisé de Fourier

Des anneaux concentriques de rayon croissant sont construits à partir du centre de la Transformée de Fourier. La moyenne est calculée pour chaque anneau. Chaque valeur obtenue représente l'énergie relative à une fréquence particulière. Cette valeur est stockée dans une case du vecteur caractéristique. Un exemple de DGF est présenté dans la Figure 2.16.

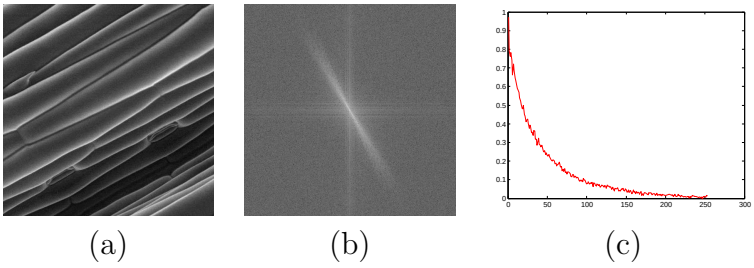


Figure 2.16: Exemple de calcul du DGF (a) Image originale, (b) Transformée de Fourier, (c) Allure du vecteur caractéristique ou DGF

Si les DGF présentent un fort potentiel dans le domaine de la reconnaissance de formes, ils représentent malheureusement un espace de relativement haute dimension dans le cas d'images de textures de grande taille. Ces données sont alors difficiles à manipuler car redondantes et présentent un coût temporel de traitement prohibitif. Par ailleurs, elles réduisent de manière significative les

performances des classifieurs classiques. Ce problème, bien connu sous le nom du phénomène de Hughes [Hughes, 1968], est illustré dans la Figure 2.17.

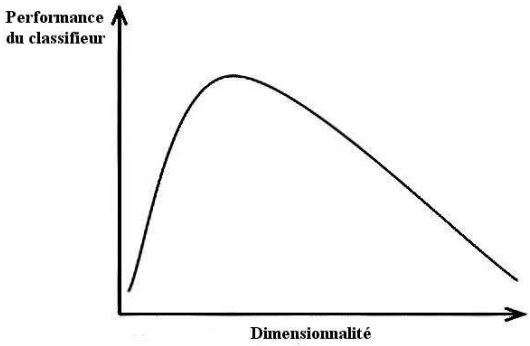


Figure 2.17: Le phénomène de Hughes d'après [Journaux et al., 2006]

Ainsi, pour améliorer le processus de classification, il peut être intéressant d'employer dans ce cadre des techniques de réduction de dimension (RD) permettant de conserver l'essentiel de l'information tout en réduisant la quantité de données. Dans la littérature, un éventail important de méthodes de RD existe, ces méthodes pouvant être classées selon trois caractéristiques propres à la transformation appliquée : la linéarité (linéaire ou non), l'échelle d'analyse (locale ou globale) et la métrique utilisée (euclidienne, géodésique,etc...).

L'application d'une méthode de RD nécessite la détermination de la dimension du nouveau sous-espace de projection (espace d'arrivée). Cette dernière correspond à la dimension intrinsèque, autrement dit à la dimension informative réelle des données, afin de conserver le maximum de l'information utile lors de la projection. La dimension intrinsèque est inférieure ou égale à la dimension initiale des données. Un état de l'art des différentes approches permettant de calculer la dimension intrinsèque est proposé par [Lee and Verleysen, 2007].

Dans le contexte de classification de textures naturelles à partir des DGF, [Journaux et al., 2008] ont proposé une étude comparative des performances des classifieurs classiques alimentés avec les DGF réduits par les différentes familles de RD. Dans cette étude, la dimension intrinsèque est déterminée par une approche basée sur la notion de dimension fractale [Camastra and

Vinciarelli, 2002], elle est fixée à 5. Les résultats montrent que peu importe la méthode de RD employée, l'utilisation d'un classifieur Machine à Vecteurs Supports (SVM) [Vapnik, 1998] permet d'obtenir les meilleurs performances avec les pourcentages d'erreur de classification les plus faibles.

Ainsi, j'ai décidé de me limiter à ce type de classifieur précis dans le cadre de mes travaux. Parmi la douzaine de techniques de RD comparées dans cette étude, j'ai sélectionné les quatres techniques offrant les meilleurs résultats et appartenant à quatre familles basées sur des caractéristiques différentes. Il s'agit de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) [Jolliffe, 2002], l'Analyse des Distances Curvilignes (ADC) [Lee et al., 2004], l'Isometric Feature Mapping (ISOMAP) [Tenenbaum et al., 2000] et l'Analyse Discriminante à Noyaux (ADN) [Liang et al., 2006]. Les caractéristiques de ces méthodes sont présentées dans le Tableau 2.1 :

	Linéarité		Echelle		Métrique	
	Linéaire	Non-linéaire	Globale	Locale	Euclidienne	Géodésique
ACP	X		X		X	
ADC		X		X		X
ISOMAP		X	X			X
ADN		X	X		X	

Tableau 2.1: Caractéristiques des méthodes de RD sélectionnées

L'utilisation d'un classifieur SVM ayant comme entrées des DGF réduits par les techniques sélectionnées fournit d'excellents résultats de classification dans le cas de textures naturelles d'après [Journaux et al., 2008]. Cependant, la robustesse au bruit d'un tel protocole n'a jamais été vérifiée. Or cette étape est cruciale afin de pouvoir valider ce protocole dans le cas de textures naturelles. Pour y parvenir, j'ai repris la base d'images agronomiques réalisée à l'université libre de Bruxelles et utilisée par [Journaux et al., 2008] (Figure 2.18) lors de son post-doctorat à Gembloux, Université de Liège. Une nouvelle classe comprenant les images de feuilles de vigne présentées dans la Figure 2.14 est ajoutée à cette base. Ces images possèdent la même résolution (512x512 pixels) et la même échelle (100 µm) qui est parfaitement adaptée à notre application.

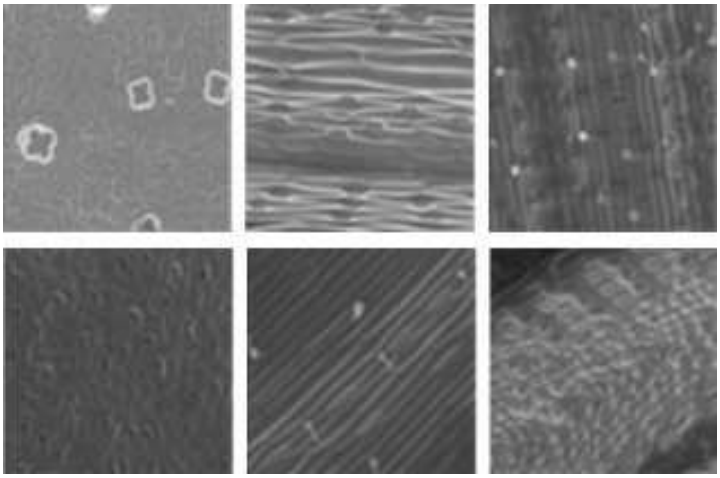


Figure 2.18: Base d'images agronomiques utilisée par [Journaux et al., 2008] (tomate, ray grass, blé mûr, pois, blé jeune, prêle)

Afin de proposer la démarche la plus rigoureuse possible, une deuxième base d'images bien connue de la communauté scientifique, la base de Brodatz, est également utilisée en guise de référence. Cette base contient quant à elle 32 classes de texture.

Pour chaque classe d'images, cinq niveaux de bruit blanc gaussien avec un écart-type compris entre 0.03 et 0.19 sont ajoutés artificiellement comme illustré dans la Figure 2.19.

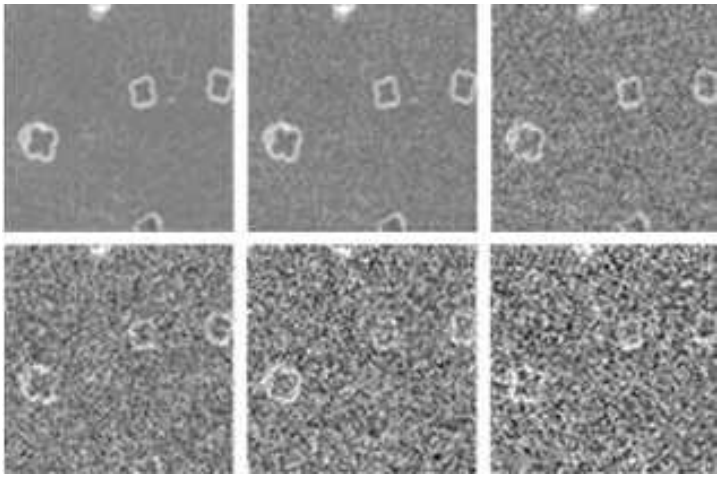


Figure 2.19: Images bruitées selon cinq niveaux de bruit (écart-type : 0, 0.03, 0.08, 0.12, 0.16, 0.19)

La validation des performances du protocole est déterminée au moyen d'une erreur moyenne calculée à partir de 20 expériences consécutives dont le résultat est obtenu par validation croisée d'ordre 10 [Witten et al., 2011]. Les résultats du Tableau 2.2 et du Tableau 2.3 présentent le taux d'erreur de classification en fonction de la méthode de RD utilisée et du niveau de bruit appliqué aux images.

		Bruit (Ecart-type)	0	0.03	0.08	0.12	0.16	0.19
DGF non réduit			**6.94**	7.06	7.15	7.22	7.4	7.51
Méthode de RD	linéaire	ACP	**4.67**	4.69	4.81	4.93	5.06	**5.21**
	non linéaire	ISOMAP	4.51	4.59	4.67	4.85	4.97	5.14
		ADC	4.42	4.47	4.58	4.7	4.86	5.03
		ADN	**4.18**	4.22	4.34	4.47	4.63	**4.81**

Tableau 2.2: Taux d'erreur de classification (en %) sur la base de Brodatz en fonction du bruit et de la méthode de RD

		Bruit (Ecart-type)	0	0.03	0.08	0.12	0.16	0.19
DGF non réduit			**4.82**	4.96	5.11	5.27	5.48	6.07
	linéaire	ACP	**2.35**	2.46	2.56	2.64	2.71	**2.94**
		ISOMAP	2.28	2.33	2.41	2.53	2.62	2.86
Méthode de RD	non linéaire	ADC	1.92	1.98	2.04	2.12	2.19	2.41
		ADN	**1.76**	1.8	1.84	1.91	1.97	**2.21**

Tableau 2.3: Taux d'erreur de classification (en %) sur la base d'images naturelles en fonction du bruit et de la méthode de RD

En prenant comme paramètre de texture le DGF non-réduit, il est intéressant d'observer que même avec l'ajout de bruit blanc gaussien (dont l'écart type reste inférieur à 0.19), les résultats de classification restent raisonnables (erreur inférieure à 7.51% pour la base de Brodatz et 6.07% pour la base d'images naturelles). Le même comportement est observé lorsque le DGF est réduit par n'importe quelle méthode de RD, et ce peu importe la base d'images étudiée. Ceci n'est pas vraiment étonnant puisque le paramètre est construit à partir de la Transformée de Fourier, dans le domaine fréquentiel, où le bruit est représenté de façon quasi-uniforme. Ces résultats prouvent la robustesse au bruit du protocole, élément extrêmement important dans la classification de textures naturelles.

Ensuite, bien que les résultats avec les DGF non-réduits soient satisfaisants, ils s'améliorent à tous les coups lorsqu'une technique de RD est appliquée. De plus, cette amélioration est plus nette avec l'utilisation de méthodes de RD non linéaires (notamment l'ADN). Néanmoins, ce gain en termes de performance de classification a un impact sur un autre paramètre important du processus : le temps de calcul. Le temps de calcul moyen nécessaire à chaque technique de RD est présenté dans le Tableau 2.4 :

Méthode de RD	linéaire	ACP	0.46
	non linéaire	ISOMAP	24.55
		ADC	378.59
		ADN	9.41

Tableau 2.4: Temps de calcul moyen (en s) pour chaque méthode de RD

Les temps de calcul sont très différents selon les techniques utilisées. L'origine de ces différences est la différence de complexité algorithmique entre ces techniques. Les méthodes de RD non linéaires sont plus gourmandes en terme de calculs (surtout l'ADC), par rapport à l'ACP (linéaire) qui est beaucoup plus rapide tout en fournissant un taux d'erreur de classification très faible, ce qui représente un excellent compromis. Pour notre application qui ne nécessite pas d'exécution en temps réel, un temps de calcul conséquent n'est pas un handicap. Cependant, si le besoin d'une étude en temps réel se fait ressentir, une solution permettant un temps de calcul plus raisonnable pour les techniques de RD non linéaires est envisageable. Elle consiste en l'utilisation d'une puissance de calcul plus conséquente disponible grâce à plusieurs ordinateurs connectés sur le même réseau, on parle alors de cloud computing [Decourselle et al., 2010].

2.3.3 Bilan

Dans l'optique d'analyser la qualité de la pulvérisation et plus particulièrement l'impact des gouttes, il est important d'étudier l'influence de la surface et notamment sa rugosité. Une description quantitative de la rugosité n'a pu être établie, que ce soit par une approche mécanique (palpeur) ou que ce soit par une approche optique (interféromètre). Une description qualitative de la rugosité est alors proposée grâce à des outils d'analyse de texture. Les résultats présentés indiquent que le protocole basé sur un classifieur SVM alimenté par les DGF réduits est parfaitement adapté à la classification des textures

naturelles, ce qui permet de caractériser la rugosité des surfaces étudiées. La caractérisation de la rugosité de ces surfaces fournit un indicateur directement lié au terme E_θ dans l'Équation 2.3 (page 33), ce terme définissant l'influence de la surface d'impact sur le comportement de la goutte. Un changement de rugosité va provoquer une modification de E_θ et par conséquent des rapports d'énergie définissant les transitions entre les différents comportements de la goutte. Il reste maintenant à déterminer les caractéristiques de la goutte ainsi que son comportement lors de l'impact. Dans un premier temps, la mise en place d'un système d'acquisition permettant l'observation de gouttes dans les conditions de pulvérisation est indispensable. Ensuite, des techniques de traitement d'images seront nécessaires afin d'extraire les caractéristiques des gouttes. Dans le chapitre suivant, l'attention sera portée sur la mise en place du système d'acquisition.

3 Acquisition pour observation des gouttes

Dans l'optique d'analyser le processus de pulvérisation, l'imagerie et des techniques de traitement d'images sont associées afin d'extraire les paramètres pertinents influençant la qualité de la pulvérisation (sous-sous-section 1.2.2.3). La qualité du traitement d'images dépend fortement de la qualité des images acquises. La conception du système d'acquisition est donc une étape importante. Un système d'acquisition spécifique est nécessaire afin de répondre aux contraintes liées aux conditions de pulvérisation (taille, vitesse des gouttes). Ce chapitre est essentiellement consacré à la présentation des outils mis en place permettant l'observation du processus de pulvérisation tant au niveau de la trajectoire qu'au niveau du comportement des gouttes lors de l'impact.

3.1 Description du système d'acquisition

Comme indiqué dans la sous-sous-section 1.2.2.3 où un état de l'art des différentes techniques d'imagerie permettant d'observer le processus de pulvérisation est dressé, mon choix s'est porté sur la conception d'un système basé sur l'utilisation d'une caméra à imagerie rapide. Grâce à la haute fréquence d'acquisition, le suivi des gouttes est possible et par là même l'extraction de la trajectoire. Il est important de noter que ce système possède un avantage indéniable par rapport aux méthodes existantes comme la PIV : il permet l'observation du comportement des gouttes lors de l'impact avec la cible.

3.1.1 Vue d'ensemble du système

Le principe du système d'acquisition est schématisé dans la Figure 3.1.

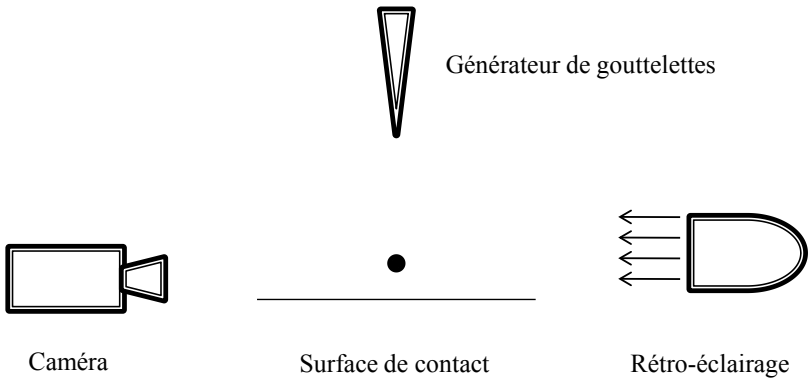


Figure 3.1: Schéma du système d'acquisition

La conception d'un système d'imagerie, notamment rapide, implique un travail précis concernant l'éclairage de la scène. En effet, cela conditionne la qualité de l'enregistrement des images et par conséquent la complexité du traitement d'images qui est appliqué a posteriori. Un puissant dispositif d'éclairage est indispensable à cause des paramètres intrinsèques de la caméra qui prennent des valeurs bien spécifiques dans le cas de l'imagerie rapide (haute fréquence d'acquisition, faible temps d'exposition). En effet, un faible temps d'exposition implique qu'une faible quantité de lumière passe à travers l'objectif, ce qui a pour conséquence l'acquisition d'une image sombre qui ne pourra pas être traité correctement.

Différentes techniques d'illumination existent. Chaque méthode est adaptée aux détails que l'on souhaite faire ressortir dans l'image. L'illumination frontale ou lumière clé (key light en anglais) éclaire directement la surface de l'objet. Cependant, certains détails de la surface peuvent ne pas apparaître à cause de la formation d'ombres. Dans ce cas, une seconde technique peut être utilisée en complément : l'illumination d'appoint. Cette dernière éclaire l'objet par un angle relatif à la lumière clé et permet de déboucher les ombres crées par la première technique. Enfin, il existe une dernière technique où la lumière est dirigée de l'arrière de la scène vers la caméra, ce principe est connu sous le nom de rétro-éclairage. Son intérêt est d'éclairer les contours de l'objet afin de mieux le séparer du fond. Ce type d'éclairage est le plus adapté à

notre système car il va permettre de faire ressortir les contours de la goutte (Figure 3.2) et ainsi faciliter sa détection lors de la phase de traitement.

(a) (b)

Figure 3.2: Acquisition avec une caméra standard d'une goutte illuminée par une lumière d'appoint sur fond noir (a) ou par rétro-éclairage (b)

L'enjeu principal est de mettre en place un tel système d'acquisition sous les contraintes liées aux conditions de pulvérisation en viticulture.

