

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
**Université Mohamed Khider – Biskra**  
جامعة محمد خيضر بسكرة



**Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie**  
Département des Sciences Agronomiques

## **THÈSE**

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de  
**Doctorat en Sciences Agronomiques**  
Spécialité: **Machinisme Agricole**

## **THÈME**

**Caractérisation de la répartition spatiale des jets de  
pulvérisation : contribution à l'évaluation des risques  
de pollution du milieu naturel**

Par : **BOUKHALFA Hassina dite Hafida**

Soutenue le: 07/01/2016

### **Devant le jury:**

<b>Président</b>	Mr. BARKAT Djamel	Professeur à l'Université de Biskra
<b>Rapporteur</b>	Mr. BELHAMRA Mohamed	Professeur à l'Université de Biskra
<b>Examineurs</b>	Mr. LEBEAU Frédéric	Professeur à Gembloux Agro-Bio Tech Ulg
	Mr. HARTANI Tarek	Professeur au Centre Universitaire de Tipaza
	Mr. DJABRI Larbi	Professeur à l'Université d'Annaba
	Mr. DEBABECHE Mahmoud	Professeur à l'université de Biskra

Année universitaire : 2015/2016

## **REMERCIEMENTS**

Il m'est agréable de remercier les personnes qui m'ont aidé, soutenu ou encouragé au long de ce travail et grâce à qui cette recherche a pu être menée à bien.

Je tiens à remercier en premier lieu le directeur de ce travail, Pr Mohamed BELHAMRA, qui a encadré cette recherche avec attention et qui l'a dirigé avec la persévérance nécessaire.

Je remercie le personnel de l'unité d'Agriculture de Précision Gembloux Agro-Bio Tech Ulg - Belgique, pour leur accueil, leur disponibilité et l'aide que chacun(e) a pu m'apporter pour la réalisation de ce travail.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude au professeur Frédéric LEBEAU pour sa patience, sa grande disponibilité et son enthousiasme tout au long de la réalisation de ce travail.

Je n'oublierai pas de remercier Mr Mathieu MASSINON pour son aide précieuse, et également Nicholas DECOCK.

Je remercie également les membres du jury, Pr BARKAT Djamel d'avoir accepté de présider le jury. Pr. DEBABECHE Mahmoud, Pr HARTANI Tarik et Pr. DJABRI Larbi d'avoir accepté d'examiner le présent travail. Merci d'avoir consacré du temps à lire et à juger cette recherche.

Il ne faut pas passer sous silence non plus l'aide amicale du personnel du département d'agronomie.

Je terminerai par remercier mes amis et ma famille pour les encouragements et le soutien.

## LISTE DES TABLEAUX

N°	Titre	Page
1	Vitesse terminale dans l'air de gouttes de fluide, densité 1 g/cm <sup>3</sup>	08
2	Récapitulatif des pourcentages volumétriques pour les différents types d'impact en fonction de la formulation.	57

## LISTE DES FIGURES

N°	Titre	Page
1	Application de produits phytosanitaires	05
2	Classification des jets selon le « <i>British Crop Protection Council</i> »	06
3	Type d'impact d'une goutte en fonction de la vitesse d'impact et de la rugosité de la surface	09
4	Aplatissement d'une goutte de mélange glycérine-eau à 30% sur film Téflon, diamètre 810 $\mu\text{m}$ , vitesse : 1,6 m/s, $We = 40$ , $Re = 672$	10
5	Phases d'adhésion d'une goutte sur surface solide sèche	11
6	Formation d'un tore lors de l'impact d'une goutte	12
7	Comparaison du splashing et du rebond pour une goutte sur une surface solide	13
8	Carte du comportement lors de l'impact de gouttes ( $Re = 800$ ), selon l'angle de contact et le nombre de Weber	14
9	Photographies en microscopie électronique d'une feuille de blé jeune et mûr.	16
10	Photographie en microscopie électronique d'une feuille de tomate.	16
11	Différentes méthodes de détermination de la taille de particules	17
12	Exemples de buses utilisées en grandes cultures	20
13	Régimes de mouillage d'une surface idéale Wenzel(a) et Cassie-Baxter(b).	32
14	Comparaison de l'impact d'une goutte de fluide newtonien (eau) et d'une goutte d'un fluide au comportement non-newtonien (polysaccharide)	32
15	Schéma général du banc d'essais dynamique	35
16	Photographies de la caméra Y4 CMOS	36
17	Photographie de la caméra rapide et de la source du rétro-éclairage LED	37
18	Photographie de la cuve sous pression alimentant la buse en bouillie	38

19	Photographie du compresseur	38
20	Photographie système de déplacement et de la buse	39
21	Support de fixation des feuilles d'orge	39
22	Photographie du spectrofluoromètre SHIMADZU RF-1501	41
23	Exemples d'images utilisées pour le traitement	42
24	Image obtenue par le programme de traitement sous MATLAB	43
25	Photographie du dispositif expérimental de l'essai standard de rétention	45
26	Préparation des échantillons pour mesures de fluorométrie	45
27	Photographie du dispositif de mesure de granulométrie des buses de pulvérisation	46
28	Photographie de la caméra dans sa boîte de protection en plexiglas	47
29	Test USAF 1951	49
30	Buse RS-MM 110°/04	50
31	Résultats d'impact extraits de 10 essais: en fonction de la décélération et du diamètre sur feuille d'orge horizontale avec une bouillie d'eau et de fluorescéine	52
32	Résultats d'impact extraits de 10 essais: en fonction de la décélération et du diamètre sur feuille d'orge horizontale avec une bouillie d'eau, Break Thru et de fluorescéine	53
33	Résultats d'impact extraits de 10 essais: en fonction de la décélération et du diamètre sur feuille d'orge horizontale avec une bouillie d'eau, Li700 et de fluorescéine.	54
34	Pourcentages volumétriques des résultats d'impact en fonction des classes d'énergie selon le nombre de Weber avec une bouillie d'eau et de fluorescéine	55
35	Pourcentages volumétriques des résultats d'impact en fonction des classes d'énergie selon le nombre de Weber avec une bouillie d'eau, Break Thru et de	56

fluorescéine		
36	Pourcentages volumétrique des résultats d'impact en fonction des classes d'énergie selon le nombre de Weber avec une bouillie d'eau, Li700 et de fluorescéine	56
37	Comparaison des volumes de rétention aux volumes d'adhésion sur feuilles d'orge	58
38	Schéma révisé du type d'impact d'une goutte en fonction de la vitesse d'impact et de la rugosité de la surface	59
39	Variabilité de rétention sur des lignes 5plants	60
40	Moyennes de rétention sur une ligne 5plants	61
41	Photographie du jet issu de la buse XR11003VK	62
42	Vitesse en fonction du diamètre à différentes hauteurs de mesure pour de l'eau distillée à une pression de 2 bars	63
43	Granulométrie à la pression de 1.5 bars mesurée à une hauteur de 10 cm	64
44	Granulométrie à la pression de 2 bars mesurée à une hauteur de 10 cm	64
45	Granulométrie à la pression de 1.5 bars mesurée à une hauteur de 20 cm	65
46	Granulométrie à la pression de 2 bars mesurée à une hauteur de 20 cm	65
47	Granulométrie à la pression de 1.5 bars mesurée à une hauteur de 30 cm	66
48	Granulométrie à la pression de 2 bars mesurée à une hauteur de 30 cm	66
49	Granulométrie à la pression de 1.5 bars mesurée à une hauteur de 40 cm	67
50	Granulométrie à la pression de 2 bars mesurée à une hauteur de 40 cm	67
51	Granulométrie à la pression de 1.5 bars mesurée à une hauteur de 50 cm	68
52	Granulométrie à la pression de 2 bars mesurée à une hauteur de 50 cm	68

## LISTE DES ABREVIATIONS

<b>Symbol</b>	<b>Signification</b>
$q$	Volume épandu (l/ha)
$V$	Vitesse d'avancement (km/h)
$e$	Ecartement entre buses (m)
$d$	Débit d'une buse (l/min)
$\eta$	Viscosité de l'air
$R$	Rayon de la goutte
$v$	Vitesse de la goutte.
$\theta_a$	Advancing contact angle
$\theta_r$	Receding contact angle
$H$	Hystérèse
$F$	Force appliquée au fluide
$We$	Nombre de Weber
$Re$	Nombre de Reynolds
$\mu$	Viscosité dynamique
$\rho$	Masse volumique
$\sigma$	Tension superficielle
$V_{tot}$	Volume total mesuré par ombroscopie
% Ad	Pourcentage d'Adhésion
%RCB	Pourcentage de Rebond au regime Cassie-Baxter
% RW	Pourcentage de Rebond au regime Wenzel
% Sp CB	Pourcentage de Splashing au regime Cassie-Baxter
% Sp W	Pourcentage de Splashing au regime Wenzel
VMD	Diamètre median Volumétrique
N-drops	Nombre de gouttes
V Ad	Volume d'Adhesion
V RCB	Volume de Rebound au regime Cassie-Baxter
V RW	Volume de Rebound au regime Wenzel
V Sp CB	Volume de Splashing au regime Cassie-Baxter

V Sp W	Volume de Splashing au regime Wenzel
VF	Volume de Retention mesuré par Fluorométrie
% Sp W Rt	Pourcentage retenu du volume de splashing au regime Wenzel
Ret p	Rétention pendérée (V Ad + V Sp W Rt)
Wat-BT	Bouillie eau et Break-Thru
Wat_Li700	Bouillie eau et Li700



## TABLE DES MATIERES

	<b>Page</b>
I. Liste des Tableaux	
II. Liste des figures	
III. Liste des abréviations	
Introduction	01
 Chapitre I : LE POINT DES CONNAISSANCES  	
I. Importance de la caractérisation des jets de pulvérisation agricole	05
II. Dynamique des gouttes éjectées	07
III. L'impact des gouttes sur la surface ciblée	09
III.1. Présentation des différents types d'impact	09
III.1.1. L'adhésion	11
III.1.2. Le rebond	11
III.1.3. Éclaboussures ou fragmentations	12
III.2. Limite entre les régimes d'adhérence et de rebond	13
IV. Propriétés des surfaces biologiques	14
V. Méthodes de mesure des gouttes	17
V.1. Méthodes d'acquisition d'images de gouttelettes	18
VI. Facteurs affectant la répartition des jets de pulvérisation	18
VI.1. Distribution de la buse	19
VI.1.1. Caractéristiques de la buse	19
VI.1.2. Pression de pulvérisation	21
VI.1.3. Propriétés de la bouillie	22

VI.2. Mouvements de la buse	22
VI.2.1. Hauteur de pulvérisation	23
VI.2.2. Vitesse de la buse	24
VII. Mesure de la distribution et de la répartition	25
VII.1. Mesure de la répartition statique unidimensionnelle	25
VII.2. Mesure de la répartition statique bidimensionnelle	26
VII.3. Mesure de la répartition dynamique	27
VIII. Modélisation	28
VIII.1. Modélisation de la distribution des buses	28
VIII.2. Modélisation de la répartition dynamique	29
VIII.2.1. Effets des mouvements verticaux de la buse	29
VIII.2.2. Effets des mouvements horizontaux de la buse	30
IX. Mouillabilité de la surface	31
IX.1. Régimes d'équilibre sur surface texturée	32
IX.1.1. Régime de Wenzel	32
IX.1.2. Régime de Cassie-Baxter	32
X. Rôle des additifs aux bouillies de pulvérisation	32
XI. Modèles de rétention et efficacité d'application	33

## Chapitre II : MATERIELS ET METHODES

I. Mesures combinées de rétention par imagerie rapide et spectrofluorométrie	35
I.1. Présentation générale du dispositif expérimental	35
I.1.1. Dispositif d'acquisition d'images	36
I.1.1.1. Caméra rapide	36

I.1.1.2. L'éclairage	37
I.1.2. Alimentation du dispositif en bouillie	38
I.1.3. Système de déplacement de la buse	38
I.1.4. Support de fixation de la surface cible	39
1.2. Protocole des manipulations	40
1.2.1. Mesure de fluorométrie	40
I.2.2. Mesure de la surface des feuilles	41
I.2.3. Analyse d'images et de traitement de données	41
II. Essai standard de rétention sur orge	44
III. Mesure de la Granulométrie des jets	46
III.1. Présentation générale du dispositif expérimental	46
III.2. Méthode d'acquisition d'images	48
III.3. Calibration dimensionnelle	48
III.4. Traitement de l'arrière-plan	49
III.5. Caractérisation des gouttes	49
III.6. Essais réalisés	50

### Chapitre III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

I. Evaluation de la rétention par imagerie rapide	51
I.1. Types d'impact et volumes correspondants	51
I.2. Contribution des gouttes fragmentées en régime Wenzel à la rétention	58
II. Mesure de rétention par fluorométrie (essais standard de rétention)	60
III. Caractérisations de la granulométrie de la buse	61
III.1. Mesure du spectre de gouttes	62

III.2. Caractérisation granulométrique des jets	62
Conclusion	69
Références bibliographiques	71
Annexes	
Articles publiés	
Résumé	

## INTRODUCTION

La plupart des produits phytopharmaceutiques sont des composés chimiques spécifiquement formulés. Ils peuvent aussi être des produits chimiques de base (acides gras, acides aminés, autres substances chimiques courantes), des extraits végétaux ou animaux (huiles végétales ou animales, gélatine, etc.) ou des dérivés de métabolites végétaux ou d'autres substances. Avec environ 98 % des quantités totales utilisées, l'agriculture est le plus gros utilisateur de produits phytopharmaceutiques.

L'usage des produits phytopharmaceutiques, tant en nature qu'en quantité, varie en fonction du type de production agricole. Divers facteurs influencent les produits et les quantités utilisés: type de maladie ou de ravageur, conditions météorologiques, facteurs saisonniers, prix des pesticides, réglementation,...Le facteur humain fait que la quantité de matière active appliquée sur la même culture dans la même région durant la même période de végétation peut varier considérablement.

L'utilisation des produits phytopharmaceutiques présente des avantages économiques considérables. Ils permettent à l'agriculteur d'augmenter ou de maintenir les rendements en éliminant ou réduisant la compétition avec les adventices et les attaques des ravageurs, de protéger les produits végétaux des organismes nuisibles, et d'améliorer ou de préserver la qualité des produits (Oppenheimer et al., 1998). Les pratiques culturales simplifiées qui, par ailleurs, peuvent présenter des avantages écologiques sont largement tributaires de l'utilisation d'herbicides.

De nombreux facteurs influencent les risques liés à l'utilisation des produits phytopharmaceutiques, parmi lesquels il faut citer le type de matière active, les conditions climatiques lors de la pulvérisation et enfin le respect des bonnes pratiques par l'opérateur.

Les produits phytopharmaceutiques contiennent pour la majorité des substances actives dont les propriétés les rendent dangereux pour la santé et l'environnement. Les risques liés à leur dissémination volontaire dans l'environnement au moment de l'application sont acceptés par la société en raison de l'avantage économique important que présente leur utilisation.

Les risques pour la santé humaine peuvent découler d'une exposition directe ou indirecte. Si des personnes se trouvant à proximité peuvent entrer en contact avec les produits phytopharmaceutiques lors de leur application, les agriculteurs sont les plus directement exposés aux risques.

Les consommateurs peuvent être soumis à une exposition indirecte due à la présence de résidus de produits phytopharmaceutiques dans les produits agricoles. Des limites maximales

en résidus ont été fixées pour de nombreuses combinaisons produit phytopharmaceutique / denrée alimentaire et l'exposition des consommateurs est évaluée par des autorités de contrôle au niveau mondial (OMS/FAO, Codex Alimentarius). L'exposition par l'intermédiaire de l'eau potable est une autre source de contamination qui nécessite une surveillance constante de la part des autorités.

La contamination diffuse des eaux pose des problèmes à long terme en raison du laps de temps nécessaire à la contamination et à la remédiation tandis que la pollution ponctuelle de captages à la suite d'accidents nécessite un suivi permanent de la qualité des eaux.

Les risques pour la santé humaine et l'environnement résident dans les effets néfastes aigus et chroniques sur les êtres humains et sur les espèces non cibles. Les effets aigus sont dus à la forte toxicité de certains produits phytopharmaceutiques et les effets chroniques à la bioaccumulation et à la persistance des substances actives ou de leurs produits de dégradation. Les pays en voie de développement y compris notre pays sont les moins bien protégés par la faiblesse des outils réglementaires.

La dérive, le lessivage et le ruissellement sont des sources diffuses de dissémination incontrôlée des produits phytopharmaceutiques dans l'environnement qui entraînent une pollution de l'air, des sols et des eaux superficielles et souterraines. Le vent risque de transporter les produits en-dehors de la zone de traitement et d'exposer par inhalation de manière récurrente ou ponctuelle des personnes ou des animaux. Les averses orageuses peuvent induire des pics de pollution dans les ruisseaux par ruissellement des produits lessivés. Une contamination ponctuelle de l'environnement peut également se produire pendant et après l'application lors du nettoyage de l'équipement ou en cas d'élimination non contrôlée des produits phytopharmaceutiques.

S'il apparaît que l'utilisation des produits phytopharmaceutiques est nécessaire à la protection des cultures, il est impératif de réduire les risques liés à leur utilisation afin que les diminutions de coût de production qu'ils engendrent n'entraînent pas de coûts externes disproportionnés sur l'environnement et la santé.

De nombreux moyens existent pour limiter davantage l'impact des produits phytopharmaceutiques. La démarche qualité est basée principalement sur la vérification technique, standardisation et certifications de l'équipement d'application. L'accréditation du matériel d'application nouvellement mis sur le marché et la mise en place de contrôles techniques permet d'améliorer les outils de travail utilisés pour l'application des produits phytopharmaceutiques (Herbst et Ganzelmeier, 2002).

L'objectif de l'application est d'assurer l'efficacité biologique des traitements en tenant compte de considérations techniques, économiques et environnementales.

Le passage au travers les buses assure l'éclatement de la veine fluide en un jet de gouttelettes. Les propriétés physico-chimiques et la pression de la bouillie ainsi que la géométrie de l'orifice conditionnent le spectre des gouttelettes et leur trajectoire jusqu' à la cible. Des facteurs extérieurs comme le vent, la température ou l'humidité relative de l'air peuvent altérer la trajectoire des gouttelettes.

L'objectif du processus est d'assurer une efficacité biologique optimale du traitement sous la contrainte d'aspects techniques et de considérations économiques. L'efficacité biologique dépend de la dose (quantité de matière active ou de produit formulé appliqué par unité de longueur, de surface ou de volume traité), de facteurs physiques, tels que la taille des gouttes, le nombre d'impacts et le taux de couverture, des propriétés physico-chimiques des bouillies, de facteurs environnementaux et de facteurs biologiques tels que le taux d'infestation ou le stade de développement du parasite et de la culture. Sur base de la dose homologuée définie par les formulateurs en tenant compte des contraintes d'ordre biologique, technologique, économique et toxicologique, la dose appliquée est choisie en tenant compte des critères agronomiques et économiques. En fonction des conditions d'application, la dose est répartie de manière plus ou moins homogène, et donc l'efficacité du traitement peut être variable. Enfält et al., (1996) montrent qu' une répartition hétérogène tend à diminuer l'efficacité du traitement de sorte qu' une plus haute dose est nécessaire pour obtenir l' efficacité maximale du traitement. Comme l'efficacité biologique est en général hautement corrélée à l'uniformité de la répartition (Gölich, 1985), une meilleure maîtrise du processus d'application est nécessaire afin de respecter précisément le taux d'application désiré.

La réduction de l'impact des pesticides passe notamment par une meilleure maîtrise des techniques d'application afin d'obtenir la répartition la plus homogène possible.

La granulométrie du jet utilisé lors de l'application a une influence directe sur l'importance de la dérive (Nuyttens, et al., 2007).

Zabkiewicz (2007) divise le procédé de pulvérisation en quatre étapes: le dépôt (deposition); quantité de bouillie déposée dans la zone cible, la rétention (retention); quantité capturée par la plante, l'absorption (uptake); quantité retenue dans le feuillage de la plante et la translocation (translocation) ; quantité absorbée à partir du site d'absorption vers le système vasculaire de la plante. L'efficacité du traitement est directement liée à la quantité de produit adhérent à la feuille suite à l'impact des gouttes ainsi qu'à la densité de gouttes par unité de surface.

La pulvérisation est donc un procédé multicritères qui peuvent avoir des effets différents en fonction de la phase étudiée. La taille et la vitesse des gouttes sont liées aux conditions opératoires (pression, type de la buse) mais également aux paramètres physico-chimiques de la bouillie. Au niveau de la rétention, la taille, la vitesse et les propriétés physico-chimiques de la bouillie ainsi que l'état de la surface d'impact ont tous une influence sur la proportion du jet retenue par la feuille. Si on s'intéresse à la rétention de la plante entière, il faut également tenir compte de la densité de la canopée (LAI, ELADP, etc.), position de chaque feuille dans cette canopée, le stade de croissance, les conditions de croissance, etc.

Cependant, la pertinence des différentes techniques de caractérisation de la granulométrie des jets de pulvérisation agricole reste l'objet de controverses. La caractérisation d'un même jet par différentes techniques de mesures conduit à des différences de granulométries significatives (Nuyttens, et al., 2007). De plus les « Phase Doppler Particle Analyzer » (PDPA) commerciaux couramment utilisés comme références fournissent une mesure performante de la corrélation vitesse-diamètre mais s'avèrent délicats à mettre en oeuvre et peu aptes à déterminer précisément la fraction volumique au sein de chaque classe granulométrique (Hirleman, et al., 1990).

L'imagerie par ombroscopie présente une alternative séduisante pour la caractérisation de ces jets peu denses et lents en raison de l'accessibilité du matériel et de sa polyvalence. En particulier, le recours à des sources d'éclairage LED assure une grande modularité.

Cette recherche doctorale s'inscrit dès lors dans cette problématique et se focalise sur les deux premières phases du procédé de pulvérisation. L'accent étant mis sur la compréhension physique des mécanismes en jeu pendant l'impact des gouttes sur les feuilles et sur la mise en place de propositions innovantes pour déterminer la fraction du jet réellement retenue sur cible et en déduire les pertes hors cible.

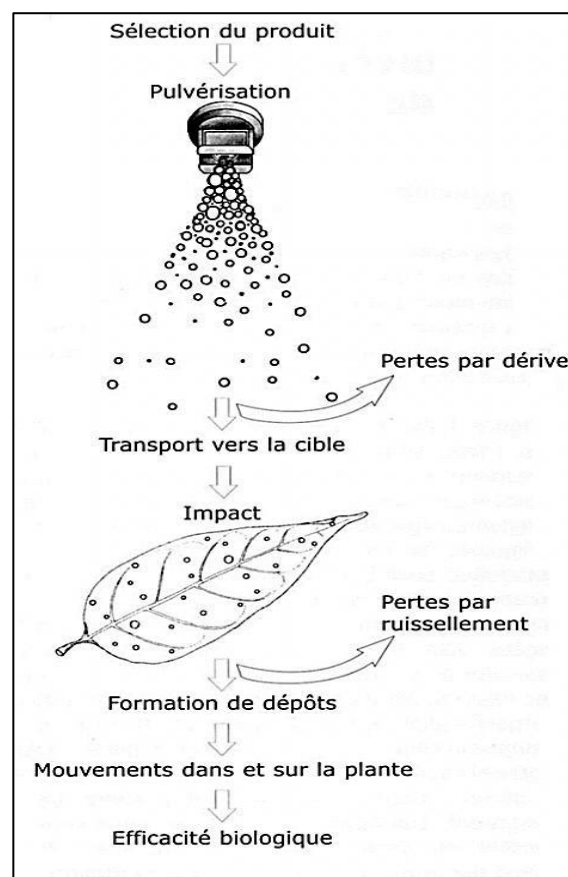
C'est dans ce cadre que le présent travail tente de focaliser sur la phase d'interaction entre les gouttelettes des jets de pulvérisation et la surface végétale ciblée. Les informations tirées permettront d'apporter une contribution à l'amélioration de la santé publique et de l'environnement.



## Chapitre I : LE POINT DES CONNAISSANCES

### I. Importance de la caractérisation des jets de pulvérisation agricole

Différentes méthodes existent pour appliquer les produits phytosanitaires sur les cultures, comme la pulvérisation par jet projeté, par centrifugation, par courant d'air, par vibration et par électrostatisme (Nuyttens, 2007). Le mode le plus répandu est la pulvérisation à jet projeté. Elle consiste à fragmenter un volume de bouillie phytosanitaire en gouttelettes, et à répartir celles-ci le plus uniformément possible sur une cible déterminée. L'énergie nécessaire au transport est fournie par la pression du fluide (Hamza, et al., 2000). La figure 1 montre les étapes de la pulvérisation.



**Figure 1:** Application de produits phytosanitaires (Hamza, et al., 2000)

Les petits orifices, appelés buses, existant en différentes tailles et modèles, sont capable de fournir une grande quantité de jets différents.

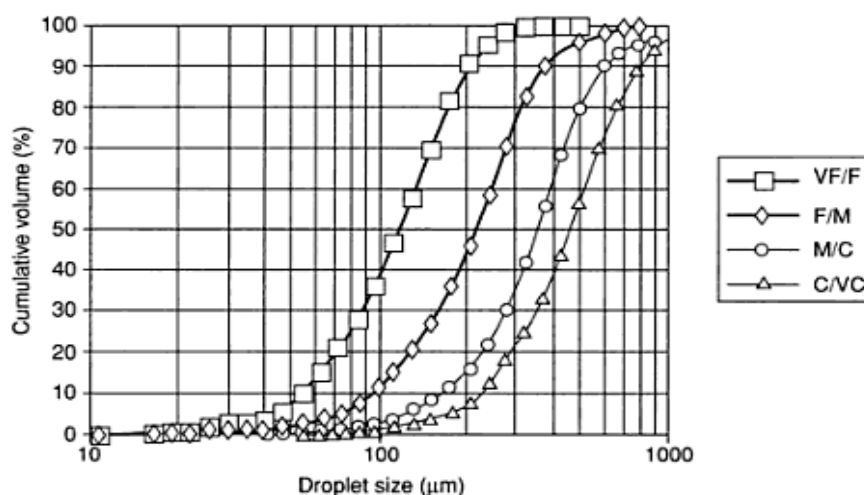
L'entièreté du volume pulvérisé n'atteint pas la cible, en effet une partie subit la dérive. Nuyttens (2007), a défini la dérive comme le mouvement physique des gouttes dans l'air de la zone ciblée vers une zone non désirée au moment ou peu après l'application. La dérive ne

comprend pas les mouvements causés par la volatilisation, l'érosion, le transport par les eaux de surface ou souterraines ou les particules de sol emportées par le vent qui se produit après l'application (Nuyttens, 2007).

Ce sont les plus petites gouttes (<100  $\mu\text{m}$ ) qui sont le plus sensibles à la dérive. Cette perte provoque une diminution de l'efficacité du traitement et une perte financière pour l'exploitant. La dérive peut engendrer de nombreuses autres conséquences: contamination de l'eau de surface, dommage sur les cultures avoisinantes, risque sanitaire pour les êtres humains et les animaux (Nuyttens, 2007).

Lorsque les gouttes atteignent la surface ciblée, elles peuvent avoir différents comportements: elles peuvent y adhérer, y rebondir ou se fractionner. Le comportement d'une goutte est dicté par son énergie cinétique (vitesse, diamètre), ses propriétés physico-chimique (viscosité, tension de surface ...), les propriétés de la surface (rugosité, état de surface...). Le liquide restant sur la feuille, soit directement soit après rebonds, s'évapore formant des dépôts.

La granulométrie du jet est un paramètre déterminant pour les deux premières phases de l'application de produits phytosanitaire (transport, impact). Les jets sont donc logiquement classés selon leur granulométrie. L'un des classements les plus répandus est celui réalisé par le « *British Crop Protection Council* ». Ce classement comporte 5 classes: Very Fine (VF), Fine (F), Medium (M), Coarse (C), Very Coarse (VC). Les limites de ces classes ont été définies sur base de 4 jets de référence (figure 2).



**Figure 2:** Classification des jets selon le « *British Crop Protection Council* » (Primary Industries Standing Committee, 2002)

La granulométrie d'un jet est généralement décrite à l'aide de critères de position et de dispersion. Les critères de positions les plus couramment utilisés sont:

- Le diamètre en volume,  $D_v 10$   $D_v 50$   $D_v 90$  est le diamètre en dessous duquel se situe respectivement 10, 50 ou 90 % du volume du jet. Le  $D_v 50$  est aussi appelé diamètre médian en volume (DMV).
- Le diamètre médian en nombre (DMN), diamètre pour lequel 50% des gouttes ont un diamètre inférieur et 50% des gouttes ont un diamètre supérieur.

Les critères de dispersion les plus couramment utilisés sont:

- Facteur relative d'envergure (Relative span factor) qui caractérise l'uniformité de la distribution granulométrique. Lorsque le jet ne comporte qu'une seule taille de goutte, le relative span factor est égal à 0.
- La largeur de la distribution.

## II. Dynamique des gouttes éjectées

Une goutte chutant dans l'air est soumise à différentes forces. La première est la résistance causée par la viscosité de l'air. Cette force est définie par la loi de Stokes, pour un corps sphérique:

$$F_{Stokes} = 6\pi\eta Rv \quad (1)$$

où  $\eta$  est la viscosité de l'air,  $R$  est le rayon de la goutte et  $v$  est la vitesse de la goutte.

La viscosité est l'énergie nécessaire pour déformer l'air de manière à permettre le passage de la goutte à travers lui (écoulement laminaire). Elle est la source de la résistance de Stokes. La goutte est également soumise à l'accélération de la gravité qui tend à la faire chuter. Le nombre de Reynolds permet de déterminer l'importance des forces d'inertie sur les forces de viscosité et permet également de déterminer deux régimes d'écoulement: laminaire et turbulent.

Lorsque l'objet se trouve en écoulement laminaire, c'est la force de frottement de Stokes qui domine, ce qui est le cas des gouttes de fluides que l'on désire produire en général. La dominance de la force de Stokes détermine alors la vitesse terminale de la goutte et sa constante de temps de relaxation.