3.1.2 Les contraintes liées à la pulvérisation

Il existe différentes techniques de pulvérisation en viticulture (sous-section 1.2.1). Les trois principales sont la pulvérisation par jet projeté, la pulvérisation par jet porté et la pulvérisation pneumatique. En fonction de la technique employée et des paramètres choisis par l'utilisateur (pression, choix des buses), les gouttelettes peuvent présenter des caractéristiques différentes en termes de diamètre et de vitesse. Les valeurs du diamètre sont comprises entre 100 et 500 µm tandis que les vitesses maximales sont de l'ordre de 13 m/s [Gauvrit, 1996], ce qui est largement supérieur à la vitesse terminale de chute de la goutte (vitesse que prend la goutte lorsqu'elle tombe sous le seul effet de son poids). Le challenge réside alors dans le fait de mettre en place un système capable de visualiser des objets possédant de telles caractéristiques de taille et de vitesse. Dans la suite de ce chapitre, les différentes parties composant le système sont détaillées et les choix effectués en vue de répondre à la problématique d'acquisition sont exposés.

3.2 Conception du système

3.2.1 La caméra rapide

Afin de permettre le suivi d'objets se déplaçant à de telles vitesses, la caméra doit offrir une fréquence d'acquisition élevée. Une telle caméra a grâcieusement été mise à ma disposition par l'Institut public belge de recherche pour l'agriculture, l'horticulture et la pêche [1] (ILVO). Elle a été utilisée pour diverses activités de recherche réalisées conjointement par ILVO et Agrosup Dijon dans le domaine de l'agriculture de précision [Hijazi et al., 2012]. Il s'agit du modèle Redlake's MotionPro HS-3 présenté dans la Figure 3.3 (source : IDTVision [2]).

Figure 3.3: Caméra Redlake's MotionPro HS-3

Cette caméra offre une résolution maximale de 1280x1024 pixels. Le capteur CMOS est composé de photosites de dimensions 12x12 µm, ce qui constitue une taille relativement importante par rapport à la normale. Cela permet de capter plus de lumière pour un pixel et réduire la sensibilité au bruit. En résolution maximale, la fréquence d'acquisition peut atteindre 1000 images par seconde. Toutefois des fréquences d'acquisition plus élevées peuvent être

1. www.ilvo.vlaanderen.be
2. http ://www.idtvision.com/

atteintes. En effet, la caméra possède une fonctionnalité particulièrement intéressante : le binning. Celle-ci permet, en diminuant la résolution verticale, de réduire le temps de lecture du capteur, ce qui permet alors d'accroître la fréquence d'acquisition. A résolution réduite (résolution verticale de 16 pixels), une fréquence d'acquisition atteignant 64000 images par seconde peut être envisagée. Enfin, une dernière caractéristique également très importante dans le domaine de l'imagerie rapide est le temps d'exposition du capteur. Celui-ci représente l'intervalle de temps pendant lequel l'obturateur laisse passer la lumière recueillie par le capteur afin de procéder à la construction d'une image. La caméra Redlake's MotionPro HS-3 admet des temps d'exposition pouvant descendre jusque 1 µs.

3.2.2 Le système optique

Le choix du système optique est fortement lié aux contraintes définies dans la sous-section 3.1.2. Un paramètre important à fixer est le champ de vue. Il correspond aux dimensions réelles de la scène qui est reflétée sur le capteur.

3.2.2.1 Détermination du champ de vue

Le diamètre minimal d'une gouttelette de pulvérisation est de l'ordre de 100 µm. Afin de permettre le suivi le plus aisé possible, cette gouttelette doit représenter la plus grande partie possible du capteur. Cependant, un second paramètre important à prendre en compte est la vitesse maximale de ces gouttelettes (13 m/s). Sachant que la caméra est capable de fonctionner en pleine résolution à 1000 images/s, la gouttelette peut parcourir 13 mm entre l'acquisition de 2 images. Ainsi, le champ de vue vertical doit être supérieur ou égal à 13 mm afin d'obtenir au moins 2 images d'une même gouttelette possédant une telle vitesse. Ensuite, si le champ de vue s'accroît, la goutte se reflète sur une portion de plus en plus réduite du capteur, ce qui implique une représentation de plus en plus petite de la goutte dans l'image et donc potentiellement un post-traitement de plus en plus compliqué. Ainsi, le champ de vue vertical est fixé à 13 mm, le champ de vue horizontal vaut alors 16.25 mm.

Le champ de vue fixé, il reste maintenant à déterminer le système optique permettant d'obtenir une représentation nette d'un tel champ de vue.

3.2.2.2 Choix du bloc optique

Le grossissement en fonction de la distance focale et de la distance de travail peut s'écrire de la manière suivante :

$$\frac{f}{d} = \frac{w}{W} = \frac{h}{H} \tag{3.1}$$

avec f la focale de l'objectif (en mm), d la distance de travail (en mm), w la largeur du capteur (en mm), W la largeur de la scène (en mm), h la hauteur du capteur (en mm) et H la hauteur de la scène (en mm).

D'après les données constructeurs, les dimensions du capteur sont : $w = 15.36$ mm et $h = 12.29$ mm. Le champ de vue souhaité a pour dimensions : $W = 16.25$ mm et $H = 13$ mm, ce qui correspond donc à un grossissement de 0.95x. Le Tableau 3.1 indique, pour des objectifs à différentes focales que j'ai à ma disposition, la distance de travail théorique pour obtenir le champ de vue désiré.

Focale (en mm)	25	50	100
Distance minimale de mise au point (en mm)	350	820	1000
Distance de travail théorique (en mm)	26.4	52.9	105.8

Tableau 3.1: Distances de travail théoriques pour différents objectifs

Dans chaque cas, la distance de travail théorique est inférieure à la distance minimale de mise au point, ce qui entraîne l'acquisition d'une image floue. Afin de remédier à ce problème, l'utilisation d'un ensemble de bagues-allonge est la solution. L'idée est d'augmenter la distance entre l'objectif et le capteur, on dit aussi qu'on augmente le tirage. Cet ensemble permet de simuler un objectif macro à moindre coût. Il permet d'augmenter le grossissement suivant la longueur des bagues-allonges utilisées tout en se rapprochant de la scène.

Le grossissement se calcule de la façon suivante :

$$G = \frac{t}{f} - 1 \tag{3.2}$$

avec t le tirage de l'objectif (en mm) et f la distance focale (en mm).

Cependant cette formule ne tient compte que d'un réglage de l'objectif calé sur l'infini. Il est important de prendre en compte l'allongement de tirage créé par la bague de mise au point. Le tirage obtenu par le simple allongement dû à la bague de mise au point se calcule par :

$$t' = \frac{D.f}{D - f} \tag{3.3}$$

avec D distance minimale de mise au point de l'objectif (en mm) et f la distance focale (en mm).

A cette valeur, il faut ajouter l'allongement de tirage, e (en mm), généré par la bague utilisée. On obtient alors le tirage total Tt :

$$Tt = t' + e \tag{3.4}$$

Le grossissement devient alors :

$$G = \frac{Tt}{f} - 1 \tag{3.5}$$

et la nouvelle distance de mise au point, D' (en mm), se calcule de la façon suivante :

$$D' = (1 + \frac{1}{G}).f \tag{3.6}$$

Le Tableau 3.2 indique, pour les différents objectifs que j'ai à ma disposition, l'allonge théorique permettant d'atteindre le grossissement souhaité ainsi que la nouvelle distance de mise au point.

Focale (en mm)	25	50	100
Distance minimale de mise au point (en mm)	350	820	1000
Tirage généré par la mise au point (en mm)	26.9	53.2	111.1
Allonge théorique (arrondie au mm)	22	44	84
Nouvelle distance de mise au point (en mm)	51.3	102.6	205.2

Tableau 3.2: Allonges théoriques et nouvelles distances de mise au point pour différents objectifs

Techniquement, ces 3 systèmes optiques sont réalisables. L'inconvénient majeur quant à l'utilisation de l'objectif de 25 mm réside dans la faible distance de mise au point. La scène se trouve alors très proche de la caméra, les risques d'éclaboussures sont importants. Cette solution est à éviter. Dans les conditions d'utilisation de l'objectif de 50 mm, la distance de mise au point est doublée et les risques d'éclaboussures grandement diminués, cette solution est envisageable. Dans le cas d'un 100 mm, la nouvelle distance de mise au point est quadruplée par rapport au cas du 25 mm.

Pour permettre un choix définitif du type d'objectif, un autre critère de décision doit être pris en compte : l'ouverture relative de l'objectif. Par convention, l'ouverture relative A est exprimé comme étant :

$$A = \frac{f}{n} \tag{3.7}$$

avec f la focale (en mm) et n le diamètre de l'objectif (en mm).

L'ouverture relative varie en fonction d'une plage dépendante de l'objectif selon une suite géométrique de raison $\sqrt{2}$ (Figure 3.4).

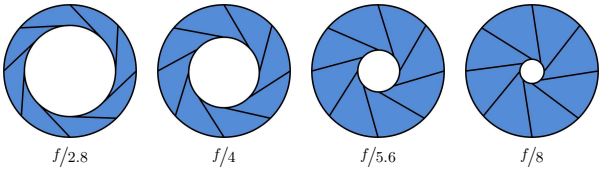


Figure 3.4: Exemples d'ouvertures relatives

Par exemple, A = 1.4, 2, 2.8... 16 avec A = 1.4 correspondant à une grande ouverture du diaphragme alors qu'une valeur plus grande (A = 16) indique une ouverture plus faible. Pour chaque augmentation de A, deux fois moins de lumière traverse l'objectif .

Un paramètre est directement lié à l'ouverture relative, il s'agit de la profondeur de champ (PdC). Lors de la mise au point de la scène, une zone devant et derrière ce plan de mise au point est également considérée comme nette : c'est ce qu'on appelle la profondeur de champ. Son calcul s'écrit :

$$PdC = Dpn - Ppn \tag{3.8}$$

où Dpn correspond au dernier plan net et Ppn au premier plan net, avec :

$$Dpn = \frac{D}{1 + C.A.\frac{D-f}{f^2}} \tag{3.9}$$

$$Ppn = \frac{D}{1 - C.A.\frac{D-f}{f^2}} \tag{3.10}$$

où D est la distance de mise au point, C le diamètre du cercle de confusion (estimé à la taille d'un photosite) qui vaut 12 µm pour le capteur présent dans la caméra et A l'ouverture relative du diaphragme.

L'équation de la profondeur de champ peut s'écrire de façon simplifiée sous la forme :

$$PdC = \frac{2.A.C.f^2.D.(D-f)}{f^4 - A^2.C^2.(D-f)^2} \tag{3.11}$$

Une importante profondeur de champ est un problème pour le système. En effet, si les gouttes apparaissent nettes dans des plans eloignés du plan de mise au point, alors l'extraction des caractéristiques de la goutte (comme la taille et la vitesse) ne peut pas être précise.

Le Tableau 3.3 indique les ouvertures relatives des différents objectifs à ma disposition ainsi que les profondeurs de champ calculées pour les différentes combinaisons objectif/bagues-allonge.

Focale (en mm)	25	50	100
Ouverture relative	1.4	1.4	2.8
Allonge nécessaire (en mm)	22	44	84
Distance de mise au point (en mm)	51.3	102.6	205.2
Profondeur de champ (en mm)	0.07	0.07	0.14

Tableau 3.3: Ouvertures relatives des différents objectifs et profondeurs de champs calculées

Les 3 combinaisons objectif/bagues-allonge fournissent de faibles profondeurs de champ, ce qui est idéal pour le système. D'autre part, l'objectif de 100 mm laisse moins passer de lumière que les autres objectifs à cause de son ouverure relative de 2.8. De plus, pour une même ouverture, plus l'allonge est importante, moins la lumière passe à travers l'objectif. Sachant qu'une des priorités en imagerie rapide est de capter le maximum de lumière, le choix de l'objectif de 100 mm avec 84 mm de bagues-allonge n'est semble-t-il pas adéquat. Le choix d'un objectif de 50 mm combiné à 44 mm de bagues-allonge semble donc correspondre au compromis idéal entre distance de travail et capacité à laisser passer la lumière. Un objectif Pentax de distance focale 50 mm et d'ouverture maximale 1.4 est donc utilisé conjointement à un ensemble

de bagues-allonge de 44 mm, ce qui permet d'obtenir le grossissement souhaité tout en restant à une distance raisonnable de la scène.

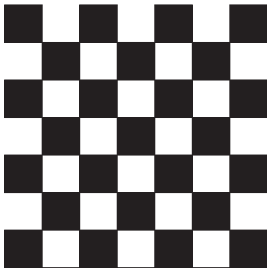
Focale (en mm)	50
Ouverture relative	1.4
Grossissement	0.95
Allonge nécessaire (en mm)	44
Distance de mise au point (en mm)	102.6
Profondeur de champ (en mm)	0.07

Tableau 3.4: Récapitulation des caractéristiques du dispositif optique sélectionné

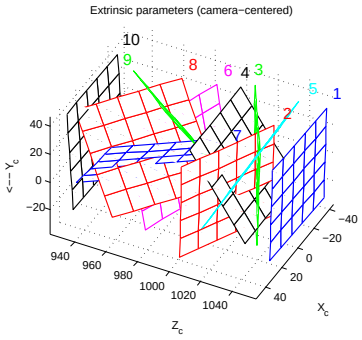
3.2.2.3 Mesure des distorsions induites par l'objectif

Le dispositif optique étant sélectionné, il est important de s'intéresser à la mesure de la distorsion engendrée par le système. La distorsion est une aberration géométrique (défaut optique de l'objectif) qui se traduit par exemple par la courbure des lignes droites présentes dans la scène acquise. A cet effet, l'outil de calibrage de caméra développé sous Matlab par Jean-Yves Bouguet est utilisé (Camera Calibration Toolbox[3] [Bouguet, 2010]). Une mire à damiers est utilisée comme référence, chaque carreau mesurant 30x30 mm. Elle est disposée selon différentes orientations (Figure 3.5) afin de calculer les paramètres extrinsèques de la caméra, c'est-à-dire les paramètres définissant sa position et son orientation dans l'espace. Il est important de noter que la mesure de la distorsion est effectuée avec l'objectif seul. En effet, l'utilisation de bagues-allonge implique une faible profondeur de champ, ce qui empêche d'obtenir des représentations nettes de la mire orientée de différentes façons. De plus, les bagues-allonge sont des éléments passifs. Elles ne modifient pas la trajectoire des rayons lumineux qui les traversent. Elles ne sont donc pas responsables de la distorsion qui peut apparaître avec certains objectifs.

3. http ://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html



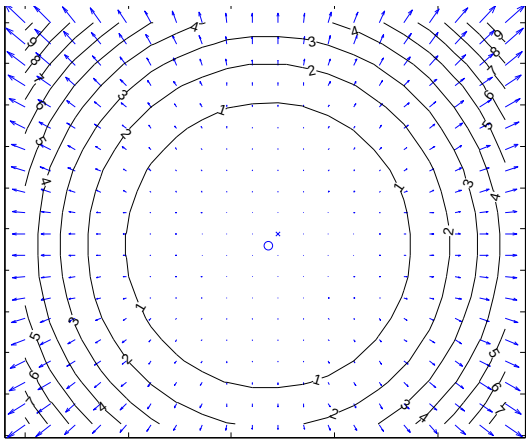
(a)



(b)

Figure 3.5: (a) Mire à damiers (b) Orientations de la mire

Après la détermination des intersections du damier sur chaque plan, le calcul de la distorsion est effectué. Afin de consulter les étapes de l'implémentation de ce calcul, le lecteur pourra se référer au site[2] où une documentation détaillée de l'outil est disponible. L'outil de calibrage génère 2 résultats : le modèle complet de distorsion et le vecteur de distorsion. Le modèle complet de distorsion permet une analyse plutôt qualitative de la distorsion tandis que le vecteur autorise une interprétation quantitative du résultat. Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 3.6.



$kc = [0.04633,\ 0.46141,\ 0.00000,\ 0.00000,\ 0.16425]$

Figure 3.6: Modèle complet de distorsion de l'objectif de 50 mm

Le vecteur de distorsion obtenue, kc, est le vecteur qui décrit la distorsion et permet d'effectuer les corrections de distorsion sur les images [Zhang, 2000]. Il est intéressant d'observer que cette matrice possède des valeurs très proche de 0, ce qui indique que la distorsion est extrêmement faible et peut être négligée. Ceci n'est pas étonnant du fait qu'une distance focale de 50 mm offre un angle de champ équivalent à celui de la vision humaine qui ne présente aucune distorsion (ou très faible).

Le modèle complet de distorsion offre une représentation très visuelle de la distorsion de l'objectif. Il se traduit par un champ de vecteurs décrivant l'effet de distorsion en différentes zones du capteur. Pour l'objectif de 50 mm, il est remarquable de constater que les vecteurs possèdent en général une amplitude très faible. Les seules zones présentant des amplitudes un peu plus importantes sont les coins de l'image, cependant ces valeurs restent raisonnables. De plus, en utilisant une zone d'intérêt réduite du capteur afin d'augmenter la fréquence d'acquision (cf sous-section 3.2.3), les parties du capteur situées dans les coins ne sont pas exploitées. Ainsi, la distorsion peut être considérée comme négligeable dans la suite des travaux.

3.2.3 Les réglages de la caméra

La caméra est inclinée de 90° afin de permuter résolution horizontale et verticale. Ceci permet de disposer d'une résolution verticale supérieure (16.25 mm). La marge (par rapport aux 13 mm) permet de prendre en compte la surface d'impact qui est également reflétée sur la partie inférieure du capteur.

La résolution horizontale (anciennement la résolution verticale) est diminuée selon un rapport de 3.6, ce qui permet d'augmenter la fréquence d'acquisition selon le même rapport grâce à la fonction binning de la caméra. Ainsi, la fréquence d'acquisition atteint 3600 images par seconde, ce qui offre une description plus précise de la trajectoire de la goutte et de son comportement à l'impact, ce qui va faciliter le suivi des gouttes réalisé *a posteriori*.

Enfin, il reste un dernier paramètre très important à fixer : le temps d'exposition de la caméra. Il représente l'intervalle de temps pendant lequel l'obturateur laisse passer la lumière qui se reflète sur le capteur et permet la création

de l'image. Un trop long temps d'exposition aura pour conséquence une représentation floue de la goutte (dûe à son mouvement), et entraînera donc l'extraction de caractéristiques erronées. Afin de pallier ce problème, le temps d'exposition maximal doit être déterminé. Il correspond au temps permettant à la goutte de se déplacer d'un pixel sur le capteur. Sachant que la goutte peut atteindre des vitesses maximales de l'ordre de 13 m/s et qu'un pixel représente 12.63 µm (12/0.95), le temps d'exposition maximal est estimé à 1 µs (12.63/13=0.97), ce qui est également le temps d'exposition minimal autorisé par la caméra. Le temps d'exposition est donc fixé à 1 µs, ce qui est très faible et va nécessiter la mise en place d'un rétro-éclairage puissant.

3.2.4 Le rétro-éclairage

Comme précisé précédemment, le rétro-éclairage permet de faire ressortir les contours de la goutte afin de la séparer du fond. A cause du faible temps d'exposition utilisé lors de l'acquisition (1 µs), ce rétro-éclairage doit être puissant. Dans un premier temps, un projecteur halogène d'une puissance de 500 W est utilisé (Figure 3.7).

Figure 3.7: Projecteur halogène d'une puissance de 500 W

L'avantage de ce projecteur est son faible coût. Cependant, il présente de nombreux inconvénients. Tout d'abord, même si l'illumination semble suffisante, elle n'est pas du tout homogène. Il est possible par exemple de distinguer l'ampoule au milieu de l'illumination, ceci peut entraîner des problèmes lors de la phase de suivi des gouttes. Ensuite, ce projecteur dégage énormément de chaleur, ce qui contribue à la détérioration rapide des feuilles (visible à l'oeil nu) et donc à une modification de leur état de surface. Ce type d'illumination n'est donc pas adapté à cette étude.

Afin de surmonter ce problème de dégagement excessif de chaleur, l'utilisation d'un système à LED de puissance (3W) est la solution proposée. Ce type d'éclairage permet une puissante illumination avec un dégagement de chaleur moindre. De plus, l'utilisation d'un dissipateur thermique permet encore de réduire la quantité de chaleur émise vers la scène. Un tel dispositif est illustré dans la Figure 3.8.

Figure 3.8: Système d'illumination à LED de puissance avec dissipateur thermique

Le système d'illumination est positionné en mode rétro-éclairage afin de faire ressortir les contours de la goutte uniquement. Il n'est pas nécessaire de faire apparaître certains détails en particulier, donc il n'existe pas de longueur d'onde spécifique d'émission de la LED qui soit particulièrement avantageuse dans notre cas. Ainsi, parmi les différentes températures de teinte disponibles, l'ampoule LED blanc neutre (4500K) est choisie car elle permet de faire ressortir les détails de façon homogène (pas forcément dans le rouge par exemple)

et pourra donc être réutilisée pour diverses applications au sein du laboratoire en mode illumination d'appoint. Cette LED est alimentée par un courant de 700 mA et génère un flux lumineux de 150 lumens (lm).

La lumière émise par une LED se propage en rayons allant dans toutes les directions à partir du centre de la LED selon un angle solide propre à chaque LED. Afin de récupérer le maximum de l'intensité lumineuse dans un faisceau de direction unique, ces rayons passent dans un collimateur. Un collimateur est une solution optique convergente qui permet de corriger l'angle oblique d'arrivée des rayons afin d'avoir des rayons parallèles en sortie. Ce faisceau est ensuite dirigé à travers un diffuseur afin d'homogénéiser la source de lumière. On dispose ainsi d'une source de lumière puissante, homogène et dégageant une quantité de chaleur raisonnable, bref cette source convient parfaitement à notre application. Ce système d'illumination a été fabriqué par une entreprise locale, BEST ELECTRONIQUE[4], spécialisée dans le domaine de l'éclairage LED. Le système d'imagerie rapide est maintenant opérationnel, la prochaine étape consiste en la mise en place des conditions de pulvérisation : définition de la surface d'impact et génération des gouttes.

Hypothèses

L'objectif de la thèse étant de montrer la faisabilité d'un système d'imagerie permettant d'analyser la qualité d'une pulvérisation par l'observation du comportement des gouttes lors de l'impact, certaines hypothèses sont posées afin de simplifier la mise en place du protocole experimental. Ainsi, les surfaces d'impact considérées sont toutes en position horizontale. Une fois le protocole validé, des expérimentations prenant en compte différentes inclinaisons de la feuille pourront être réalisées, ce qui correspondra mieux à la réelle disposition des feuilles dans un rang de vigne. Une seconde hypothèse est posée : les gouttes pulvérisées ne sont constituées que d'eau, ce qui est suffisant pour valider le protocole. Des expérimentations pourront être réalisées ultérieurement avec différentes bouillies phytosanitaires afin de compléter l'étude. Enfin, les expérimentations sont réalisées en laboratoire, dans un environnement contrôlé. L'influence de paramètres comme le vent, la température n'est pas prise en compte.

4. http ://www.best.fr/

3.2.5 La surface d'impact

La surface d'impact est constituée d'une feuille de vigne dont les extrémités sont attachées à des lames identiques à celles utilisées en chimie. La Figure 3.9 illustre ce dispositif.

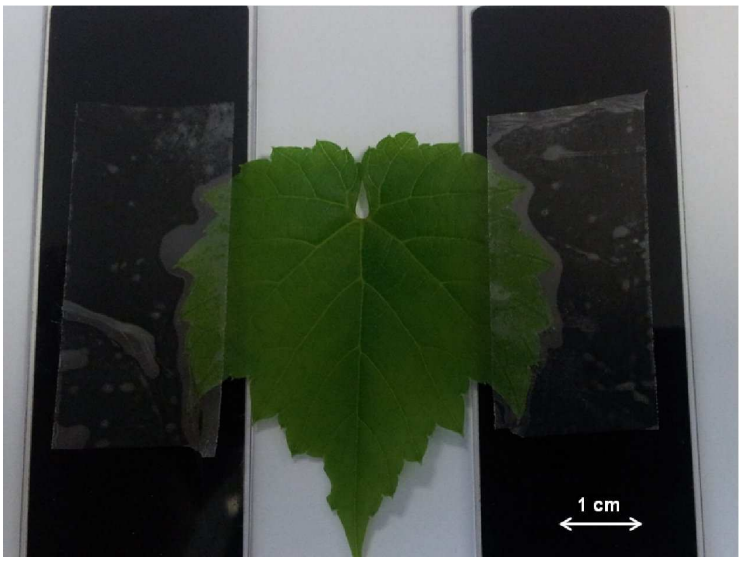


Figure 3.9: La surface d'impact

La surface d'impact est situé à 102.6 mm de l'objectif (dans le plan de netteté), juste en-dessous du système de génération de gouttes qui peut se présenter sous deux formes : un dispositif piézo-électrique ou un pulvérisateur industriel.

3.2.6 La génération des gouttes

Dans un premier temps, un système piézo-électrique est utilisé pour générer les gouttes. Ce système a été développé à l'Université de Liège, Gembloux, Agro-Bio-Tech [5]. La Figure 3.10 illustre les différents éléments composant un tel dispositif.

5. http ://www.gembloux.ulg.ac.be/

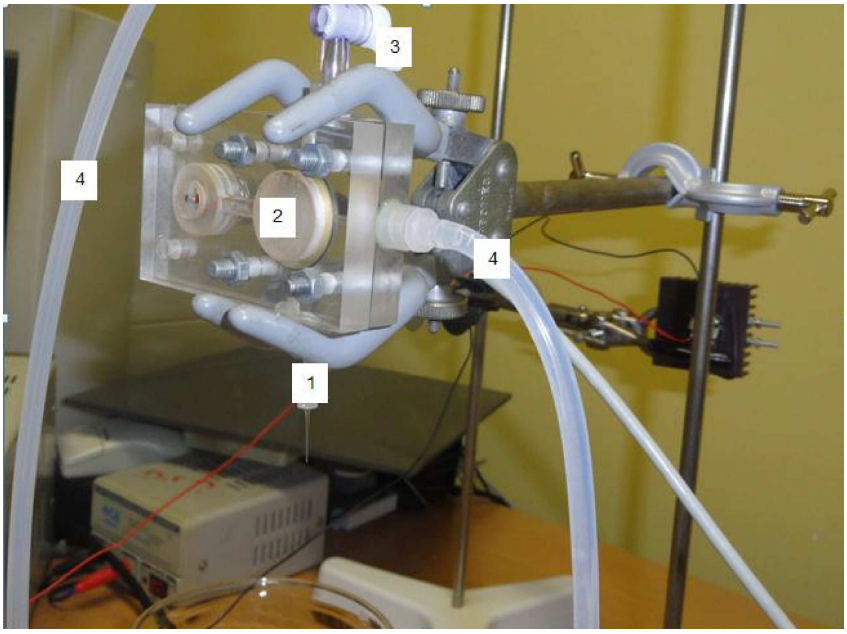


Figure 3.10: Système piézo-électrique de génération de gouttes (1 : buse en verre, 2 : composant piézo-électrique, chambre d'éjection, 3 : pince, 4 : tuyaux transparents en plastique souple) photo S. Vulgarakis

Une description détaillée du générateur de gouttes piézo-électrique est disponible dans le livre de [Lee, 2003]. L'objectif est de pouvoir contrôler la taille et la vitesse des gouttes en modifiant les caractéristiques du signal électrique envoyé au composant piézo-électrique. Ce dispositif possède 2 modes de fonctionnement : le mode à la demande et le mode continu. Dans le mode à la demande, le but est la création d'une goutte unique tandis que dans le mode continu, le but est de décomposer un jet en une série de gouttes ayant entre elles les mêmes caractéristiques de taille et de vitesse.

Expérimentalement, il est extrêmement important de vérifier l'absence de bulles d'air dans le circuit amenant le liquide au dispositif piézo-électrique. Ces bulles sont facilement visibles dans les tuyaux en plastique transparent. La mise sous pression du circuit résoud ce problème. En mode à la demande, la pression est ajustée en modifiant la hauteur du réservoir contenant le liquide. Une fois la pression ajustée, le ménisque du fluide apparaît tout juste à l'extrémité de la buse sous l'effet de la tension de surface.

La technique d'éjection de goutte se produit en 2 étapes, correpondant à 2 impulsions : une positive et une autre négative. Une tension positive (V_p) envoyée au composant piézo-électrique résulte en une absorption tandis qu'une tension opposée ($-V_p$) résulte en une pression dans la chambre d'éjection. Pendant la première étape (dont la durée correspond au temps d'absorption : t_a), la goutte se forme à l'extrémité de la buse. La seconde étape permet à la goutte de se détacher du reste du liquide. Elle dure un temps t_p qui correspond au temps de pulsation. La Figure 3.11 illustre ces différents paramètres du signal qui régissent l'éjection d'une goutte dans le mode à la demande.

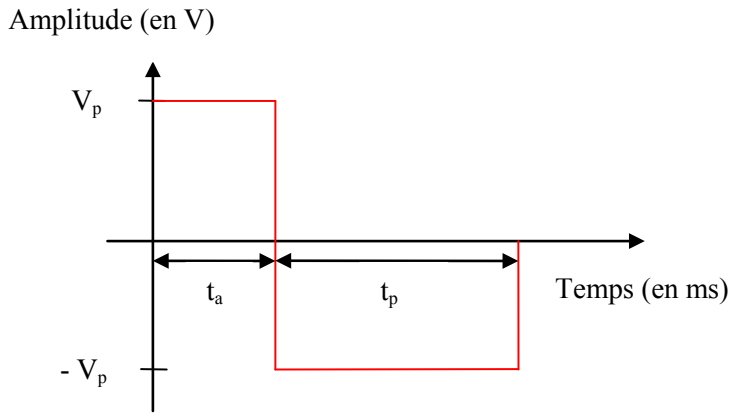


Figure 3.11: Paramètres d'éjection en mode à la demande

Une amplitude d'impulsion trop faible provoque la disparition de la goutte dans la buse avant la rupture du jet, aucune goutte n'est formée. D'autre part, une amplitude trop importante provoque la génération de plusieurs gouttes.

D'après [Lee, 2003], la buse doit posséder un orifice 2 à 3 fois plus petit que le diamètre des gouttes souhaité. Les tests sont réalisés avec 4 buses en verre également fabriquées à Gembloux. Elles possèdent des orifices de diamètre : 50, 100, 150 et 200 µm mesurés avec une précision de 10-15 µm (Figure 3.12).

Figure 3.12: Buses en verre de diamètre : 50, 100, 150 et 200 µm (de gauche à droite) photo S. Vulgarakis

Pour chaque buse, des expériences sont réalisées afin de déterminer les combinaisons de V_p, t_a, t_p qui permettent l'éjection d'une goutte unique. Ces valeurs sont paramètrables à travers le logiciel de pilotage développé sous Labview et fourni avec le dispositif de génération de gouttes. Lors de l'envoi de la double impulsion permettant la génération de la goutte, le logiciel envoie simultanément un signal de déclenchement (trigger) à la caméra permettant de synchroniser l'éjection de la goutte avec l'acquisition de la séquence d'images.

La valeur optimale pour V_p est déterminée expérimentalement. En-dessous de cette valeur, aucune goutte ne se forme tandis qu'au-dessus plusieurs gouttes apparaissent. Les premières expériences indiquent que cette valeur avoisine les 45V, quelque soit la buse utilisée. Par la suite, V_p est donc fixé à 45V.

Dans ces conditions, différentes combinaisons de t_p et t_a sont possibles et permettent la génération de gouttes uniques de tailles et de vitesses différentes. Des essais sont réalisés avec t_p et t_a (en ms) prenant leurs valeurs dans l'intervalle $[0.1; 10]$. Le Tableau 3.5 recense, pour chaque buse, les différentes combinaisons de t_p et de t_a permettant la génération de gouttes uniques. Chaque combinaison est validée par le biais de 5 répétitions où une goutte unique est générée. Les essais ont été réalisés à Dijon pour la buse de 200 µm ainsi qu'à ILVO par une collègue doctorante pour les autres buses en même temps qu'une série de tests comparatifs sur l'illumination [Vulgarakis Minov et al., 2012].

Diamètre orifice de la buse (en µm)	50			100			150			200		
t_a (en ms)	0.4	0.4	0.4	0.6	0.3	0.2	2	0.7	0.4	5	0.9	0.4
t_p (en ms)	0.6	0.8	0.9	0.1	1	5	0.1	1	10	0.1	1	5

Tableau 3.5: Combinaisons de t_p et de t_a conduisant à la génération de gouttes uniques

La Figure 3.13 représente quelques images à différents instants t d'une séquence acquise avec la buse ayant un orifice de 200 µm de diamètre. Pour cette séquence, $t_a = 5$ et $t_p = 0.1$ ms.

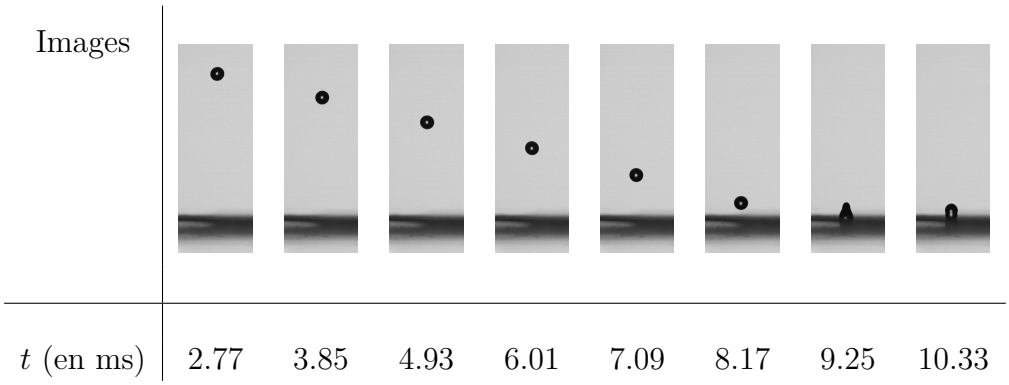


Figure 3.13: Séquence acquise avec la buse d'orifice 200 µm ($t_p = 0.1$ et $t_a = 5$ ms)

Soixante acquisitions ont été réalisées (15 pour chaque buse, soit 5 acquisitions par combinaison de (t_a, t_p). Les diamètres moyens ainsi que les vitesses moyennes des gouttes sont calculés pour chaque combinaison à partir des vitesses et diamètres relevés manuellement dans chaque séquence. Le Tableau 3.6 et le Tableau 3.7 présentent ces résultats.

Diamètre orifice de la buse (en µm)	50			100		
t_a (en ms)	0.4	0.4	0.4	0.6	0.3	0.2
t_p (en ms)	0.6	0.8	0.9	0.1	1	5
Vitesse moyenne (en m/s)	0.66±0.01	0.77±0.11	0.34±0.11	0.68±0.01	0.52±0.01	0.53±0.01
Diamètre moyen (en µm)	134.8±3.6	171.8±4.6	214.3±0.7	249.0±8.4	284.6±2.9	309.9±0.19

Tableau 3.6: Vitesses et diamètres moyens pour les buses 50 et 100 µm et combinaison (t_a, t_p)

Diamètre orifice de la buse (en µm)	150			200		
t_a (en ms)	2	0.7	0.4	5	0.9	0.4
t_p (en ms)	0.1	1	10	0.1	1	5
Vitesse moyenne (en m/s)	0.72±0.01	0.49±0.01	0.26±0.01	0.81±0.03	0.48±0.02	0.34±0.01
Diamètre moyen (en µm)	333.2±1.2	339.±1.6	416.5±0.2	351.2±1.2	385.6±2.9	458.7±3.5

Tableau 3.7: Vitesses et diamètres moyens pour les buses 150 et 200 µm et combinaison (t_a, t_p)

Ces résultats montrent tout d'abord que les vitesses obtenues (inférieures à 1 m/s) sont très éloignées de celles observées dans les conditions réelles de pulvérisation (jusqu'à 13 m/s).

Ensuite, il est intéressant de remarquer que le diamètre des gouttes est fortement lié au diamètre de l'orifice de la buse comme décrit par [Lee, 2003]. Cependant, il n'est pas possible d'obtenir des gouttes possédant un diamètre de l'ordre de 100 µm, même avec la plus petite buse qui possède un orifice de 50 µm. Afin de pallier à ce problème, le mode continu du générateur piézoélectrique est envisagé. Dans ce cas, une double impulsion est remplacée par un signal périodique qui permet de fragmenter le jet de liquide. Ce mode a été testé succintement mais n'a pas permis de corriger le problème de la taille

des gouttes. Egalement, les vitesses obtenues étant toujours bien trop faibles, ce système de génération de gouttes a été abandonné au profit d'un pulvérisateur industriel. L'avantage de ce pulvérisateur est d'une part de nous fournir des vitesses de gouttes plus élevées et bien-entendu de nous rapprocher des conditions réelles de pulvérisation.

Le pulvérisateur employé est de marque « Brard et Sarran ». Il possède un réservoir de 50 L. Ce réservoir est mis sous pression par une pompe électrique de 12 V. La pression maximale autorisée est de 4 bars. Ce modèle de puvérisateur est illustré dans la Figure 3.14.

Figure 3.14: Pulvérisateur industriel « Brard et Sarran »

Dans l'objectif de produire des gouttes de tailles et de vitesses différentes, différentes buses à fente (type AFX) de la marque « Nozal » sont utilisées. Ce type de buse est illsutré dans la Figure 3.15 (source : Nozal[6]).

6. http ://www.nozal.fr/nozal/ ?langueChp=fr

Figure 3.15: Buses « Nozal » de type AFX (de gauche à droite : modèles n°015, 02, 06, 08)

Pour élargir l'éventail de tailles et de vitesses de gouttes, la pression est ajustée à différents niveaux entre 2 et 4 bars. Le Tableau 3.8 fournit, à titre indicatif, le débit (en L/min) théorique calculé par le constructeur pour chaque buse et pour les différents niveaux de pression. Le débit étant fonction de la vitesse et de la taille des gouttes, une variation du débit entraîne une variation de la taille et/ou de la vitesse.