La vitesse terminale de la goutte est un paramètre qui est intéressant de pouvoir déterminer pour caractériser l'énergie de la goutte lors de son impact. Elle se détermine en théorie en

égalant les forces gravitationnelles appliquées à la goutte aux forces de frottement dépendantes de la vitesse.

Le tableau 1. donne la vitesse terminale de gouttes d'eau de diamètres différents dans l'air.

**Tableau 1:** Vitesse terminale dans l'air de gouttes de fluide, densité 1 g/cm<sup>3</sup> (Lee, 2003).

Diamètre (µm)	Vitesse terminale (mm/s)
0,1	$9,4 \cdot 10^{-4}$
0,5	$1,0 \cdot 10^{-2}$
1,0	$3,5 \cdot 10^{-2}$
2,0	$1,3 \cdot 10^{-1}$
5,0	$7,7 \cdot 10^{-1}$
10,0	$3,0 \cdot 10^0$
15,0	$6,7 \cdot 10^0$
20,0	$1,2 \cdot 10^1$
25,0	$1,9 \cdot 10^1$
50,0	$7,5 \cdot 10^1$
75,0	$1,7 \cdot 10^2$
100,0	$2,6 \cdot 10^2$
200,0	$7,1 \cdot 10^2$
400,0	$1,6 \cdot 10^3$
1000,0	$4,0 \cdot 10^3$
5800,0	$9,2 \cdot 10^3$

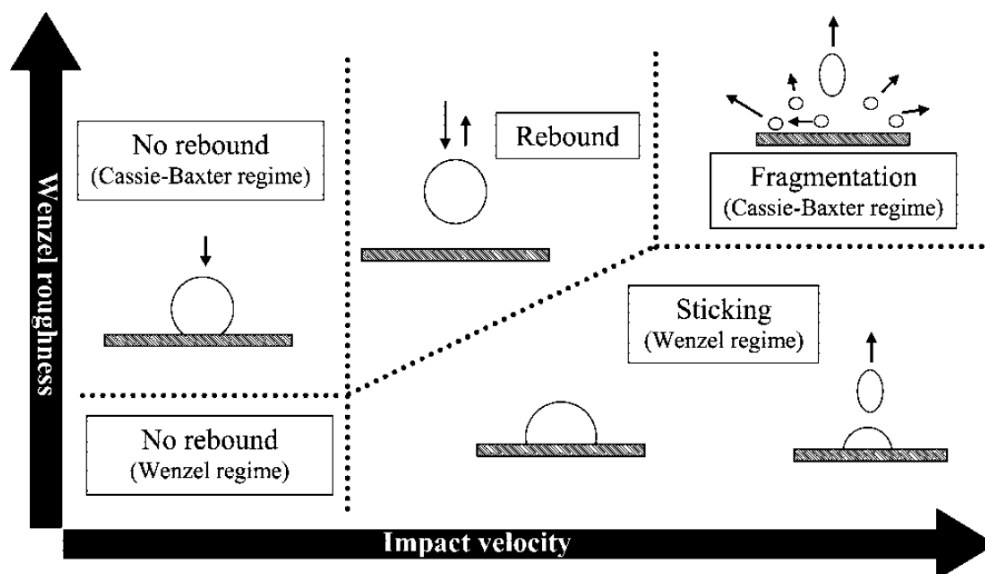
Une goutte sortant à une vitesse de l'ordre de quelques mètres par seconde, peut présenter une vitesse terminale de l'ordre du millimètre par seconde. Lorsque l'on désire observer l'impact de telles gouttes sur un objet, la vitesse terminale gouverne en grande partie le comportement de cet impact. Une vitesse d'éjection importante tend à diminuer les effets de convection de l'air sur la goutte. Et, comme il est presque impossible de travailler en conditions libres de tout mouvement d'air, une vitesse élevée permet d'éviter cette problématique. Ce paramètre est donc important à définir lors de toute expérimentation. Cependant, augmenter la vitesse d'éjection du fluide pour se débarrasser des problèmes de convection n'est pas toujours une solution compatible avec les objectifs définis en termes de vitesse terminale, par exemple, et même en termes de stabilité de production des gouttes (une amplitude de l'impulsion trop importante peut conduire à la formation de gouttes

satellites, voire d'un spray). Il faut également remarquer qu'il existe un seuil de vitesse en dessous duquel aucune goutte ne peut sortir du générateur. (Massinon, 2009)

### III. L'impact des gouttes sur la surface ciblée

Différents aspects sont à prendre en compte lors de l'impact: les paramètres de la goutte (forces de capillarité, d'inertie et de viscosité) et les paramètres de la surface. Le fluide ambiant joue également un rôle non négligeable. Un autre point important est la durée de l'impact. En effet, celle-ci est souvent inférieure à quelques millisecondes, ce qui justifie l'utilisation d'une caméra rapide pour l'observation.

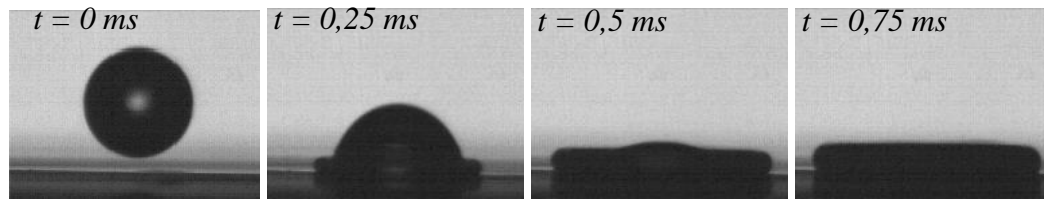
Des études intéressantes sur l'impact de gouttes sur surfaces superhydrophobes de synthèse (Sikalo et al, 2002 ; Bartolo et al, 2006; Reyssat et al, 2006; Caviezel et al, 2008; Rioboo et al, 2008) détaillent le phénomène de rétention sur la plante. La figure 3 résume les connaissances actuelles à ce niveau en représentant les types d'impact en fonction de la vitesse et de la rugosité pour un diamètre de goutte donné.



**Figure 3 :** Type d'impact d'une goutte en fonction de la vitesse d'impact et de la rugosité de la surface (Rioboo, 2008).

#### III.1. Présentation des différents types d'impact

Lors de l'impact, la forme sphérique d'origine de la goutte est forcée de s'aplatir sous la forme d'une crêpe (pancake) et de s'étendre sur la surface. La figure 4 présente une séquence photographique qui permet d'observer cet aplatissement. La goutte s'étale jusqu'à atteindre un diamètre d'étalement maximal après  $7,5 \cdot 10^{-4}$  secondes.



**Figure 4:** Aplatissement d'une goutte de mélange glycérine-eau à 30% sur film Téflon, diamètre  $810 \mu\text{m}$ , vitesse :  $1,6 \text{ m/s}$ ,  $We = 40$ ,  $Re = 672$  (Massinon, 2009).

L'énergie cinétique force la goutte à s'étendre sur la surface. La goutte perd de l'énergie sous forme de chaleur à cause de la viscosité lors de sa déformation pendant l'impact. Son énergie cinétique la force à se conformer à la géométrie de la surface solide. Cela signifie donc que le principe de conservation de l'énergie lors de l'impact ne peut être appliqué. Lors de l'étalement, une onde de choc se propage radialement vers l'extérieur, ce qui augmente la surface de la goutte et donc augmente son énergie de surface. Si le matériau constituant la surface d'impact est hydrophile, la goutte va continuer à s'étendre jusqu'à atteindre son diamètre d'étalement maximum. Éventuellement, la goutte va adhérer ou rebondir selon son énergie initiale et le type de surface. Il faut remarquer que la goutte s'étend quel que soit le type de surface. L'étendue de la goutte dépend des interactions moléculaires entre le fluide et la surface. Si les interactions moléculaires entre le fluide et la surface sont répulsives, le fluide s'écrasant sur la surface, dite hydrophobique, tend à réduire sa surface de contact. Après l'impact, la goutte tend à reprendre sa forme sphérique pour minimiser son exposition à la surface. Ceci est influencé par la force de tension superficielle du produit. Lorsque la rétraction est suffisamment violente la goutte rebondit. Si la goutte arrive avec une énergie cinétique importante, la goutte peut se désintégrer (splashing).

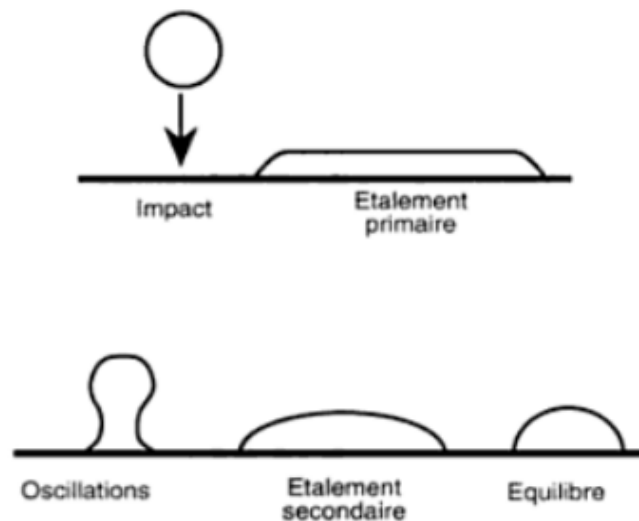
D'une manière générale, augmenter la viscosité du fluide tend à augmenter la dissipation de l'énergie lors de l'impact et donc à favoriser l'adhésion. De plus, diminuer les forces de tension de surface conduit également à favoriser l'adhésion. Ceci peut être réalisé en pratique avec l'ajout de surfactants qui, une fois mélangés avec la bouillie de pulvérisation, diminuent sa tension de surface. Ils se composent de tensioactifs qui s'adsorbent à l'interface air-eau en positionnant leur partie insoluble en dehors de la solution dans la phase adjacente (air), tandis que leurs constituants solubles restent dans la solution. Cependant, ce positionnement à l'interface air-eau prend un certain temps qui est caractérisé par la tension de surface

dynamique du produit. Si le positionnement se fait trop lentement lors de l'impact de la goutte, l'effet escompté n'aura pas lieu. L'échelle de temps est de l'ordre de quelques millisecondes. Cependant, diminuer la tension de surface d'un produit phytosanitaire engendre un autre problème, à savoir la création de plus petites gouttes lors de la pulvérisation. Ces plus petites gouttes seront plus affectées par la dérive (Bergeron, 2003).

Lorsqu'une goutte atteint une surface, différents comportements sont possibles (Caviezel, et al., 2008).

### III.1.1. L'adhésion

L'adhésion directe se produit lorsque le liquide de la goutte ne garde pas assez d'énergie pour rebondir. La goutte a tendance à se coller à la surface et à atteindre un état d'équilibre après quelques oscillations. La limite d'adhérence, en termes de nombre de Weber, diminue alors que l'angle de contact augmente. Pour une goutte déterminée, l'adhérence est favorisée pour des angles de contact faibles. La figure 5 montre les phases de l'adhésion.



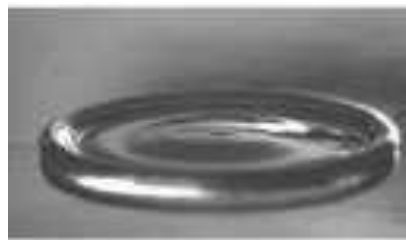
**Figure 5:** Phases d'adhésion d'une goutte sur surface solide sèche (Gauvrit, 1996).

### III.1.2. Le rebond

Le rebond de la goutte (bouncing/rebound) se produit lorsque la goutte s'étend jusqu'à un diamètre maximum et se rétracte alors sous l'action de forces capillaires qui minimisent la surface de contact entre la goutte et la surface d'impact. Si cette rétraction est suffisamment violente (la tension de surface absorbe l'énergie cinétique, déduction faite des pertes d'énergie), la goutte peut rebondir (Bergeron, 2003). Lors de ce rebond, la goutte prend la

forme d'une colonne verticale, connue sous le nom de jet de Worthington. Le cas de droite de la figure 7 illustre un rebond type, avec formation du jet de Worthington sur la dernière image en bas.

Deux types de rebonds peuvent se produire: un rebond sans ou avec la formation d'un tore au niveau du périmètre extrême de la goutte (figure 6). Dans le premier cas, la goutte récupère assez d'énergie pour rebondir, avec une forme similaire à celle qu'elle avait auparavant. Les forces de tensions superficielles sont comparables aux forces d'inertie. La forme de la déformation maximale diffère selon les valeurs de tension de surface. Pour de grandes valeurs, la goutte se déforme faiblement et rebondit comme une balle en caoutchouc. Pour de plus faibles valeurs, la goutte s'étale à l'impact en créant un renflement périphérique connecté par un film liquide au centre. Dans le second cas, un tore se forme au moment où la goutte atteint son diamètre d'étalement maximum, dépourvu de liquide au centre. Si des instabilités circonférentielles sont présentes, le tore de liquide peut se briser en un nombre de gouttes secondaires. Les forces de tensions de surface sont toujours capables de contracter le tore et de faire rebondir la goutte.



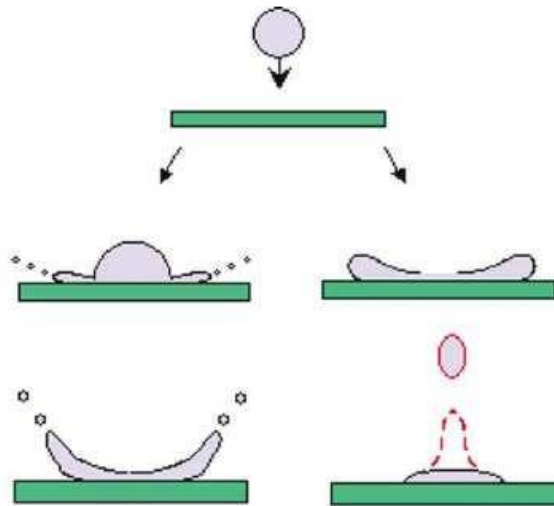
**Figure 6:** Formation d'un tore lors de l'impact d'une goutte (Caviezel, 2008).

### III.1.3. Éclaboussures ou fragmentations

Le dernier cas s'identifie sous l'appellation d'éclaboussures (splashing). Le terme de « splash » est, en anglais, une onomatopée qui évoque les gouttelettes projetées dans toutes les directions lors de l'impact. Une partie du liquide est éjectée dans différentes directions radiales et la goutte se fragmente en une série de gouttelettes qui adhèrent sur la surface ou non, en fonction de l'énergie dissipée lors de l'impact. Dans ces conditions, il est possible que la goutte ne rebondisse pas. Le splashing se produit, en général, lorsque les gouttes s'écrasent sur la surface avec une énergie cinétique très importante (grande vitesse d'impact et/ou très grosses gouttes). Le seuil d'énergie requis pour le splashing est grandement



diminué par la rugosité de la surface et le *splashing* se produit plus facilement sur des surfaces hydrophobes et dures. Durant son expansion radiale, la goutte glisse le long des crêtes hydrophobes de la surface laissant un coussin de poches d'air entre la goutte et la surface. Dès lors, peu de dissipations visqueuses se produisent et la goutte est forcée de s'étendre sur la surface. En conséquence, presque toute l'énergie cinétique de la goutte est utilisée pour sa déformation lors de l'impact. L'état de surface de l'objet sur lequel la goutte s'écrase est donc un paramètre très important. Quand les forces de capillarité sont insuffisantes pour maintenir l'intégrité de la goutte, elle se désintègre en petites gouttes satellites qui sont projetées à partir du périmètre extrême de la goutte (cas de gauche de la figure 7) (Bergeron, 2003).



**Figure 7:** Comparaison du *splashing* (à gauche) et du rebond (à droite) pour une goutte sur une surface solide sèche (Bergeron, 2003).

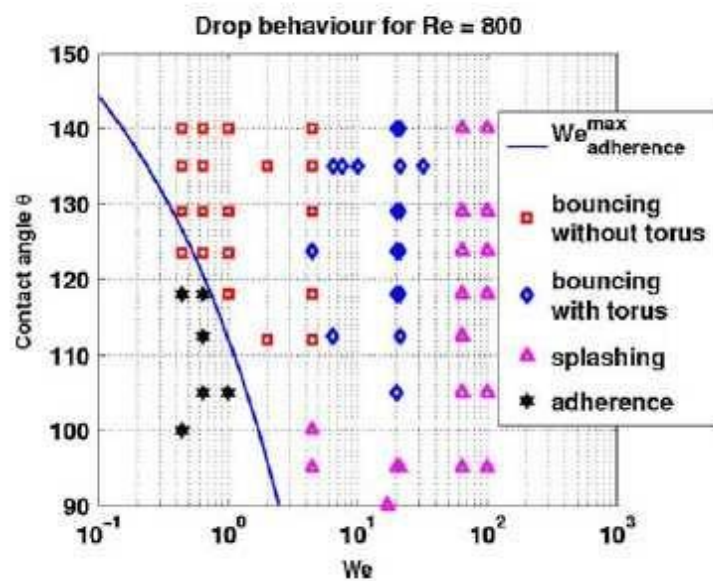
### III.2. Limite entre les régimes d'adhérence et de rebond

Une estimation simple pour déterminer la limite entre les régimes d'adhérence et de rebond peut être réalisée en comparant l'énergie cinétique initiale de la goutte à la différence d'énergie de surface d'une goutte sphérique à l'équilibre et d'une goutte adhérant sur une surface solide (Caviezel, 2008). L'état d'équilibre d'une goutte adhérant sur une surface solide possède moins d'énergie totale qu'une goutte libre à l'équilibre ayant le même volume.

Pour les gouttes dont le nombre de Weber est faible, l'impact est dominé par les effets de tension de surface. La goutte adhère immédiatement et l'énergie est dissipée après quelques

oscillations. Ceci signifie qu'il n'y a pas assez d'énergie cinétique pour créer une nouvelle goutte, et donc pour permettre un rebond. Ceci a pour raison que si l'énergie cinétique est plus petite que l'énergie gagnée lors de l'adhésion, les effets de tension de surface aident à l'adhésion de la goutte. Lorsque la tension de surface domine les forces d'inertie. Pour des nombres de Weber et de Reynolds plus importants, la viscosité joue un rôle non négligeable. Toutes ces considérations ont été vérifiées expérimentalement par Caviezel (2008).

Les différents régimes d'impacts mis en évidence par Caviezel (2008) sont visibles sur la figure 8. Cette figure présente les différents impacts observés pour des gouttes d'eau ( $Re = 800$ ) sur surfaces solides sèches, en fonction de l'angle de contact et du nombre de Weber.



**Figure 8:** Carte du comportement lors de l'impact de gouttes ( $Re = 800$ ), selon l'angle de contact et le nombre de Weber (Caviezel, 2008).

Cette figure montre également l'influence de l'angle de contact sur le comportement lors de l'impact. Pour de faibles angles de contact, le rebond n'est pas observé: les gouttes adhèrent puis s'éclatent avec l'augmentation du nombre de Weber (diminution de la tension de surface). Le rebond est observé en augmentant l'angle de contact.

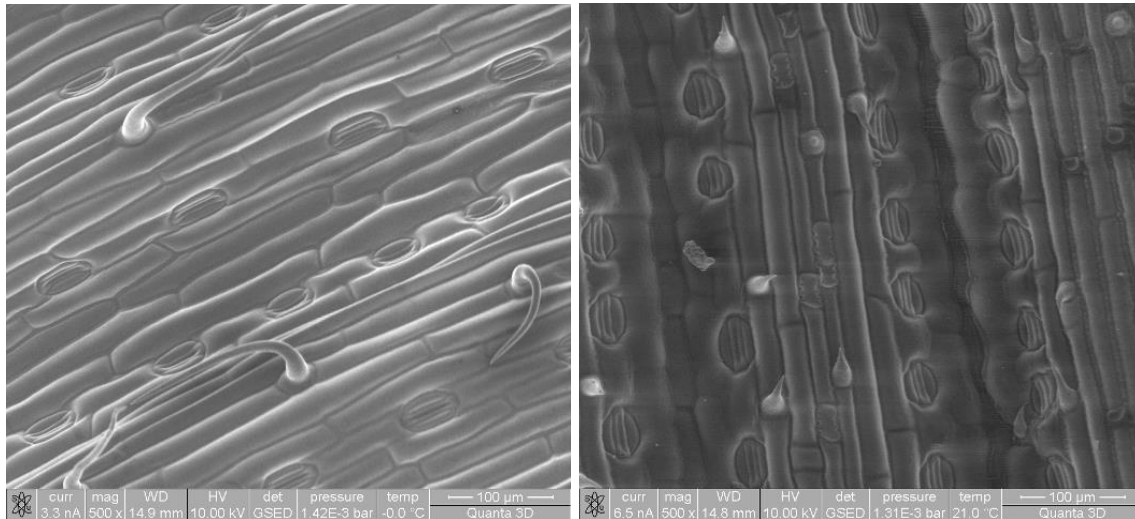
#### IV. Propriétés des surfaces biologiques

L'état de surface des végétaux diffère d'une espèce à l'autre et il est important de connaître les différentes caractéristiques des surfaces foliaires pour pouvoir interpréter les résultats des tests sur surfaces végétales.

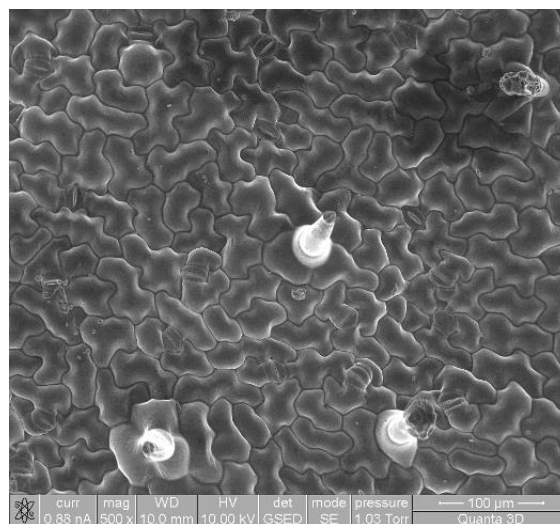
Les surfaces foliaires présentent des reliefs observables à plusieurs échelles: nervations, pilosité, cellules épidermiques et cires épicuticulaires (Gauvrit, 1996). Ces reliefs sont des paramètres qui conditionnent l'état de surface des feuilles et donc conditionnent le comportement d'une goutte lors de l'impact.

Les nervures possèdent des dimensions de l'ordre du millimètre et forment parfois des reliefs. La surface réelle de la feuille en est augmentée. Chez les poacées, ces nervures sont disposées parallèlement. Cette nervation peut conduire à une rétention de l'eau plus grande à cause de dépressions qui retiennent mieux l'eau. La pilosité se décline selon différents modes: il existe des surfaces glabres (vulpin, luzerne, liseron, etc.), des surfaces avec des poils épars (folle avoine, etc.), des poils abondants (blé, maïs, moutarde, etc.). Les cellules épidermiques ont des dimensions comprises entre 10 et 50  $\mu\text{m}$ . Ces cellules forment en général de légers bombements délimitant des dépressions à leur frontière et sont ordonnées en lignes chez les monocotylédones (figure 9). Des cellules épidermiques remarquables sont les cellules de garde des stomates. Ces cellules ont pour rôle de canaliser les échanges gazeux (permettre l'entrée du dioxyde de carbone et limiter sans empêcher la sortie de vapeur d'eau). La cuticule des cellules stomatiques est souvent plus épaisse sur le bord externe mais y serait plus perméable que celle des autres cellules épidermiques. Les cellules de garde sont réniformes chez les dicotylédones et en forme d'haltère chez les monocotylédones. De plus, les stomates sont réputées plus abondantes sur les faces inférieures (abaxiales) des feuilles, comme par exemple pour la tomate, mais ceci n'est pas vérifié chez le blé et le maïs. Aux dimensions de 1 à 5  $\mu\text{m}$ , on trouve les cires épicuticulaires qui constituent la structure superficielle de la cuticule. Elles possèdent un caractère hydrophobe. Ces cires sont amorphes chez la plupart des dicotylédones, mais pour la majorité des monocotylédones, elles présentent des structures qui ont l'apparence de cristaux. Ceci tend à augmenter la surface réelle de la feuille et également à augmenter son hydrophobicité. Dans le cas particulier des poacées, l'âge de la feuille influence l'état de surface (figure 9). L'extrémité d'une feuille de graminées est plus âgée que la base et possède plus de cire. Ceci est dû à la croissance par la base, au niveau de la ligule des feuilles, contrairement aux dicotylédones, dont les feuilles croissent par augmentation uniforme de leur surface. Finalement, le port de la feuille joue un rôle important pour la rétention de l'eau. Chez les dicotylédones, les feuilles se placent de manière horizontale après la levée, alors que chez les monocotylédones, le port est plus dressé. Plus l'inclinaison de la feuille est grande (verticale), plus la rétention de l'eau diminue. Toutes ces considérations sur l'état de surface tendent à faire une généralisation peut-être abusive de la

faible rétention des monocotylédones. Il ne faut donc pas opposer trop strictement monocotylédones et dicotylédones. Par exemple, le ray-grass est une plante mouillable, tandis que le pois est peu mouillable.



**Figure 9:** Photographies en microscopie électronique d'une feuille de blé jeune (à gauche) et mûr (à droite).



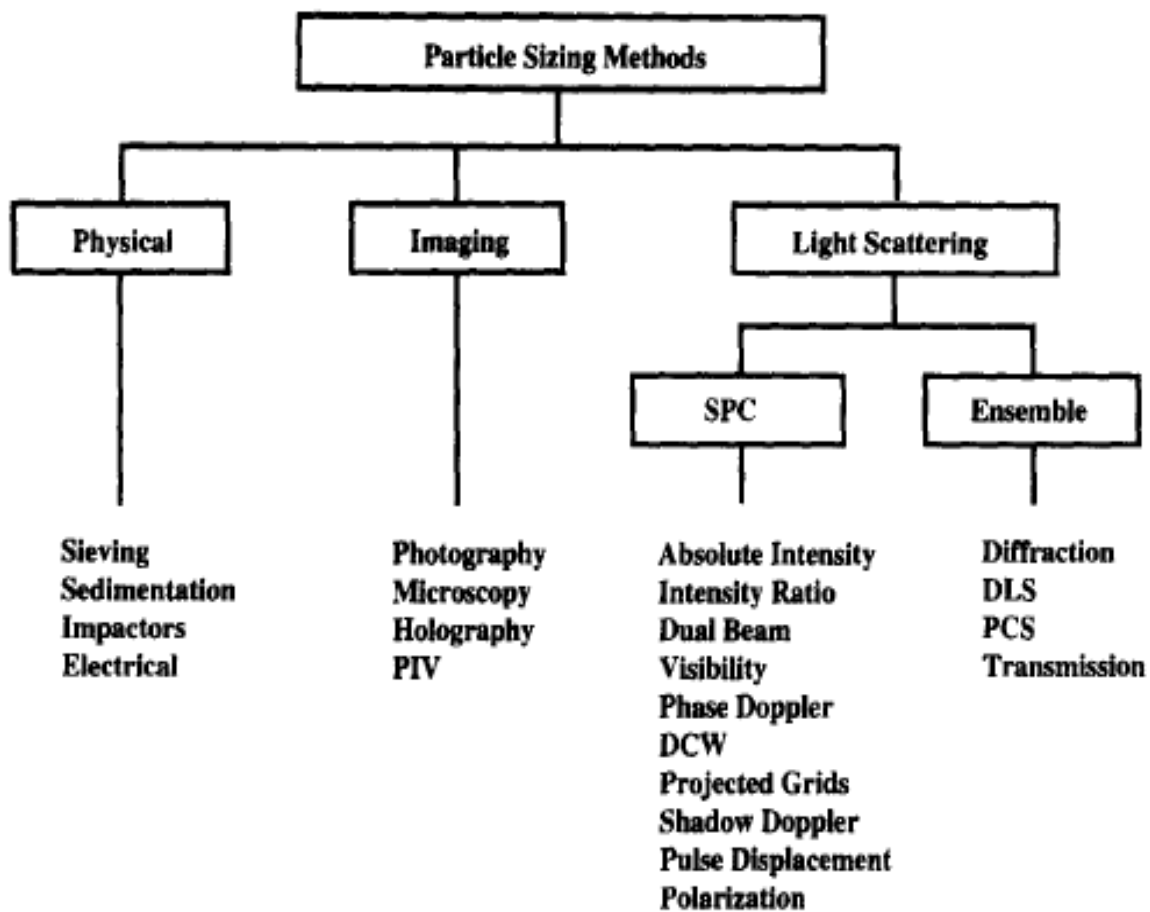
**Figure 10:** Photographie en microscopie électronique d'une feuille de tomate.

La comparaison des figures 9 et 10 permet d'observer les différences d'organisation des cellules de surface entre monocotylédones et dicotylédones, sans pour autant représenter une vérité généralisée. Sur l'image en microscopie électronique du blé jeune, il est possible

d'observer que l'écartement entre deux poils est de l'ordre de  $100 \mu\text{m}$ . Cette distance est plus petite que le diamètre moyen des gouttes produites lors de la pulvérisation. Les poils du blé jouent indéniablement un rôle dans l'hydrophobicité de sa surface foliaire.

### V. Méthodes de mesure des gouttes

La détermination de la taille de particules solides ou liquides peut s'effectuer selon différentes méthodes qui se classent en trois grandes catégories (figure 11). La première englobe les méthodes physiques, comme le tamisage et la sédimentation. La seconde est la méthode basée sur l'acquisition d'images, comme la photographie, la microscopie et la PIV (Particle Image Velocimetry). La dernière est basée sur la diffusion lumineuse, comme par exemple la transmission, la diffraction, PDA (Phase Doppler Anemometry), PDPA (Phase Doppler Particle Analyzer), etc. Une information plus détaillée du sujet est donnée par Black (1996).



**Figure 11:** Différentes méthodes de détermination de la taille de particules (Black, 1996).

### **V.1. Méthodes d'acquisition d'images de gouttelettes**

Deux méthodes de base sont couramment utilisées pour photographier les gouttes (Lee, 2003):

La première consiste en une illumination directe des gouttes en utilisant une lumière constante et concentrée. La source lumineuse est placée dans un autre axe que l'axe caméra-goutte. Les gouttes apparaissent donc sur un arrière-fond noir. Une source lumineuse chaude ne doit pas être utilisée car elle modifie les propriétés rhéologiques du fluide et génère de forts courants de convection dans l'air, ce qui peut dévier les gouttes. La source lumineuse doit en plus être suffisamment puissante pour pouvoir être concentrée en faisceaux. Un exemple typique de source lumineuse répondant à ces conditions est une lampe LED (Light-Emitting Diode).