Buses (modèle n°)	Pression (en bar)	Débit théorique (en L/min)
015	2	0.48
	3	0.59
	4	0.68
02	2	0.65
	3	0.79
	4	0.91
06	2	1.93
	3	2.37
	4	2.74
08	2	2.58
	3	3.16
	4	3.65

Tableau 3.8: Débits théoriques en fonction de la buse et de la pression

Grâce à ce système, les conditions réelles de pulvérisation sont reproduites avec des gouttes dont le diamètre est compris entre 100 et 500 µm et des vitesses maximum dépassant 10 m/s. Une vanne de contrôle permet de maîtriser l'éjection des gouttes. L'ouverture de cette vanne provoque le passage

du liquide sous pression dans la buse en même temps que l'envoi d'un signal de déclenchement (trigger) à la caméra. Ceci permet de synchroniser l'éjection de la goutte avec l'acquisition de la séquence d'images.

Néanmoins, il reste une dernière difficulté à surmonter. Contrairement au générateur piézo-électrique qui génère des gouttes dont la chute est verticale, le pulvérisateur engendre un cône d'éjection à la sortie de la buse (angle de 80° pour les buses 015 et 02, angle de 110° pour les buses 06 et 08). La mise en place d'un mécanisme de protection pour la caméra et pour le système d'illumination est donc nécessaire. Ce mécanisme a également la particularité de filtrer une partie des gouttes afin de ne laisser passer que celles qui sont proches du plan de netteté. Un schéma de ce système est présenté dans la Figure 3.16.

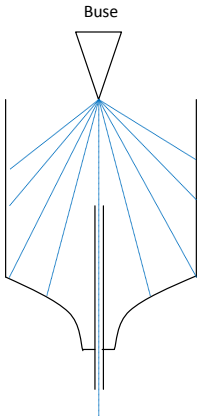


Figure 3.16: Schéma du système de protection et de filtrage

Seules les gouttes passant dans l'orifice central traversent le champ de vue de la caméra et sont acquises. La Figure 3.17 présente le système complet d'acquisition et de génération de gouttes.

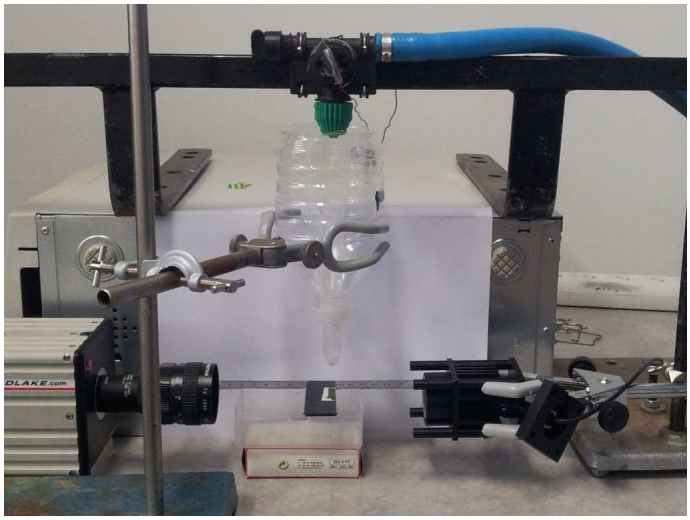


Figure 3.17: Système complet

Une fois l'acquisition effectuée, la séquence est coupée à ses extrémités. Au début, les images ne contenant aucune goutte sont supprimées. Ensuite, les images contenant les premières gouttes sont conservées. Ces images sont intéressantes pour l'étude ultérieure des caractéristiques et du comportement des gouttes. Enfin, les dernières images sont supprimées à partir du moment où les gouttes entrent en collision dans l'orifice et ruissellent à son extrémité. Suite à ce troncage, la séquence est prête à être analysée. Un exemple de séquence est présentée dans la Figure 3.18.

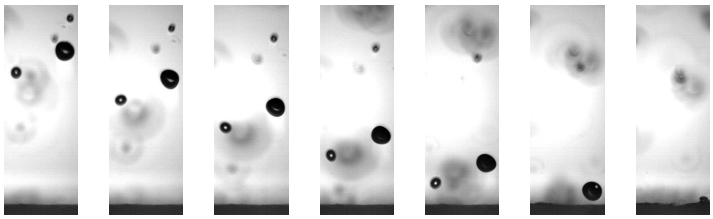
Images							
t (en ms)	2.77	3.04	3.31	3.58	3.85	4.12	4.39

Figure 3.18: Séquence acquise avec le pulvérisateur

Le système d'acquisition est maintenant opérationnel. Il permet d'acquérir des séquences d'images représentant des gouttes impactant des feuilles de vigne dans les conditions réelles de pulvérisation en tenant compte des hypothèses établies (surface d'impact horizontale, génération de gouttes d'eau uniquement). A partir de ces séquences, les caractéristiques des gouttes (taille, vitesse) sont extraites, tout comme leur comportement (adhésion, rebond, éclatement) par le biais d'un protocole de suivi d'objets (tracking) qui est décrit dans le chapitre suivant. Une analyse statistique est ensuite effectuée afin de déterminer l'influence des paramètres de la goutte sur son comportement lors de l'impact.

4 Tracking pour analyse des gouttes

Ce chapitre traite de l'analyse des gouttelettes et de leur comportement dans les séquences d'images acquises avec le système précédemment exposé. Dans un premier temps, les caractéristiques et le comportement des gouttelettes sont extraits grâce à une technique d'analyse de mouvement. La taille et la vitesse des gouttes sont les caractéristiques que l'on cherche à extraire puisque ces paramètres rentrent dans la définition de l'énergie cinétique de la goutte (Équation 2.1), énergie importante dans la compréhension du comportement de la gouttelette lors de l'impact. Comme illustré dans la Figure 2.2, le comportement de la gouttelette analysé se présente sous différentes formes : adhésion, rebond ou éclatement. A posteriori, une étude statistique est réalisée afin de déterminer l'influence des différents paramètres et permettre, si possible, une prédiction du comportement de la gouttelette.

4.1 Etat de l'art en analyse de mouvement

De nos jours, l'imagerie numérique occupe une place de plus en plus importante au sein de la société. En effet, l'amélioration des performances des ordinateurs, la disponibilité de caméras de qualité à des prix très raisonnables ont généré un engouement important de la part de la communauté scientifique pour la conception d'algorithmes analysant automatiquement l'information contenue dans les images. Cette information peut être de nature très diverse (informations sur la forme, la texture, le mouvement...). Ici, on se limitera à l'information de mouvement, et plus précisément du mouvement apparent. Il est important de bien distinguer le mouvement apparent du mouvement réel. Ceux-ci peuvent ne pas être identiques dans certains cas. Par exemple, une sphère uniforme qui tourne sur elle-même possède un mouvement réel non-nul (rotation) tandis que son mouvement apparent est nul (image identique).

L'analyse du mouvement s'avère être un outil indispensable pour des applications très variées comme la vidéo surveillance [Evans et al., 2003], la compression vidéo [Richardson, 2004], l'imagerie médicale [Xavier et al., 2012], l'agronomie [Hijazi et al., 2010], la robotique [Camus, 1995], l'analyse de séquences sportives [Theobalt et al., 2004]... L'analyse du mouvement représente un sujet très vaste qui peut être découpé selon 3 problématiques principales :

la détection de mouvement, l'estimation de mouvement et le suivi d'objets.

Ces problématiques principales peuvent découler sur des problématiques secondaires telles que la segmentation (rassemblement de pixels en vue du partitionnement de l'image) ou la synthèse d'images (interpolation de vues).

4.1.1 La détection du mouvement

La détection du mouvement consiste à étiqueter chaque pixel d'une image suivant qu'il corresponde ou non à une région en mouvement. La méthode de détection de mouvement la plus simple consiste à effectuer la différence entre 2 images successives [Jain and Nagel, 1979]. Les pixels dont l'intensité résultante est proche de zéro sont assimilés comme les pixels n'étant pas en mouvement. Dans cette idée, il est possible de soustraire à l'image courante une image de référence qui représente uniquement le fond de la scène (background subtraction). La difficulté réside parfois dans la détection de l'arrière-plan. [Piccardi, 2004] recense les principaux travaux réalisés par la communauté scientifique afin de résoudre ce problème. Cette technique, basée sur la différence de deux images, présente un inconvénient de taille : elle est très sensible au bruit. C'est pourquoi un seuillage est généralement effectué sur l'image de différence (Équation 4.1).

$$X_t(x, y) = Seuil(|I_t(x, y) - b(x, y)|) \tag{4.1}$$

Cette méthode est également très sensible aux changements d'illumination, mouvements de caméra. [Radke et al., 2005] et [Jodoin et al., 2008] ont proposé des améliorations (modélisation d'arrière-plan, modèles prédictifs) afin d'outrepasser ces limites et permettre la détection du mouvement dans de telles conditions.

La Figure 4.1 illustre la méthode de soustraction d'arrière-plan appliquée à partir d'images d'un carrefour routier.

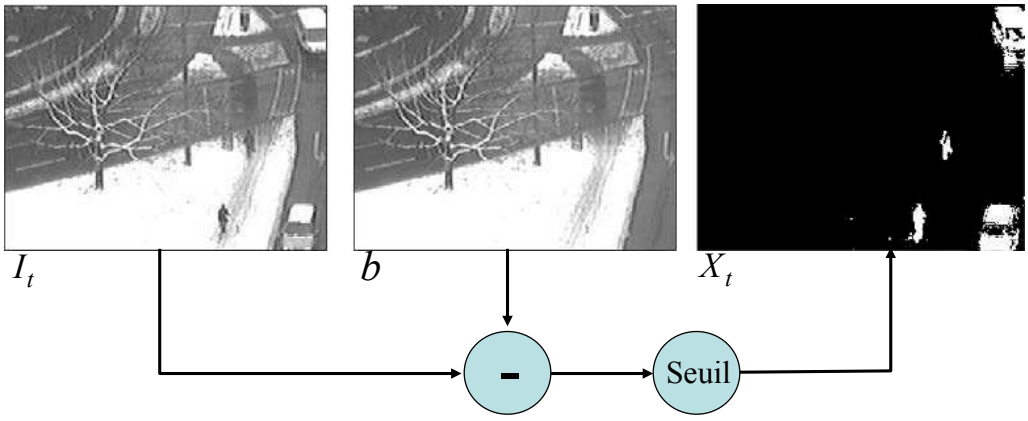


Figure 4.1: Soustraction d'arrière-plan (Images de Vincent Veilleux Gaboury, Université de Sherbrooke)

L'image binaire résultante contient uniquement les objets en mouvement : les deux piétons et les deux véhicules. A partir ce type d'image, on s'aperçoit qu'il est possible d'extraire la taille des objets en mouvement. Cependant aucune information concernant l'amplitude ou la direction du mouvement ne peut être extraite. Ce manque est comblé par les techniques d'estimation de mouvement.

4.1.2 L'estimation du mouvement

L'estimation de mouvement permet de rendre compte, à partir d'une séquence d'images, du mouvement apparent des objets de la scène. Son objectif est alors de construire le champ des vitesses apparentes. Le résultat se présente sous la forme d'un champ de vecteur à deux dimensions représentant la projection du mouvement réel sur le plan image.

Les méthodes d'estimation du mouvement sont nombreuses mais trois types de méthodes prédominent :
- la mise en correspondance de blocs (block matching)
- le filtrage spatio-temporel
- la mesure de champ dense ou flot (flux) optique

La mise en correspondance de blocs

La méthode d'appariement par correspondance de blocs consiste à trouver le déplacement (r_x, r_y) qui apparie au mieux des régions de la scène entre deux instants consécutifs. Ce principe est illustré dans la Figure 4.2.

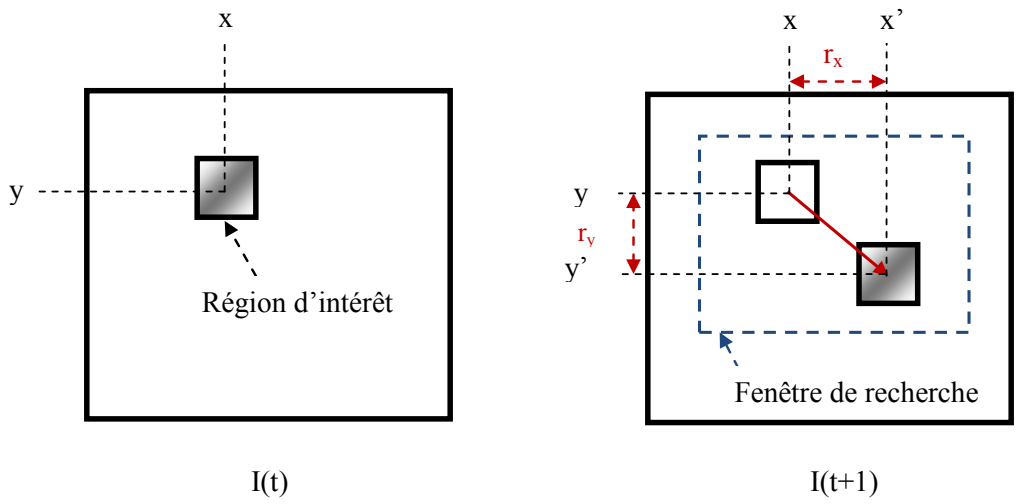


Figure 4.2: Principe d'appariement par correspondance de blocs

L'appariement est en général calculé par maximisation d'un critère de similarité ou par minimisation de distance entre les régions de l'image aux instants t et $t+1$. Cette technique, bien qu'imprécise (du fait de la discrétisation du déplacement estimé) est robuste et simple à mettre en oeuvre.

Le filtrage spatio-temporel

La méthode de filtrage spatio-temporel est une technique qui repose sur l'analyse fréquentielle du mouvement à partir de la Transformée de Fourier (présentée dans la sous-sous-section 2.3.2.2). L'analyse fréquentielle doit se faire sur des blocs de taille suffisante pour le calcul de la Transformée. Cette approche permet donc de trouver le mouvement global d'un bloc.

La Transformée de Fourier à trois dimensions, c'est-à-dire spatio-temporelle, d'une région d'une séquence d'images ne possédant qu'un seul objet animé par

un mouvement de translation uniforme, de vecteur vitesse (v_x, v_y), donne une représentation simple du mouvement puisque l'espace des fréquences se résume à un plan, appelé plan de mouvement, passant par l'origine des fréquences d'équation [Watson and Ahumada, 1983] :

$$v_x f_x + v_y f_y + f_t = 0 \tag{4.2}$$

où f_x et f_y sont les fréquences spatiales et f_t la fréquence temporelle.

Le point fondamental de l'analyse fréquentielle réside dans les paramètres du plan de mouvement puisqu'ils constituent les composantes du vecteur vitesse (v_x, v_y) de l'objet. L'objectif des méthodes fréquentielles d'estimation de mouvement consiste donc à déterminer les paramètres du plan de mouvement. L'estimation de ces paramètres est équivalent à l'analyse de l'orientation du spectre de l'objet dans l'espace fréquentiel [Adelson and Bergen, 1985]. Les premières méthodes d'estimation du mouvement dans le domaine fréquentiel consistent donc à déterminer l'emplacement des plans de mouvement par des filtres spatio-temporels orientés, tels que les filtres de Gabor 3D (filtres construits par modulation d'une fonction gaussienne à l'aide d'ondes sinusoïdales) [Heeger, 1988]. Ces méthodes fréquentielles d'estimation de mouvement sont dites basées sur l'énergie. Cependant, il existe d'autres approches basées sur la phase du signal. Le point de départ de telles approches est de constater qu'un mouvement de translation animant une image introduit un déplacement de la phase de sa transformée de Fourier [Fleet and Jepson, 1990].

La mesure de champ dense ou flot optique

Afin d'éviter les problèmes liés à un découpage arbitraire en blocs comme avec les techniques précédentes, des études visant à estimer localement le mouvement de chaque pixel ont été réalisées. Il s'agit d'associer à chaque pixel de l'image un vecteur de déplacement permettant de le situer dans l'image suivante. Le champ dense de vecteurs ainsi obtenu est appelé champs de déplacement. En divisant chacun de ces vecteurs par l'intervalle de temps séparant

deux image successives, on obtient un champ de vecteur vitesse représentant la vitesse de chaque pixel : c'est le flot optique.

Deux principales catégories d'approches permettent de parvenir à ce type de résultat : les méthodes différentielles et les méthodes stochastiques. Toutes les deux sont basées sur l'hypothèse de conservation de l'intensité au cours du déplacement. Ceci se traduit par l'équation :

$$I(x, y, t) = I(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t) \tag{4.3}$$

avec $I(x, y, t)$ l'intensité à un pixel de coordonnées (x, y) à l'instant t. $(\delta x, \delta y)$ est le déplacement 2D après un temps δt.

En appliquant le développement en série de Taylor sur le terme de droite de l'Équation 4.3, on obtient :

$$I(, y, t) \approx I(x, y, t) + \frac{\partial I}{\partial x}.\delta x + \frac{\partial I}{\partial y}.\delta y + \frac{\partial I}{\partial t}.\delta t + ... \tag{4.4}$$

où ... représente les termes d'ordre supérieur à 1.

Il est possible de restreindre l'approximation à l'ordre 1 sous condition que les variations spatiales de la fonction d'intensité I dans le voisinage (x, y, t) soient linéaires et que l'amplitude de la vitesse soit faible. Cette hypothèse est posée. En négligeant les termes d'ordre supérieur à 1 et en divisant tous les termes de l'Équation 4.4 par δt, la relation entre la vitesse et les dérivées partielles temporelles et spatiales de I s'écrit :

$$\nabla I.v + \frac{\partial I}{\partial t} = 0 \tag{4.5}$$

avec $\nabla I = (\frac{\partial I}{\partial x}, \frac{\partial I}{\partial y})$ le gradient spatial, $v = (v_x, v_y)^T$ le vecteur vitesse et $\frac{\partial I}{\partial t}$ le gradient temporel. Cette équation est connue sous le nom d'équation de contrainte du mouvement apparent (ECMA) ou équation du flot optique. En

d'autres termes, cette équation signifie que les changements temporels dans l'image sont équivalents au produit scalaire des changements spatiaux et de la vitesse apparente.

Il se pose alors un problème, connu sous le nom de problème d'ouverture, causé par l'obtention d'une seule équation (ECMA) à 2 inconnues (v_x, v_y). Cette équation seule ne permet de déterminer que la projection du vecteur vitesse dans la direction du gradient spatial de l'intensité. Le problème d'ouverture est illustré dans la Figure 4.3.