La seconde méthode consiste en la création d'un arrière-fond uniforme brillant avec une source lumineuse placée dans l'axe caméra-goutte (les gouttes se trouvant entre la caméra et la source lumineuse). On peut dès lors observer l'ombre des gouttes assez aisément. La source lumineuse peut être alimentée en continu ou de manière stroboscopique. Dans le second cas, l'acquisition d'images doit être synchronisée avec l'illumination. Cette méthode, comparée à la première, permet de voir les gouttes comme des objets ronds plutôt que comme un ensemble de gouttes déterminant un filet liquide. De plus, les détails à petite échelle sont visibles, comme par exemple la formation de petites gouttes satellites, qui sont impossibles à détecter avec une illumination directe. D'une manière générale, c'est cette méthode qui est utilisée dans la plupart des publications scientifiques. Il est parfois nécessaire de placer un diffuseur devant la source lumineuse pour générer l'arrière-plan homogène.

### **VI. Facteurs affectant la répartition des jets de pulvérisation**

La répartition est conditionnée essentiellement par la distribution et la trajectoire de la buse. Des facteurs atmosphériques tels que le vent et l'humidité de l'air l'influencent également. De manière générale, la sensibilité de la répartition aux facteurs extérieurs augmente lorsque le diamètre des gouttes constituant le jet diminue. Le BCPC (British Crop Protection Council) a défini cinq catégories de jets de pulvérisation d'après le diamètre ("Volume Median Diameter") des gouttelettes mesurés par un granulomètre Malvern 2600: jet très fin ( $VMD < 90 \mu\text{m}$ ), jet fin ( $90 \mu\text{m} < VMD < 200 \mu\text{m}$ ), jet moyen ( $200 \mu\text{m} < VMD < 300 \mu\text{m}$ ), jet à grosses gouttes ( $300 \mu\text{m} < VMD < 450 \mu\text{m}$ ), jet à très grosses gouttes ( $450 \mu\text{m} < VMD$ ).

VMD : pour un échantillon de gouttes, c'est la valeur du diamètre tel que 50% du volume est constitué de gouttes dont le diamètre est inférieur à cette valeur.

### **VI.1. Distribution de la buse**

La distribution du jet de pulvérisation issu d'une buse est conditionnée par les caractéristiques de l'orifice de la buse (type de buse, usure,...) ainsi que par la pression et les propriétés physico-chimiques de la bouillie.

#### **VI.1.1. Caractéristiques de la buse**

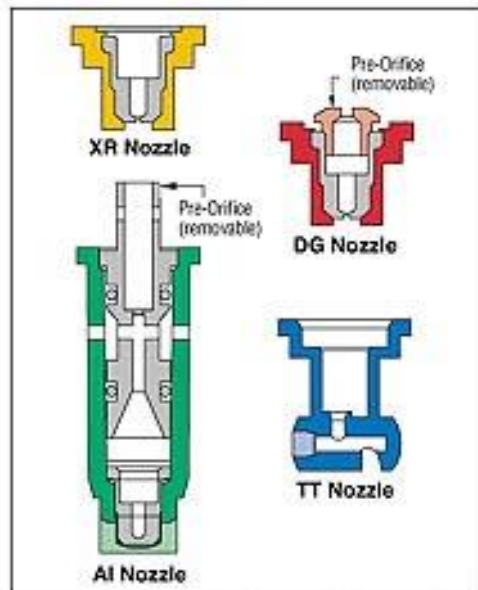
Les différents types de buses forment des jets présentant des distributions très diverses. Pour un même type de buse et, dans une moindre mesure, à l'intérieur d'une même série, les distributions diffèrent également entre elles.

Parmi les nombreux modèles de buses développés pour la pulvérisation, les buses à fente (à jet plat) et les buses à turbulence (à jet conique) représentent les deux catégories les plus couramment utilisées.

Les buses à fente forment un jet en forme de cône 'aplati' dont l'angle au sommet peut aller jusqu'à 120°, ce qui améliore la qualité du recouvrement entre buses voisines. La granulométrie des gouttelettes est habituellement celle d'un jet moyen. La distribution transversale a la forme d'une ellipse. Lors du montage sur la rampe, le grand axe de l'ellipse est généralement incliné de 10° par rapport à l'axe de la rampe, pour éviter que les jets de buses voisines ne se croisent, ce qui serait préjudiciable à la répartition générale. Certaines buses à fente pour la pulvérisation localisée ainsi que les buses à miroir forment un jet plat rectangulaire dont la distribution transversale est relativement uniforme. Les buses à turbulence, aussi appelées buses à jet conique, ont une distribution circulaire qui les rend insensible à l'orientation. La densité de pulvérisation au sein du jet décroît régulièrement en partant du centre vers la périphérie pour les buses à jet plein ou présente un minimum local au centre, croît vers un maximum puis se remet à décroître à la périphérie du jet pour les buses à jet creux. Les buses à jet plein ont une distribution transversale en forme de cloche tandis que les buses à jet creux présentent une distribution transversale hétérogène présentant deux maxima. Les gouttelettes pulvérisées ont en général une granulométrie plus fine que celle des buses à fente, ce qui les fait préférer pour certains usages, comme l'application d'insecticides de contact (Lebeau, 2004). En plus des buses classiques, de plus en plus de types de buses

anti-dérive apparaissent sur le marché. On distingue les buses qui possèdent en amont de l'orifice classique un pré-orifice qui permet l'induction d'air par un effet Venturi.

Leur objectif est d'obtenir une granulométrie plus grossière afin de limiter les risques de dérive. A titre d'exemple, la Figure 12 présente des coupes dans divers modèles de buses fabriquées par la société Teejet ; la buse à fente classique (XR Nozzle), une buse à fente munie d'un pré-orifice (DG Nozzle), une buse à induction d'air (AI Nozzle) et une buse à jet plat (TT Nozzle).



**Figure 12:** Exemples de buses utilisées en grandes cultures (Lebeau, 2003)

C'est essentiellement la géométrie de l'orifice qui conditionne le devenir de la veine fluide. Il se peut que l'état de surface de l'ajutage ait également une influence. Des essais montrent que la répartition est plus uniforme avec des buses en céramique et en polymère qu'avec des modèles métalliques (Wang *et al.*, 1995). Les caractéristiques du jet issu d'une buse sont susceptibles d'évoluer en cours d'utilisation. D'une manière générale, l'usure des buses se traduit par une augmentation du débit, une modification de sa distribution et une évolution de la granulométrie des gouttelettes (Ozkan *et al.*, 1992). Le matériau constitutif de la buse est le principal paramètre qui conditionne la sensibilité à l'usure. La distribution d'une buse peut également être altérée de manière temporaire (lors d'un bouchage partiel ou total de l'orifice résultant d'une filtration imparfaite de la bouillie de pulvérisation) ou définitive (lors d'un débouchage au moyen d'un ustensile inadapté ou suite à un contact avec le sol).

En pratique, il est nécessaire de s'assurer que les buses sont toujours à même de fournir une distribution correcte à intervalles réguliers. Le fabricant de buses Teejet recommande de



changer de buses lorsque le débit de celles-ci dépasse de plus de 10% le débit de buses neuves.

### **VI.1.2. Pression de pulvérisation**

De manière générale, les pressions de travail recommandées se situent entre 2 et 3 bars pour des extrêmes compris entre 1 et 8 bars. La pression de pulvérisation change en cours de travail lorsque le régulateur compense une variation de la vitesse d'avancement par une modification du débit des buses.

Ces modifications sont d'assez basses fréquences mais peuvent être de grande amplitude, particulièrement sur des parcelles de géométrie compliquée. Des modifications de pressions de plus hautes fréquences peuvent apparaître en raison du fonctionnement alternatif des pompes volumétriques si l'effet de l'amortisseur hydraulique est insuffisant. L'effet de la pression est direct sur le débit de la buse, le débit étant pratiquement proportionnel à la racine carrée de la pression. De plus, de manière générale, le VMD diminue avec l'augmentation de pression de pulvérisation.

La pression de pulvérisation influence également la formation du jet de pulvérisation à la sortie de la buse. Selon Smith (1992), dans la gamme des pressions de pulvérisation courantes, le jet de buses à fente présente plus de sensibilité au niveau de la forme de la distribution qu'au niveau de son amplitude. Les basses pressions (1 bar) se distinguent par une augmentation de la fréquence relative des valeurs élevées du centre de la distribution par rapport aux plus faibles, le jet semblant se concentrer dans ces zones. Les résultats de Smith sont confirmés par ceux de Wang et al. (1995) qui réalisent des essais avec trois pressions (1,38, 2,76 et 4,14 bars) et n'observent pas de différence importante sur la distribution transversale de buses à fente. Smith et al. (2000) confirment l'absence de différence significative entre 2,07 et 2,76 bars pour un grand nombre de buses dans leurs travaux. Il apparaît que les résultats sont similaires pour les buses à turbulence à jet creux (Butler Ellis et Tuck, 1999). Le fabricant Teejet annonce dans ses fiches techniques que, de manière générale, la pression de travail a un effet significatif sur l'angle de pulvérisation et la qualité de la distribution. Il recommande de travailler dans la gamme de pression spécifiée dans les fiches techniques. De manière générale, il apparaît que la pression a une influence minimale sur la distribution à condition que la pression soit supérieure un certain seuil (de l'ordre de 1 à 1,5 bars) qui assure la formation complète du jet.

### **VI.1.3. Propriétés de la bouillie**

En pratique, les propriétés physico-chimiques des bouillies de pulvérisation sont fonction de la formulation et des adjuvants. Des adjuvants utilisés pour améliorer la pénétration du produit phytosanitaire ont un effet sur la formation du jet (Holloway, 1994). Les tensio-actifs, par exemple, ont pour but essentiel d'augmenter la surface de contact de la goutte sur la cible et de limiter le lessivage. D'autres adjuvants ont été développés spécifiquement pour modifier le spectre des gouttes afin de réduire le risque de dérive (Zhu et al., 1997) qui est particulièrement présent pour les faibles volumes par hectare.

Différentes propriétés physico-chimiques des bouillies sont impliquées dans la formation du jet. Buttler Ellis et al. (1997) citent notamment la tension de surface dynamique et différentes propriétés rhéologiques, comme la viscosité cinématique et la viscosité extensionnelle (une propriété des fluides non newtoniens), mais notent que leur effet n'est pas encore bien compris. Plus récemment, ils comparent la distribution obtenue avec de l'eau pure à celles obtenues avec de l'eau additionnée de 6 adjuvants représentatifs de la diversité des propriétés des solutions commerciales (Butler Ellis et Tuck, 1999). Ils montrent que l'effet des adjuvants est limité aux basses pressions (1 bar) pour les buses à fente tandis qu'il existe à toutes les pressions (de 1 à 4 bars) pour les buses à jet conique. Quant à l'effet du produit, ils notent qu'en général les liquides plus visqueux forment des angles de pulvérisation inférieurs, à l'inverse des liquides à tension de surface inférieure qui produisent des jets plus larges.

### **VI.2. Mouvements de la buse**

Le pulvérisateur subit pendant le travail des vibrations induites par les inégalités du sol et des chocs au niveau du crochet d'attelage pour les pulvérisateurs traînés. L'usage courant de pneumatiques étroits pour limiter l'écrasement des cultures, les mouvements d'eau dans la cuve, la garde au sol importante et l'étroitesse de voie tendent encore à amplifier l'effet des mouvements sur la rampe. Ces différents mouvements du châssis induisent des mouvements de la rampe. Les mouvements verticaux, principalement causés par le roulis et le pompage, modifient la hauteur des buses. Les mouvements horizontaux alternatifs d'avant en arrière résultant du lacet et du moutonnement induisent des variations de vitesse des buses. Dans une moindre mesure, un déport latéral peut être engendré par les mouvements de tamis avec pour conséquence un mauvais recouvrement entre passages successifs de rampe.

Dans tous les cas, ce sont les extrémités de rampes qui sont le plus sujettes à des mouvements de grande amplitude. Lors d'essais de terrain, Speelman et Jansen (1974) observent des

variations de hauteur de rampe allant jusqu'à 0,5 mètres d'amplitude et des variations de vitesse de rampe comprises entre 0,5 et 2 fois la vitesse d'avancement du pulvérisateur.

Malgré les efforts des constructeurs de pulvérisateurs pour réduire ces mouvements, ils affectent toujours la répartition principalement par l'effet des modifications de hauteur de pulvérisation et de vitesse de la buse.

### **VI.2.1. Hauteur de pulvérisation**

La hauteur de pulvérisation influence directement la distribution car le jet s'élargit depuis l'orifice de la buse au fur et à mesure que la distance parcourue par les gouttelettes augmente. La répartition engendrée à différentes hauteurs par des buses à fente et à turbulence, présentant des distributions variées (triangulaire, rectangulaire, creuse) et des angles au sommet de 80°, a été simulée par voie numérique et mesurée sur banc de répartition. Ces travaux montrent la présence d'une hauteur de pulvérisation optimale à 0,545 m pour un espacement entre buses voisines de 0,457 m. Les courbes théoriques et expérimentales obtenues indiquent une très nette décroissance du coefficient de variation depuis une hauteur nulle jusqu'à la hauteur optimale suivie d'une croissance moins sensible lorsque la hauteur dépasse l'optimum. Sur le plan quantitatif, Nation (1976), observe par contre, qu'en règle générale, les courbes théoriques prédisent une meilleure performance que celle observée en pratique. Il conclut de la sensibilité du coefficient de variation à la hauteur que la pulvérisation doit être effectuée à une hauteur moyenne légèrement supérieure à la hauteur théorique optimale.

Azimi et al. (1985) testent des buses à fente dont l'angle de jet est de 80°. Ils préconisent de diminuer la distance entre buses et d'augmenter la hauteur pour favoriser une répartition uniforme car ils n'observent pas la présence d'un optimum local qui minimise le coefficient de variation. Les études de Leunda et al. (1990) corroborent ces résultats. Ces auteurs étudient différentes buses à fente et montrent que le coefficient de variation de la répartition mesuré sur banc de répartition diminue dans la majorité des cas avec l'augmentation de hauteur de pulvérisation en tendant vers un minimum. Wang *et al.* (1995) s'intéressent à 5 modèles de buses à fente présentant un angle de jet de 110° et débitant à trois hauteurs (305, 381 et 457 mm). Ils observent une forte influence de la hauteur sur l'uniformité. La meilleure uniformité correspond à la hauteur intermédiaire, ce qui suggère l'existence d'une hauteur optimale qui minimise les hétérogénéités.

Des expérimentations visant à étudier la sensibilité de la répartition aux variations de hauteurs ont également été réalisées en conditions dynamiques. Les travaux de l'Université de

Wageningen (Speelman et Jansen, 1974) ont montré l'effet néfaste des mouvements de buses dans le plan vertical ainsi que la moindre sensibilité aux mouvements verticaux des buses à fente de 110° par rapport aux buses à jet conique creux. Les travaux de l'Université d'Hohenheim (Ganzelmeier et Moser, 1977) confirment l'effet néfaste de l'augmentation de l'amplitude des vibrations verticales sur la répartition. Plus récemment, l'équipe de l'IMAG (Instituut voor Milieu- en Agritechniek German) (De Jong, et al., 2000) a testé l'effet de mouvements verticaux ayant une fréquence de 1 Hz et une amplitude de 0, 10 et 20 cm pour quatre hauteurs moyennes différentes (30, 50, 70, 90 cm) et une vitesse d'avancement de 1m/s. Ils mettent en évidence qu'en règle générale le coefficient de variation de la répartition augmente avec l'amplitude du mouvement et diminue avec la hauteur. Les différences observées entre buses à fente (110°) et buses à jet conique (80°) sont très importantes : en moyenne, le coefficient de variation de la répartition pour l'ensemble des essais réalisés est double pour ces dernières.

### VI.2.2. Vitesse de la buse

Le débit permettant d'obtenir le volume par hectare est donné par la relation :

$$d = \frac{q \cdot v \cdot e}{600} \quad (2)$$

Avec •  $d$  : débit d'une buse (l/min) ;

$q$  : volume épandu (l/ha) ;

$v$  : vitesse d'avancement (km/h) ;

$e$  : écartement entre buses (m).

Cette relation montre que la vitesse horizontale des buses selon la direction d'avancement influence directement la dose appliquée. Davis (1973) se base sur cette hypothèse pour affirmer que les densités de dépôt en un point sont pratiquement inversement proportionnelles à la vitesse de la rampe lorsqu'elle passe par ce point. En pratique, divers phénomènes affectent la vitesse individuelle des buses en cours de travail. Les variations de la vitesse d'avancement du tracteur sont une première source de variation de vitesse des buses. Elles résultent soit de variations du régime moteur dues à la topographie, soit de l'action du conducteur. Plusieurs régulateurs de débit ont été développés pour limiter l'effet de ces variations de vitesse sur la dose appliquée.

Une autre source de variation de vitesse est à rechercher dans les mouvements des rampes de pulvérisation qui ont pour origine les vibrations transmises par le tracteur. Ces vibrations créent des variations de vitesse de plus hautes fréquences et induisent un effet sur la répartition quelque peu différent. En effet, l'équation (2) n'est strictement valable en pratique que pour les très basses fréquences et la valeur moyenne de la vitesse. Pour les plus hautes fréquences, l'épaisseur du jet selon la direction d'avancement engendre une filtration de l'effet des variations de vitesse. Pour étudier ce phénomène, Speelman et Jansen (1974) appliquent des mouvements de même amplitude et de fréquence variant entre 0,5 et 3 Hz et observent un effet très néfaste de ceux-ci sur la répartition. Ils notent que les buses à jet conique creux sont moins sensibles aux variations de vitesse que les buses à fente, particulièrement aux plus hautes fréquences. Pour tous les types de buses, l'effet néfaste des variations de vitesse horizontale sur la répartition augmente avec la diminution de la fréquence du mouvement (le coefficient de variation de la répartition croît de 200% quand la fréquence passe de 3 à 0,5 Hz) et augmente avec l'amplitude des variations de vitesse. Ces résultats sont confirmés par ceux obtenus par De Jong et al. (2000) qui cherchent à développer un modèle de la répartition en fonction des mouvements de buse.

## **VII. Mesure de la distribution et de la répartition**

### **VII.1. Mesure de la répartition statique unidimensionnelle**

La répartition transversale a été la première à faire l'objet d'une attention de la part des centres de recherche car son effet sur la réussite du traitement est très grave quand elle est mal maîtrisée. Dès 1976, la répartition des pulvérisateurs est évaluée au moyen de bancs de répartition ("patternators") par les laboratoires de recherche. Ces bancs sont constitués de gouttières parallèles à la direction d'avancement qui dirigent la partie du jet collecté vers des éprouvettes graduées. (Nation, 1976)

Le recours à une photographie des éprouvettes fournit une première forme d'acquisition automatisée des volumes collectés. Par la suite, de nombreuses méthodes alternatives ont été proposées pour automatiser l'acquisition de la mesure de la répartition pour évaluer la distribution transversale des buses. Carpenter et al. (1988) proposent un système automatisé de mesure de la distribution unidimensionnelle des buses basé sur la pesée du volume cumulé recueilli dans un récipient à travers une fenêtre d'échantillonnage rectangulaire (2,5 x 35,6 cm<sup>2</sup>) lors du passage lent d'une buse perpendiculairement à l'axe principal de la fenêtre. La courbe obtenue est ensuite dérivée pour fournir une mesure de distribution similaire à celle

obtenue au moyen des bancs de répartition. D'autres principes ont été mis en oeuvre, comme la mesure de fluorescence sur des fils de coton ou des papiers collants placés perpendiculairement à la trajectoire de buses (Whitney et Roth., 1985). Une mesure de la distribution basée sur le traitement par analyse d'images d'une prise de vue du nuage de pulvérisation selon l'axe d'avancement au moyen d'un dispositif particulier a également servi à analyser l'uniformité de la distribution de buses de pulvérisation (Zhang et al., 1994).

Actuellement, la majorité des laboratoires actifs dans la recherche sur la pulvérisation disposent d'un banc de répartition répondant à la norme internationale ISO 5681/1. Le jet est divisé au moyen de gouttières parallèles de 50 mm de largeur qui le dirigent vers les éprouvettes. Le temps de mesure est limité au temps nécessaire pour remplir à 90 % l'éprouvette qui reçoit le débit le plus important. La mesure de la distribution est par conséquent réalisée durant une période pouvant varier de quelques dizaines de secondes à quelques minutes. Une précision de 1 % est exigée pour les différents éléments constitutifs du banc de répartition. Le résultat de la mesure de répartition est présenté sous forme d'histogramme des volumes recueillis. Le coefficient de variation est classiquement utilisé comme paramètre réduit pour quantifier l'homogénéité de la répartition (Smith, 1992). D'autres paramètres comme le Degré de Non- Uniformité (DNU), qui tiennent compte non seulement des variations relatives mais également de leur distribution, ont été proposés (Zhang et al., 1994).

## **VII.2. Mesure de la répartition statique bidimensionnelle**

La répartition statique bidimensionnelle des buses peut être mesurée de différentes manières pour évaluer la distribution bidimensionnelle de la buse. Une première approche est de mesurer le liquide collecté sous une buse statique dans des récipients disposés selon une matrice. En Hollande, l'IMAG (Institute of Agricultural and Environmental Engineering) dispose à cette fin 16 x 16 ou 30 x 8 récipients de 10 x 10 cm<sup>2</sup> sur une surface horizontale, selon que l'étude concerne une buse à turbulence ou une buse à fente (de Jong et al., 2000). En Suède, l'Université d'Uppsala a développé un banc bidimensionnel constitué d'une rangée de collecteurs carrés de 5 cm de côté équipée d'un dispositif automatisé de mesure du volume collecté, à savoir la mesure du temps de remplissage des éprouvettes. Ces collecteurs sont déplacés perpendiculairement à l'axe de la rangée de collecteurs pour couvrir l'épaisseur du jet.

Des méthodes basées sur l'utilisation d'un banc de répartition unidimensionnel ont également été développées. Une première approche consiste en une adaptation du banc qui est

partiellement couvert d'une surface de collecte posée sur sa partie supérieure. Seule une fente de 5 cm laissée libre permet le passage d'une fraction du jet vers les gouttières et éprouvettes. La mesure est répétée avec la position de la fente modifiée par incréments de 5 cm, ce qui offre un résultat similaire au scanner 2-D (deux dimensions) avec un matériel standard (Tian et Zheng, 2000). Une seconde approche est de recourir à une rétro-projection filtrée de distributions unidimensionnelles mesurées pour différents angles de la buse de pulvérisation (Holterman et de Jong, 2000). Cette technique classique en imagerie médicale (computer tomography) limite les modifications structurales à apporter au banc de répartition standardisé.

Les granulomètres-vélocimètres classiquement utilisés pour mesurer la granulométrie et la vitesse des gouttelettes (Schick, 1997) permettent également de mesurer la distribution des buses.

### **VII.3. Mesure de la répartition dynamique**

La répartition dynamique est un paramètre essentiel pour obtenir une évaluation de la qualité du traitement. Les méthodes mises en oeuvre pour la mesurer peuvent être classées en méthodes discontinues et continues.

Les méthodes discontinues reposent sur la mise en place d'un dispositif d'échantillonnage de la répartition. Le type de collecteurs est très varié. Des papiers filtre (Speelman, 1971), des languettes de polyéthylène, des rubans de papier adhésif (Solie et Gerling, 1984), des fils de coton (Whitney et Roth, 1985), des lames de verre ou des boîtes de Pétri (Smith et al., 2000) sont utilisés pour recueillir la bouillie. Les méthodes de mesure des quantités recueillies sont également diverses. Le dosage des matières actives ou d'un sel ajouté par des méthodes de chimie analytique spécifiques est parfois utilisé. Plus souvent, on recourt à une bouillie fluorescente dont le taux d'application est analysé par dosage fluorométrique. Par ailleurs, des méthodes colorimétriques utilisant des colorants tels que la nigrosine, un colorant noir non toxique, sont parfois utilisées. Les dépôts de nigrosine sur de la pellicule photographique sont analysés par transmission de la lumière à travers cette dernière (Carlton et Bouse, 1981). Enfin, du papier hydro-sensible est couramment utilisé pour mesurer les dépôts. Au contact des gouttelettes, le papier se teinte en bleu foncé, offrant un bon contraste avec le fond jaune. L'analyse quantitative est réalisée au moyen de scanners ou de dispositifs spécialement réalisés à cette fin (De Moor et al. 2000).

Les différentes méthodes peuvent être appliquées tant au laboratoire que sur le terrain, mais le papier sensible est souvent préféré dans les utilisations de terrain en raison de sa facilité de

mise en oeuvre. La taille des collecteurs ne permet qu'un échantillonnage discontinu de la répartition, ce qui pose la question de l'établissement d'un plan d'échantillonnage. Ce problème est complexe car la variabilité des dépôts observés est très grande et a priori inconnue. D'autre part, le coût des analyses et des manipulations est souvent élevé, ce qui tend à réduire le nombre d'échantillons mesurés. (Lebeau, 2003)

Un moyen d'échapper à la difficulté d'échantillonnage est de recourir à une mesure continue de la répartition. Une première méthode consiste à utiliser un banc de répartition standard. Cette méthode réservée au laboratoire a été mise en oeuvre pour valider un modèle décrivant l'effet des mouvements de rampes de pulvérisation (Ramon et De Baerdemaeker, 1997) ou pour mesurer la répartition dynamique des buses PWM (Pulse Width Modulation) (Tian et Zheng, 2000).

Malheureusement, la résolution spatiale est limitée et unidimensionnelle. De plus, le débit nécessaire pour obtenir une précision suffisante implique la répétition de nombreux passages de la buse dans des conditions identiques au dessus de la surface de collecte du banc ou des vitesses très faibles qui n'apportent que peu d'information sur les phénomènes dynamiques. (Lebeau, 2003).

Une deuxième méthode consiste à utiliser des récipients carrés jointifs contenant des papiers filtre disposés selon une matrice rectangulaire. Une telle méthode a été utilisée en laboratoire par De Jong et al. (2000) pour valider un modèle étudiant l'effet des mouvements de rampe sur la répartition. Le colorant fluorescent pulvérisé sur les papiers filtre est dosé par spectrophotométrie. Les analyses chimiques étant coûteuses et laborieuses, une mesure par analyse d'images des dépôts de solution colorée par de la nigrosine sur du papier est proposée par Enfält et al. (1997). Des rouleaux de papier peint de 56 cm de large servent de collecteur pour la bouillie colorée. Une relation présentant une bonne corrélation entre le niveau de gris moyen de carrés de 5 centimètres de côté et la dose appliquée est mise en évidence. Cette méthode présente l'avantage d'être rapide et de permettre une mesure à grande échelle de la répartition. Par contre, la précision obtenue est moins bonne qu'avec les méthodes analytiques ou gravimétriques (Lardoux, 2002).

## **VIII. Modélisation**

### **VIII.1. Modélisation de la distribution des buses**

La modélisation de la répartition passe souvent par la modélisation de la distribution des buses de pulvérisation. L'étude de l'influence des paramètres fonctionnels (hauteur,



pression,..) sur la distribution permet d'extraire des relations mathématiques précieuses pour la compréhension de ces interactions. Cette approche permet de décrire avec un nombre limité de paramètres la distribution d'une buse. (Lebeau, 2003)

Sur base de distributions mesurées au banc de répartition, divers auteurs procèdent à l'ajustement de distributions théoriques. Le plus souvent, la mesure de la distribution est réalisée avec un banc de répartition unidimensionnelle (transversale selon l'axe y) et, de ce fait, est modélisée par une distribution théorique à une dimension. Dans un premier temps, des distributions rectangulaires et triangulaires sont utilisées pour modéliser respectivement des buses à jet plat rectangulaires et en cloche ainsi que des buses à jet creux (Nation, 1976). Par la suite, divers auteurs dont Leunda et al., (1990) ont recours à une distribution normale pour décrire la distribution de buses à fente sur base des moyennes et écart-type de distributions mesurées. Ils remarquent toutefois que la qualité de cet ajustement n'est pas toujours satisfaisante. D'autres auteurs (Ramon et Langenakens, 1996) s'intéressent à la modélisation de la distribution bidimensionnelle, selon les axes x et y à partir de données expérimentales obtenues sur banc de répartition. Pour ceux-ci, la distribution de certaines buses peut être approchée par une distribution gaussienne à deux dimensions (Equation 3) :

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left[\left(\frac{x-m_x}{\sigma_x}\right)^2 - 2\rho\frac{x-m_x}{\sigma_x}\frac{y-m_y}{\sigma_y} + \left(\frac{y-m_y}{\sigma_y}\right)^2\right]\right\} \quad (3)$$

Avec  $x$  et  $y$  : variables aléatoires variant entre  $-\infty$  et  $+\infty$ ;

$m_x$  et  $m_y$  : moyennes marginales ;

$\sigma_x$  et  $\sigma_y$  : écarts-types marginaux ;

$\rho$  : coefficient de corrélation.

## VIII.2. Modélisation de la répartition dynamique

La modélisation de la répartition dynamique nécessite de tenir compte d'une part de l'effet des mouvements verticaux et d'autre part de l'effet des mouvements horizontaux de la buse.

### VIII.2.1. Effets des mouvements verticaux de la buse

Les modèles de répartition sont généralement basés sur l'hypothèse selon laquelle la répartition engendrée par une buse sujette à des variations de hauteur peut être modélisée par la somme des répartitions statiques mesurées à des hauteurs successives. (Ramon e al., 1997 ; Sinfort et al., 1997; Pochi et Vanucci, 1998). Les résultats des simulations de De Jong (2000)

montrent effectivement que cette approche prédit correctement les tendances observées mais que des différences absolues importantes apparaissent par rapport aux mesures. De manière générale, les pourcentages de la surface surdosée (taux d'application supérieur de 25% à la moyenne) et sousdosées (taux d'application inférieur de 25% à la moyenne) observés sont supérieurs à ceux mesurés, que ce soit pour une buse à fente ou une buse à turbulence. Lardoux (2002) modélise l'effet des mouvements verticaux causés par un mouvement de roulis sur les coefficients de variation. Il observe que ces coefficients de variation sont généralement surévalués et estime que les erreurs proviennent d'un manque de prise en compte de phénomènes tels que l'évaporation et la modification de vitesse de chute des gouttes, associés à la variation de hauteur de la buse.

### **VIII.2.2. Effets des mouvements horizontaux de la buse**

Une approche simplifiée développée par Nation (1982) utilise la distribution unidimensionnelle d'une buse selon le sens d'avancement pour calculer l'effet des mouvements horizontaux. Sinfort au CEMAGREF et Herbst (1996) à la BBA (Bundesoberbehörde und Bundesforschungsanstalt) proposent un algorithme similaire qui calcule la répartition longitudinale en distribuant uniformément le volume pulvérisé pendant l'intervalle de temps entre deux positions successives, ce qui revient à accepter l'hypothèse d'une relation inversement proportionnelle entre la vitesse et la répartition. Cette approche a le désavantage de ne pas tenir compte de l'épaisseur du jet (Lebeau, 2003). Ramon et De Baerdemaker (1997) décrivent de manière détaillée un algorithme qui calcule la répartition comme la somme de distributions bidimensionnelles à intervalles de temps constants. La validation du modèle est malheureusement limitée à une dimension pour de très faibles vitesses d'avancement de la buse (inférieures à 0,2 m/s) et est réalisée avec une orientation inhabituelle de la buse. Dans ces conditions, elle offre une très bonne prédiction de la répartition longitudinale (Lebeau, 2003). Le modèle de De Jong (2000) se base sur les mêmes hypothèses. La validation montre que l'influence des mouvements de rampe sur la répartition est similaire, que les résultats soient obtenus par voie numérique ou expérimentale. Cependant, le niveau de précision de la prédiction varie beaucoup selon les paramètres opératoires. Il est notamment meilleur pour les grandes amplitudes de mouvement que pour les petites.

Selon Lebeau (2003), les différentes études montrent des écarts de prédiction qui peuvent être importants mais leur importance est relativisée par les auteurs en regard de leurs objectifs. Différentes explications peuvent être envisagées pour expliquer ces différences. Tout d'

abord, il faut remarquer que ces auteurs ne se préoccupent pas des éventuels effets dynamiques sur la distribution des buses. Cette hypothèse peut paraître osée dans la mesure où, pour des gouttelettes de la classe 50 – 500 microns qui représentent une part importante du débit de buses, les travaux de Marchant (1977) montrent que la trajectoire de la goutte doit être assimilée à celle d'une sphère solide sous l'effet de la gravité et des forces de frottement visqueux en fonction de sa vitesse initiale. Néanmoins, certaines sources comme l'équipe de Holterman (1997) estiment que la vitesse de la buse n'a que peu d'effet en regard de la vitesse initiale des gouttelettes à la sortie des buses. Les résultats de comparaisons de la répartition statique et dynamique obtenus par Langenkens et al. (2000) montrent toutefois que le coefficient de variation mesuré en statique sur un banc de répartition est différent de celui mesuré en dynamique lorsque la rampe se déplace. Ils invoquent les différences de surface d'échantillonnage et de temps d'intégration de la mesure de répartition pour expliquer ces différences.

L'estimation de la distribution de la buse peut être une source d'erreur qui affecte la qualité des résultats. Les distributions des buses peuvent s'écarter significativement des distributions théoriques qui leur sont ajustées dans certains modèles de répartition. Quand des distributions observées sont utilisées comme paramètres des modèles, elles peuvent différer de celles de la buse lors de l'essai dynamique en raison de la variabilité de la distribution de la buse dans le temps ou de différences entre buses d'un même lot. (Lebeau, 2003)

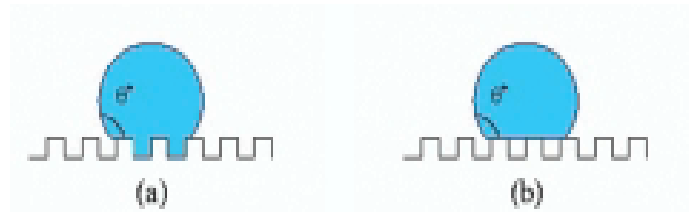
## **IX. Mouillabilité de la surface**

La mouillabilité caractérise la facilité avec laquelle une goutte de liquide s'étale sur une surface solide. Elle dépend des plusieurs facteurs comme les propriétés de la surface (caractère hydrophobe et microstructure) et des propriétés physico-chimiques du liquide placé sur cette surface (essentiellement tension de surface). La mouillabilité est caractérisée par la mesure de l'angle de contact que présente le liquide au niveau du point triple.

Différents modèles ont été proposés pour évaluer cet angle de contact en fonction des trois tensions interfaciales (solide-liquide, solide-vapeur et liquide-vapeur). Dans le cas d'une surface idéale (lisse), l'équation de Young résulte de l'équilibre des trois tensions.

Les moindres impuretés de surface peuvent modifier les propriétés du mouillage, de même que la rugosité. L'angle de contact n'est pas le même si la goutte avance sur une surface vierge (advancing contact angle  $\theta_a$ ) ou au contraire recule (receding contact angle  $\theta_r$ ). L'angle de contact présente dès lors une hystérèse  $H = \theta_a - \theta_r$ .

### IX.1. Régimes d'équilibre sur surface texturée



**Figure 13** : Régimes de mouillage d'une surface idéale (Young), Wenzel(a) et Cassie-Baxter(b).

#### IX.1.1. Régime de Wenzel

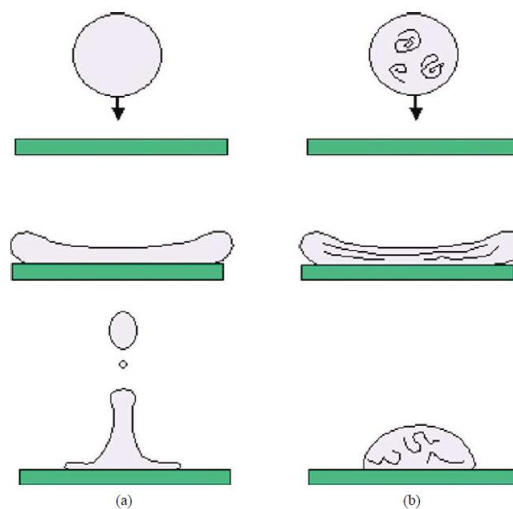
Le liquide épouse la rugosité, ce qui démultiplie la surface mouillée et augmente l'angle de contact apparent. La *Rugosité de Wenzel* ( $r$ ) est le rapport entre l'aire de la surface de contact réelle et l'aire de contact apparente de la surface.

#### IX.1.2. Régime de Cassie-Baxter

Le liquide n'est en contact qu'avec le haut des irrégularités de la surface rugueuse, et de l'air est emprisonné dans les interstices. Apparition de la *superhydrophobicité*:  $\theta_s \approx 180^\circ$ .

### X. Rôle des additifs aux bouillies de pulvérisation

Les adjuvants tensio-actifs sont les plus répandus en pulvérisation. Ces adjuvants ont pour rôle de diminuer la tension de surface des gouttes, augmentant ainsi la mouillabilité à l'impact de la surface. Ils modifient de ce fait le comportement pendant l'impact, la distribution granulométrique et la vitesse des gouttes. Bergeron (2003) illustre leur effet sur la figure 14.



**Figure 14**: Comparaison de l'impact d'une goutte de fluide newtonien (eau) (a) et d'une goutte d'un fluide au comportement non-newtonien (polysaccharide) (b). (Bergeron, 2003).

L'ajout de polysaccharides à la bouillie de pulvérisation tend à résoudre plusieurs problèmes liés la dérive, à l'impact et à la résistance au lessivage ainsi qu'à l'évaporation.

### **XI. Modèles de rétention et efficacité d'application**

Beaucoup d'études de rétention se sont basées sur l'utilisation de traceurs chimiques (Skuterud et al., 1988). Stevens (1993) a abordé les effets d'adhésion primaires montrant que la vitesse et la taille des gouttelettes ont un haut degré de corrélation avec l'adhésion. Des études de pulvérisation ont conduit à la conception de modèles pour expliquer l'effet de rétention (Stock, 1997). L'interprétation de ces essais est toujours délicate en raison des nombreux paramètres qui interviennent. Cependant, la plupart des paramètres régissant le processus de rétention ont été identifiés, Wilson, (2003) cite par exemple, la vitesse de chute et le diamètre, résultant du taux d'application, la vitesse d'avancement, la pression et le type de buse ou le type d'atomiseur; les propriétés de la formulation tels que la tension superficielle dynamique et la viscosité; et les propriétés de la surface cibles telles que l'espèce de la plante, l'angle des feuilles, l'hydrophobicité et le stade de croissance. Ces paramètres ont été le fondement du modèle universel d'adhésion de gouttelettes de pulvérisation (Forster et al., 2005). Sur la base de quatre variables faciles à mesurer ; tension de surface dynamique, angle de contact statique pour une solution de 50% d'acétone et 50% d'eau, la vitesse des gouttelettes et l'angle d'impact qui permettent de prédire l'adhésion des gouttelettes pulvérisée au contact initial à la surface de la feuille. Ces modèles sont encore affinée afin d'inclure de nouveaux paramètres tels que les poils (Nairn et al., 2013).

Maximiser l'efficacité d'application des pesticides nécessite donc un bon contrôle de la taille des gouttelettes et la vitesse de distribution (Butler Ellis et al., 1997). Les adjuvants réducteurs de dérive et de nombreux autres adjuvants utilisés pour améliorer le comportement des gouttelettes de pulvérisation sur la cible influencent la formation, le transport de la gouttelette à la cible et l'interaction des gouttelettes avec la cible (Butler Ellis et al., 1999).

Afin d'évoluer vers une meilleure compréhension de l'efficacité d'application des pesticides, il a été proposé de diviser les traitements en des modèles appropriés pour chaque étape successive de dépôt, rétention, absorption et translocation (Zabkiewicz, 2007) et de développer des modèles de processus basés sur des études fondamentales détaillées qui peuvent remplacer les méthodes de dépistage en laboratoire, les tests empiriques et essais sur terrain. Comme trois résultats sont possibles lorsque une gouttelette impact sur une surface de feuille : adhésion, rebond ou fragmentation, ceux-ci ont une influence directe sur la rétention

de pulvérisation. La morphologie des feuilles joue un rôle important dans le dépôt (Smith et al., 2000 ). Les gouttes qui rebondissent ou fragmentent peuvent poursuivre leur voyage à travers la canopée jusqu'à une nouvelle interception par la plante ou le sol (Cox et al., 2000).

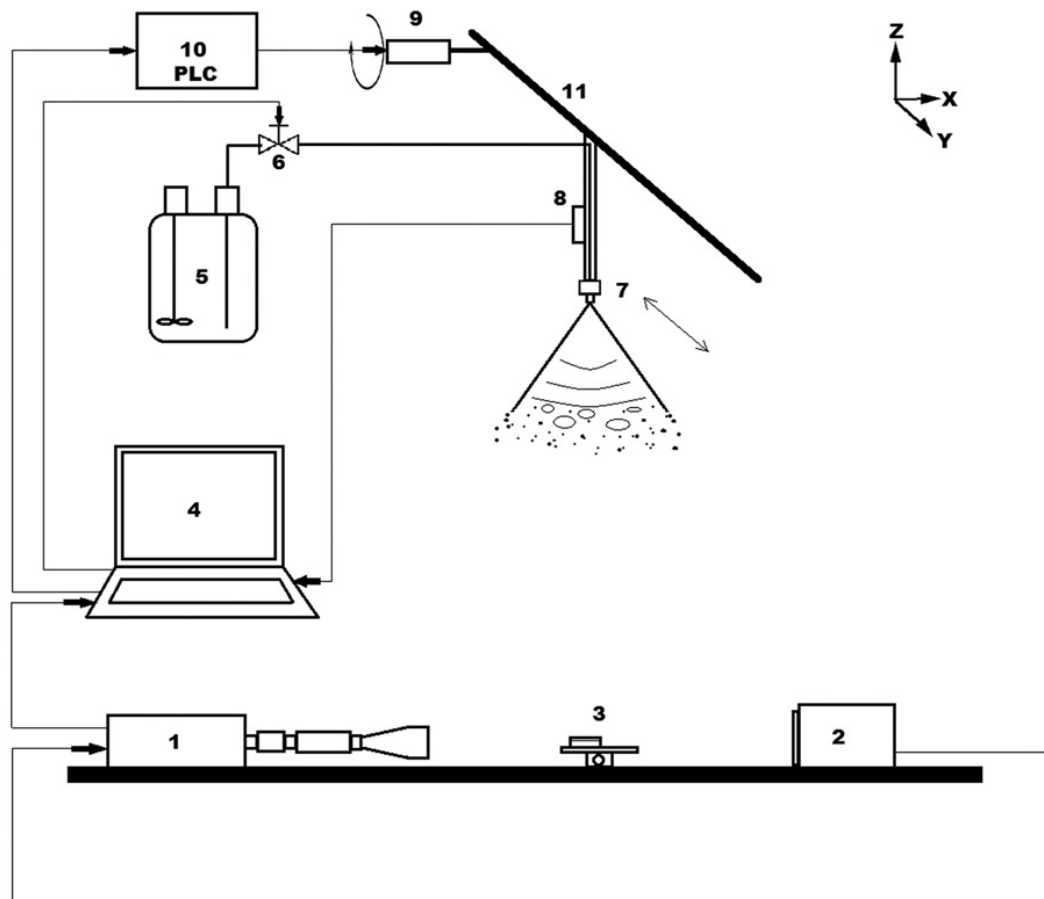
## Chapitre II : MATERIELS ET METHODES

### I. Mesures combinées de rétention par imagerie rapide et spectrofluorométrie

#### I.1. Présentation générale du dispositif expérimental

Les essais combinés de mesure de la rétention de bouillie sur feuilles d'orge des diamètres et vitesses de gouttes au moment de l'impact et leurs comportements sont réalisés au niveau du laboratoire de l'Unité d'Agriculture de Précision à Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège – Belgique. Lors de cette expérimentation, nous utilisons simultanément la méthode chimique de dosage par spectrofluorométrie et la méthode optique d'imagerie rapide. Pour cette dernière les résultats sont obtenus par traitement d'images à l'aide d'un programme informatique sous MATLAB.

Les essais sont menés en conditions contrôlées dans un tunnel à vent. La figure 15 illustre les composantes du banc d'essais dynamique.



(1)Camera de haute vitesse,(2) Source d'éclairage,(3) Support de la surface foliaire à pulvériser, (4)Ordinateur,(5) Cuve sous pression, (6) Electrovanne,(7) Buse, (8)Manomètre,(9) Servomoteur, (10)Contrôleur programmable,(11) Rail linéaire.

**Figure 15** : Schéma général du banc d'essais dynamique.

Le banc d'essai est conçu pour enregistrer les impacts de gouttelettes en utilisant l'imagerie rapide (Massinon et Lebeau, 2012a).

### **I.1.1. Dispositif d'acquisition d'images**

Le dispositif d'acquisition d'images se compose d'une caméra rapide et d'une source lumineuse LED (Light-Emitting Diode). La méthode d'acquisition d'images utilisée consiste en la création d'un arrière-fond homogène et lumineux sur lequel l'ombre des gouttes apparaît en noir (shadow images). La source lumineuse est donc dirigée vers la caméra, et la buse se déplace entre la caméra et cette source lumineuse.

#### **I.1.1.1. Caméra rapide**

Une caméra haute vitesse (Y4 CMOS, Outils intégrés de conception) enregistre les impacts de gouttelettes sur la cible à 20 000 images par seconde en utilisant le rétro-éclairage pour maximiser le contraste et permettre une bonne identification des impacts lors de leur chute. Le système de zoom optique (12X, Navitar) offre une distance de travail de 341 mm et 11.47  $\mu\text{m}/\text{pixel}$  résolution spatiale. Une correction de fond a été effectuée avant les essais avec le logiciel de l'appareil photo intégré (mosion studio, outils intégrés de conception) pour fournir une image homogène. Un signal provenant du dispositif de commande est utilisé pour déclencher l'enregistrement de la caméra. La zone de mesure est d'environ 2 mm de haut sur 10 mm de long. La caméra peut digitaliser les images en nuances de gris avec une profondeur de pixels maximale de 10 bits.

La caméra est placée dans un tube de protection en plexiglas translucide pour éviter que l'eau ne vienne l'endommager. La figure 16 présente cette caméra rapide.



**Figure 16:** Photographies de la caméra Y4 CMOS.



La caméra possède un objectif amovible (figure 16) fixé sur trois bagues d'allonge. Ces dernières permettent un agrandissement supérieur à celui de l'objectif. La caméra doit fonctionner avec un temps d'exposition très faible, de l'ordre de  $10 \mu s$ . Cette contrainte se justifie par le fait que les objets filmés sont de très petites tailles et en mouvement. Le seul moyen d'obtenir une image nette est donc d'acquérir les images avec un faible temps d'exposition pour éviter les traînées sur les images. Dès lors, l'ouverture du diaphragme doit être la plus grande possible pour permettre l'admission d'une quantité lumineuse maximale.

Le logiciel d'acquisition d'images utilisé est celui fourni par IDT: Motion Studio – Image Acquisition and Processing 2008.

### I.1.1.2. L'éclairage

Un éclairage à LED (19 LED Constellation, Outils intégrés de conception) avec un angle de faisceau de  $12,5^\circ$  est placé à 500 mm derrière le support de fixation de la surface cible pour assurer à la fois l'illumination élevée et le fond uniforme pour les images. L'éclairage est utilisé dans un mode pulsé et déclenché par l'acquisition de l'image.



**Figure 17** : Photographie de la caméra rapide et de la source du rétro-éclairage LED.

### I.1.2. Alimentation du dispositif en bouillie

Une pression constante est appliquée au fluide à l'aide d'un récipient sous pression contrôlée par mesure de la jauge de pression au niveau de la buse.



**Figure 18:** Photographie de la cuve sous pression alimentant la buse en bouillie

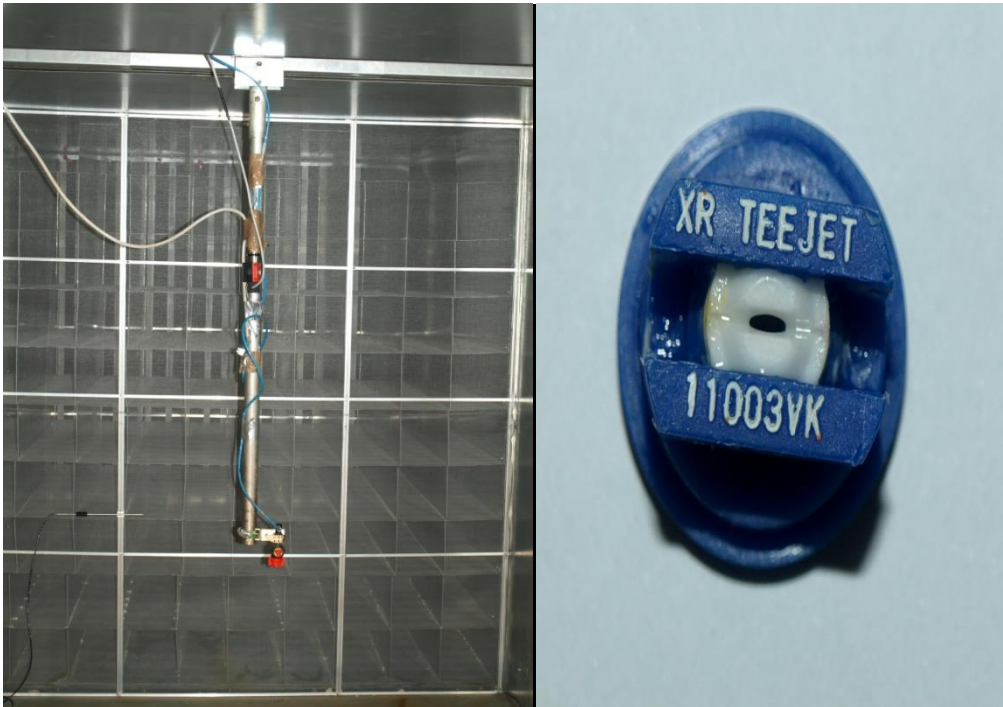
La pression est maintenue constante à l'aide d'un compresseur.



**Figure 19:** Photographie du compresseur

### I.1.3. Système de déplacement de la buse

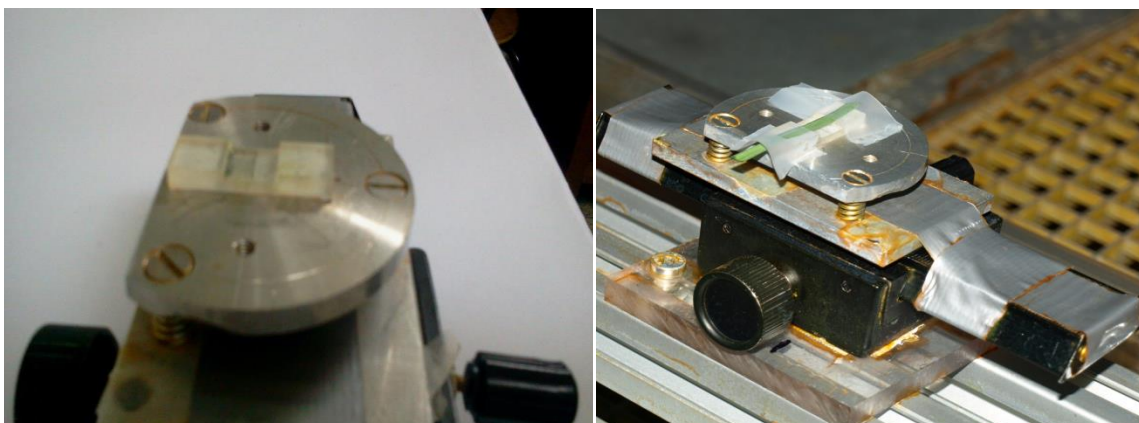
La buse de pulvérisation est montée sur un actionneur linéaire avec système galet de guidage denté et unité d'entraînement par courroie se déplace à vitesse constante au-dessus d'une zone de pulvérisation à l'aide d'un servomoteur et un contrôleur. Une buse à fente Teejet XR11003VK est utilisée pour cette expérimentation.



**Figure 20 :** Photographie système de déplacement et de la buse

#### **I.1.4. Support de fixation de la surface cible**

Une platine de translation linéaire est utilisée pour ajuster la position de l'échantillon horizontal de feuille d'orge dans le plan focal de la caméra. Dans cette configuration, la taille des gouttes et leur vitesse peuvent être mesurées juste avant l'impact. Des feuilles d'orge coupées longitudinalement à 3mm de large sont fixées horizontalement à l'aide du ruban adhésif entre les deux bras d'un support en forme de U.



**Figure 21 :** Support de fixation des feuilles d'orge.

Seule la partie centrale des échantillons de feuilles (10 mm de long) située entre les bras et portant pas sur un support ont été utilisés pour l'imagerie et l'analyse chimique. La feuille a été fixé sans étirement, libres de se plier entre les points de fixation.

## 1.2. Protocole des manipulations

Les essais sont effectués à l'aide d'une buse Teejet XR11003VK à 0,2 bars, 0,96 l / min, produisant généralement un intervalle de diamètres de goutte de pulvérisation de 50 à 600  $\mu\text{m}$ . La buse placée à 50cm au dessus de la surface cible se déplace à une vitesse de 2m/s, correspondant à un taux d'application de 160 l/ha pour un écartement de 50 cm entre buses.

Trois formulations de bouillies ont été testées :

- L'eau du robinet + 1 % de sel sodique de fluorescéine ;
- L'eau du robinet + 0,1 % en volume/volume Break Thru<sup>®</sup> S240 (Evonik Industries AG, Essen, Allemagne) + 1 % de sel sodique de fluorescéine ;
- L'eau du robinet + 0,25 % volume/volume Li700 (350g/l phospholipides de soja 350g/l Acide propionique, United Agri Products Inc), + 1 % de sel sodique de fluorescéine.

Les pulvérisations sont effectuées sur le banc d'essai dynamique à la température de 18 ° C et l'humidité relative de 40 %. Dix tranches échantillon de 10 mm de long, de 3 mm de large coupés à partir de feuilles d'orge sont pulvérisées pour chaque formulation testée. L'orge est cultivé sous serre à 23° C sous lampes aux halogénures métalliques à 200 $\mu\text{mol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$  sur les cailloux d'argile expansée en utilisant une solution nutritive hydroponique.

Des vidéos par ombroscopie à haute vitesse d'impacts de pulvérisation sont enregistrées pour chaque pulvérisation afin de servir à l'analyse d'image.

### 1.2.1. Mesure de fluorométrie

Chaque échantillon de feuille pulvérisé est transféré dans 20 ml de  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  (8.71g/l). La solution a été gardée dans une boîte réfrigérée à l'abri de la lumière jusqu'à l'analyse.

Chaque solution est analysée en utilisant un spectrophotomètre (RF -1501, Shimadzu Corporation) à 460 nm de longueur d'onde d'excitation et de 540 nm de longueur d'onde d'émission afin de quantifier la quantité de bouillie retenue par les échantillons de feuilles.

Une courbe d'étalonnage est effectuée pour chaque bouillie de pulvérisation en tant que mesures de fluorométrie en fonction de l'adjuvant.



**Figure22** : Photographie du spectrofluoromètre SHIMADZU RF-1501

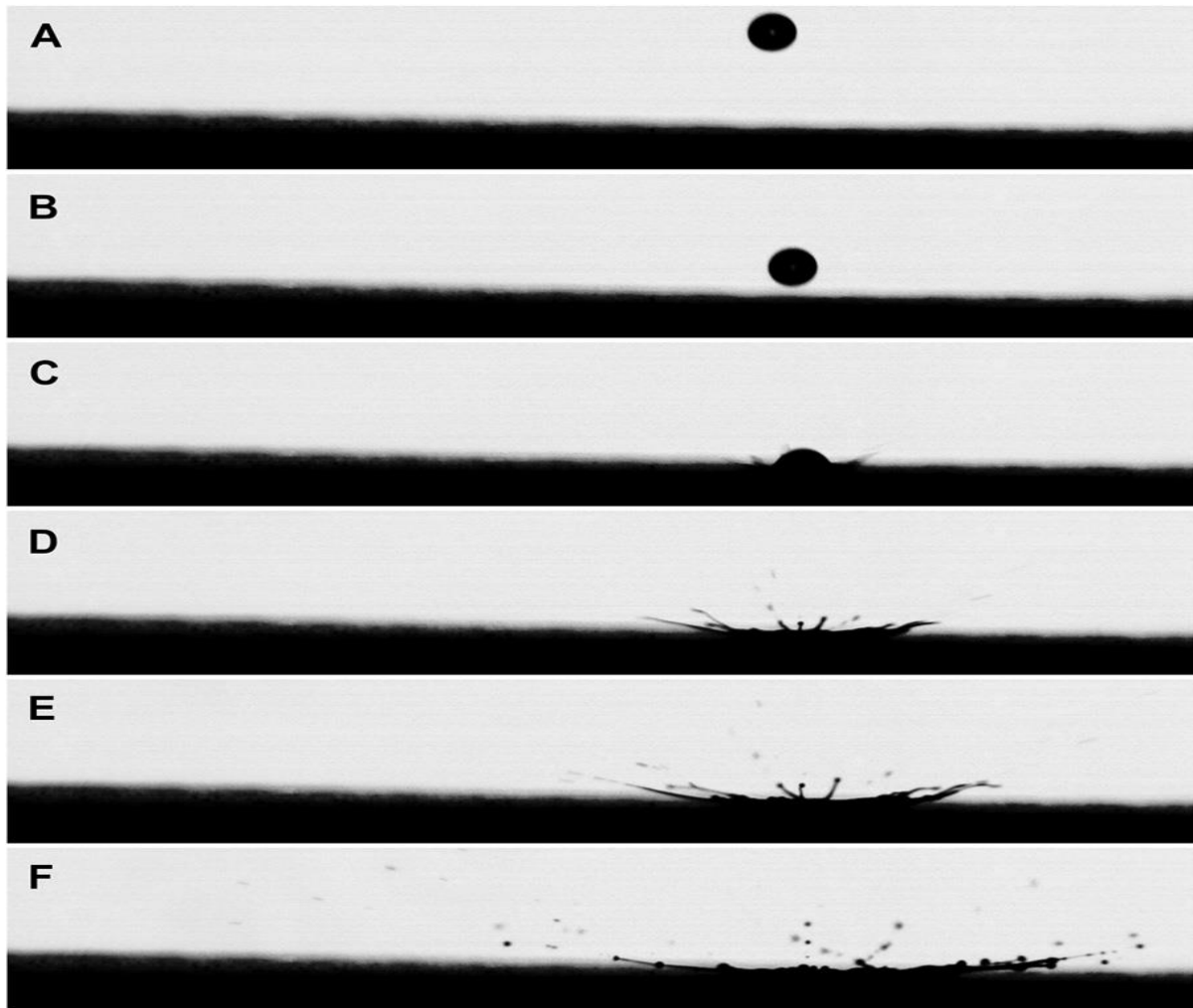
### **I.2.2. Mesure de la surface des feuilles**

La quantité de produit retenue par une feuille dépend de sa taille. Dès lors, la mesure de la surface est réalisée, après récupération du traceur fluorescent, par un scannage à une résolution de 300 dpi suivi d'une analyse informatique de l'image obtenue pour calculer sa surface.

### **I.2.3. Analyse d'images et de traitement de données**

Dans cette étape, les vitesses et tailles d'impact des gouttelettes sont calculés par un algorithme de suivi de particules vélocimétrie (PTVs) Matlab développé par Massinon et Lebeau (2012a). Le type d'impact et les proportions des gouttelettes retenues par la feuille sont déterminés par l'opérateur. Pas de rebond à l'impact initial (régime Wenzel ou Cassie - Baxter) est considéré comme l'adhésion. La fragmentation sans preuve visuelle d'une partie de la goutte restant sur la surface où elle a eu incidence est compté comme des fragmentations dans le régime Cassie - Baxter, tandis que rebond partiel et partielle fragmentation laissant des traces de la gouttelette à l'endroit où elle a eu incidence est considérée comme la fragmentation dans le régime Wenzel. Le rebond complet est compté comme rebond dans le régime Cassie – Baxter. Les gouttelettes qui ne sont pas adaptés à un traitement informatique en raison des limitations du champ de vue, la limite de certaines grandes gouttelettes touchant

le bord de l'image, sont traitées par l'opérateur sur la base d'une détermination manuelle des centres de gouttelettes et leurs diamètres et ajoutées aux tableaux de résultats .