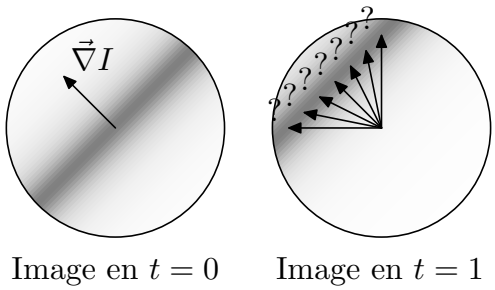


Figure 4.3: Illustration du problème d'ouverture

Connaissant la projection du vecteur vitesse dans la direction du gradient spatial de l'intensité, il existe une multitude de solutions pour le vecteur de mouvement. Le seul moyen de réduire le nombre de solutions est de faire une hypothèse supplémentaire sur le flot optique. Dans ce but, [Horn and Schunck, 1981] émettent l'hypothèse que le déplacement varie lentement au voisinage d'un pixel. Cette hypothèse se traduit par l'ajout d'une contrainte de régularité qui a pour effet un lissage globale du champs de vecteurs. Ce processus est réalisé grâce à la minimisation d'une fonction de coût définie de la façon suivante :

$$C_{(x,y)}(v_x, v_y) = (\nabla I.v + \frac{\partial I}{\partial t})^2 + \lambda \left[(\frac{\partial v_x}{\partial x})^2 + (\frac{\partial v_x}{\partial y})^2 + (\frac{\partial v_y}{\partial x})^2 + (\frac{\partial v_y}{\partial y})^2 \right] \quad (4.6)$$

où λ est un facteur de pondération de la régularisation définie par $(\frac{\partial v_x}{\partial x})^2 +$

$(\frac{\partial v_x}{\partial y})^2 + (\frac{\partial v_y}{\partial x})^2 + (\frac{\partial v_y}{\partial y})^2$.

De nombreux chercheurs ont reformulé le terme de régularisation à l'aide de méthodes stochastiques. La plus utilisée d'entre elles est basée sur la théorie des champs de Markov. L'approche markovienne en traitement d'images s'est développée surtout suite aux travaux de [Geman and Graffigne, 1986]. Les méthodes stochastiques basées sur les champs de Markov utilisent, pour estimer le déplacement, des contraintes probabilistes de lissage, en général sous forme d'un champ aléatoire [Heitz and Bouthemy, 1993].

Enfin, la contrainte de régularisation n'est pas l'unique contrainte permettant de résoudre le problème d'ouverture et donc d'estimer le flot optique. D'autres hypothèses peuvent être posées. L'approche proposée par [Lucas et al., 1981] figure parmi les plus répandues. Elle consiste à supposer le flot optique constant sur une fenêtre spatiale Ω :

$$v(p_i) = (u_0, v_0)^T, \forall p_i \epsilon \Omega \tag{4.7}$$

L'estimation de mouvement au point p_i consiste alors en l'identification des paramètres (u_0, v_0). Cette estimation est obtenue par la minimisation d'une erreur quadratique définie sur le support Ω :

$$v = \arg\min_v \sum_{p_i \epsilon \Omega} \left[\nabla I(p_i, t).v(p_i) + \frac{\partial I(p_i, t)}{\partial t} \right]^2 \tag{4.8}$$

Un exemple de flot optique, calculé avec la méthode de Lucas et Kanade à partir d'images décrivant un rubik's cube posé sur un plateau tournant [Barron et al., 1994], est présenté dans la Figure 4.4.

(a) (b) (c)

Figure 4.4: Exemple de calcul de flot optique (a) image à $t = 0$, (b) image à $t = 1$, (c) flot optique calculé avec la méthode de Lucas et Kanade

Le champ des vitesses apparentes obtenu grâce aux techniques d'estimation de mouvement permet de décrire quantitativement le mouvement observé dans une séquence d'images. Cependant le mouvement estimé est relatif à un pixel ou bloc de pixels. Sans étapes supplémentaires (une segmentation par exemple), il est impossible d'obtenir le mouvement relatif à un objet, d'analyser sa trajectoire, son comportement. Ceci est le coeur de la troisième problématique : le suivi d'objets.

Les deux premières problématiques (détection et estimation du mouvement) ont fait l'objet d'un nombre conséquent de travaux au sein de la communauté scientifique. Cependant, au vue de l'abondante littérature sur ces sujets et du fait que ces techniques, à elles seules, ne permettent pas d'analyser les caractéristiques des gouttes en même temps que leur comportement, seules les techniques majeures ont été présentées dans cette section. Par la suite, l'accent est mis sur la troisième problématique de l'analyse de mouvement : le suivi d'objets, car cette approche permet l'analyse du comportement et de la trajectoire des objets en mouvement dans une séquence d'images. Ceci correspond parfaitement à notre objectif puisque l'on souhaite extraire les caractéristiques de taille et de vitesse des gouttes en même temps qu'analyser le comportement à l'impact (rebond, adhésion ou éclatement).

4.2 Spécialisation au suivi d'objets (tracking)

Le suivi d'objets a pour but de déterminer, dans chaque image de la séquence, la position des objets de la scène afin de les suivre et autoriser l'analyse du comportement et/ou de la trajectoire de ces objets.

Le suivi d'objets constitue un axe important dans le domaine de la vision par ordinateur. C'est un problème complexe sur lequel de nombreuses études ont déjà été effectuées. Les difficultés rencontrées lors de la mise en place d'un tel système sont diverses et variées. Un brusque déplacement, un changement d'apparence ou une déformation de l'objet peuvent entraîner des erreurs dans le suivi. D'autres phénomènes peuvent gêner le suivi comme le mouvement de la caméra, les changements d'illumination, les occlusions entres objets ou entre l'objet et la scène.

L'objectif du suivi est de déterminer la position de l'objet dans chaque image. De nombreuses méthodes ont été implémentées afin de surmonter ces difficultés. Ce sont les contraintes liées à l'application (environnement, objet, informations à extraire) qui permettent de choisir la méthode adéquate de suivi.

D'après [Yilmaz et al., 2006], les différentes approches permettant de réaliser le suivi d'objet peuvent être classées selon les caractéristiques suivantes :

- le mode de représentation de l'objet
- la méthode de détection de l'objet
- la méthode permettant de faire la correspondance entre 2 objets appartenant à 2 images consécutives.

4.2.1 Les modes de représentation de l'objet

Dans un protocole de suivi d'objets, les objets peuvent être représentées de différentes façons. Le mode de représentation de l'objet est choisi en fonction des informations que l'on souhaite extraire.

Les points

L'objet est représenté par un point [Veenman et al., 2001] ou par un ensemble de points [Serby et al., 2004]. Cette représentation est adaptée aux objets qui occupent de petites régions dans l'image. La représentation par un point n'est pas adaptée à notre étude puisqu'on ne peut en tirer aucune information sur la taille de l'objet étudié. Or la taille de la gouttelette est une caractéristique importante qui doit être analysée lors du suivi. La représentation par un ensemble de points n'est pas non plus adaptée puisque selon la répartition des points, on ne peut affirmer avec certitude que la goutte est en contact ou non avec la feuille.

Les primitives géométriques

L'objet est représenté par un rectangle, une ellipse [Comaniciu et al., 2003]. Le mouvement de l'objet pour de telles modélisations est souvent modélisé par une forme paramétrique. Cette représentation ne convient pas dans notre cas car elle ne permet pas de prendre en compte les déformations de la goutte, ce qui empêche une analyse rigoureuse du comportement de la gouttelette.

Les silhouettes, les contours

Cette représentation est définie par les frontières d'un objet. La région situé à l'intérieur de ce contour est appelée la silhouette. Ce mode est particulièrement adapté au suivi de formes complexes non-rigides [Yilmaz et al., 2004]. Par conséquent, ce type de représentation est parfaitement adapté au cas de la goutte qui subit de nombreuses déformations lors de l'impact. C'est donc ce type de représentation qui est retenu dans notre cas.

Une fois le mode de représentation de l'objet déterminée en fonction des besoins de l'application de suivi, il est nécessaire de définir la façon avec laquelle les objets sont détectés dans la séquence.

4.2.2 Les méthodes de détection de l'objet

La méthode de détection de l'objet est une méthode qui est exécutée soit sur chaque image, soit sur la première image où l'objet apparaît. Plusieurs approches sont possibles. Le choix de la méthode dépend des caractéristiques intrinsèques de l'objet que l'on cherche à détecter (texture, frontières, forme...).

Les algorithmes de détection de points d'intérêt

Ces algorithmes sont utilisés pour trouver des points d'intérêts dans des images qui présentent des coins ou des variations de texture. Un critère de qualité de cette technique est son invariance à l'illumination et au point de vue de la caméra. On peut citer parmi les méthodes les plus utilisées la méthode de Harris [Harris and Stephens, 1988] et le détecteur SIFT [Lowe, 2004]. Dans l'approche de Harris, le calcul est basé sur l'auto-corrélation de l'image multipliée par une fonction de lissage (Gaussienne). Soit la matrice M définie de la façon suivante :

$$M = G(\sigma) * (\nabla I)(\nabla I)^T = G(\sigma) * \begin{bmatrix} (I_x)^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & (I_y)^2 \end{bmatrix} \tag{4.9}$$

avec I_x dérivée en x de l'image, I_y dérivée en y de l'image, σ l'écart-type de la Gaussienne utilisée pour le lissage. Les valeurs propres $[\lambda_1, \lambda_2]$ de la matrice renseignent sur les caractéristiques de l'image :

- si λ_1 et λ_2 sont de faibles valeurs, alors la région considérée est homogène, elle a une intensité approximativement constante.
- si λ_1 ou λ_2 est de forte valeur alors la région contient un contour.
- si λ_1 et λ_2 sont de fortes valeurs, alors celà signifie que l'intensité varie fortement dans toutes les directions, ce qui caractérise un coin.

Une illustration du résultat de l'application de la méthode de Harris est présentée dans la Figure 4.5.

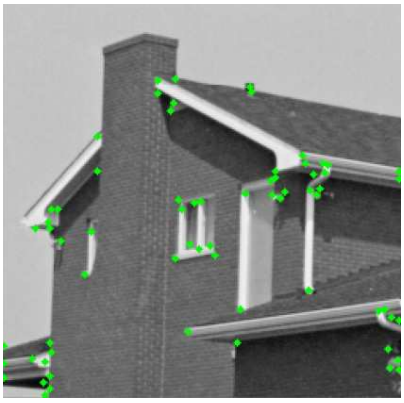


Figure 4.5: Illustration du détecteur de Harris [Chetverikov and Kropatsch, 1993]

Ce type d'algorithme ne convient malheureusement pas pour détecter les gouttelettes dans les séquences d'images. De par leur forme circulaire, les gouttelettes ne présentent pas de coins prononcés. De plus, ces dernières présentent un aspect lisse, homogène. Elles ne sont pas du tout texturées. Par conséquent, le nombre de points d'intérêt détectés sur le contour est insuffisant pour décrire le contour de la gouttelette de façon correcte. Les gouttelettes ne peuvent donc pas être correctement détectées par de tels algorithmes.

La segmentation par approche frontières

L'objectif de la segmentation par approche frontières est de mettre en évidence les pixels qui semblent appartenir à un contour. Au niveau de ces pixels, de profonds changements d'intensité sont observés. La segmentation consiste à identifier ces changements. Une des techniques les plus répandues est le détecteur de Canny [Canny, 1986]. La première étape consiste à appliquer un filtre Gaussien (filtre passe-bas) sur l'image afin d'enlever le bruit. Ensuite, le calcul de l'intensité du gradient, $G(G_x, G_y)$, dans l'image est effectué. Les orientations des contours sont déterminés par la formule :

$$\theta = \arctan(\frac{G_y}{G_x}) \tag{4.10}$$

La carte des gradients obtenue fournit une intensité en chaque point de l'image. Une forte intensité indique une forte probabilité de présence d'un contour. Toutefois, cette intensité ne suffit pas à décider si un point correspond à un contour ou non. Seuls les points correspondant à des maxima locaux sont considérés comme appartenant à des contours. Un maximum local se trouve parmi les extrema du gradient, là où la dérivée du gradient s'annule. Finalement, une étape de différentiation des contours est réalisée grâce à un seuillage par hysteresis. Deux seuils sont utilisés, un haut et un bas. Pour chaque point, si l'intensité de son gradient est :

- inférieur au seuil bas, alors le point est rejeté.
- supérieur au seuil haut, alors le point est accepté comme formant un contour.
- entre les deux seuils, le point est accepté s'il est connecté à un point déjà accepté.

L'image résultante obtenue est une image binaire où apparaissent les pixels appartenant aux contours. Un exemple de détection de contours basée sur le détecteur de Canny est présenté dans la Figure 4.6. Dans cet exemple, la détection de contours est réalisée sur l'image de Lena, image souvent utilisée par les algorithmes de traitement d'images car elle contient un mélange intéressant de détails, de régions uniformes et de texture.

(a) (b)

Figure 4.6: Application du filtre de Canny sur l'image de Lena [Maini and Aggarwal, 2009]

Ce type de détection n'a cependant pas beaucoup d'intérêt pour notre appli-

cation puisqu'il peut mener à une détection erronée de la gouttelette. En effet, lorsque la gouttelette est en contact avec la feuille, la segmentation ne permet de détecter qu'un seul objet représentant à la fois la feuille et la gouttelette.

L'apprentissage supervisé

La détection des objets peut également être effectuée suite à un apprentissage des différentes vues des objets prises à partir d'images exemples. Plusieurs approches d'apprentissage supervisé existent. Parmi elles, on peut citer les travaux de [Rowley et al., 1998] basés sur l'utilisation des réseaux de neurones et les travaux de [Papageorgiou et al., 1998] basés sur les SVM. Ces travaux ont mis en évidence la possibilité de faire de la détection d'objets grâce à un apprentissage supervisé. Toutefois, ces techniques requièrent un nombre extrêmement important d'images représentant les différentes apparences de l'objet. La constitution d'une telle base d'apprentissage représente un travail gigantesque et fastidieux dans le cas de détection de la goutte. En effet, cette dernière subit de nombreuses déformations durant l'impact. Chaque déformation devant être décrite par un nombre conséquent d'exemples pour l'apprentissage, la taille de la base d'apprentissage devient prohibitif au regard de l'application. Devant ces contraintes, la réalisation d'une telle base d'apprentissage n'est donc pas envisagée.

La soustraction d'arrière-plan

Une autre approche permettant de détecter les objets consiste à effectuer une soustraction d'arrière-plan. Cette approche a déjà été présentée dans la sous-section 4.1.1. Son intérêt est de permettre la détection d'objets en mouvement, ce qui correspond parfaitement aux gouttelettes que l'on cherche à détecter. Cette approche est par conséquent retenue.

Une fois les objets détectés dans la première image ou dans toutes les images de la séquence, il faut établir l'appariement entre les différentes représentations d'un même objet au sein d'une séquence, c'est le rôle des méthodes de mise en correspondance.

4.2.3 Les méthodes de mise en correspondance

La mise en correspondance, ou appariement, peut s'appliquer aux différents modes de représentation possibles de l'objet qui ont été présentés dans la sous-section 4.2.1. On se limitera ici aux approches basées sur une représentation de type « contour » puisque c'est la seule représentation qui permet de procéder à une analyse du comportement de la goutte, ainsi qu'à l'extraction des caractéristiques de taille et de vitesse (autres représentations : cf [Yilmaz et al., 2006]).

Deux types d'approche permettent de répondre à cette problématique. Soit la technique établit une correspondance entre des objets détectés au préalable dans chaque image, soit l'objet est détecté dans une image puis le contour évolue dans chaque image jusqu'à sa position réelle.

La mise en correspondance de forme (shape matching)

Les techniques de mise en correpondance de forme appartiennent au premier type d'approche énoncé juste avant. L'objectif est d'établir la correspondance entre deux objets découverts au préalable par la méthode de détection retenue (la soustraction d'arrière-plan dans notre cas). Une fois les objets détectés, l'appariement est réalisé quand la distance entre des caractéristiques propres à l'apparence de chaque objet est minimale. Ces caractéristiques peuvent être orientées soit région, soit contour. Elles caractérisent aussi bien la région interne de l'objet (histogramme des niveaux de gris, texture) que ses frontières (longueur, forme).

Dans le cas des gouttes, il est évident que les caractéristiques orientées région, liées à l'apparence de l'intérieur de la goutte, ne sont pas suffisamment discriminantes pour faire la distinction entre les différentes gouttes. En effet, les gouttes étant constituées avec le même liquide et l'éclairage étant homogène grâce au système à Led employé, le niveau de gris moyen d'une goutte est sensiblement le même pour toutes les gouttes. De plus, les gouttes ne présentent pas de texture particulière, leur représentation est homogène. Ainsi, l'apparence des régions représentant plusieurs gouttes est quasi-constant. Les

caractéristiques orientées région ne sont donc pas envisageables pour établir des correspondances fiables.

Néanmoins, les gouttes générées par le pulvérisateur sont presque toutes différentes. Elles possèdent des caractéristiques qui permettent de les discriminer entre elles comme la taille, la forme. Il est donc plus intéressant de s'intéresser aux informations liées au contour afin de discriminer les gouttes entre elles et permettre la mise en correspondance de tels objets. Des descripteurs simples ont été définis par [Young et al., 1974] comme l'aire, la circularité, l'excentricité, l'orientation du grand axe. Ces descripteurs à eux-seuls permettent rarement une discrimination optimale. Souvent, une combinaison de descripteurs est utilisée [Zhang and Lu, 2004]. Dans le cas des gouttes, nous proposons d'utiliser la combinaison de l'aire et de la circularité pour décrire les contours de gouttes puisque la variabilté de ces critères est importante parmi l'éventail des gouttes acquises.

La circularité est proportionnelle au ratio de l'aire sur le carré du périmètre. Elle est calculée de la façon suivante :

$$I = 4\pi A/P^2 \tag{4.11}$$

avec A : l'aire de l'objet, P : le périmètre de l'objet. Si I est égal à 1, l'objet est parfaitement circulaire.

Un exemple de mise en correspondance de formes, basé sur l'aire et la circularité, est illustré dans la Figure 4.7. Cet exemple est établi à partir des données présenté dans le Tableau 4.1.

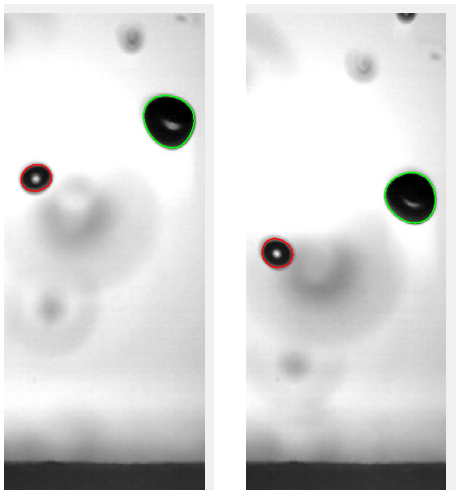
Objets détectés	Caractéristiques (A, I)	Instant
1	(1020,0.89)	t
2	(3174,0.92)	t
3	(1042,0.88)	$t+1$
4	(3012,0.93)	$t+1$

Tableau 4.1: Mise en correpondance de forme basée sur l'aire et la circularité

A partir de ces données, la similarité est étudiée grâce au calcul de la distance entre les différents couples (A, I). La distance euclidienne, d, est utilisée pour ce calcul. $d(i, j)$ représente la distance euclidienne entre l'objet i de coordonnées (A_i, I_i) et l'objet j de coordonnées (A_j, I_j). Elle est définie par :

$$d(i, j) = \sqrt{(A_j - A_i)^2 + (I_j - I_i)^2} \tag{4.12}$$

Le calcul montre que $d(1, 3) < d(1, 4)$ et $d(2, 4) < d(2, 3)$, donc l'objet 1 est mis en correpondance avec l'objet 3 (en rouge dans la Figure 4.7), l'objet 2 avec l'objet 4 (en vert dans la Figure 4.7).