(A-B): Exemple d'images utilisées pour calculer de la vitesse et du diamètre de la gouttelette.

(C-F): Exemples d'images utilisées pour déterminer le type d'impact de la gouttelette.

**Figure 23** : Exemples d'images utilisées pour le traitement.

Les données d'observation des séquences d'images sont enregistrées sur des fichiers texte. La deuxième phase est de convertir ces fichiers textes en fichiers Matlab. Les images sélectionnées sont examinés par une procédure d'analyse d'image développée dans le programme Matlab.

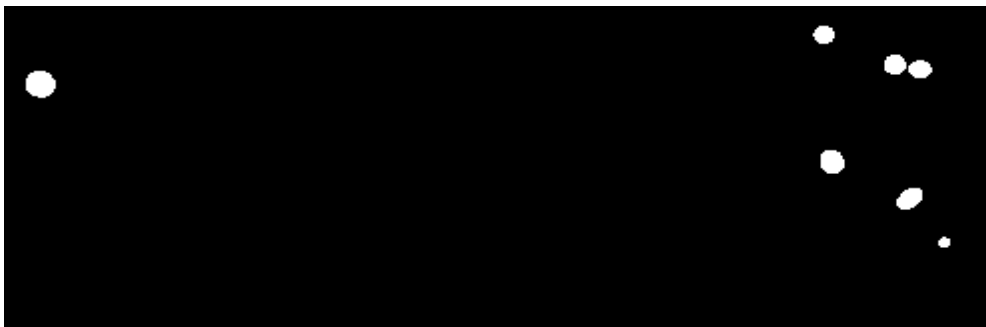
La première opération est la binarisation ou le seuillage de l'image afin de permettre la détection d'objets. Cette binarisation est la méthode la plus simple de segmentation d'image qui consiste à convertir une image contenant 256 niveaux de gris en une image contenant 2

niveaux d'intensités lumineuses (noir ou blanc). Le seuillage d'image remplace un à un les pixels d'une image à l'aide d'une valeur seuil fixée. Si un pixel a une valeur supérieure au seuil, il prendra la valeur 1 (blanc) et si sa valeur est inférieure, il prendra la valeur 0 (noir). De ce fait, les objets se présentent alors sur l'image comme un assemblage de pixels ayant un niveau d'intensité égal à 1. Pour chacun de ces objets, trois caractéristiques sont déterminées: l'aire, la position du centre et la netteté.

L'aire est obtenue en sommant le nombre de pixels composant l'objet. A partir de cette aire, le diamètre d'un cercle d'aire équivalente à la goutte est calculé. Dès lors, les distances en pixels sont converties en distance en  $\mu\text{m}$ . La position du centre est prise à partir du centre de masse de l'objet. Quant à la netteté, elle est déterminée à l'aide d'un double seuillage. La goutte est considérée comme nette si l'aire calculée avec les deux seuils ne diffèrent pas d'une valeur admise.

La vitesse de la goutte est calculée comme étant un module du vecteur défini par la différence de la position des centres des gouttes sélectionnées, divisé par le temps écoulé. Par conséquent, une matrice d'évènements d'impact va être produite. Elle contient la taille et la vitesse des gouttes, nombre de Weber, le type d'impact et le numéro d'image.

Les résultats sont traités sous forme graphique en fonction de la taille et la vitesse des gouttes notamment le graphique bi logarithmique de la vitesse en fonction du diamètre.



**Figure24** : Image obtenue par le programme de traitement sous MATLAB.

Suite à l'évaporation, les concentrations de fluorescéine dans les gouttes augmentent avant l'impact en fonction du diamètre de la goutte et des conditions ambiantes. Par conséquent, la connaissance du diamètre initial est nécessaire pour déterminer la quantité de fluorescéine retenue sur la feuille en se référant à la concentration de fluorescéine dans la bouillie initiale de pulvérisation. Les tailles de gouttes initiales sont calculées dans un algorithme MATLAB, sur la base du modèle d'évaporation développé par Guella et al. (2007) en utilisant le diamètre

mesuré à 50 cm au-dessous de la buse en entrée. La vitesse de sortie initial à partir de la buse est fixée à 15 m / s, et les conditions ambiantes de la chambre de pulvérisation sont mesurées pour tenir compte des conditions expérimentales et calculer correctement le diamètre initial de la gouttelette.

Lors de l'analyse des gouttes enregistrées, le programme de traitement d'images sous MATLAB® fournit des proportions volumiques des particules par type d'impact. Ces proportions caractérisent le jet de pulvérisation et son interaction avec la surface. En effet, le nombre de gouttes par jet est donné ainsi que le VMD (diamètre médian volumétrique), exprimé en  $\mu\text{m}$ , qui est une valeur statistique définissant un diamètre médian de gouttelettes: c'est-à-dire le diamètre de la goutte pour laquelle 50 % du volume du jet de pulvérisation est constitué de gouttelettes plus grosses et 50 % du volume est constitué par des gouttelettes plus fines. Le taux d'adhésion, de rebond et de fragmentation sont aussi calculés.

## II. Essai standard de rétention sur orge

La rétention est la proportion du jet retenue par la feuille, elle est fonction de plusieurs paramètres à savoir, la taille, la vitesse et les propriétés physico-chimiques de la bouillie ainsi que l'état de la surface d'impact. Les adjuvants tensio-actifs ont pour rôle de diminuer la tension de surface de la bouillie, augmentant ainsi la possibilité que la goutte reste sur la surface. Ils modifient également le comportement lors de l'impact, la distribution granulométrique et la vitesse des gouttes.

Nous avons testé l'effet des deux adjuvants utilisé pendant l'expérimentation précédente comparés à l'eau sur la rétention de bouillie pulvérisée sur plants d'orge au stade deux feuilles (BBCH 12). Break-Thru® S240 à une concentration de 0,1% v/v et Li700® à une concentration de 0,25% v/v.

Les trois bouillies étaient marquées d'un traceur fluorescent, le sel sodique de fluorescéine, à une concentration de 0.2g/l pour éviter la saturation de l'appareil lors de mesure de fluorométrie.

Les pulvérisations sont réalisées par une buse à fente XR Teejet 11003 VK, montée à 50 cm au-dessus de la cible sur une rampe, mobile à une vitesse de 2m/s. Dix pulvérisations pour chaque bouillie sont effectuées à une pression de 2 bars.

Chacune des pulvérisations est réalisée sur une ligne de cinq plants espacés de 12 cm sous de conditions de 24° de température et 60% d'humidité relative.





**Figure 25 :** Photographie du dispositif expérimental de l'essai standard de rétention

Après les pulvérisations, les cinq plants pulvérisés sont récupérés dans un flacon contenant 20 ml de la solution tampon ( $K_2HPO_4$ ) pour le rinçage de la quantité de fluorescéine retenue sur l'ensemble des plants et sa conservation.



**Figure 26 :** Préparation des échantillons pour mesures de fluorométrie

La fluorescence retenue par l'ensemble des cinq plants est dosée à chaque fois par un spectrofluoromètre (RF -1501, Shimadzu Corporation) à 460 nm de longueur d'onde d'excitation et de 540 nm de longueur d'onde d'émission. Les plants sont ensuite récupérés et scannés pour mesurer leur surface.

### III. Mesure de la Granulométrie des jets

#### III.1. Présentation générale du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé dans cette expérimentation est celui décrit dans (De Cock, 2012 et Wei, 2009). Il comporte la caméra, l'optique et le système d'éclairage (le panneau de LED, le contrôleur du LED et l'alimentation du contrôleur) et une buse de pulvérisation située entre la caméra et la source lumineuse à hauteur réglable.

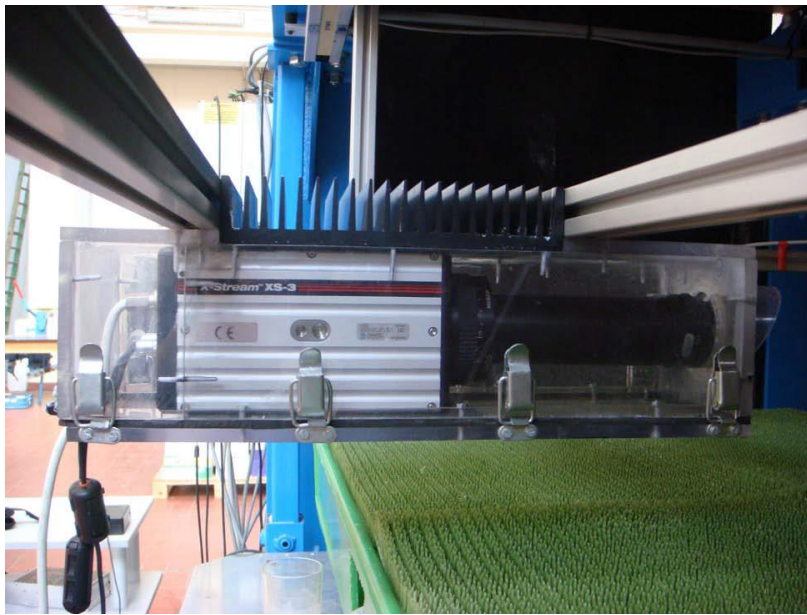


**Figure 27** : Photographie du dispositif de mesure de granulométrie des buses de pulvérisation.

L'alignement entre la caméra, le système d'éclairage et la buse à caractériser est assuré grâce à un cadre rigide réalisé en profilés Bosch-Rexroth ®. La caméra est placée dans un boîtier en plexiglass et le panneau de LED est fixé au cadre. La buse ou le générateur de gouttes faisant l'objet de la mesure est fixé sur un support mobile situé entre l'éclairage et la caméra. Grâce à un système de rails coulissants, le réglage de la position de la buse est possible selon trois directions orthogonales.

La caméra utilisée est une caméra haute vitesse XS-3 « *Integrated Design Tools, Inc* » à capteurs de type CMOS. Cette caméra possède une résolution de 1280x1024 pixels. Les images sont acquises avec une profondeur de 8 bits. La fréquence d'acquisition, lorsque la zone d'acquisition est maximale, est de 625 images par seconde. Elle peut être augmentée en

diminuant la zone d'acquisition. Dans le but de capturer le maximum d'information, la plus grande zone d'acquisition sera utilisée pour les mesures. La caméra dispose également d'un mode « double impulsion », dans lequel l'acquisition est réalisée par paires d'images séparées par un court laps de temps. Deux types de sorties sont disponibles, une sortie USB pour la connexion à un ordinateur et des sorties BNC utilisées pour la synchronisation avec le système d'éclairage. L'acquisition des images est réalisée avec le logiciel « Motion Studio – Image Acquisition and Processing ».



**Figure 28:** Photographie de la caméra dans sa boîte de protection en plexiglas.

L'optique est constituée d'un objectif « Rodenstock » de 80 mm f/4 combiné à deux bagues d'allonge de 24,5 et 87,5 mm. Lors de l'acquisition d'image, le diaphragme de l'objectif est complètement ouvert, ce qui a pour conséquence de laisser passer plus de lumière vers le capteur mais en contrepartie de diminuer la profondeur de champ.

Le système d'éclairage est constitué de trois éléments :

- Un panneau composé de 24 diodes électroluminescentes
- Un contrôleur d'éclairage « Gardasoft PP 600F »
- Une alimentation 24V pour le contrôleur

Le panneau est composé de 24 LED blanc « Luxeon® III Star » de 3 Watts chacune. Chaque diode est munie d'optiques « Carclo » à faisceau circulaire étroit avec une divergence de 10°.

Le panneau peut supporter un courant de 2.8 Ampères en continu et de courtes impulsions de 4 Ampères.

Le panneau est alimenté à l'aide d'un contrôleur « *Gardasoft PP 600F* ». Ce contrôleur possède un mode d'alimentation continu et un mode d'alimentation par impulsion. La durée minimale de l'impulsion en mode pulsé est de  $5\mu\text{s}$  avec un courant de maximal de 10 Ampères. Le contrôleur possède deux canaux comportant chacun une sortie de courant et une entrée de synchronisation. Le contrôleur est directement relié avec la caméra afin de synchroniser la prise d'image avec l'éclairage de la scène. Son alimentation est assurée par une alimentation 24 Volts fabriquée à l'unité d'agriculture de précision.

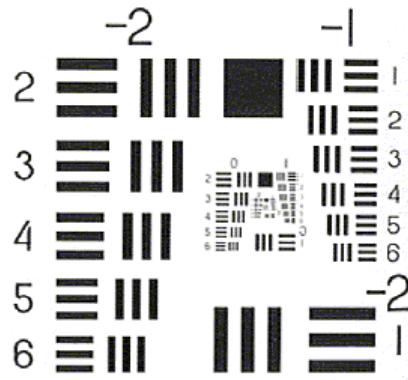
### III.2. Méthode d'acquisition d'images

Lors de l'acquisition d'objets en mouvement, le temps d'exposition revêt une importance primordiale car il doit être suffisamment court pour figer la goutte sur l'image tout en fournissant suffisamment de lumière pour fournir un contraste suffisant à l'image. Une image présentant des objets nets avec un faible contraste entre l'arrière-plan et les gouttes est représentative d'un temps d'exposition trop court. Une image acquise suite à un temps d'exposition plus élevé présente un bon contraste mais des objets flous. Le temps d'exposition intermédiaire présente une netteté et un contraste satisfaisant. Le temps d'exposition utilisé est de  $7\mu\text{s}$ .

Dans la configuration d'acquisition d'images en double impulsion, l'obturateur de la caméra s'ouvre deux fois en un laps de temps très court. Cependant, lors de l'acquisition de la 2ème image, le temps d'ouverture de l'obturateur ne peut pas être paramétré. Le temps d'exposition est donc contrôlé par la durée de l'impulsion du système d'éclairage, le panneau de LED reste allumé pendant la même durée pour les acquisitions. Malgré ce réglage la deuxième image présente un contraste moins important que la première.

### III.3. Calibration dimensionnelle

La calibration dimensionnelle a pour objectif de définir la taille d'un pixel. Cette relation a été établie à l'aide d'une mire « *USAF 1951* ». La mire se compose de six «groupes» en trois couches de motifs. Les plus grands groupes formant la première couche, sont situés sur les côtés extérieurs. Les autres groupes répètent la même disposition, mais sont d'autant plus petit que l'on se rapproche du centre. Chaque groupe se compose de six éléments, numérotés de 1 à 6. Chaque élément comporte 3 barres verticales et 3 barres horizontales.



**Figure 29 :** Test USAF 1951

La distance réelle entre deux barres voisines pour l'élément « Ele » appartenant au groupe «Grp» est déterminée à l'aide de l'équation 4 ci-dessous. La taille d'un pixel est ensuite obtenue par règle de trois. Afin de recalculer facilement ce paramètre, un script Matlab effectuant ces opérations a été créé.

Pour la caméra et le système optique utilisé, un pixel a une valeur légèrement inférieure à  $10\mu\text{m}$ . La taille exacte selon le niveau de zoom de l'objectif utilisé lors de l'acquisition est présentée sur la figure.

#### III.4. Traitement de l'arrière-plan

En règle générale, l'arrière-plan lumineux présente des hétérogénéités liées aux sources lumineuses et à l'arrangement optique. Celles-ci peuvent être traitées en soustrayant une image recomposée de l'arrière-plan. Cet arrière-plan est constitué grâce à un filtre de rang à partir d'un ensemble de 50 images. L'arrière-plan est égal au 80ème percentile d'intensité lumineuse pris pour chaque pixel. L'utilisation d'un filtre de rang permet de s'affranchir de la présence ponctuelle d'objet sur l'image. Lorsque l'arrière-plan est soustrait de l'image originale, le contraste de l'image est ajusté de telle manière à ce qu'il y ait minimum 1% de pixels saturés (fonction « Imadjust » de Matlab).

#### III.5. Caractérisation des gouttes

La détection des gouttes présentes sur l'image est réalisée en recherchant les changements brusques d'intensité lumineuse. Ceux-ci correspondent généralement à la limite entre une goutte et l'arrière-plan. L'intensité de ce contraste varie en fonction de la taille, de la focalisation de la goutte ainsi que de la présence d'autres ombres d'objets dans le même axe. La détection précise des contours des gouttes nécessite de tenir compte du contexte local

(taille et degré de focalisation de la goutte, luminosité de l'arrière fond). A cette fin l'analyse d'image est décomposée en deux phases. La première phase est globale et a pour objectif de localiser et estimer grossièrement la taille des gouttes présentes sur l'image. Chaque goutte est ensuite isolée dans une sous-image. La seconde étape se déroule au niveau local, la taille de la goutte présente dans chaque sous-image est déterminée en tenant compte du contexte de la sous image.

### III.6. Essais réalisés

Une buse à fente à RS-MM 110°/04 (Uniagroup ®) est utilisée pour les essais de mesure de granulométrie. Elle est orientée de manière à ce que le jet soit perpendiculaire à l'axe optique afin de réduire l'obstruction du jet. Les mesures sont réalisées avec deux pressions différentes, 1,5 et 2 bars, et 5 hauteurs différentes, à 10, 20, 30, 40 et 50 cm de la sortie de la buse. Trois pulvérisations d'eau distillée sont réalisés pour chaque combinaison pression-hauteur.



**Figure 30 :** Buse RS-MM 110°/04

L'alimentation en eau des buses provient d'un réservoir de type Cornelius keg. Il s'agit d'un récipient métallique qui possède une entrée par laquelle on introduit l'air venant d'un compresseur et une sortie par laquelle sort l'eau pressurisée vers la buse.

Le compresseur d'air utilisé est un compresseur Dynamair de 25 L. Il permet de fournir, dans le réservoir, de l'eau aux pressions désirées.

## Chapitre III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

### I. Evaluation de la rétention par imagerie rapide

#### I.1. Types d'impact et volumes correspondants

Les diagrammes représentant les résultats d'impact observés en utilisant l'imagerie rapide pour les trois bouillies pulvérisées sont dans une échelle log-log pour une représentation claire des diamètres des gouttes et de leurs vitesses.

Dans un tel graphique, un nombre de Weber constant correspond à une ligne droite avec une pente de -0,5. Le nombre de Weber a été calculé pour toutes les formulations par la relation :

$$\text{Nombre de Weber} = \rho V^2 D / \sigma \quad \text{Avec ;}$$

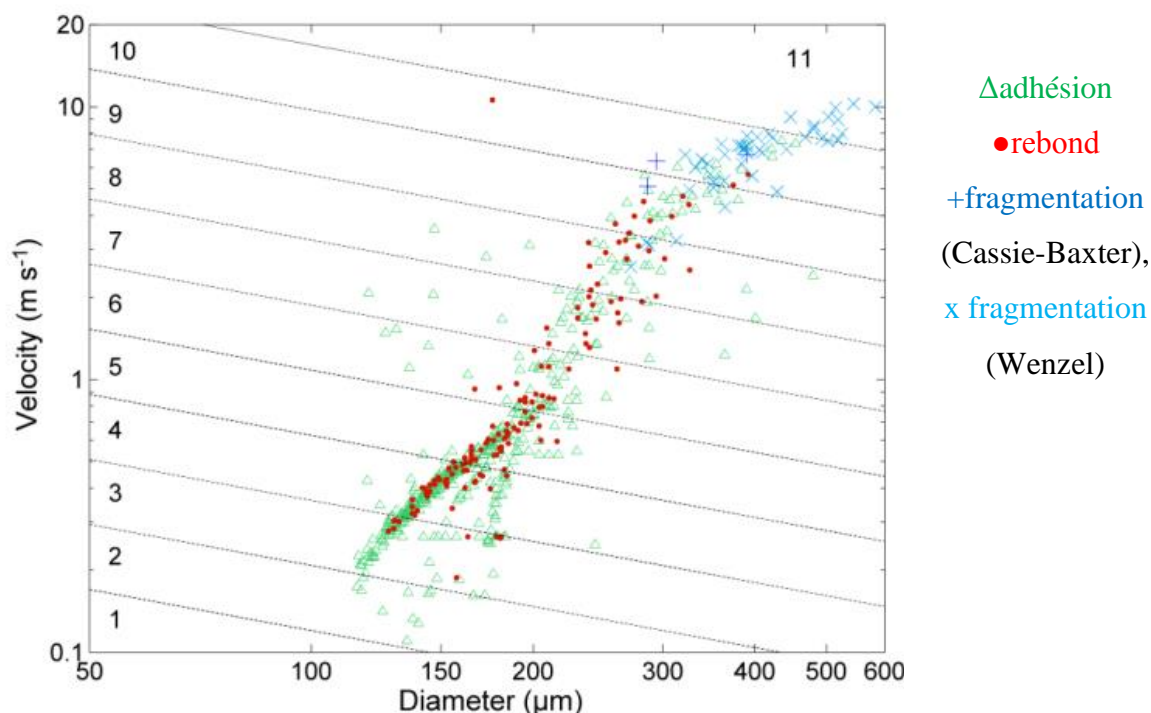
$\rho$  la densité du fluide,

$V$  la décélération,

$D$  diamètre de la goutte,

$\sigma$  tension superficielle statique de l'eau (72,2 mN / m).

Onze classes énergétiques selon le nombre de Weber de l'eau sont déterminées et séparées par une augmentation de 3 fois nombre de Weber. Des lignes de transition de ce nombre sont présentées sur les graphes. Les premières limites sont fixées à un nombre de Weber égal à 0,02. Ainsi, une échelle d'énergie qui ne dépend que des paramètres physiques de la goutte est créée. Des symbols colorés sont affectés à chaque type d'impact sur les graphiques comme suit :  $\Delta$ adhésion,  $\bullet$ rebond, +fragmentation (Cassie-Baxter), x fragmentation (Wenzel).



**Figure 31** : Résultats d'impact extraits de 10 essais: en fonction de la décélération et du diamètre sur feuille d'orge horizontale avec une bouillie d'eau et de fluorescéine.

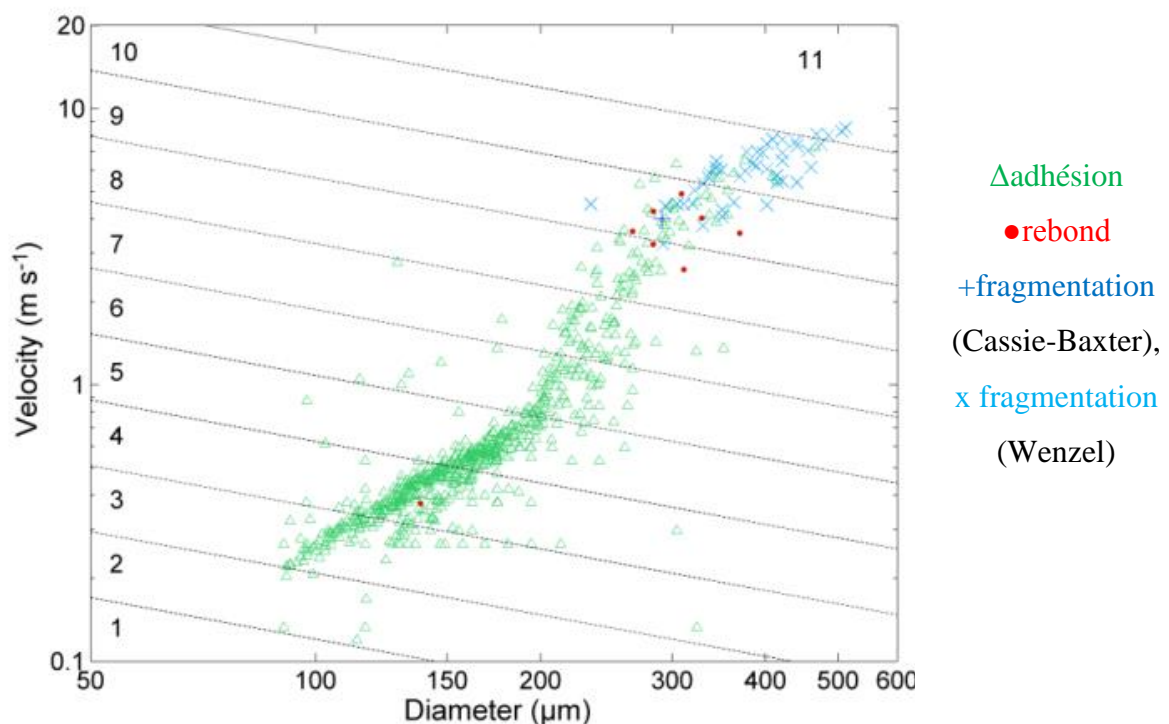
Dans les essais avec de l'eau (figure 31), quatre résultats d'impact différents sont observés. L'adhésion est la seule issue pour les impacts de faible énergie (Weber classes énergétiques 1 et 2 sur le graphique). Pour les gouttelettes aussi petites que 150  $\mu\text{m}$  de diamètre et plus lentes que 0,3 m/s, jusqu'à 300  $\mu\text{m}$  de diamètre et 4 m/s de vitesse (Classes énergétiques Weber 3 à 8 sur le graphique), on observe une coexistence d'adhésions et de rebonds sur un large éventail de situations.

Ce comportement n'est manifestement pas ce qui est attendu si une transition claire entre adhésion et rebond est indiquée. Sur certaines espèces telles que l'orge, la grande variabilité de surface de la feuille résulte en une coexistence des deux comportements sur une large gamme d'énergies d'impact. Ce comportement est généralement pris en compte en utilisant soit une régression logistique dans des modèles empiriques (Forster et al., 2005) ou sur la base d'avance et de recul pour les processus d'angles orientés (Mercer et al., 2010).

Pour les diamètres et les vitesses de l'ordre de 300  $\mu\text{m}$  et de 4 m/s correspondant approximativement à la classe énergétique Weber 9, la fragmentation apparaît à la fois en

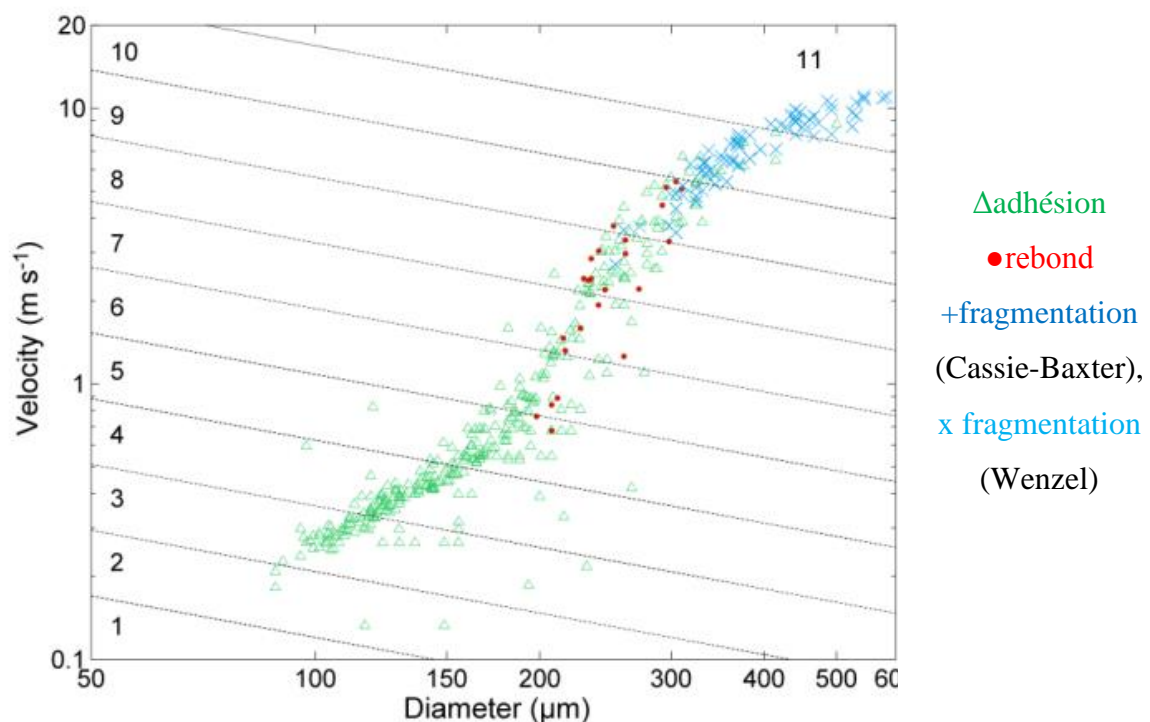


régime de mouillage Cassie-Baxter et en régime de mouillage Wenzel en même temps que l'adhésion et le rebond. Pour des vitesses et diamètres plus élevés, correspondant à la classe énergétique Weber 11, que les fragmentations, principalement en régime Wenzel se produisent résultant en pinning fragmentation considérable. Le comportement observé n'est évidemment pas une simple transition à un seuil fixé. Certaines plantes telles que le Vulpin [*Alopecurus myosuroides* HUDS. (ALOMY)], par exemple, présentent une beaucoup plus nette transition entre les différents impacts possibles résultants (Massinon et al., 2012). La coexistence de rebonds et d'adhésion peut être liée à la variabilité élevée des angles de contact à l'échelle de gouttes pour la surface adaxiale des feuilles d'orge, observée par Mercer et al. (2010). La même coexistence a été observée pour du blé d'hiver cultivé en champs (Massinon et Lebeau, 2012b). Les fragmentations dans le régime Wenzel sont répandues pour la même raison.



**Figure 32 :** Résultats d'impact extraits de 10 essais: en fonction de la décélération et du diamètre sur feuille d'orge horizontale avec une bouillie d'eau, Break Thru et de fluorescéine.

Lorsque le Break Thru S240 est ajouté à la solution (Figure 32), on obtient une disparition du rebond jusqu'à des gouttes d'environ 300  $\mu\text{m}$  de diamètre et 3 m/s de vitesse, correspondant à la classe d'énergie 8. Ce comportement est due à la faible tension de surface dynamique de cet adjuvant super-mouillant organosilicone. Les rebonds ne sont plus observé en résultats sous cette limite sur cette surface superhydrophobe, ce qui confirme la grande 'efficacité de ce super-mouillant encore mal compris (Venzmer, 2011). Le régime Cassie Baxter est rarement observé dans la classe énergétique Weber 9, avec peu de rebonds et une seule fragmentation observée.