(a) (b)

Figure 4.7: Illustration de la mise en correspondance de formes entre deux images (a) image à l'instant t, (b) image à l'instant $t + 1$

Il est important de noter que seulement deux objets sont détectés dans chaque image. Or il est possible d'observer dans les images d'autres gouttes à l'apparence très floue, car elles se situent en dehors du plan de netteté. Ces gouttes ne doivent pas être prises en considération lors du traitement, un pré-traitement est nécessaire. C'est pourquoi un filtre est appliqué aux objets détectés grâce à la soustraction d'arrière-plan. La technique consiste à analyser le gradient

sur le contour de la goutte. Si le gradient est supérieur à un certain seuil, alors l'objet détecté est valide, sinon il est considéré comme flou et n'est pas pris en compte. Le gradient appliqué est un filtre de type Sobel. Il est basé sur l'approximation des dérivées horizontales, G_x, et verticales, G_y, de chaque point. Les convolutions, permettant d'obtenir ces images à partir de l'image originale A, sont définies par l'Équation 4.13 et l'Équation 4.14.

$$G_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} * A \tag{4.13}$$

$$G_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * A \tag{4.14}$$

La norme du gradient est alors défini par :

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \tag{4.15}$$

Le seuil est déterminé expérimentalement. Il est défini à 100. Au niveau du contour, si le gradient n'atteint pas cette valeur, alors l'objet détecté est rejeté.

Ces techniques d'appariement basées sur la correspondance de forme sont les plus répandues. Néanmoins, il existe d'autres méthodes, comme celles basées sur la correspondance de mouvement. C'est la solution proposée par [Sato and Aggarwal, 2004] qui se base sur le calcul du flot optique (section 4.1.2) afin d'obtenir une estimation du mouvement dominant de l'objet dans le but d'établir la correspondance entre les objets détectés. Cette piste n'a pas été approffondie au vue du temps de calcul requis pour estimer le flot optique et du faible apport par rapport aux techniques de mise en correspondance de forme. En effet, la mise en correspondance de forme est toute aussi efficace et nécessite beaucoup moins de calculs.

Ces techniques fonctionnent parfaitement dans le cas des objets rigides, c'est-à-dire ne présentant pas (ou peu) de déformations. C'est le cas de la goutte pendant sa chute, avant l'impact. Cependant, si des déformations importantes se produisent, alors la correspondance est beaucoup plus délicate à effectuer avec ce type d'approche. C'est pourquoi un second type d'approche a vu le jour : les méthodes basées sur l'évolution de contour.

L'évolution de contour

Outre les méthodes de mise en correspondance (de formes, de mouvements), le suivi des gouttes peut également être effectué via des méthodes dites de suivi de contours. Ces méthodes font évoluer un contour initial présent dans l'image de départ vers un nouveau contour dans l'image finale. Ce principe est connu sous le nom de contours actifs. Les contours actifs ont pour origine les modèles élastiques présentés par [Burr, 1981] même si, dans de nombreux ouvrages, l'origine des contours actifs est attribuée aux travaux de [Kass et al., 1988] qui ont introduit les snakes. Les snakes tiennent leur nom de leur aptitude à se déformer comme des serpents. L'approche consiste à faire évoluer le contour en minimisant une fonction d'énergie liée au contour.

Le snake (contour) est défini paramétriquement par l'Équation 4.16 :

$$v(s) = (x(s), y(s)) \tag{4.16}$$

où $x(s), y(s)$ sont les coordonnées le long du snake et s appartient à l'intervalle $[0, 1]$.

La fonction d'énergie à minimiser est la combinaison de trois énergies : l'énergie interne, l'énergie externe et l'énergie contextuelle. L'énergie interne est directement liée à la forme du snake tandis que l'énergie externe est obtenue à partir de calculs appliqués sur l'image. L'énergie contextuelle consiste en la définition de contraintes traduisant des connaissances à priori sur le résulat escompté. La fonction d'énergie relative au snake s'écrit de la façon suivante

(Équation 4.17) :

$$E_{snake} = \int_0^1 E_{int}(v(s)) + E_{ext}(v(s)) + E_{con}(v(s))ds \tag{4.17}$$

- E_{int} représente l'énergie interne du snake. Elle définit l'élasticité et la raideur du contour. Elle est calculée selon l'Équation 4.18.
- E_{ext} symbolise l'énergie externe du snake. Elle pousse le snake vers des zones d'intérêt de l'image présentant des caractéristiques bien particulières. Elle est déterminée par l'Équation 4.19.
- E_{con} décrit l'énergie contextuelle. Elle est définie par l'utilisateur. Elle permet de contraindre le snake à ressembler à un contour pré-défini.

L'énergie interne du snake est définie par l'Équation 4.18 :

$$E_{int} = \alpha(s)\left|\frac{dv}{ds}\right|^2 + \beta(s)\left|\frac{d^2v}{ds^2}\right|^2 \tag{4.18}$$

où $\alpha(s), \beta(s)$ désignent respectivement les pondérations du terme de continuité (dérivée première) et du terme de courbure (dérivée seconde) du snake. Le terme de continuité traduit l'élasticité du contour tandis que le terme de courbure traduit sa raideur.

L'énergie externe est calculée à partir des caractéristiques de l'image où le snake réside. Elle est déterminée par l'Équation 4.19 :

$$E_{image} = w_{line}E_{line} + w_{edge}E_{edge} + w_{term}E_{term} \tag{4.19}$$

Elle est composée de la pondération de trois termes permettant de diriger le snake soit vers des zones claires ou sombres (terme E_{line}), soit vers des zones de fort gradient (terme E_{edge}), soit vers des zones présentant des terminaisons (terme E_{term}). Les pondérations de ces trois termes s'expriment par w_{line}, w_{edge}, w_{term}. Dans notre situation, on cherche principalement à attirer

le snake vers les zones de fort gradient (contours des gouttes). Ainsi, w_{line} et w_{term} sont fixés à 0. L'énergie externe est alors déterminée par l'Équation 4.20 :

$$E_{image} = -\nabla f \tag{4.20}$$

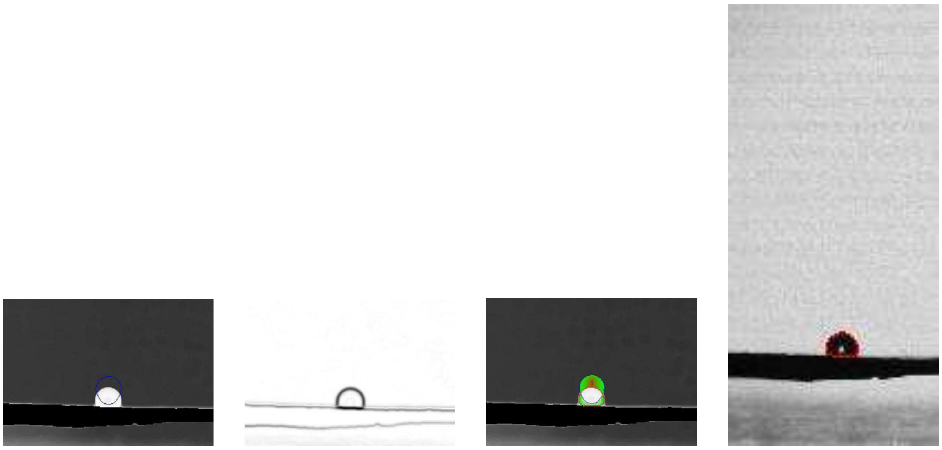
où ∇f représente le gradient de l'image f.

D'autre part, le terme d'énergie contextuelle peut également être négligé. En effet, il est difficile d'avoir une connaissance à priori sur le résultat à obtenir. Celà nécessiterait la construction d'une base de formes comprenant toutes les déformations possibles de la goutte, ce qui peut s'avérer fastidieux. En effectuant les simplifications, l'énergie globale du snake est alors décrite par l'Équation 4.21 :

$$E_{snake} = \int_0^1 \left[-\nabla f + \alpha(s) \left| \frac{dv}{ds} \right|^2 + \beta(s) \left| \frac{d^2v}{ds^2} \right|^2 \right] ds \tag{4.21}$$

Après avoir calculé l'énergie globale dégagée par le contour et par son positionnement sur l'image, il convient de déterminer comment le faire évoluer pour minimiser cette énergie. Pour cela, une méthode simple et intuitive est d'observer les pixels voisins immédiats de chaque point du contour pour déterminer pour chacun d'eux l'énergie globale du snake, chaque meilleur voisin devenant un point du contour.

La Figure 4.8 illustre le fonctionnement de cette méthode sur des images de goutte impactant la feuille de vigne. $\alpha(s)$ et $\beta(s)$ sont considérés comme constant le long du snake. $\alpha(s)$ est fixé à 1 afin de permettre au snake de s'étirer. Dans le même temps, $\beta(s)$ est fixé à 0.2 afin de limiter la raideur du contour. Une courbure plus importante permet de mieux adapter le snake aux déformations de la goutte. Une inversion des images est réalisée au préalable afin de concentrer les hautes intensités dans l'objet que l'on cherche à suivre (la goutte) et faciliter son suivi.



(a) (b) (c) (d)

Figure 4.8: (a) Précédent contour affiché en bleu sur une portion de l'image courante, (b) image représentant l'énergie externe, (c) image représentant l'évolution du snake en vert (d) Contour actuel affiché en rouge dans l'image courante

L'avantage de ces méthodes est le suivi d'objets déformables, ce qui convient parfaitement pour suivre la goutte lors de l'impact, comme illustré dans l'exemple précédent. Cependant ces techniques présentent un inconvénient de taille : le suivi n'est possible que pour de faibles déplacements.

4.2.4 La méthode de suivi proposée

Le suivi des gouttes avant et lors de l'impact est une problématique complexe au vue de l'importante vitesse de chute des gouttes et des nombreuses déformations observées lors de l'impact. Ainsi, l'approche proposée afin de répondre à cette problématique est une approche hybride basée sur la technique de mise en correspondance de formes pour le suivi de la goutte lors de sa chute et sur la technique de contours actifs pour le suivi lors de l'impact. Le schéma de la Figure 4.9 explique le fonctionnement de l'algorithme de suivi de gouttes proposé.

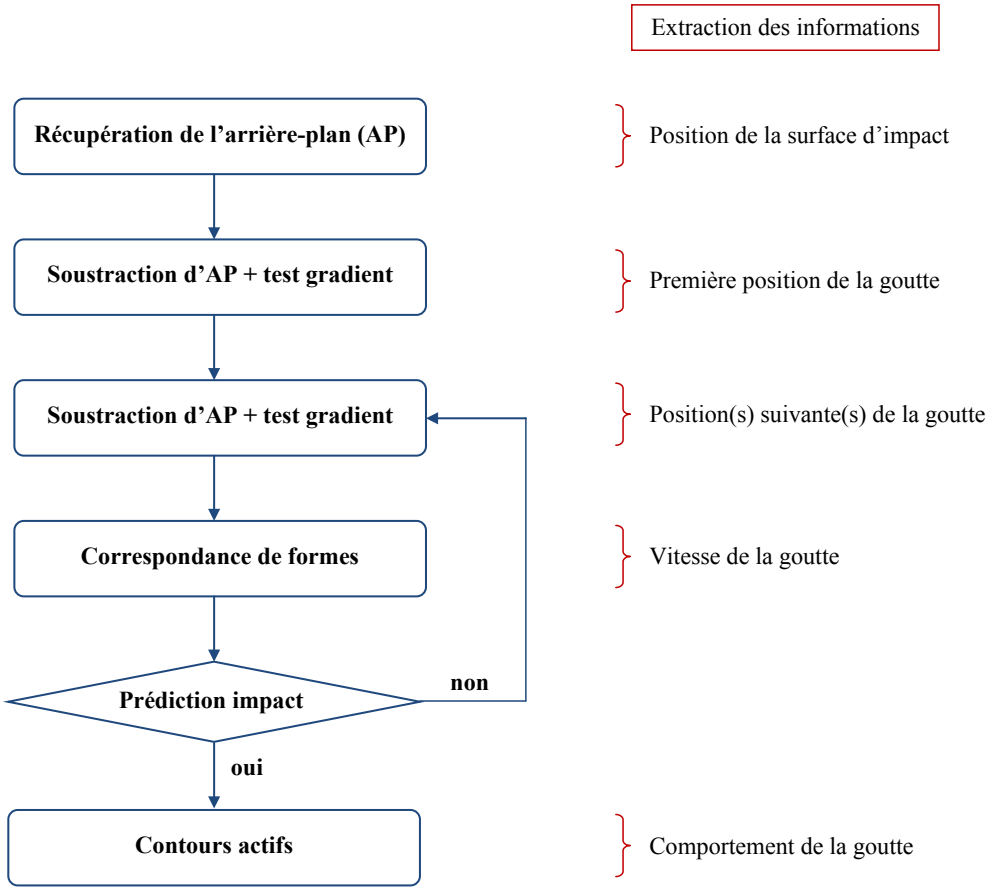


Figure 4.9: Schéma explicatif de l'algorithme de suivi des gouttes

Initialement, une image contenant uniquement l'arrière-plan est récupérée. Cette image sera utilisée par la suite pour effectuer la détection des objets en mouvement (soustraction d'arrière-plan). A partir de cette première image, la position de la surface d'impact est extraite.

Ensuite, les gouttes commencent à apparaître dans la séquence. Lors de leur première apparition, la technique de soustraction d'arrière-plan est employée afin de les détecter. Chaque détection est validée (ou non) par l'analyse du gradient sur le contour. La détection permet en premier lieu d'accéder à la position de la goutte. Sachant que le système d'acquisition a été conçu afin

d'obtenir au moins deux représentations de la goutte avant l'impact, une seconde soustraction d'arrière-plan est appliquée sur l'image suivante. Une fois la goutte détectée une seconde fois, une étape d'appariement par correspondance de formes est appliquée afin de lier les deux représentations de la goutte. Les deux premières positions de la goutte connues, il est alors possible de procéder au calcul de son déplacement entre les deux images, donc d'obtenir sa vitesse.

L'étape suivante consiste à prédire si, sur la prochaine image, la goutte aura atteint (ou non) la surface d'impact. Pour celà, l'hypothèse d'une vitesse quasi-régulière lors de la chute est retenue. Connaissant la position de la surface d'impact, la position de la goutte ainsi que sa vitesse, la prédiction peut être réalisée. Si le résultat est négatif (la goutte n'atteindra pas la feuille), alors le processus détection/appariement/prédiction est répété jusqu'à temps que le résultat de la prédiction soit positif, c'est-à-dire que la goutte atteindra la feuille sur la prochaine image.

Lorsque le résultat de la prédiction est positif, les informations de taille et de vitesse avant l'impact de la goutte sont stockées. Certaines précisions sont nécessaires quant aux informations extraites. Tout d'abord, en ce qui concerne la taille de la goutte, aucune précision de la mesure ne peut être établie car la taille réelle de la goutte n'est pas connue. L'information sur la taille est donc relative, cependant elle suffit amplement à notre application afin d'évaluer l'influence de la taille sur l'impact. La taille de la goutte est définie grâce à son diamètre apparent. Le diamètre apparent de la goutte correspond au diamètre du disque qui posséde la même surface que la goutte. Par exemple, une goutte dont la surface représente 113 pixels possède la même aire qu'un disque de 6 pixels de rayon ($\pi \times 6^2 = 113$). Le diamètre apparent de la goutte vaut alors 12 pixels. L'information de vitesse est quant à elle obtenue en calculant le ratio du déplacement du centre de la goutte sur le temps entre l'acquisition de deux images. Le vecteur de vitesse obtenu est ensuite décomposé en deux paramètres : la norme de la vitesse et son angle.

Une fois la goutte en contact avec la feuille, le suivi est réalisé grâce à la technique des contours actifs. Cette technique nécessite de posséder un contour proche du contour recherché. Le contour précédemment détecté avant l'im-

pact est translaté selon l'angle définie par la vitesse de la goutte jusqu'à la surface d'impact. L'évolution de ce contour au fil des images permet alors de suivre les déformations de la goutte suite à l'impact et d'analyser son comportement. Trois types de comportement sont possibles : l'adhésion, le rebond ou l'éclatement. Le comportement défini par défaut est l'adhésion. Si le contour présente une diminution de surface de plus de 50% entre deux images, alors le comportement correspond à un éclatement. Une détection locale d'objets en mouvement (toujours basée sur une soustraction d'arrière-plan) permet alors de détecter les gouttes satellites issues de l'éclatement. Enfin, si la goutte ne présente pas de diminution significative de sa surface (plus de 50 %) mais qu'à un instant donné, le contour n'est plus en contact avec la surface, alors le comportement analysé est considéré comme un rebond.

Les différents comportements possibles de la goutte (adhésion, rebond, éclatement) sont analysés par notre méthode de suivi (respectivement Figure 4.10, Figure 4.11 et Figure 4.12).

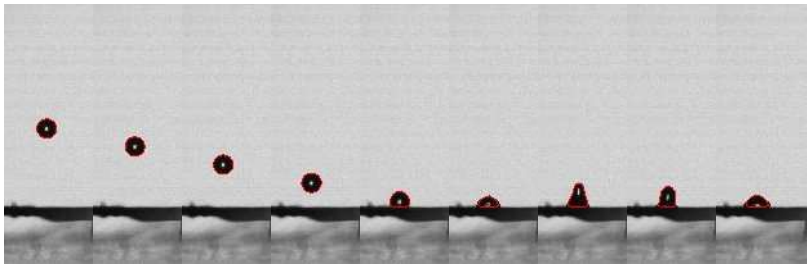


Figure 4.10: Séquence d'impact de goutte avec adhésion

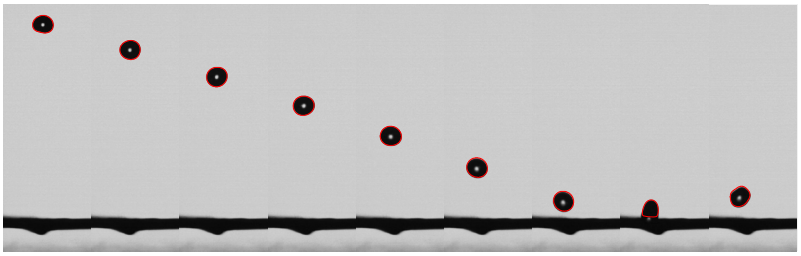


Figure 4.11: Séquence d'impact de goutte avec rebond

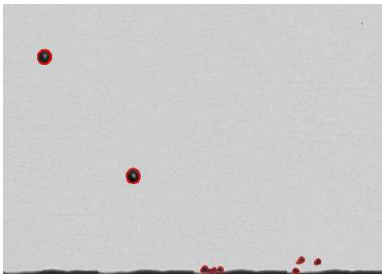


Figure 4.12: Séquence d'impact de goutte avec éclatement

Les caractéristiques de la goutte sont extraites juste avant l'impact. Elles concernent son diamètre, sa vitesse ainsi que l'angle d'impact. Afin de déterminer l'influence de ces différents paramètres sur le comportement de la goutte lors de l'impact, une étude statistique est réalisée à partir d'un nombre important de séquences contenant les différents comportements et un éventail de diamètres et de vitesses des gouttes réprésentatif des conditions de pulvérisation en viticulture.