**Figure 33 :** Résultats d'impact extraits de 10 essais: en fonction de la décélération et du diamètre sur feuille d'orge horizontale avec une bouillie d'eau, Li700 et de fluorescéine.

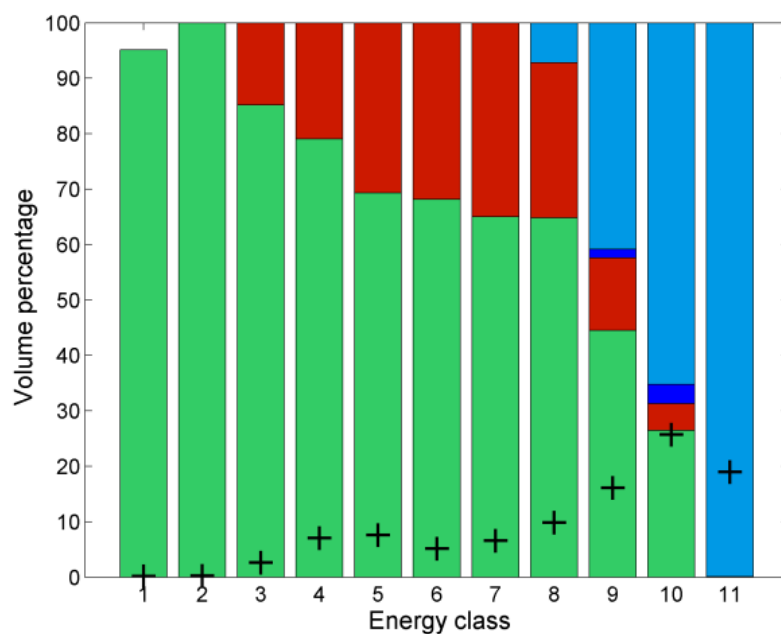
La figure 33 présente les résultats pour Li700, un plus traditionnel adjuvant et qui semble être un agent mouillant moins efficace que le Break Thru S240 au moment de l'impact. L'effet sur la transition entre l'adhésion et le rebond est donc limité à environ 200  $\mu\text{m}$ , de diamètre et 0,7 m/s de vitesse de gouttes correspondant approximativement à la classe d'énergie 5 et 6, offrant une importante augmentation comparant à l'eau mais loin de la performance du Break-thru

S240. Cependant, les fragmentations en régime Cassie-Baxter disparaissent, ce qui peut être lié à l'augmentation de la surface de contact avec le diamètre de la goutte.

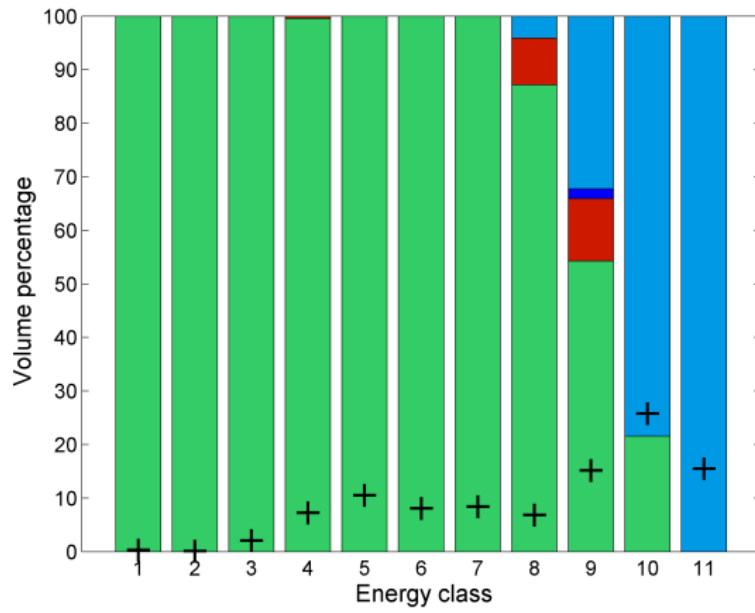
Les figures 34, 35 et 36 présentent le pourcentage volumétrique pour chaque type d'impact en fonction de onze classes énergétiques pour les trois formulations de pulvérisation.

Ces histogrammes résument généralement les informations extraites par une imagerie rapide dans une forme pratique qui offre un aperçu statistique de comportements des gouttelettes en fonction de la classe d'énergie pour une combinaison formulation de pulvérisation/surface. Ils peuvent être utilisés lors de la modélisation de la capture des jets de pulvérisation par la canopée. Il est également très clair que la modification du seuil de fragmentation par les adjuvants tensio-actifs est d'une importance beaucoup plus faible que pour la transition de l'adhésion au rebond. En outre, les pourcentages de volumes de chaque classe d'énergie sont représentés dans les histogrammes. Cette information couplée aux types d'impacts détermine la rétention aux champs. La rétention finale est donc une somme de tous les volumes dans chaque type d'impact pondérée par la proportion de volume relatif de chaque classe d'énergie.

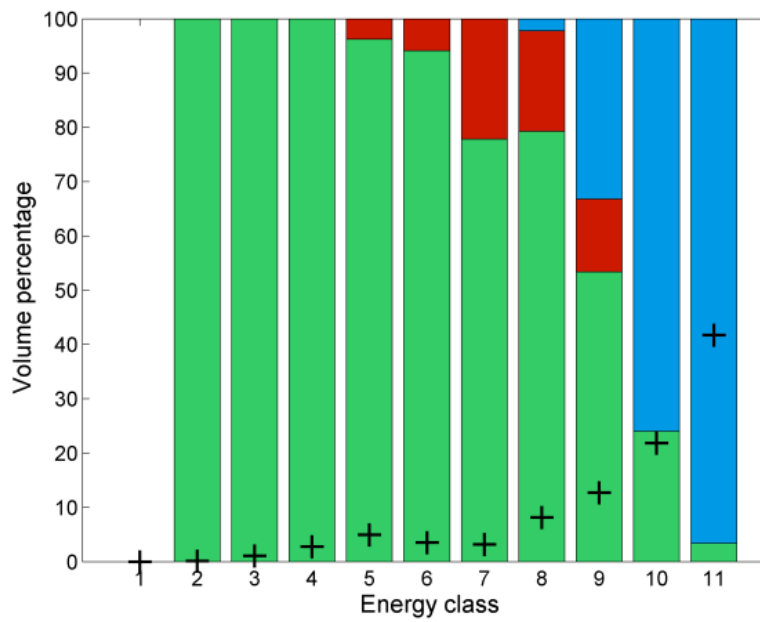
Sur ces histogrammes, on peut voir que la majeure partie de la pulvérisation est située à l'intérieur des classes d'énergie 10 et 11, ce qui prouve l'importance des erreurs suite à la négligence des fractions de gouttelettes épinglées sur la surface lors de l'impact.



**Figure 34 :** Pourcentages volumétriques des résultats d'impact en fonction des classes d'énergie selon le nombre de Weber avec une bouillie d'eau et de fluorescéine.



**Figure 35 :** Pourcentages volumétriques des résultats d’impact en fonction des classes d’énergie selon le nombre de Weber avec une bouillie d’eau, Break Thru et de fluorescéine.



**Figure 36 :** Pourcentages volumétrique des résultats d’impact en fonction des classes d’énergie selon le nombre de Weber avec une bouillie d’eau, Li700 et de fluorescéine.

Le tableau 2 présente certains paramètres moyens observés au cours des essais pour les trois formulations de pulvérisation. Le volume total de gouttes ( $V_{tot}$ ) mesuré pour 10 essais immédiatement avant l'impact est très similaire entre les formulations, car le même taux d'application a été utilisé. Une moyenne de 115 l/ha a été observée dans l'axe de la buse sur la cible, ce qui est notablement au-dessous de la valeur théorique de 160 l/ha qui serait attendu si les buses adjacentes étaient présentes à 50 cm d'intervalle.

**Tableau2** : Récapitulatif des pourcentages volumétriques pour les différents types d'impact en fonction de la formulation.

Formulation	$V_{tot}$ ( $\mu$ l)	% Ad	% R CB	% Sp CB	% Sp W	VMD	Nombre de gouttes
Eau	3.44	41.6	14.2	1.1	43.0	317	627
Eau + Break-Thru	3.35	58.0	2.4	0.3	39.4	272	736
Eau +Li700	3.31	35.6	4.3	0	60.1	328	448

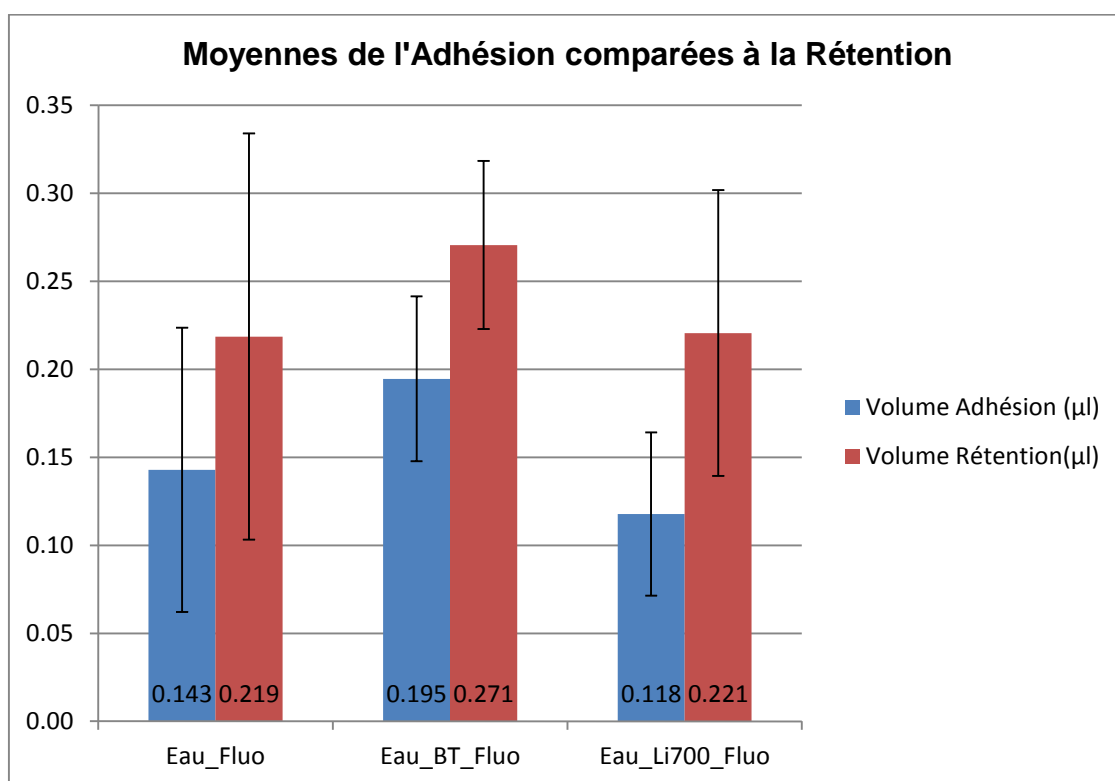
Ce tableau offre également une vue quantitative de l'effet de l'adjuvant utilisé pour ce réglage de la buse. Comme prévu, comparant à l'eau, le diamètre médian volumétrique (VMD) est plus faible lorsque Break-Thru est utilisé et augmenté pour Li 700 (Butler Ellis et al, 1997. ; Holloway et al, 2000. ; Butler Ellis et Tuck, 1999). Le nombre d'impacts gouttes sur la surface est modifié en conséquence, puisque un faible VMD conduit à un nombre élevé de gouttelettes. Les proportions volumétriques des différents types d'impact sont alors modifiées. Le pourcentage d'adhésion (%Ad) est augmenté pour Break-Thru et réduit pour Li700. Ce dernier résultat peut-être pas intuitif au premier, mais qui s'explique par l'augmentation de VMD. La proportion de Rebond (%RCB) est fortement réduite par les deux adjuvants. La fragmentation Wenzel (%SpW) est fortement augmentée pour Li700 tandis qu'elle est réduite pour le Break-Thru comme une conséquence de la modification du VMD. Cette dernière représente 39 et 60 % du volume totale pour le Break-Thru et le Li700 respectivement. Une proportion importante du volume des gouttes fragmentées en régime Wenzel reste en lieu d'impact et contribue au volume retenu sur la feuille végétale.

## I.2. Contribution des gouttes fragmentées en régime Wenzel à la rétention

Lors de modélisation de la rétention sur feuilles végétales, l'ensemble des auteurs considèrent que le volume de rétention est représenté par l'ensemble des gouttes qui adhèrent. Les autres types d'impact sont négligés.

Les résultats obtenus de mesures de rétention par spectrofluorométrie et ceux des volumes des différents types d'impacts observés par imagerie rapide et mesurés par analyse d'image montrent une différence entre rétention et adhésion.

La figure 37 représente une comparaison entre les volumes de bouillie retenus sur les feuilles d'orge mesurés par spectrofluorométrie et les volumes d'adhésion mesurés par traitement d'images issues des vidéos prises par la caméra rapide.

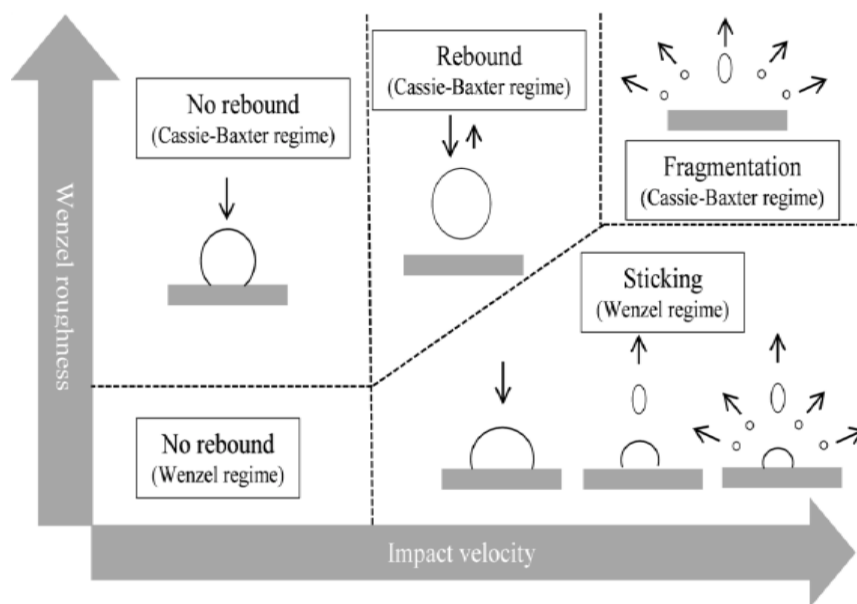


**Figure 37** : Comparaison des volumes de rétention aux volumes d'adhésion sur feuilles d'orge.

La comparaison présentée sur la figure 37 montre clairement que la rétention est différente de l'adhésion alors que les scientifiques ont toujours considéré l'adhésion pour modéliser la rétention.

Ces résultats permettent de mettre en évidence la contribution d'un autre type d'impact à la quantité retenue sur les feuilles végétales. L'imagerie rapide permet d'observer le comportement des gouttelettes lors des différents impacts sur les feuilles, et de voir réellement ce qui reste. D'après nos observations, la différence de volume entre adhésion et rétention constitue la fraction des gouttes fragmentées en régime Wenzel qui reste sur les feuilles. Donc la fragmentation en régime Wenzel constitue un type d'impact très important qui doit être considéré lors de modélisation de la rétention. (Boukhalfa, et al., 2014)

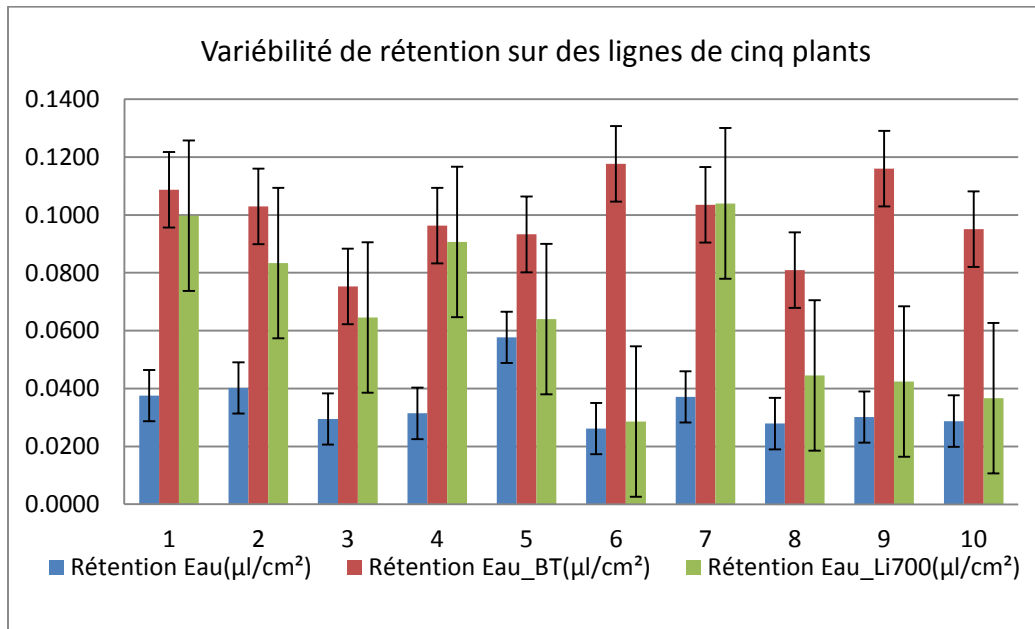
Le schéma proposé par Rioboo (2008) du Type d'impact d'une goutte en fonction de la vitesse d'impact et de la rugosité de la surface peut être modifié comme présenté sur la figure 38.



**Figure 38** : Schéma révisé du type d'impact d'une goutte en fonction de la vitesse d'impact et de la rugosité de la surface. (Boukhalfa, et al., 2014)

## II. Mesure de rétention par fluorométrie (essais standard de rétention)

Les mesures de fluorométrie pour les groupes de cinq plants présentées sur la figure 39 montrent une variabilité entre les 10 répétitions pour les trois bouillies, ceci peut être lié à la nature et la géométrie de la surface qui sont hétérogènes.



**Figure 39 :** Variabilité de rétention sur des lignes de cinq plants.

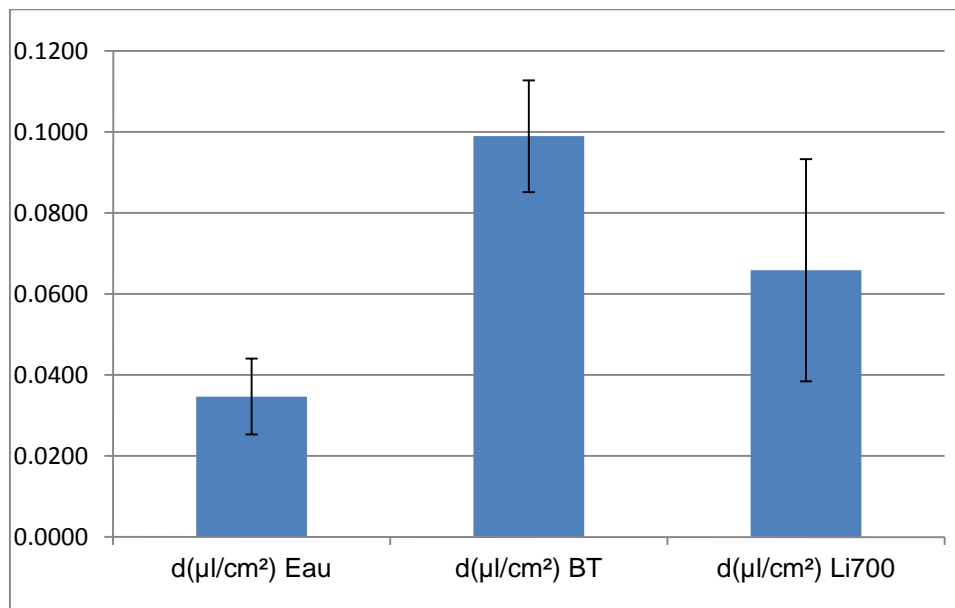
En observant les résultats de chaque essai, nous remarquons une meilleure rétention (supérieure au double) avec la bouillie contenant le Break-thru. Cet adjuvant tensio-actif agit en diminuant le diamètre des gouttes ce qui permet d'augmenter l'adhésion et par conséquent la rétention.

L'ajout du Li700 aussi permet d'augmenter la rétention, cependant son action ne donne pas des résultats aussi remarquables que le Break-thru. Cet adjuvant est connu par son action sur l'augmentation du diamètre de gouttes (VMD plus important comparant à l'eau et à la bouillie contenant du Break-thru). Avec la position presque verticale des feuilles d'orge au stade deux feuilles, les grosses gouttes produites par la bouillie contenant du Li700 rencontreront une difficulté à rester sur la cible.

L'orge est une espèce hydrophobe qui présente une forte hétérogénéité sur la surface de ses feuilles. Cette hétérogénéité engendre une grande variabilité de rétention de pulvérisation. Ceci implique des interrogations sur les méthodes expérimentales utilisées pour définir la rétention sur ce genre de surfaces. Une telle variabilité de résultats enregistrés mène à



augmenter le nombre de répétition afin de minimiser l'écart entre les valeurs mesurées. Il faut donc réfléchir et chercher à fixer des normes en ce qui concerne les méthodes de mesure.



**Figure 40 :** Moyennes de rétention sur des lignes de cinq plants.

Les moyennes de rétention présentées sur la figure 40 permettent de mesurer l'effet des adjuvants en volume retenu par les feuilles d'orge. Il est net que le Break Thru permet d'obtenir un volume de rétention triple de celui obtenu par l'eau. Cependant, le Li700 ne permet d'obtenir que le double du volume obtenu par une pulvérisation d'eau. Ces résultats sont utiles pour diminuer les volumes d'application de pesticides en agriculture.

### III. Caractérisations de la granulométrie de la buse

Une buse à fente Teejet XR11003VK est utilisée tout au long de l'expérimentation. Cette buse présente à 2 bars un débit mesuré par empotement de 0,99 litres par minute.

Ce type de buse, particulièrement résistant à l'usure, est très couramment utilisé à cette pression de travail en pulvérisation sur grandes cultures. La forme de sa distribution est peu affectée par la pression de pulvérisation et par les propriétés physico-chimiques de la bouillie. En raison de la variabilité du processus de fabrication, chaque buse d'un même type présente des caractéristiques qui lui sont propres.

### III.1. Mesure du spectre de gouttes

La Figure 41 présente une photographie au flash du jet issu de la buse à fente Teejet XR11003VK. On peut observer qu'après rupture de la veine fluide (quelques centimètres après la sortie de la buse), des gouttes de diamètres variés s'individualisent au sein du jet, constituant un spectre de gouttes.

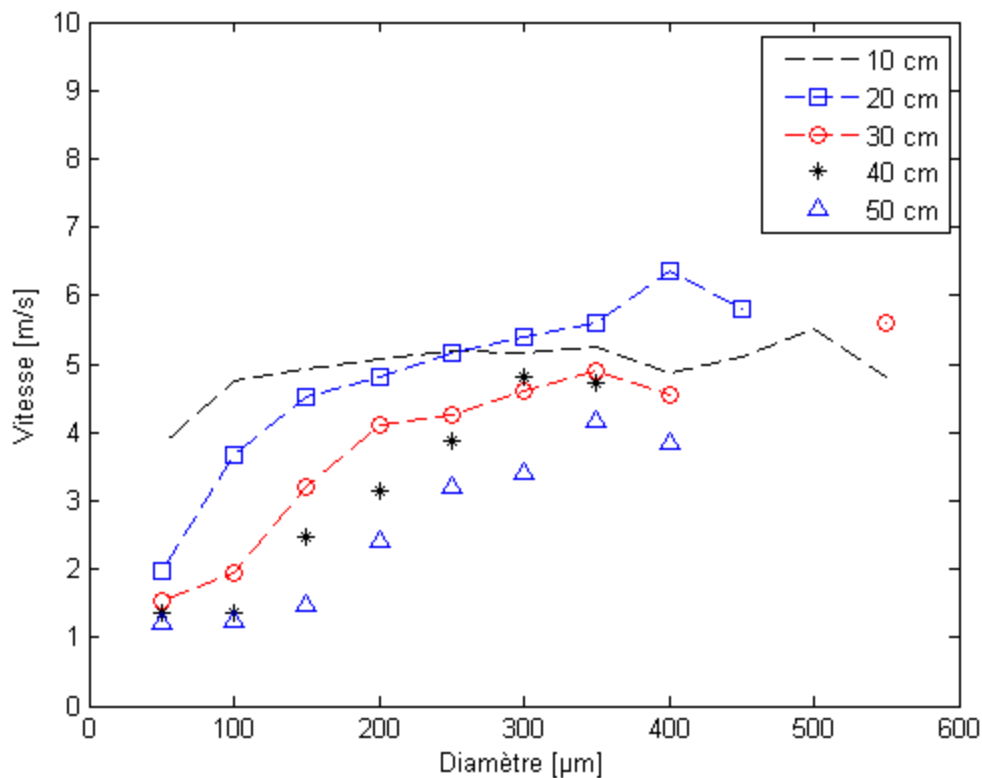


**Figure 41** : Photographie du jet issu de la buse XR11003VK

Cette distribution irrégulière de la granulométrie des gouttes au sein du jet des buses à fente est confirmée dans les travaux de différents auteurs. Lors de l'étude de la distribution spatiale du spectre des gouttes sous une buse à fente (Lund et Matzen, 1996) montre que les fines gouttelettes sont concentrées au centre du jet, tandis que les grosses gouttes se situent à la périphérie. Cette observation est confirmée par Butler Ellis et al. (1997).

### III.2. Caractérisation granulométrique des jets

La figure 42 ci-dessous présente l'évolution de la vitesse en fonction du diamètre à différentes hauteurs de mesure. A proximité de la sortie de la buse, la vitesse est approximativement constante pour chaque classe granulométrique. Lorsque la hauteur de mesure augmente, la vitesse des particules diminue d'autant plus qu'elles sont de petites tailles.



**Figure 42 :** Vitesse en fonction du diamètre à différentes hauteurs de mesure pour de l'eau distillée à une pression de 2 bars.

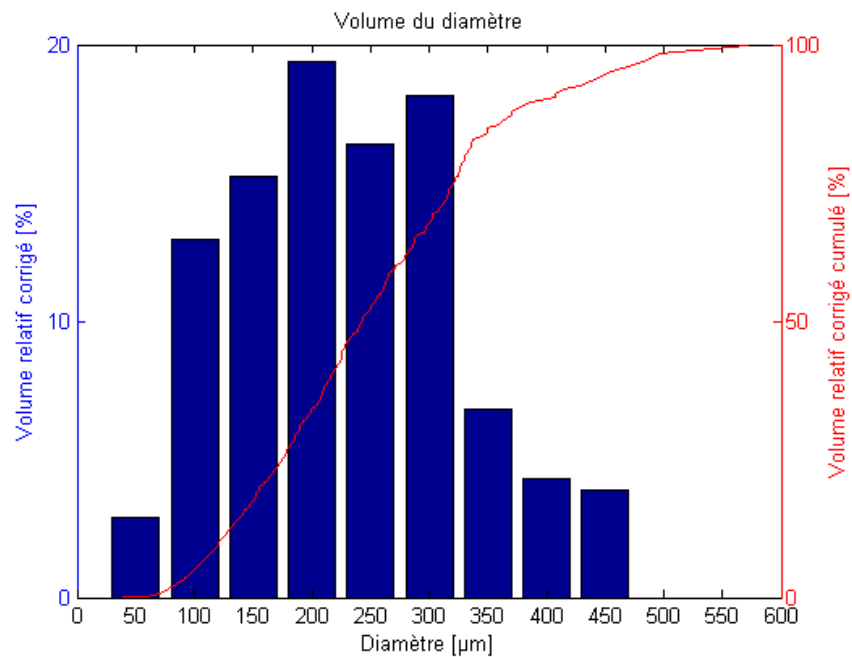
Le  $Dv_{90}$  n'est pas un indicateur fiable car il est fortement influencé par les plus grandes classes granulométriques ( $>350 \mu\text{m}$ ) pour lesquelles le nombre de gouttes détectées par essai est très faible ( $<10$ ) ce qui induit une incertitude importante sur ce paramètre.

L'augmentation de la pression conduit à un décalage de la distribution vers la gauche et donc une plus grande génération de petites gouttes ( $<150 \mu\text{m}$ ).

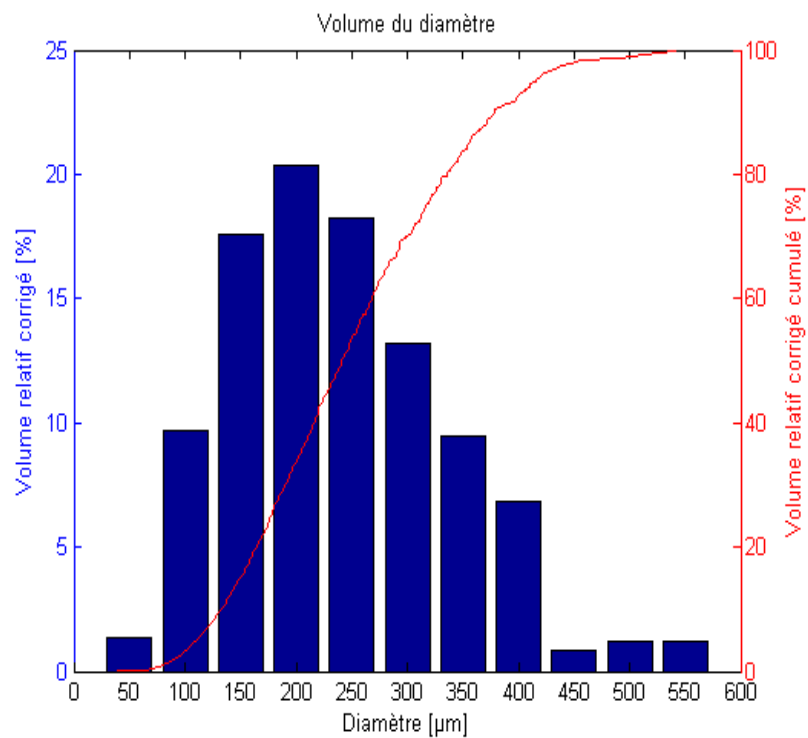
Le décalage de la granulométrie vers la droite a pour conséquence une augmentation du nombre de gouttes dans les classes granulométriques les plus importantes. Ceci est bénéfique dans la lutte contre la dérive des gouttes.

L'étude des graphiques de la vitesse en fonction du diamètre montre que l'augmentation de la pression provoque une augmentation générale de la vitesse dans le jet. Les gouttes de petites tailles présentant une vitesse élevée sont dues à des erreurs lors du suivi des gouttes sur l'image suivante, deux gouttes sont mal appariées et le déplacement est surestimé. Ces erreurs

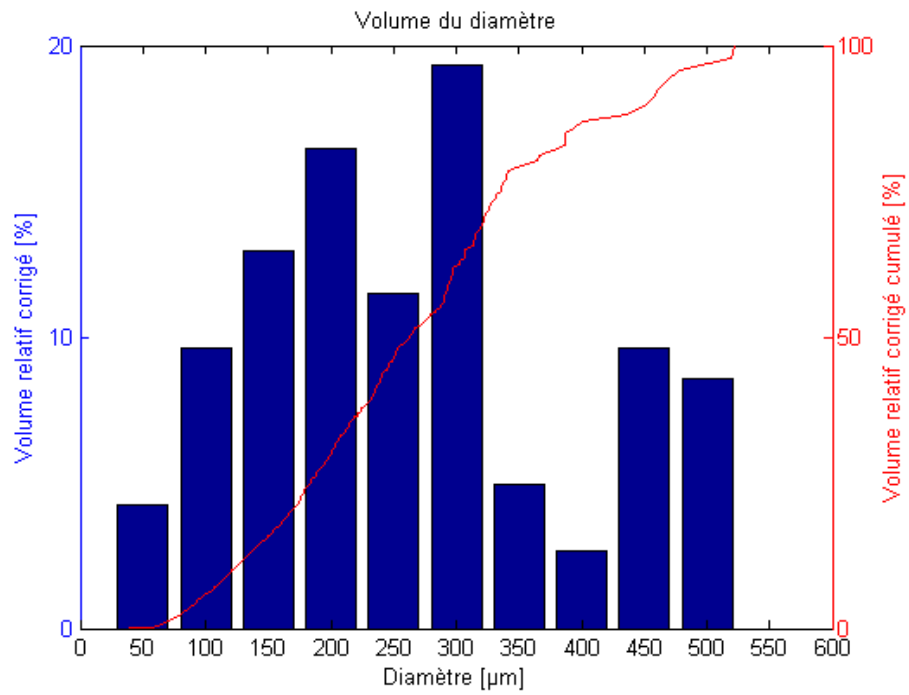
surviennent généralement pour les particules de petits diamètres car elles sont plus nombreuses à l'image.



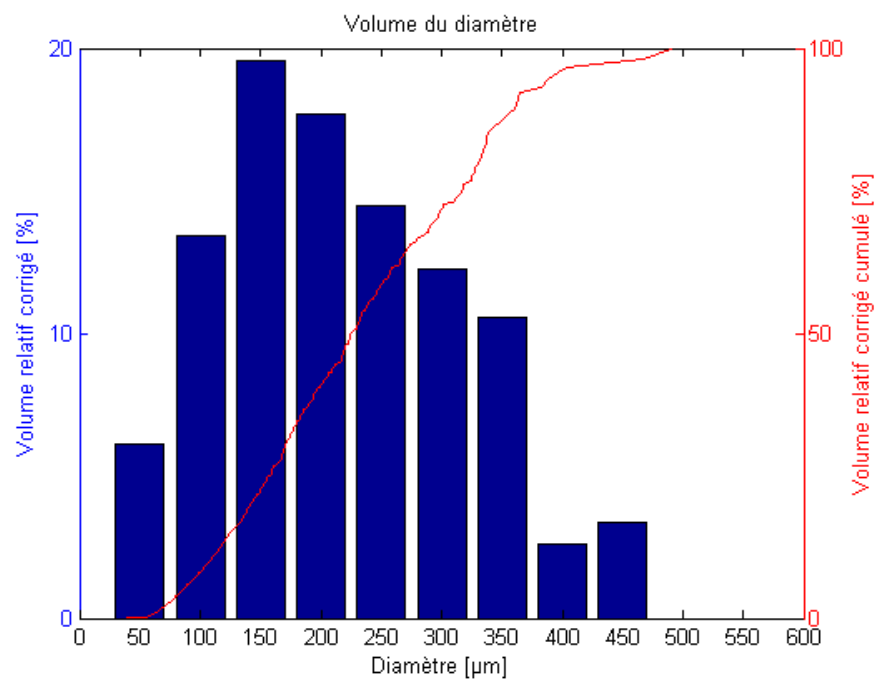
**Figure 43 :** Granulométrie à la pression de 1.5 bars mesurée à une hauteur de 10 cm.



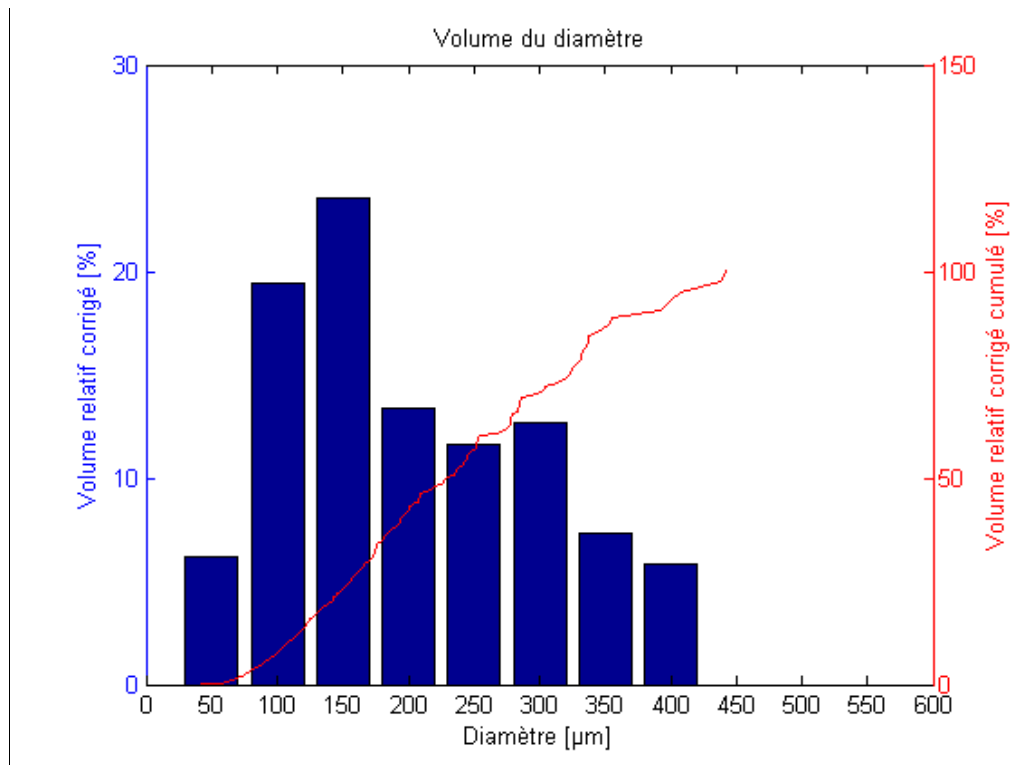
**Figure 44 :** Granulométrie à la pression de 2 bars mesurée à une hauteur de 10 cm.



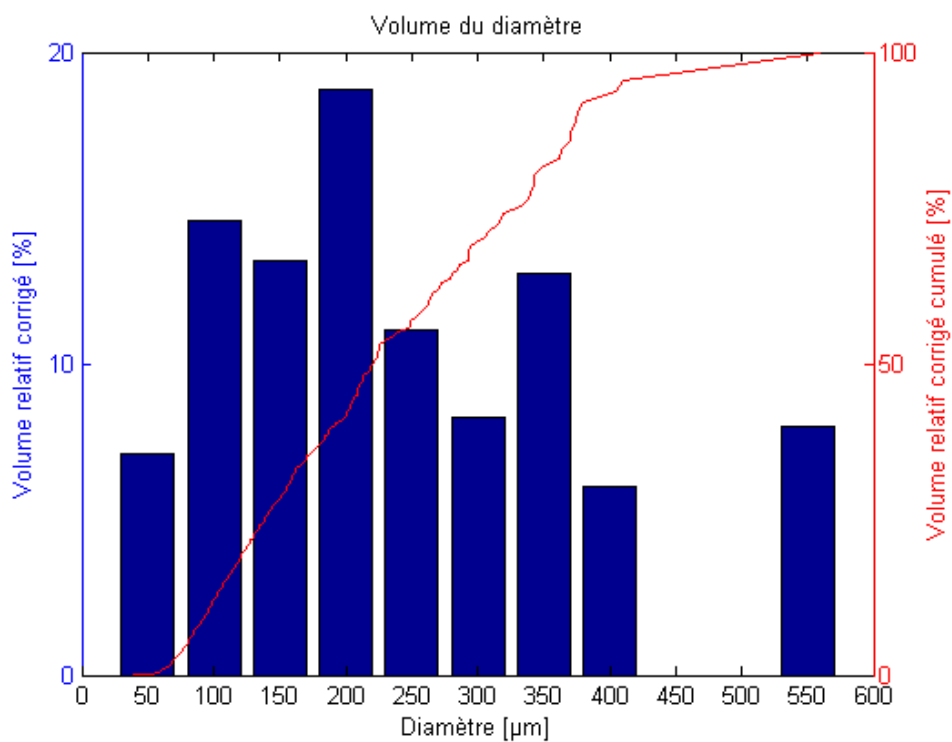
**Figure 45 :** Granulométrie à la pression de 1.5 bars mesurée à une hauteur de 20 cm.



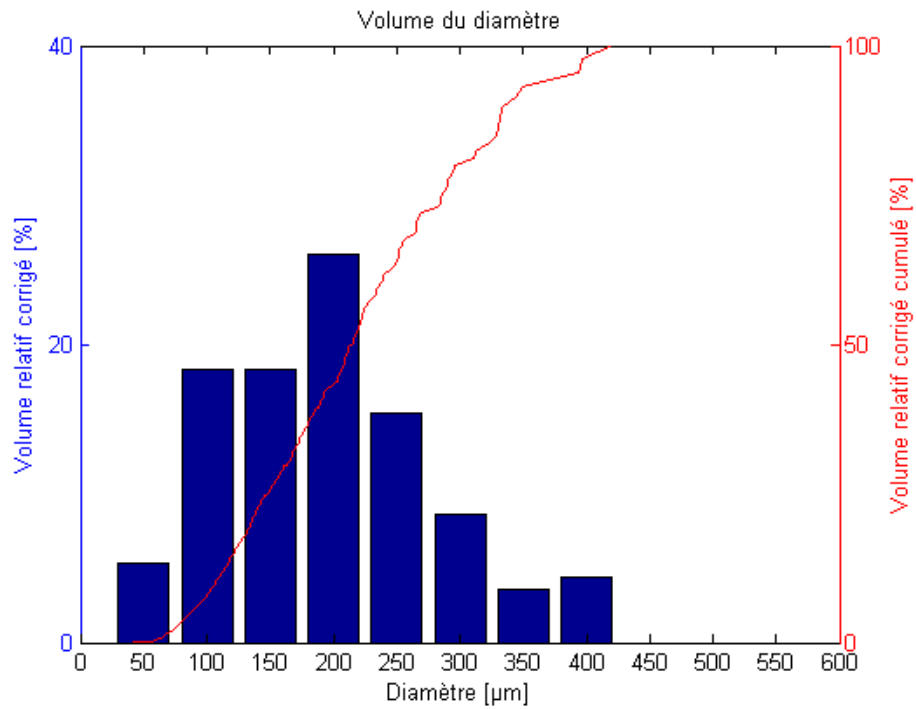
**Figure 46 :** Granulométrie à la pression de 2 bars mesurée à une hauteur de 20 cm.



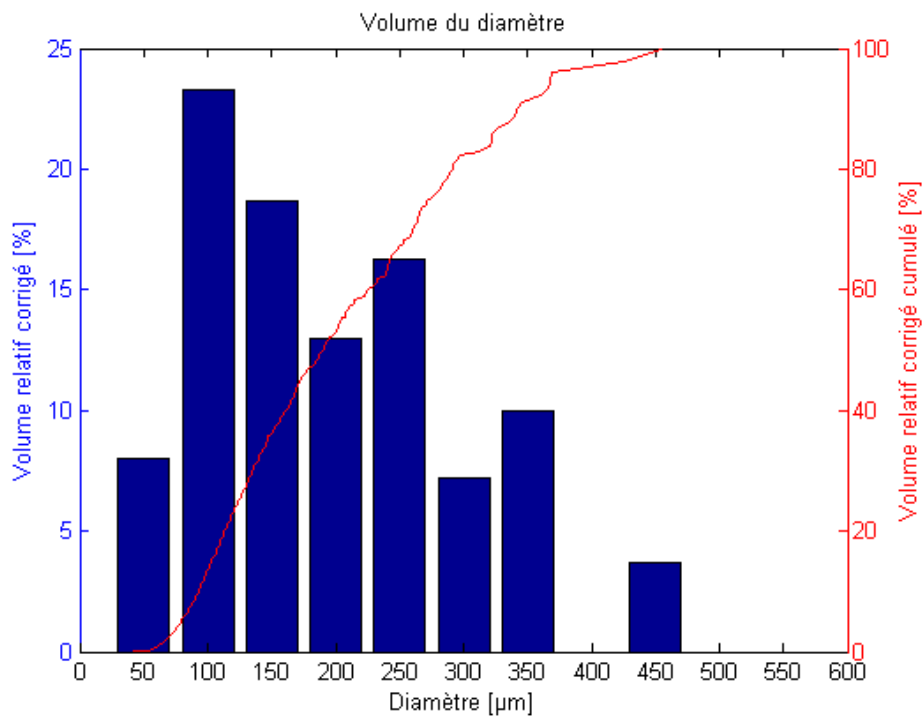
**Figure 47 :** Granulométrie à la pression de 1.5 bars mesurée à une hauteur de 30 cm.



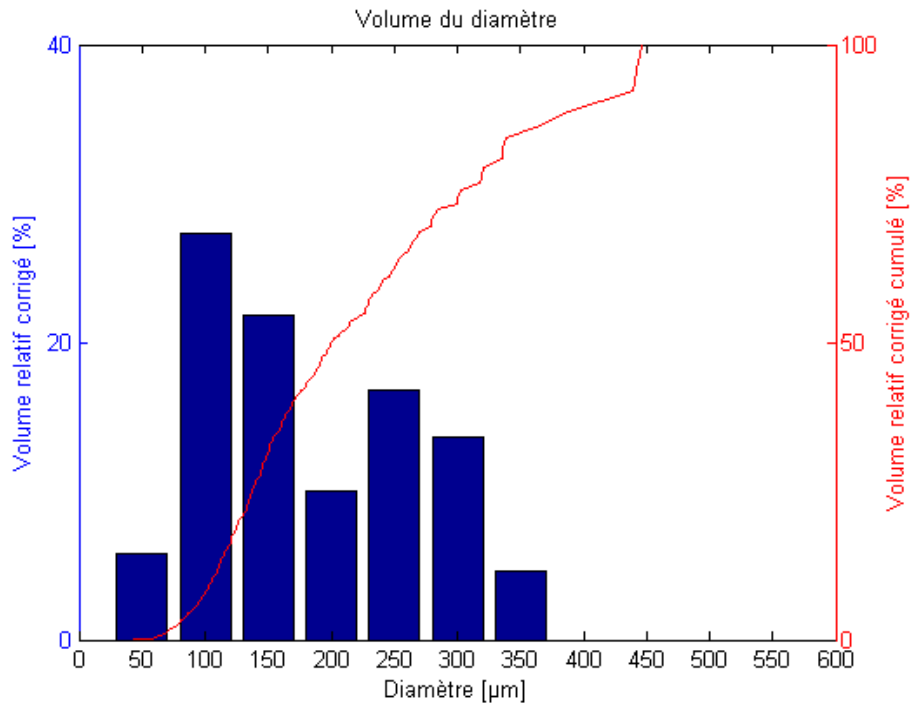
**Figure 48 :** Granulométrie à la pression de 2 bars mesurée à une hauteur de 30 cm.



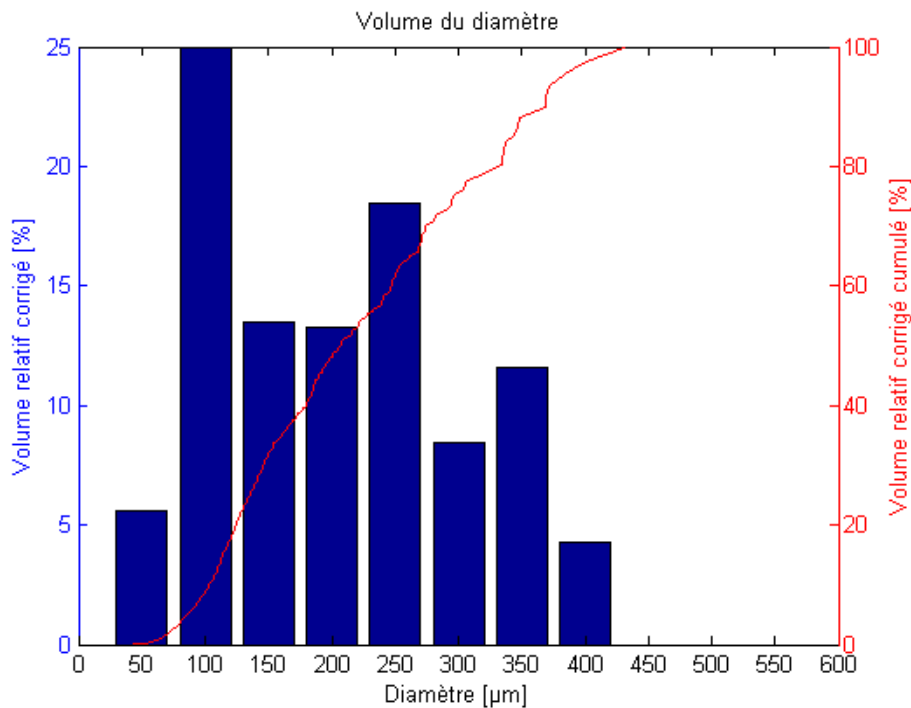
**Figure 49 :** Granulométrie à la pression de 1.5 bars mesurée à une hauteur de 40 cm.



**Figure 50 :** Granulométrie à la pression de 2 bars mesurée à une hauteur de 40 cm.



**Figure 51 :** Granulométrie à la pression de 1.5 bars mesurée à une hauteur de 50 cm.



**Figure 52 :** Granulométrie à la pression de 2 bars mesurée à une hauteur de 50 cm.



## CONCLUSION GENERALE

L'agriculture continue à recourir aux produits phytopharmaceutiques afin de produire des quantités importantes au moindre coût en présence d'adventices, de pathogènes et de ravageurs. En effet, les solutions alternatives comme les cultures produites sous label d'Agriculture Biologique ne représentent encore qu'une très faible fraction de la production. Par ailleurs, les agriculteurs sont soumis à une forte pression de la part de la société civile en raison des risques que fait courir la dissémination de ces produits dans les différents compartiments de l'environnement et des inquiétudes croissantes pour la santé des consommateurs. Ces considérations plaident pour un concept révisé de l'application des produits phytopharmaceutiques qui dépasse l'obtention de hauts rendements. L'application des produits phytosanitaires doit aussi assurer la sécurité sanitaire des produits récoltés tout en limitant les risques sur l'environnement. L'agriculteur doit appliquer au moment opportun les traitements de manière précise afin d'assurer l'efficacité biologique tout en tenant compte des paramètres culturaux (espèce, stade végétatif), des risques (parasite, niveau d'infestation) et des conditions du milieu (température, humidité). Pour cela, il a besoin d'une meilleure maîtrise des techniques d'application, ce qui passe par un matériel adapté et performant.

La répartition dynamique est essentiellement conditionnée par la distribution des jets à la pression de travail. Cette étude concerne une buse à fente classique, de même type que celles couramment utilisées en traitements herbicides. La distribution de la buse possède une forme bimodale asymétrique qui dépend de la hauteur et de la pression de pulvérisation. Le spectre des gouttes à deux bars mesuré par ombroscopie montre que la granulométrie est plus fine au centre du jet qu'à sa périphérie, comme cela est habituellement observé pour des buses de même type.

Un banc d'essai de répartition dynamique, réalisé pour reproduire au laboratoire des conditions similaires à celles du terrain, permet de déplacer la buse selon une trajectoire contrôlée. Il est par ailleurs équipé d'un porte-buse PWM (Pulse Width Modulation) qui permet de contrôler à très haute vitesse l'ouverture ou la fermeture de l'alimentation en bouillie, directement en amont de la buse. La répartition dynamique est mesurée par deux méthodes différentes, à savoir l'analyse d'images et le dosage de fluorescéine par voie chimique. L'analyse d'images permet d'effectuer une mesure continue de la répartition et s'avère intéressante pour déterminer les types d'impacts et les proportions de volumes dans chaque classe d'énergie. Cependant, sa précision est testée et validée par recours à la méthode quantitative chimique pour quantifier précisément et vérifier l'exactitude des résultats. Grâce

à la méthode chimique recourant au dosage de fluorescéine, la variabilité spatiale de la répartition peut être chiffrée.

L'effet des adjuvants tensioactifs rajoutés à la bouillie est également étudié et quantifié à trois échelles bidimensionnelles, sur petits morceaux par imagerie rapide et par fluorométrie, et sur des rangs de cinq plants par fluorométrie.

La comparaison entre la rétention mesurée par imagerie rapide et par spectrofluorométrie fait apparaître des différences qui mènent à la mise en évidence de la contribution des gouttes qui se fragmentent à l'impact des feuilles végétales à la rétention sur ces dernières. Cette classe de gouttes contribue par 25% au volume de bouillie retenue par la cible, ce qui constitue une fraction importante qu'on ne peut pas négliger lors de la modélisation de la rétention des jets de pulvérisation sur les végétaux.

La concentration des fines gouttelettes au centre de la distribution de la buse à fente semble être à l'origine de modifications complexes dans la forme de la distribution induites par la vitesse.

D'un point de vue pratique, la méthode d'imagerie rapide constitue un outil utile pour les mesures de granulométrie vélocimétrie des jets de pulvérisation sans avoir recours à la manipulation directe de produits chimiques. Il est intéressant de l'adopter pour des travaux de recherche sur l'efficacité et l'efficacité biologique des produits phytopharmaceutiques à usage agricole. Ceci permettra de quantifier exactement les produits phytopharmaceutiques selon les conditions d'usage dans le but de limiter les pertes de ces produits qui constitue une nuisance assurée à l'environnement et à la santé publique.

L'importance de la caractérisation des jets agricoles et l'absence de techniques de références met en évidence la pertinence du développement d'une technique de caractérisation de jets agricoles via l'imagerie par ombroscopie.

Les essais réalisés permettent de faire apparaître l'augmentation des fractions volumiques des plus grandes classes granulométriques lors de l'ajout d'adjuvant. L'augmentation de la pression a l'effet inverse. La hauteur de mesure a un effet sur la vitesse dans le jet, lorsque la mesure se situe à proximité de la buse, il y a peu de différence de vitesse entre les différentes classes granulométriques. Lorsque la hauteur de mesure augmente, la vitesse des particules diminue d'autant plus qu'elles sont de petites tailles.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Azimi A. H., Carpenter T. G., Reichard D. L. (1981), Nozzle Spray Distribution for Pesticide Application. Transactions of the ASAE. 28(5), 1410-1414.
- Balik G. (2006), Non-newtonian spray atomization. Project Report 2006-02 von Karman Institute, 81 p.
- Bartolo D., Bouamrène F., Verneuil É., Buguin A., Silberzan P. and Moulinet S. (2006), Bouncing or sticky droplets: Impalement transitions on superhydrophobic micropatterned surfaces. Europhysics Letters, 74 (2), 299-305.
- Bergeron V. (2003), Designing intelligent fluids for controlling spray applications. *C.R. Physique*, 4, 211-219.
- Black D.L., Mcquay M.Q., Bonin M.P. (1996), Laser-Based Techniques for Particle-Size Measurement: A Review of Sizing Methods and Their Industrial Applications. *Progress dans Energy and Combustion Science* (22), 267- 306.
- Boukhalfa H.H., Massinon M., Belhamra M., Lebeau F. (2014), Contribution of spray droplet pinning fragmentation to canopy retention. *Crop Protection*, 56, 91-97.
- Brenn G., Prebeg Z., Rensink D. and Yarin A.L. (2005), Control of spray formation by vibrational excitation of flat-fan and conical liquid sheets. *Atomization and Sprays*, 15, 661-685.
- Butler Ellis M. C., Miller P. C. H., Tuck C.R. (1997), The Effect of some Adjuvants on Sprays Produced by Agricultural Flat fan Nozzles. *Crop Protection*, 16, 41-50.
- Butler Ellis M. C., Tuck C.R. (1999), How adjuvants influence spray formation with different hydraulic nozzles. *Crop Protection*, 18, 101-109.
- Butler Ellis M.C., Tuck C.R., Miller P.C.H. (1999), How surface tension of surfactant solutions influences the characteristics of sprays produced by hydraulic nozzles used for pesticide application. *Coll. Surf.*, 180, 267-276.
- Butler Ellis M.C., Webb D.A. and Western N.M. (2004), The effect of different spray liquids on the foliar retention of agricultural sprays by wheat plants in a canopy. *Pesticide Management Science*, 60, 786-794.
- Butler Ellis M.C. and Miller P.C.H. (2010), The Silsoe spray drift model: a model of spray drift for the assessment of non-target exposure to pesticides. *Biosystems Engineering*, 107, 169-177.
- Carlton J. B. and Bouse L. F. (1981), Characterising Spray Deposit on film by light transmission. Transactions of the ASAE, 24, 277-280.

Carpenter T. G., Reichard D. L., Ozkan H. E., Holmes R. G., Thornton E. (1988), Computerized Weighing System for Analyses of Nozzle Spray Distribution. Transactions of the ASAE, 31(2), 375-379.

Cassie A.B.D., Baxter, S. (1944), Wettability of porous surfaces. Trans. Faraday Soc., 40, 546-551.

Caviezel D., Narayanan C., Lakehal D. (2008), Adherence and bouncing of liquid droplets impacting on dry surfaces. Microfluid Nanofluid, 5, 469-478.

CLANET C., BÉGUIN C., RICHARD D., QUÉRÉ D. (2004), Maximal Deformation of an Impacting Drop. Journal of Fluid Mech., 517, 199-208.

Cox S.J., Salt D.W., Lee B.E., Ford M.G. (2000), A model for the capture of aerially sprayed pesticide by barley. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 87, 217-230.

Dagnelie P. (1973), Théorie et méthodes statistiques (vol.1). Les presses agronomiques de Gembloux, 378 p.

Davis P. F. (1973), The method of analysis of spray boom motions. NIAE Departmental Note DN/CM/382/1905, 19 p.

De Cock N. (2012), Caractérisation des sprays agricoles via imagerie par ombroscopie. TFE, Ulg. 43 p.

De Jong E., Van de Zande J. C., Stallinga H. (2000), The Effects of Vertical and Horizontal Boom Movements on the Uniformity of Spray Distribution. Ag Eng 2000 paper 00-PM-015-Warwick, Royaume-uni, pp 8.

De Moor A., Langenakens J., Jaeken P., Vereecke E. (2000), Adjustment of Orchard Sprayers by Image Analysis of Vertical Spray Patterns. Ag Eng 2000 paper 00-PM-031-Warwick, Royaume-uni, pp 7.

Enfält P., Alness K., Engqvist A. (1996), A mathematical model of dose response behavior depending on the spray liquid distribution. Ag Eng 96 International Conference on Agricultural Engineering- Madrid, Spain, Paper 96A-132, pp. 8.

Enfält P., Engqvist A., Alness K. (1997), Assessment of the Dynamic Spray Distribution on a Flat Surface Using Image Analysis. Aspects of Applied Biology, 48, 17-24.

Forster W.A., Kimberley M.O., Zabkiewicz J.A. (2005), A universal spray droplet adhesion model. Trans. ASAE, 48 (4), 1321-1330.

Forster W.A., Mercer G.N., Schou W.C. (2010), Process driven models for spray droplet shatter, adhesion or bounce. In: Proc. 9th Int. Symp. Adj. Agrochem, 277-285.

Forster W.A., Mercer G.N., Schou W.C. (2012), Spray droplet impaction models and their use within AGDISP software to predict retention. *N. Z. Plant Prot.*, 65, 85-92.

Forster W.A., Schou W.C., Mercer G.N. (2013). Evaluation of a Modified AGDISP Model to Predict Spray Canopy Retention. *Proc. ISAA 2013*, pp. 301e309. Foz do Iguaçu, Brazil April 22-26, 2013.

Furmidge C.G.L. (1962), Physico-chemical studies on agricultural sprays IV, the retention of spray liquids on leaf surfaces. *J. Sci. Food Agric.*, 13, 127-140.

Ganzelmeier H., Moser E. (1977), Einfluss des Auslegerbewegungen von Feldspritzgeräten auf die Verteilgenauigkeit der Spritzflüssigkeit. *Grundlagen der landtechnik*, 27(3), 65 -72.

GAUVRIT C., (1996), Efficacité et sélectivité des herbicides. INRA, Paris.

Giles D. K., Comino J. A. (1990), Droplet Size and Spray Pattern Characteristics of an Electronic Flow Controller for Spray Nozzle. *J. Agric. eng. Res.*, 47, 249-267.