4.3 L'analyse statistique des résultats du suivi

Dans le but d'obtenir un échantillon représentatif pour analyser l'influence des caractéristiques de la goutte sur l'impact, 100 séquences ont été acquises avec le système présenté dans le chapitre 3. A partir de ces séquences, l'algorithme proposé a permis le suivi de 143 gouttes possédant les différents comportements possibles. L'extraction des caractéristiques des 143 gouttes contribue à la construction d'une matrice de caractéristiques liée aux comportements analysés par notre algorithme. Afin d'analyser la contribution de chaque caractéristique sur le comportement, une analyse en composantes principales (ACP [Jolliffe, 2002]) est réalisée.

L'objectif de cette analyse est de déterminer un nouvel axe de projection des données maximisant la variabilité entres celles-ci. Cette analyse permettra de savoir si le comportement de la goutte est lié à toutes les caractéristiques extraites du suivi, ou plus particulièrement à l'une d'entre elles. Chaque caracté-

ristique extraite du suivi (vitesse, diamètre, angle) est bien entendu normalisée entre 0 et 1 compte tenu du fait que la dynamique de chaque caractéristique est différente (ACP normalisée). L'illustration du comportement des gouttes par la projection des scores factoriels issus de l'ACP est présenté dans la Figure 4.13.

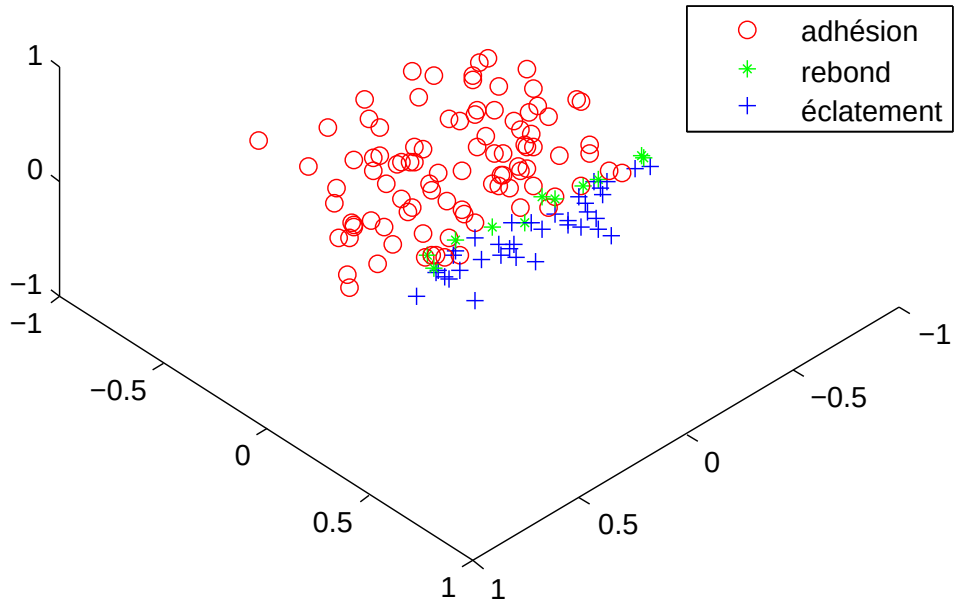


Figure 4.13: Illustration du comportement des gouttes par projection des scores factoriels

Issues de l'ACP, les données sont projetées dans un nouvel espace selon 3 axes factoriels (CP1, CP2, CP3). Cet espace de représentation sera également utilisé dans la Figure 4.15, Figure 4.16 et la Figure 4.17. L'analyse du premier axe factoriel montre rapidement que le gradient des gouttes s'organise en fonction de la vitesse tandis que le second axe factoriel s'organise en fonction du diamètre des gouttes. De même, le troisième et dernier axe factoriel présente un gradient marqué des angles d'impact. La projection de la representation des gouttes sur les trois plans factoriels fait distinctement apparaître 3 groupes (cluster) de gouttes organisés selon un gradient allant de l'adhésion jusqu'à l'éclatement en passant par le rebond. On observe donc une forte structura-

tion des gouttes dûe a l'ensemble des variables explicatives extraites du suivi : à savoir la vitesse, le diamètre, l'angle d'impact. En effet, ces axes factoriels expliquent respectivement 43.91% de la variabilité pour le gradient de la vitesse (CP1), 33.91% pour le gradient du diamètre (CP2) et 22.18% pour le gradient des angles d'impact (CP3) (Figure 4.14). Le pourcentage d'information expliquée de chaque axe factoriel est relativement important. Ainsi ces caractéristiques doivent toutes être considérées pour modéliser et prédire le comportement des gouttes puisqu'elles influencent de manière significative le comportement de la goutte.

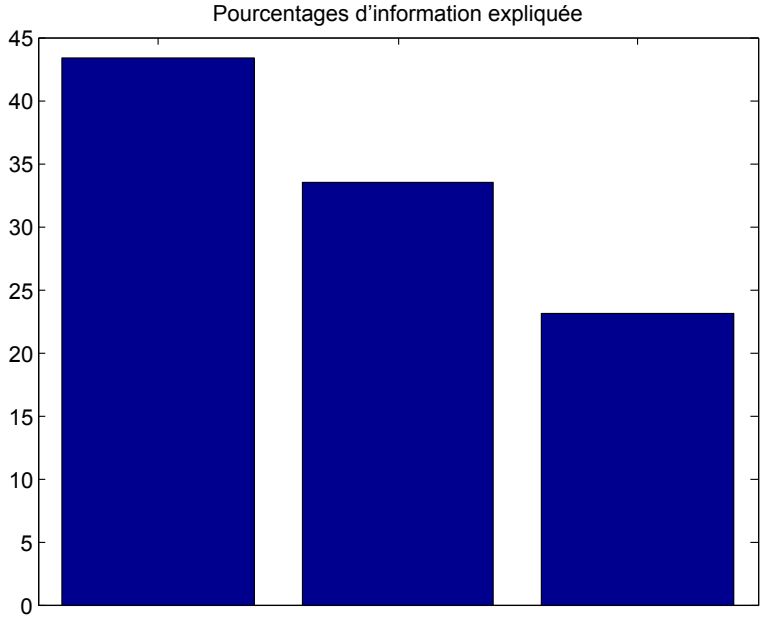


Figure 4.14: Pourcentages d'inertie des axes

Il est possible d'obtenir une représentation plus explicite permettant de mieux rendre compte de l'influence de chaque paramètre. Elle consiste à attribuer une couleur à la projection des scores factoriels en fonction de la valeur du paramètre étudié. La Figure 4.15 et la Figure 4.16 témoignent de l'influence de la vitesse et du diamètre sur le comportement.

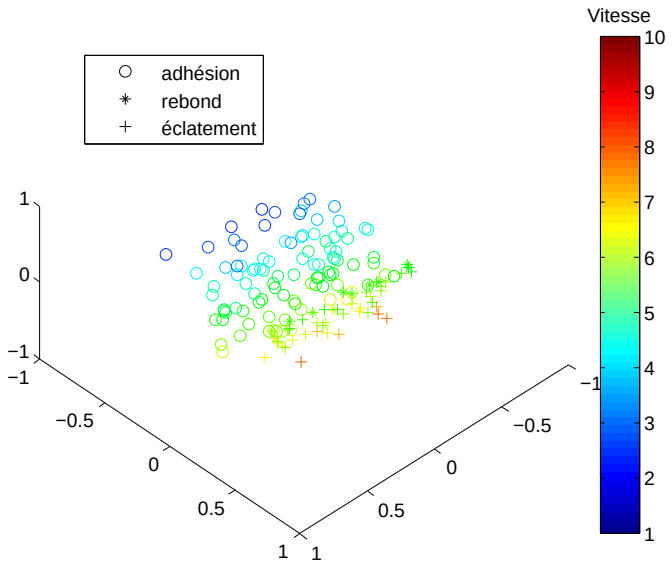


Figure 4.15: Illustration de l'influence de la vitesse sur le comportement (vitesse en $m.s^{-1}$)

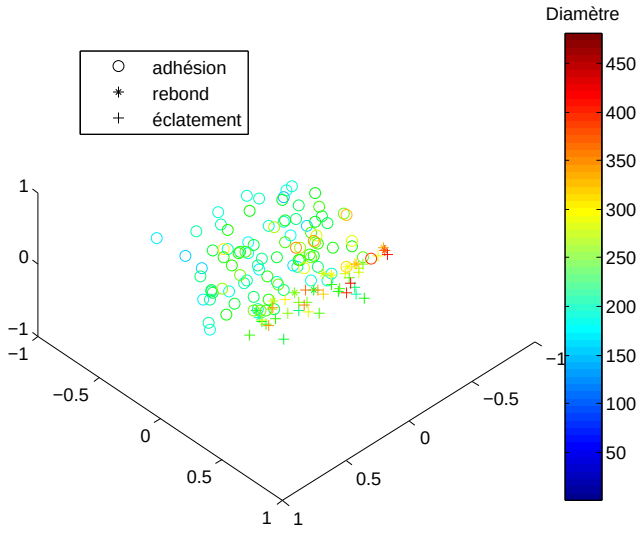


Figure 4.16: Illustration de l'influence du diamètre sur le comportement (diamètre en μm)

Sous ces représentations, l'influence de la vitesse et du diamètre est indéniable. Pour de faibles valeurs de la vitesse ou du diamètre (en bleu), le comportement observé est une adhésion tandis que pour de fortes valeurs (en rouge), un éclatement est détecté. Cependant, à elles-seules, ces variables ne permettent pas de prédire correctement le comportement de la goutte. Il est par exemple possible d'observer un éclatement de la goutte alors que son diamètre correspond à une valeur moyenne (en vert). C'est la combinaison de ces caractéristiques qui permet la prédiction du comportement de la goutte.

Une combinaison de ces caractéristiques entre en compte dans le calcul du nombre de Weber. Le nombre de Weber est un nombre sans dimension souvent utilisé en mécanique des fluides pour caractériser l'écoulement des fluides. Il correspond au ratio de l'énergie cinétique sur l'énergie de surface et peut être utilisé pour classer les gouttes [Richard and Quéré, 2000].

$$We = \frac{\rho D_0 v^2}{\sigma} \tag{4.22}$$

avec ρ : densité du liquide (en $kg.m^{-3}$), D_0 : diamètre apparent de la goutte (en m), v : vitesse de la goutte (en $m.s^{-1}$) et σ : tension de surface du liquide (en $N.m^{-1}$).

A partir des valeurs de densité et de tension de surface de l'eau à température et pression ambiantes ($\rho = 1000 kg.m^{-3}$, $\sigma = 72.8 \times 10^{-3} N.m^{-1}$), il est possible de calculer le nombre de Weber pour caractériser chaque goutte avant l'impact. La Figure 4.17 illustre l'influence du nombre de Weber sur le comportement de la goutte.

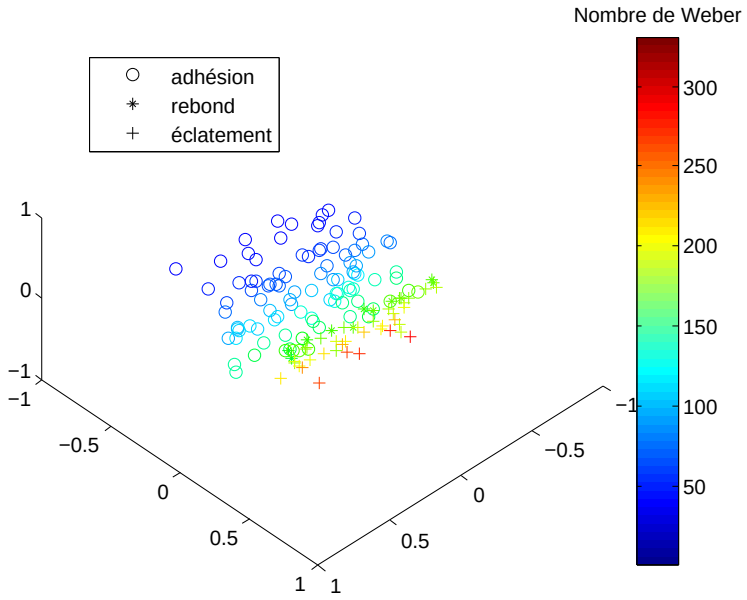


Figure 4.17: Illustration de l'influence du nombre de Weber sur le comportement

Dans cette représentation, il est remarquable d'observer que le dégradé des couleurs suit le gradient des comportements. Ceci n'est pas étonnant puisque pour un état de surface donné (auquel correspond une rugosité qui peut être caractérisé grâce à notre technique d'analyse de texture), les transitions entre les différents comportements sont définies à partir des rapports énergétiques entre l'énergie cinétique et l'énergie de surface de la goutte (Équation 2.3). Cette représentation est donc très intéressante puisqu'elle permet de repérer les nombres de Weber critiques, c'est-à-dire les nombres de Weber qui définissent les transitions entre les différents comportements : entre l'adhésion et le rebond, puis entre le rebond et l'éclatement.

Par rapport au système d'acquisition et de traitement mis en place, ce qui a été développé permet d'évaluer de manière robuste le devenir d'une goutte en fonction de sa vitesse, son diamètre, son angle d'impact. Autrement dit, nous sommes capables de prédire l'avenir d'une gouttelette d'après son suivi et d'observer son comportement à posteriori.

Conclusion et Perspectives

Dans le cadre de la réduction d'apport de produits phytosanitaires dans les vignes, l'étude du comportement des gouttes lors de l'impact constitue une piste intéressante. Jusqu'à aujourd'hui, une analyse empirique permettait, grâce à l'utilisation de papiers hydrosensibles, d'étudier la qualité de la pulvérisation. Afin d'éviter ce travail fastidieux et les problèmes qui en découlent, la mise en place d'un système d'acquisition associé à des techniques de traitement d'images constitue un outil des plus intéressants.

Cette thèse apporte la conception d'un système d'imagerie rapide permettant d'observer le comportement des gouttes lors de l'impact dans des conditions respectant les contraintes liées au processus de pulvérisation (en termes de taille et de vitesse de gouttes). Un nouvel outil de suivi d'objets basé sur l'imagerie rapide et aux traitements associés a été élaboré afin de permettre le suivi des gouttes à partir des séquences acquises et donc de procéder à l'extraction des caractéristiques de la goutte ainsi qu'à l'analyse de son comportement. Toute cette phase de traitement d'images se base sur une stratégie originale permettant d'adapter le suivi selon le stade de chute de la goutte (avant/après impact). A côté de ces principales réalisations, un protocole permettant la caractérisation de la rugosité des feuilles naturelles a également été validé afin de rendre compte de l'influence de la surface de la feuille sur le comportement. Cette rugosité est directement liée aux nombres de Weber critiques définissant les transitions entre les différents comportements de la goutte, ces nombres ayant été déterminés grâce à une analyse statistique des résultats du suivi.

L'intérêt de ces travaux de recherche est de définir les caractéristiques conjointes de la goutte et de la feuille qui permettent d'étudier la pulvérisation de précision dans le but d'améliorer la qualité de la pulvérisation et réduire finalement

la quantité d'intrants. Ils présentent donc une utilité certaine que ce soit pour les réglages du pulvérisateur ou pour le choix du type de buse. Ces résultats constituent un point de départ pour la construction d'un modèle plus complet décrivant l'impact des gouttes. En effet, d'autres paramètres sont à prendre en compte. Par exemple, notre étude n'est basée que sur des surfaces horizontales, or en réalité, les feuilles dans les rangs de vigne sont très souvent inclinées. Ceci implique la prise en compte d'une autre force dans le bilan énergétique lors de l'impact : la force de gravité.

Par la suite, il serait également intéressant d'étudier les impacts de gouttes constituées avec de vériatbles bouillies plutôt que de l'eau. Ceci permettrait de visualiser l'effet de la tension de surface sur le comportement lors de l'impact. La position des nombres de Weber critiques comme transition entre les comportements de la goutte pourrait alors être vérifiée. Ces travaux pourraient permettre d'adapter la bouillie afin d'obtenir la meilleure pulvérisation possible.

Finalement, dans notre étude, la surface de la feuille de vigne constitue une unique classe de rugosité. Il pourrait être intéressant d'observer la rugosité de la feuille à différents stades de croissance ou bien de comparer la rugosité d'un cépage par rapport à un autre. En effet, des différences de rugosité pourraient apparaître. Ces différences impliqueraient la détermination de nombres de Weber critiques différents. Ainsi, il serait possible d'adapter la pulvérisation en fonction du stade de croissance de la vigne ou du cépage.

Côté technique, il pourrait être intéressant d'améliorer le temps de calcul des méthodes gourmandes dans ce domaine (comme les contours actifs), ceci dans l'optique d'un traitement temps réel. Une solution envisageable est l'utilisation d'une puissance de calcul considérable comme le cloud computing. Une telle amélioration pourrait permettre une application directement dans les rangs de vignes et permettre une adaptation instantanée des paramètres de pulvérisation.

Durant ces trois années de thèse, nous avons abordé plusieurs grands thèmes situés entre le traitement des images et l'agronomie. Ces grands thèmes sont l'analyse de texture, le suivi d'objets et leur application à l'analyse de la pulvérisation en viticulture.

Notre contribution scientifique est l'aboutissement d'une démarche réfléchie parfois remise en cause par d'âpres discussions scientifiques et techniques. Elle a contribué à afficher une démarche scientifique à la charnière des deux domaines tant au niveau du traitement d'images qu'au niveau de la pulvérisation en viticulture.

Bibliographie

[Adelson and Bergen, 1985] Adelson, E. H. and Bergen, J. R. (1985). Spatio-temporal energy models for the perception of motion. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2(2) :284–299. 94

[Balsari et al., 2003] Balsari, P., Tamagnone, M., and Marucco, P. (2003). Innovative technologies for orchard/vineyard sprayers. In *VII Workshop on Spray Application Techniques in Fruit Growing*, page 35–42. 20

[Barron et al., 1994] Barron, J. L., Fleet, D. J., and Beauchemin, S. S. (1994). Performance of optical flow techniques. *International journal of computer vision*, 12(1) :43–77. 97

[Bouguet, 2010] Bouguet, J. (2010). Camera calibration toolbox. 72

[Brady et al., 2009] Brady, M. R., Raben, S. G., and Vlachos, P. P. (2009). Methods for digital particle image sizing (DPIS) : comparisons and improvements. *Flow Measurement and Instrumentation*, 20(6) :207–219. 27

[Burr, 1981] Burr, D. (1981). Elastic matching of line drawings. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, (6) :708–713. 109

[Camastra and Vinciarelli, 2002] Camastra, F. and Vinciarelli, A. (2002). Estimating the intrinsic dimension of data with a fractal-based method. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 24(10) :1404–1407. 55

[Camus, 1995] Camus, T. (1995). Real-time quantized optical flow. In *Computer Architectures for Machine Perception, 1995. Proceedings. CAMP'95*, pages 126–131. IEEE. 90

[Canny, 1986] Canny, J. (1986). A computational approach to edge detec-

tion. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, (6) :679–698. 102

[Chetverikov and Kropatsch, 1993] Chetverikov, D. and Kropatsch, W. G. (1993). *Computer Analysis of Images and Patterns : 5th International Conference, CAIP'93, Budapest, Hungary, September 13-15, 1993. Proceedings*. Springer-Verlag. xvi, 102

[Comaniciu et al., 2003] Comaniciu, D., Ramesh, V., and Meer, P. (2003). Kernel-based object tracking. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 25 :564—577. 100

[Decourselle et al., 2010] Decourselle, T., Journaux, L., Simon, J. C., Paoli, J. N., Cointault, F., Yang, F., and Miteran, J. (2010). Vineyard leaf roughness characterization by computer vision and cloud computing technics. In *International Conference on Agricultural Engineering - AgEng 2010 : towards environmental technologies, Clermont-Ferrand, France, 6-8 September 2010*. Cemagref. 59

[Deveau et al., 2009] Deveau, J., Ontario. Ministry of Agriculture, F., and Affairs, R. (2009). *Six Elements of Effective Spraying in Orchards and Vineyards*. Ontario, Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. xiii, 19

[Duhamel and Vetterli, 1990] Duhamel, P. and Vetterli, M. (1990). Fast fourier transforms : a tutorial review and a state of the art. *Signal processing*, 19(4) :259–299. 51

[Evans et al., 2003] Evans, R., Brassington, E., and Stennett, C. (2003). Video motion processing for event detection and other applications. In *Visual Information Engineering, 2003. VIE 2003. International Conference on*, pages 93–96. 90

[Fleet and Jepson, 1990] Fleet, D. J. and Jepson, A. D. (1990). Computation of component image velocity from local phase information. *International Journal of Computer Vision*, 5(1) :77–104. 94

[Forster et al., 2005] Forster, W., Kimberley, M., and Zabkiewicz, J. (2005). A universal spray droplet adhesion model. *Transactions-American Society of Agricultural Engineers*, 48(4) :1321. 37

[Galloway, 1975] Galloway, M. M. (1975). Texture analysis using gray level run lengths. *Computer Graphics and Image Processing*, 4(2) :172 – 179. 50

[Gauthier et al., 1991] Gauthier, J., Bornard, G., and Silbermann, M. (1991). Motions and pattern analysis : harmonic analysis on motion groups and their homogeneous spaces. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 21(1) :159–172. 52

[Gauvrit, 1996] Gauvrit, C. (1996). *Efficacité et sélectivité des herbicides*. Editions Quae. 64

[Geman and Graffigne, 1986] Geman, S. and Graffigne, C. (1986). Markov random field image models and their applications to computer vision. In *International Congress of Mathematicians*, page 1496. 97

[Giles et al., 1996] Giles, D. K., Henderson, G. W., and Funk, K. (1996). Digital control of flow rate and spray droplet size from agricultural nozzles for precision chemical application. *Precision Agriculture*, acsesspublicati(precisionagricu3) :729–738. 16

[Haralick, 1979] Haralick, R. M. (1979). Statistical and structural approaches to texture. *Proceedings of the IEEE*, 67(5) :786–804. 47, 49

[Haralick et al., 1973] Haralick, R. M., Shanmugam, K., and Dinstein, I. H. (1973). Textural features for image classification. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, (6) :610–621. 46, 49

[Harris and Stephens, 1988] Harris, C. and Stephens, M. (1988). A combined corner and edge detection. In *Proceedings of The Fourth Alvey Vision Conference*, pages 147–151. 101

[Heeger, 1988] Heeger, D. J. (1988). Optical flow using spatiotemporal filters. *International Journal of Computer Vision*, 1(4) :279–302. 94

[Heitz and Bouthemy, 1993] Heitz, F. and Bouthemy, P. (1993). Multimodal estimation of discontinuous optical flow using markov random fields. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 15(12) :1217–1232. 97

[Hijazi et al., 2010] Hijazi, B., Cointault, F., Dubois, J., Coudert, S., Vangeyte, J., Pieters, J., and Paindavoine, M. (2010). Multi-phase cross-

correlation method for motion estimation of fertiliser granules during centrifugal spreading. *Precision Agriculture*, 11(6) :684–702. 90

[Hijazi et al., 2012] Hijazi, B., Decourselle, T., Vulgarakis Minov, S., Nuyttens, D., Cointault, F., Pieters, J., and Vangeyte, J. r. (2012). *The use of high-speed imaging systems for applications in precision agriculture*, pages 279–296. New technologies : trends, innovations and research. InTech. 65

[Horn and Schunck, 1981] Horn, B. K. and Schunck, B. G. (1981). Determining optical flow. *Artificial intelligence*, 17(1) :185–203. 96

[Hughes, 1968] Hughes, G. (1968). On the mean accuracy of statistical pattern recognizers. *IEEE Transactions on Information Theory*, 14 :55–63. 54

[J. K. Lee, 2008] J. K. Lee, K. N. (2008). Development of an LIF image processing technique for measuring drop sizes in a pre-swirl spray. 9(4) :381–390. 28

[Jain and Nagel, 1979] Jain, R. and Nagel, H.-H. (1979). On the analysis of accumulative difference pictures from image sequences of real world scenes. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, PAMI-1(2) :206–214. 91

[Jodoin et al., 2008] Jodoin, P., Konrad, J., Saligrama, V., and Veilleux-Gaboury, V. (2008). Motion detection with an unstable camera. In *Image Processing, 2008. ICIP 2008. 15th IEEE International Conference on*, pages 229–232. 91

[Jolliffe, 2002] Jolliffe, I. T. (2002). *Principal component analysis*. Springer. 55, 116

[Journaux et al., 2008] Journaux, L., Destain, M., Miteran, J., Piron, A., and Cointault, F. (2008). Texture classification with generalized fourier descriptors in dimensionality reduction context : An overview exploration. *Artificial Neural Networks in Pattern Recognition*, pages 280–291. xv, 54, 55, 56

[Journaux et al., 2006] Journaux, L., Foucherot, I., and Gouton, P. (2006). Reduction of the number of spectral bands in landsat images : a comparison of linear and nonlinear methods. *Optical Engineering*, 45 :067002. xiv, 54

[Kashdan et al., 2007] Kashdan, J. T., Shrimpton, J. S., and Whybrew, A. (2007). A digital image analysis technique for quantitative characterisation of high-speed sprays. *Optics and Lasers in Engineering*, 45(1) :106–115. 27, 28

[Kass et al., 1988] Kass, M., Witkin, A., and Terzopoulos, D. (1988). Snakes : Active contour models. *International journal of computer vision*, 1(4) :321–331. 109

[Larkin, 1996] Larkin, K. G. (1996). Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry. *J. Opt. Soc. Am. A*, page 832–843. 42

[Lee, 2003] Lee, E. R. (2003). *Microdrop Generation*. CRC Press. 79, 80, 83

[Lee et al., 2004] Lee, J., Lendasse, A., and Verleysen, M. (2004). Nonlinear projection with curvilinear distances : Isomap versus curvilinear distance analysis. *Neurocomputing*, 57 :49–76. 55

[Lee and Verleysen, 2007] Lee, J. J. A. and Verleysen, M. (2007). *Nonlinear dimensionality reduction*. Springer. 54

[Liang et al., 2006] Liang, Z., Zhang, D., and Shi, P. (2006). Robust kernel discriminant analysis and its application to feature extraction and recognition. *Neurocomputing*, 69(7-9) :928–933. 55

[Liu and Jernigan, 1990] Liu, S. and Jernigan, M. (1990). Texture analysis and discrimination in additive noise. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 49(1) :52 – 67. 51

[Lowe, 2004] Lowe, D. G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60 :91–110. 101

[Lucas et al., 1981] Lucas, B. D., Kanade, T., et al. (1981). An iterative image registration technique with an application to stereo vision. In *IJCAI*, volume 81, pages 674–679. 97

[Maini and Aggarwal, 2009] Maini, R. and Aggarwal, H. (2009). Study and comparison of various image edge detection techniques. *International Journal of Image Processing (IJIP)*, 3(1) :1–11. xvi, 103

[Massinon and Lebeau, 2012] Massinon, M. and Lebeau, F. (2012). Experimental method for the assessment of agricultural spray retention based on high-speed imaging of drop impact on a synthetic superhydrophobic surface. *Biosystems Engineering*, 112(1) :56–64. 29

[Mathieu et al., 2003] Mathieu, H. J., Bergmann, E., and Gras, R. (2003). *Traité des matériaux, tome 4 : Analyse et technologie des surfaces : Couches minces et tribologie*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR). xiv, 40

[Mavros, 2001] Mavros, P. (2001). Flow visualization in stirred vessels : A review of experimental techniques. *Chemical Engineering Research and Design*, 79(2) :113–127. 29

[Mercer and Sweatman, 2006] Mercer, G. and Sweatman, W. (2006). Process driven models for spray retention of plants. 33

[Nuyttens et al., 2007] Nuyttens, D., Baetens, K., De Schampheleire, M., and Sonck, B. (2007). *Effect of nozzle type, size and pressure on spray droplet characteristics*. 27

[Nuyttens et al., 2009] Nuyttens, D., Schampheleire, M. d., Verboven, P., Brusselman, E., and Dekeyser, D. (2009). Droplet size and velocity characteristics of agricultural sprays. *Transactions of the ASABE*, 52(5) :1471–1480. 19

[Papageorgiou et al., 1998] Papageorgiou, C. P., Oren, M., and Poggio, T. (1998). A general framework for object detection. In *Computer Vision, 1998. Sixth International Conference on*, pages 555–562. IEEE. 104

[Piccardi, 2004] Piccardi, M. (2004). Background subtraction techniques : a review. In *Systems, Man and Cybernetics, 2004 IEEE International Conference on*, volume 4, pages 3099–3104 vol.4. 91

[Quéré, 2005] Quéré, D. (2005). Non-sticking drops. *Reports on Progress in Physics*, 68(11) :2495–2532. 35

[Quéré and Reyssat, 2008] Quéré, D. and Reyssat, M. (2008). Non-adhesive lotus and other hydrophobic materials. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, 366(1870) :1539–1556. PMID : 18192172. xiv, 35

[Radke et al., 2005] Radke, R. J., Andra, S., Al-Kofahi, O., and Roysam, B. (2005). Image change detection algorithms : a systematic survey. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 14(3) :294–307. 91

[Reyssat et al., 2006] Reyssat, M., Pépin, A., Marty, F., Chen, Y., and Quéré, D. (2006). Bouncing transitions on microtextured materials. *Europhysics Letters (EPL)*, 74(2) :306–312. 32

[Richard and Quéré, 2000] Richard, D. and Quéré, D. (2000). Bouncing water drops. *Europhysics Letters (EPL)*, 50 :769–775. 120

[Richardson, 2004] Richardson, I. E. (2004). *H. 264 and MPEG-4 video compression : video coding for next-generation multimedia*. Wiley. com. 90

[Rioboo et al., 2002] Rioboo, R., Marengo, M., and Tropea, C. (2002). Time evolution of liquid drop impact onto solid, dry surfaces. *Experiments in Fluids*, 33(1) :112–124. xiv, 35, 37

[Roisman et al., 2002] Roisman, I. V., Rioboo, R., and Tropea, C. (2002). Normal impact of a liquid drop on a dry surface : model for spreading and receding. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 458(2022) :1411–1430. xiv, 32, 33, 34

[Rowley et al., 1998] Rowley, H. A., Baluja, S., and Kanade, T. (1998). Neural network-based face detection. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 20(1) :23–38. 104

[Sato and Aggarwal, 2004] Sato, K. and Aggarwal, J. K. (2004). Temporal spatio-velocity transform and its application to tracking and interaction. *Computer Vision and Image Understanding*, 96(2) :100–128. 108

[Schick, 2008] Schick, R. J. (2008). *Spray Technology Reference Guide : Understanding Drop Size*. Number Bulletin No. 459C in Spraying Systems Co. xiii, xiv, 25, 26, 28

[Serby et al., 2004] Serby, D., Meier, E. K., and Van Gool, L. (2004). Probabilistic object tracking using multiple features. In *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004*, volume 2, pages 184– 187 Vol.2. IEEE. 100

[Šikalo et al., 2002] Šikalo, Š., Marengo, M., Tropea, C., and Ganić, E. (2002). Analysis of impact of droplets on horizontal surfaces. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 25(7) :503–510. 37

[Smach et al., 2008] Smach, F., Lemaître, C., Gauthier, J.-P., Miteran, J., and Atri, M. (2008). Generalized fourier descriptors with applications to objects recognition in svm context. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 30(1) :43–71. 52

[Stahl, 1991] Stahl, H. P. (1991). Review of phase-measuring interferometry. pages 704–719. 42

[Tenenbaum et al., 2000] Tenenbaum, J., Silva, V., and Langford, J. (2000). A global geometric framework for nonlinear dimensionality reduction. *Science*, 290(5500) :2319. 55

[Theobalt et al., 2004] Theobalt, C., Albrecht, I., Haber, J., Magnor, M., and Seidel, H.-P. (2004). Pitching a baseball : tracking high-speed motion with multi-exposure images. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, volume 23, pages 540–547. ACM. 90

[Tuceryan and Jain, 1993] Tuceryan, M. and Jain, A. (1993). Texture analysis. *Handbook of pattern recognition and computer vision*, 276. 47

[Vapnik, 1998] Vapnik, V. (1998). *Statistical Learning Theory*. Wiley-Interscience. 55

[Veenman et al., 2001] Veenman, C., Reinders, M., and Backer, E. (2001). Resolving motion correspondence for densely moving points. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 23 :54–72. 100

[Viret et al., 2003] Viret, O., Siegfried, W., Holliger, E., and Raisigl, U. (2003). Comparison of spray deposits and efficacy against powdery mildew of aerial and ground-based spraying equipment in viticulture. *Crop Protection*, 22(8) :1023–1032. 17

[Vulgarakis Minov et al., 2012] Vulgarakis Minov, S., Cointault, F., Vangeyte, J., Pieters, J., Hijazi, B., and Nuyttens, D. (2012). Development of an imaging system for single droplet characterization using a droplet generator. In *64th International symposium on Crop Protection*, volume 77, pages 469–481. 81

[Watson and Ahumada, 1983] Watson, A. B. and Ahumada, A. (1983). *A look at motion in the frequency domain*, volume 84352. National Aeronautics and Space Administration, Ames Research Center. 94

[Witten et al., 2011] Witten, I., Backer, E., and Hall, M. (2011). *Data Mining : Practical Machine Learning Tools and Techniques (3rd Edition)*. Morgan Kaufmann. 57

[Xavier et al., 2012] Xavier, M., Lalande, A., Walker, P., Brunotte, F., and Legrand, L. (2012). An adapted optical flow algorithm for robust quantification of cardiac wall motion from standard cine-mr examinations. *Information Technology in Biomedicine, IEEE Transactions on*, 16(5) :859–868. 90

[Yarin, 2006] Yarin, A. L. (2006). Drop impact dynamics : splashing, spreading, receding, bouncing. . . . *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 38 :159–192. 34, 35

[Yilmaz et al., 2006] Yilmaz, A., Javed, O., and Shah, M. (2006). Object tracking : A survey. *Acm Computing Surveys (CSUR)*, 38(4) :13. 99, 105

[Yilmaz et al., 2004] Yilmaz, A., Li, X., and Shah, M. (2004). Contour-based object tracking with occlusion handling in video acquired using mobile cameras. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 26 :1531–1536. 100

[Young et al., 1974] Young, I. T., Walker, J. E., and Bowie, J. E. (1974). An analysis technique for biological shape. i. *Information and control*, 25(4) :357–370. 106

[Young, 1805] Young, T. (1805). An essay on the cohesion of fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 95 :65–87. 34

[Zhang and Lu, 2004] Zhang, D. and Lu, G. (2004). Review of shape representation and description techniques. *Pattern recognition*, 37(1) :1–19. 106

[Zhang, 2000] Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 22(11) :1330–1334. 74

Résumé

Dans le contexte actuel de diminution des pollutions d'origine agricole, la réduction des apports d'intrants devient un enjeu primordial. En France, la viticulture est l'activité qui possède le taux le plus important de traitements phytosanitaires par unité de surface. Elle représente, à elle seule, 20% de la consommation annuelle de pesticides. Par conséquent, il est nécessaire d'étudier le devenir des pesticides appliqués afin de réduire les quantités perdues dans l'environnement. Dans le cadre de la réduction d'apport de produits phytosanitaires dans les vignes, de nombreux travaux ont été effectués sur la modélisation du comportement d'un spray de gouttelettes et sa répartition au niveau de la parcelle et de l'air environnant. Cependant, il est également important de s'intéresser au comportement de la gouttelette directement au niveau de la feuille. Les progrès dans le domaine de l'imagerie et la diminution du coût des systèmes ont rendus ces systèmes beaucoup plus attractifs. Le travail de cette thèse consiste en la mise en place d'un système d'imagerie rapide qui permet l'observation du comportement à l'impact de gouttelettes répondant aux conditions de pulvérisation. Les caractéristiques ainsi que le comportement associé de chaque gouttelette sont extraits grâce à une méthode de suivi d'objets. Une analyse statistique basée sur un nombre représentatif de résultats permet ensuite d'évaluer de manière robuste le devenir d'une goutte en fonction de ses caractéristiques. Parallèlement, un paramètre décrivant l'état de surface de la feuille est également étudié grâce à l'imagerie : la rugosité. Elle joue un rôle prédominant dans la compréhension des mécanismes d'adhésion en influençant le comportement de la goutte lors de l'impact. La validation d'une méthode d'analyse de textures permettant de caractériser la rugosité des surfaces naturelles est également proposée dans ces travaux.

Mots-clés : pulvérisation, imagerie rapide, suivi d'objets, analyse de textures

Abstract

In the domain of vineyard precision spraying research, one of the most important objectives is to minimize the volume of phytosanitary products ejected by a sprayer in order to be more environmentally respectful with more effective vine leaf treatments. Unfortunaltely, even if lot of works have been carried out at a parcel scale, mainly on losses caused by drift, less works have been carried out at the leaf scale in order to understand which parameters influence the spray quality. Since few years, recent improvements in image processing, sensitivity of imaging systems and cost reduction have increased the interest of high-speed imaging techniques. Analyzing the behavior of droplets after impact with the leaf thanks to high speed imaging technology is a relevant solution. By this way, we propose a droplets behavior analyzing process in vineyard spraying context based on high-speed acquision system combined with image processing techniques. This process allows us to extract droplets parameters. Therefore, a statistical study is processed in order to determine the effects of droplets parameters on leaf impact or to predict behavior of a single droplet. Since this behavior is strongly related to leaf surface, we also propose to validate a natural leaf roughness characterization method based on texture analysis.

Keywords : spraying, high-speed imaging, tracking, texture analysis

SPIM

■ École doctorale SPIM - Université de Bourgogne/UFR ST BP 47870 F - 21078 Dijon cedex

■ tél. +33 (0)3 80 39 59 10 ■ ed-spim@univ-fcomte.fr ■ www.ed-spim.univ-fcomte.fr

UNIVERSITÉ DE BOURGOGNE