Gölich H. (1985), Deposition and Penetration of Sprays. *Symposium on Application and Biology*, BCPC monogram, 28, 172-182.

Guella S., Alexandrova S., Saboni A. (2008), Evaporation d'une gouttelette en chute libre dans l'air. *Int. J. Therm. Sci.*, 47, 886-898.

HAMZA E., LEBEAU F., DESTAIN M.-F. (2000), La bonne utilisation des pulvérisateurs à jet projeté, éd. Laboratoires de Mécanique Agricole de l'INAT et de la FUSAGx.

Herbst A., Ganzelmeier H. (2002), International Standards and their Impact on Pesticide Application. *Aspects of Applied Biology*, 66, 1-8.

Holloway P.J., Butler Ellis M.C., Webb D.A., Western N.M., Tuck C.R., Hayes A.L., Lake J.R., Marchant J.A. (1983), The use of dimensional analysis in a study of drop retention on barley. *Pestic. Sci.*, 14, 638-644.

Holloway P.J. (1994), Physicochemical factors influencing the adjuvant enhanced spray deposition and coverage of foliage-applied agrochemicals. *Interactions between Adjuvants, Agrochemicals and target Organisms*, P.J.G. Holloway, R.T. Rees and D Stock (Eds); Ernst Schering Research Foundation Workshop 12, Springer-Verlag, Berlin, 83-106.

Holterman H. J., Van de Zande J. C., Porskamp H.A.J, Huijsmans J.F.M. (1997), Modelling Spray Drift from Boom Sprayer. *Computers and Electronics in Agriculture*, 19, 1-22.

Kak A. C. and Slaney M. (1987), *Principles of Computerized Tomographic Imaging*. IEEE Press, USA. pp.322.

Langenkens J., De Moor A, Taylor W., Cooper S., Taylor B. (2000), The Effect of Orifice Wear on Flat Fan Nozzle Performance using Predictive and Dynamic Techniques to Determine Quality of Liquid Distribution. *Aspects of Applied biology*, 57, 207-217.

Lardoux Y. (2002), Etude de la répartition au sol des produits phytosanitaires sous une rampe en mouvement a partir d'une modélisation dynamique – application a la définition de méthodes d'évaluation des pulvérisateurs à jet projetés. Thèse de Doctorat en sciences agronomiques, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier France. pp. 333

Lardoux Y., Sinfort C., Miralles A., Bonicelli B., Sevilla F. (1998), Dynamic Effect of Boom Movements on Spray Distribution. ASAE Meeting – Orlando, Florida - July 12-16, pp. 12.

Lebeau F., Destain. M.-F. (1998), Measurements of the Sprayer Boom Displacements with a Laser Sensor. Ag Eng 98 International Conference on Agricultural Engineering – Oslo, Norvège, Paper 98A-004, 561-526.

Lebeau F., Destain. M.-F. (2000), Sensor Data Fusion for the Measurement of Horizontal Sprayer Boom Displacement. Isma 25. Proceeding of the first International ISMA Workshop on noise and vibrations in agricultural and biological engineering, Leuven Belgium. 1615-1618.

Lebeau F., Hamza E., Destain M. F. (2001), Automatisation d'un banc de répartition pour buses de pulvérisation. *Cahiers Agriculture*, 9(6), 505-509.

Lebeau F. (2003), Modélisation de la répartition dynamique des produits phytopharmaceutiques sous une rampe de pulvérisation. Thèse de doctorat, FUSAgx. pp 190.

Lebeau F. (2004), Modelling the dynamic distribution of spray deposits. *Biosystems Engineering*, 89 (3), 255-265.

Lee, E.R. (2003), *Microdrop Generation*. Boca Raton: CRC Press LLC.

Leunda P., Debouche C., Caussin R. (1990), Predicting the Transverse Distribution under an Agricultural Spray Boom. *Crop Protection*, 9, 111-114.

Lund, I. Matzen, R. (1996), Analysis of droplets in a three dimensional pattern in the spray from a field sprayer. Ag Eng 96 International Conference on Agricultural Engineering – Madrid, Spain. Paper 96A-123, pp. 8.

Marchant J. A. (1977), Calculation of Spray Droplet Trajectory in a Moving Airstream. *J. Agric. Eng. Res.* 22, 93-96.

Massinon M. (2009), Etude de l'impact de gouttelettes liquides sur surface solide sèche par imagerie rapide. TFE, FUSAgx. pp 61.

Massinon M., Lebeau F. (2012a), Experimental method for the assessment of agricultural spray retention based on high-speed imaging of drop impact on a synthetic superhydrophobic surface. *Biosyst. Eng.*, 112 (1), 56-64.

Massinon M., Lebeau F. (2012b), Comparison of Spray Retention on Synthetic Superhydrophobic Surface with Retention on Outdoor Grown Wheat Leaves. In: *Int. Adv. Pest. Ap.: Asp. Appl. Biol.*, vol. 114. Association of Applied Biologists, Warwick, UK, pp. 261-268.

Massinon M., Boukhalfa H.H., Marechal P., Lebeau F. (2012), The Effect of Leaf Orientation on Spray Retention on Blackgrass. In: *Proc. 11th Int. Conf. Precision Agriculture*. Indianapolis, USA.

Massinon M., Lebeau F. (2013), Review of physicochemical processes involved in agrochemical spray retention. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 17 (3), 494-504.

Matthews G.A. (1992), *Pesticide Application Methods*. Singapore Longman, pp. 405.

Mercer G.N., Sweatman W.L., Elvin A., Counce J., Fulford G. and Harper G. (2007), Process driven models for spray retention in plants. In: Wake G, editor. *Proceedings of the 2006 Mathematics in Industry study group*, 57–85.

Mercer G.N., Sweatman W.L., Forster W.L. (2010), A model for spray droplet adhesion, bounce or shatter at a crop leaf surface. *Math. Ind.* 15. [http:// dx.doi.org/10.1007/978-3-642-12110-4\\_151](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-12110-4_151).

Miller P. C. H., Hadfield D. J. (1989), A Simulation Model of the Spray Drift from Hydraulic Nozzles. *J. Agric. Eng. Res.*, 42, 135-147.

Miller P.C.H. (2000), Effects of some agricultural tank-mix adjuvants on the deposition efficiency of aqueous sprays on foliage. *Crop Prot.*, 19, 27-37.

Nairn J.J., Rorster W.A., leeuwen Van. (2013), Universal spray droplet adhesion model accounting for hairy leaves. *Weed Res.* <http://dx.doi.org/10.1111/wre.12039>, pp. 11.

Nation H. J. (1976), *Spray Nozzle Performance and Effects of Boom Height on Distribution*. NIAE Departmental Note DN/S/77/1925, pp. 27.

Nation H. J. (1978), *The Dynamic Behavior of Field Sprayer Booms: A technique for Field Measurement*. NIAE Departmental Note DN/S/814/09005, pp. 69.

Nation H. J. (1982), *The Dynamic Behavior of Field Sprayer Booms*. *J. Agric. Eng. Res.* 27, 61-70.

NUYTTENS D. (2007), *Drift from field crop sprayers: The influence of spray application technology determined using indirect and direct drift assessment means*, Thèse de doctorat, KUL.

Ooms D., Lebeau F., Ruter R., Destain M.-F. (2002), Measurements of the horizontal sprayer boom movements by sensor data fusion. *Computers and Electronics in Agriculture*, 33, 139-162.

Oppenheimer, Wolf, Donnelly, (1998), Possibilities for future EU environmental policy on plant protection products, Summary report PES-A/ phase2.

Ozkan H. E., Reichard D. L., Ackerman K. D. (1992), Effect of Orifice Wear on Spray Patterns from Fan Nozzles. *Transactions of the ASAE*, 35(4), 1091-1096.

Park H., Yoon S.S., Jepsen R.A., Heister S.D. and Kim H.Y. (2008), Droplet bounce simulations and air pressure effects on the deformation of pre-impact droplets, using a boundary element method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 32, 21-31.

Pochi D., Vannucci D. (2002), A System with Potentiometric Transducers to Record Spray Boom Movements under Operating Conditions. *Biosystems Engineering*, 82(4), 393-406.

Pochi D., Vanucci D. (1998), Spray distribution in function of boom movement. Experimental model validation with collecting test tubes, *Ag Eng 98*, Paper 96-A-006 Oslo, Norvège, pp. 8.

Ramon H., De Baerdemaeker J. (1997), Spray Boom Motion and Spray Distribution: part 1, Derivation of a mathematical relation. *J. Agric. Eng. Res.*, 66, 23-29.

Ramon H., Langenakens J. (1996), Model-based improvement of spray distribution by optimal positioning of spray nozzles. *Crop Protection*, 15(2), 153-158

Ramon H., Missotten B., De Baerdemaeker J. (1997), Spray Boom Motion and Spray Distribution: part 2, Experimental Validation of the Mathematical Relation and Simulation Results. *J. Agric. Eng. Res.*, 66, 31-39.

Reichard D.L., Cooper J.A., Bukovac M.J. and Fox R.D. (1998), Using a videographic system to assess spray droplet impaction and reflection from leaf and artificial surfaces. *Pesticide Science*, 53 (4), 291-299.

Reyssat M., Pépin A., Marty F., Chen Y. and Quéré D. (2006), Bouncing transitions on microtextured materials. *Europhysics Letters*, 74 (2), 306-312.

Rioboo R., Voué M., Vaillant A., De Coninck, J. (2008), Drop impact on porous superhydrophobic polymer surfaces. *Langmuir*, 24 (24), 14074-14077.

Schick R. J. (1997), An Engineer's Practical Guide to Drop Size. *Spraying Systems Co Bulletin*, 459, pp.25.

Sinfort C., Herbst A. (1996), Evaluation of the Quality of Spray Distribution from Boom Sprayers in Practical Conditions. *EPPO Bulletin*, 26, 27-36.

Šikalo Š., Marengo M., Tropea C. and Ganić E.N. (2002), Analysis of impact of droplets on horizontal surfaces. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 25, 503-510.



- Sinfort C., Lardoux Y., Miralles A., Enfalt P., Alness K., Andersson S. (1997), Comparison Between Measurements and Predictions of Spray Pattern from a Moving Boom Sprayer. *Aspects of Applied Biology*, 48, 1-8.
- Sirignano W.A. and Mehring C. (2000), Review of theory of distortion and disintegration of liquid streams. *Progress in Energy and Combustion Science*, 26 (4-6), 609-655.
- Smith B. D. (1992a), Uniformity and Recovery of Broadcast Spray Using Fan Nozzles. *Transactions of the ASAE*, 35(1), 39-44.
- Smith D. B. (1992b), A Proposal for Pre-Field Broadcast Spray Deposit Evaluations. *Transactions of the ASAE*, 35(1), 33-37.
- Smith D. B., Oakley D., Williams E., Kirkpatrick A. (2000a), Broadcast Spray Deposits from Fan Nozzles. *Applied Engineering in Agriculture*, 16(2), 109-113.
- Smith, D.B., Askew, S.D., Morris, W.H., Shaw, D.R., Boyette, M. (2000b), Droplet size and leaf morphology effects on pesticide spray deposition. *Trans. ASAE*, 43 (2), 255-259.
- Shuterud R., Nordby A., Tyldum A. (1988), Effect of application methods, spray volumes, pressures and herbicide rates on weed control in spring cereals. *Crop Prot.*, 7, 303-308.
- Solie J. B., Gerling F. (1984), A Spray Pattern Analysis System for ground Application patterns. ASAE paper N° 84-1002. St Joseph, Michigan, pp 8.
- Speelman L. (1971), A Fluorescent Tracer Technique for Determination of the Liquid Distribution of Field Crop Sprayers. *J. Agric. Res.*, 16(3), 301-304.
- Speelman L., Jansen J. W. (1974), The effect of Spray-boom Movement on the Liquid Distribution of Field Crop Sprayers. *J. Agric. Res.*, 19, 117- 129.
- Stainier C., Destain M.-F., Schiffers B. and Lebeau F. (2006), Droplet size spectra and drift effect of two phenmedipham formulations and four adjuvants mixtures. *Crop Protection*, 25 (12), 1238-1243.
- Stevens P.J.G. (1993), Organosilicone surfactants as adjuvants for agrochemicals. *Pest Sci.*, 38, 103-122.
- Stock D. (1997), Do we need adjuvants? Mechanistic studies and implications for future developments. In: *Proc. 50th N.Z. Plant Prot. Conf.*, pp. 185-190.
- Taylor P. (2011), The wetting of leaf surfaces. *Curr.Opin.Coll. Interface Sci.*,16 (4), 326-334.
- Tian L., Zheng J. (2000), Dynamic Deposition Pattern Simulation of Modulated Spraying. *Transactions of the ASAE*, 43(1), 5-11.
- Tomlin C. (2000), *The Pesticide Manual*. British Crop Protection Council, pp. 1276.

Van de Zande J. C., Michielsen J. M. G. P., Stallinga H., Porskamp H. A. J., Holterman H. J., Huijsmans J. F. M. (2002), Environmental risk control. *Aspects of Applied Biology*, 66, 165-176.

Tuck C.R., Ellis M.C.B., and Miller P.C.H. (1997), Techniques for measurement of droplet size and velocity distributions in agricultural sprays. *Crop Protection*, 16 (7), 619-628.

Vanucci D., Pari L., Fedrizzi M., Menesatti P. (1992), Study of an automatic system to determine the spraying boom lateral fluctuation. *Ag Eng 1992 Paper 9205113-Uppsala Suède*, pp 5.

Venzmer J. (2011), Superspreading e 20 year of physicochemical research. *Curr. Opin. Coll. Interface Sci.*, 16 (4), 335-343.

Wang L., Zhang N., Slocombe J. W., Thierstein G. E., Kuhlman D. K. (1995), Experimental Analysis of Spray Distribution Pattern Uniformity for Agricultural Nozzles. *Applied Engineering in Agriculture*, 11(1), 51 – 55.

Wang C.J., Liu, Z.Q. (2007), Foliar uptake of pesticides-present status and future challenge. *Pestic. Biochem. Physiol.*, 87, 1-8.

Wei C. (2009), Caractérisation de jets de pulvérisateurs par PTVS avec éclairage LED pulse. *TFE, FUSAgx*. pp 58.

Wenzel R. (1936), Resistance of solid surface to wetting by water. *Ind. Eng. Chem.*, 28 (8), 988-994.

Whitney R. W., Roth L. O. (1985), String Collector for Spray Pattern Analysis. *Transactions of the ASAE*, 28(6), 1749-1753.

Wilson M. (2003), *Optimising Pesticide Use*. John Wiley and Sons Ltd, England, ISBN 0-471-49075-X.

Wirth W., Storp S., Jacobsen W. (1991), Mechanisms controlling leaf retention of agricultural spray solutions. *Pestic. Sci.*, 33 (4), 411-420.

Yang X., Madden L.V., Reichard D.L., Fox R.D. and Ellis M.A. (1991), Motion analysis of drop impaction on a strawberry surface. *Agricultural and Forest Meteorology*, 56, 67-92.

Yarin A.L. (2006), Drop impact dynamics: splashing, spreading, receding. *Bouncing Annu. Rev. Fluid Mech.*, 38, 159-192.

Zabkiewicz J.A. (2007), Spray formulation efficacy - holistic and futuristic perspectives. *Crop Prot.*, 26, 312-319.

Zhang N., Wang L., Thierstein G. E. (1994), Measuring Nozzle Spray Uniformity Using Image Analysis. *Transactions of the ASAE*, 37(2), 381-387.

Zhu H., Dexter R. W., Fox, R. D., Reichard D. L., Brazee R. D., Ozkan H. E. (1997), Effects of Polymer Composition and Viscosity on Droplet Size of Recirculated Spray Solutions. *J. Agric. Eng Res.*, 67, 35-45.

## ANNEXE I : Détails du Programme utilisé MATLAB®

### Programme principal

C'est à partir de ce script qu'est lancé le programme et que sont encodés les paramètres propres à chaque fonction (taille d'un pixel, paramètres du suivi, emplacement des images sur le disque dur, ...). Le programme fait ensuite appel aux différentes fonctions de traitement et d'analyse d'image.

```
CARACTERISATION DE JETS
%-----
%INITIALISATION DES CONSTANTES ET PARAMÈTRES
%-----
clear all
goutte=[];
%Ouverture des images
nbreimg=10; %Nombre de paire d'images traitées
repertoire='D:\Image_Buse\Buse à fente CMC 2 Bars\10cm_001\'; %Selection du
fichier contenant les images (format : C:\....\)
list=dir(strcat(repertoire,'*.tif'));
img=extractfield(list,'name');
npimg=0; %Numéro de la première image utilisée
%Localisation et dimensionnement
reso=9.4e-6; %Taille d'un pixel [µm/pixel]
%Suivi
diff=.075; %Différence admise pour le diamètre lors du suivi [%/100]
angle=30; %Angle admis lors du suivi [°]
delai=1.2085e-4; %Délai entre deux images d'une même paire [s]
vmax=10; %Vitesse maximale dans le jet [m/s]
%TRAITEMENT D IMAGES: Correction de l'arrière fond
%-----
nim=50; %Nombre d'image utilisée pour constituer l'arrière fond moyen
for n=1:nim
X(:, :, n)=imread(strcat(repertoire,img{(2*n)-1}));
Y(:, :, n)=imread(strcat(repertoire,img{(2*n)}));
end
[x1,y1] = ArrierePlan(X,Y,n);
clear X Y
h = waitbar(0,'Please wait...'); %Initialisation de la barre de progression
%ANALYSE D IMAGES
%-----
for n=1+npimg:nbreimg+npimg %Nombre d'images analysées
waitbar(n / nbreimg+npimg ) %Actualisation de la barre de progression
%Ouverture des paires d'images et soustraction de l'arrière fond
ImageA=img{(2*n)-1};
ImageB=img{(2*n)};
A=imread(strcat(repertoire,ImageA));
B=imread(strcat(repertoire,ImageB));
a=uint8(255*double(A)./double(x1));
a=imadjust(a,stretchlim(a,0));
aa=imfilter(a,fspecial('gaussian',[5 5],2),'symmetric');
b=uint8(255*double(B)./double(y1));
b=imadjust(b,stretchlim(b,0));
bb=imfilter(b,fspecial('gaussian',[5 5],2),'symmetric');
%Selection et caractérisation des objets pour chaque image (diamètre,
%position)
[C1,D1]=Dimgoutte(A,a,reso,1);
```

```

[C2,D2]=Dimgoutte(B,b,reso,2);
%Suivi des gouttes entre les paires d'images (image A et B)
g=Suivi(C1,D1,C2,D2,ImageA,reso,diff,angle,vmax,delai);
%Création d'un ensemble de structure reprenant les caractéristiques de
%chaque goutte
goutte=[goutte g];
end
close(h) %Fermeture de la barre de progression
%GRANULOMETRIE
%-----
D=Granulometrie(goutte,delai,reso); %D est une variable contenant les
paramètres de position de la distribution granulométrique (DV10, DV50,
DV90, DMN)

```

### Fonction Arrière-Plan

```

function [x1,y1] = ArrierePlan(X,Y,nim)
% Classement des pixels par ordre croissant d'intensité
X=sort(X,3);
Y=sort(Y,3);
% Création de l'arrière-plan
x1(:, :)=X(:, :, round(nim*.8));
y1(:, :)=Y(:, :, round(nim*.8));
end

```

### Caractérisation des gouttes

```

%Localisation et dimensionnement des gouttes situées sur l'image
function [C,D,Dof]=Dimgoutte(image,imagepos,reso,nim)
%Initialisation des variables
se=strel('disk',3);
sel=strel('disk',4);
%Calcul des gradients
[~,~,FX,FY]=edge(imagepos,'sobel');
Grad=sqrt(FX.^2+FY.^2);
%Localisation des gouttes sur base des gradients
Grad1=abs(Grad);
Grad2=imfill(Grad1,'holes');
Grad2=Grad2*(255/max(Grad2(:)));
Grad3=im2bw(uint8(Grad2),.1);
Grad4=imerode(Grad3,se);
Grad5=imdilate(Grad4,se);
Grad6=imclearborder(Grad5);
Grad7=logical(Grad6);
d=regionprops(Grad7,'Centroid','Area','EquivDiameter','PixelIdxList','Extrema');
%Coordonnées des centres et diamètres des gouttes localisées
centre=cat(1,d.Centroid);
diametre=cat(1,d.EquivDiameter);
%Prélocation des matrices
taille=size(diametre,1);imgoutte=cell(taille,1);imgouttepos=cell(taille,1);
Dia=zeros(taille,1);Centre=zeros(taille,2);Circ=zeros(taille,1);DOF=zeros(taille,1);
Select=zeros(taille,1);
%Création des sous images sur base des gouttes localisées
for j=1:taille
ind1=round((centre(j,2))-diametre(j)*2/3);
ind2=round((centre(j,2))+diametre(j)*2/3);
ind3=round((centre(j,1))-diametre(j)*2/3);
ind4=round((centre(j,1))+diametre(j)*2/3);
if ind1<1
ind1=1;
end
end

```

```

if ind2>1024
ind2=1024;
end
if ind3<1
ind3=1;
end
if ind4>1280
ind4=1280;
end
imgouttepos{j}=imagepos(ind1:ind2,ind3:ind4);
imgoutte{j}=image(ind1:ind2,ind3:ind4);
c=[ind3 ind1 ind4-ind3 ind2-ind1];
%Caractérisation individuelle de chaque sous image (taille, position)
%par filtre de Canny
[BW]=edge(imgoutte{j},'canny');
BW1=imclose(BW,se1);
BW2=imfill(BW1,'holes');
BW3=imclearborder(BW2);
d=regionprops(logical(BW3),'Centroid','Area','Perimeter');
if size(d,1)==1
Centre(j,:)=d.Centroid+[c(1) c(2)];
Aire=d.Area;
Dia(j)=((2*sqrt((Aire)/pi))-1)*reso;
Circ(j)=d.Area*4*pi/(d.Perimeter)^2;
elseif size(d,1)>1
[D I]=max(extractfield(d,'Area'));
Dia(j)=((2*sqrt(D/pi))-1)*reso;
Centre(j,:)=d(I,:).Centroid+[c(1) c(2)];
Circ(j)=d(I).Area*4*pi/(d(I).Perimeter)^2;
else
Dia(j)=0;
Centre(j,:)=[0 0];
Circ(j)=0;
end
%Calcul du paramètre de focalisation pour chaque sous image
[inf] = Nettete(imgoutte{j},Dia(j));
%Sélection des gouttes conservées pour le suivi, la sélection est plus
%tolérante pour la deuxième image de chaque paire (présentant
%généralement un contraste plus faible)
if nim==1
[Select(j) ~]=Selection(inf,Dia(j)*10^6,Circ(j));
else
[Select(j) ~]=Selection(inf*1.6,Dia(j)*10^6,Circ(j));
end
end
ind=find(Select==1);
C=Centre(ind,:);
D=Dia(ind);
Dof=DOF(ind);
End

```

## Netteté

```

%Calcul du critère du paramètre de focalisation (Lecuona et al, 2000)
function [inf] = Nettete(Img,dia)
%Calcul des gradients sur l'image
gv = imfilter(double(Img),fspecial('sobel')'/8,'replicate');
gh = imfilter(double(Img),fspecial('sobel') /8,'replicate');
Grad=sqrt(gv.^2+gh.^2);
%Classement des valeurs de gradient par ordre décroissant
Grad=sort(Grad(:),'descend');
Peri=dia*pi/(9.6e-6);

```

```

a=round(Peri/2)-3;b=round(Peri/2)+3;
if a<1
a=1;
end
if b>size(Grad,1)
b=size(Grad,1);
end
%Calcul du gradient moyen en bordure la goutte à partir d'un filtre de
%rang basé sur le périmètre
Gradmax=mean(Grad(a:b));
%Classement de l'intensité lumineuse par ordre décroissant en vue de
%calculer l'intensité de la goutte et de l'arrière plan
ImgBack=double(sort(Img(:)));
Taille=size(ImgBack,1);
%L'intensité lumineuse de la particule est égal à la moyenne des 10
%intensités lumineuse les plus faible
Imin=mean(mean(ImgBack(1:10)));
%L'intensité lumineuse de l'arrière-plan est calculé à partir d'une
%filtre de rang
IBack=mean(ImgBack(round(0.80*Taille):round(0.9*Taille)));
%Calcul du paramètre de focalisation
K=10^5;
Gradcomp=abs((Imin-IBack))/dia;
inf=K*Gradmax/Gradcomp;
end

```

## Sélection

```

%Fonction selection
%-----
%Sélection des gouttes à partir de leur degré de focalisation et de leur
taille. La relation entre le seuil utilisé et la
%taille de la goutte est établi par calibration du système optique
%(acquisition à différentes distances du plan focal de particules de taille
%connues).
function [Select Seuil]=Selection(inf,Dia,circ)
if Dia==0
Select=0;
I=0;
return
end
Seuil=0.0166*Dia+1;
if inf>Seuil && circ<=1.25 && circ>=0.8 && Dia>=35
Select=1;
else
Select=0;
end
end

```

## Fonction Suivi

```

%Suivi des gouttes
%-----
function [goutte]=Suivi(C1,D1,C2,D2,image,reso,diff,angle,vmax,delai)
%Initialisation des variables et paramètres
g=0;
goutte=[];
depmax=vmax*delai/reso; %Déplacement maximum exprimé en pixel
angle=angle*pi/180; %Expression de l'angle maximal admis entre le
déplacement d'une goutte et la direction de l'écoulement en radian
if abs(isempty(C1)-1) && abs(isempty(C2)-1) %Vérification que les vecteurs
contient des valeurs
for j=1:size(C1,1) %Indice de l'image paire

```

```

ind=[];
%Calcul du critère de déplacement (distance et direction)
c1=[C1(j,1)*ones(size(C2,1),1) C1(j,2)*ones(size(C2,1),1)];
a=c1-C2;
dx=a(:,1); %Distance en x
dy=a(:,2); %Distance en y
dist=sqrt(dx.^2+dy.^2); %Calcul de la distance entre les gouttes
ind1=find(atan(abs(dx./dy))<angle & dy<0 & dist<depmax); %Indice des
gouttes répondant au critère de déplacement
if size(ind1,1)>0
%Calcul du critère de diamètre
d1=D1(j)*ones(size(ind1,2),1);
deltadia=abs(d1'-D2(ind1))/d1(1); %Calcul de la différence de diamètre
entre les gouttes
ind2=find(deltadia<diff); %Indice des gouttes répondant au critère de
diamètre
ind=ind1(ind2);
%Intersection des critères
if size(ind,1)>1 %Si plusieurs gouttes répondent aux critères
[~, i]=min(deltadia(ind2));
ind=ind1(i);
end
end
%Création de la structure contenant les caractéristiques de la
%paire de gouttes identifiée
if isempty(ind)
else
%Création d'une structure reprenant le diamètre, le volume, le
%déplacement, la position, la vitesse ainsi que l'image
%surlaquelle est l'apparait pour chaque goutte
g=g+1;
goutte(g).diametre=D1(j);
goutte(g).diametremoy=(deltadia(ind2));
goutte(g).volume=((D1(j)/2)^3)*pi*4/3;
goutte(g).deplacement=dist(ind);
goutte(g).centre=[C1(j,:);C2(ind,:)];
goutte(g).vit=dist(ind)*reso/delai;
goutte(g).image=image;
end
end
end
end

```

## Granulométrie

```

%Correction des fractions volumiques et représentation graphique de la
%granulométrie
function D=Granulometrie(goutte,delai,reso)
%Extraction des paramètres de la structure "goutte"
%-----
Dia=extractfield(goutte,'diametre');
Vol=extractfield(goutte,'volume');
Vit=extractfield(goutte,'vit');
%Correction des fractions volumiques
%-----
Fcor=Correction(Vit,Dia,delai,reso);
%Mise en graphique de la correction en fonction du diamètre
%-----
a=[Fcor;Dia*10^6];
a=a';
b=sortrows(a,2);

```



```

figure,plot(b(:,2),b(:,1)),title('Facteur correctif en fonction du
diamètre'),xlabel('Diamètre [µm]'),ylabel('Facteur correctif')
%Graphique diamètre/vitesse en échelle logarithmique
%-----
figure,loglog(Dia*10^6,Vit,'*'),title('Vitesse en fonction du
diamètre'),xlabel('Diamètre [µm]'),ylabel('Vitesse [m/s]')
xlim([0 1000]),ylim([1e-1 1.5e1])
%Création de vecteur classé de volume et diamètre
%-----
d1=sort(Dia)*10^6;
v1=sort(Vol);
v2=cumsum(v1);
v3=100*v2/(sum(v1)); %Volume relatif cumulé
vc1=Vol.*Fcor;
vc2=sort(vc1);
vc3=cumsum(vc2);
vc4=100*vc3/sum(vc2); %Volume relatif corrigé cumulé
D.V10=mean(d1(vc4<10.5 & vc4>9.5));
D.V50=mean(d1(vc4<50.5 & vc4>49.5));
D.V90=mean(d1(vc4<92.5 & vc4>87.5));
D.VM=median(d1);
%Création des classes
%-----
i=0;
for classe=0:50:700
i=i+1;
X(i)=classe;
ind= Dia*10^6>classe & Dia*10^6<classe+25;
Vitmoy(i)=mean(Vit(ind));
Vitecart(i)=std(Vit(ind));
Y(i)=sum(Vol(ind));
end
figure,[AX,h1,h2]=plotyy(X,100*Y/sum(Y),d1,v3,'bar','plot');
set(h2,'color','red')
set(get(AX(1),'Ylabel'),'String','Volume relatif [%]')
set(get(AX(2),'Ylabel'),'String','Volume relatif cumulé [%]')
set(AX(2),'Ycolor','r')
set(AX(1),'YColor','b')
xlabel('Diamètre [µm]');
title('Volume en fonction du diamètre');
set(AX(1),'xlim',([0 600]),set(AX(2),'xlim',([0 600]))
%Volume corrigé
%-----
volcor=Vol.*Fcor;
i=0;
for classe=0:50:700
i=i+1;
ind=find(Dia*10^6>classe & Dia*10^6<classe+25);
Y(i)=sum(volcor(ind));
FCOR(i)=mean(Fcor(ind));
vit(i)=mean(Vit(ind));
end
figure,[AX,h1,h2]=plotyy(X,100*Y/sum(Y),d1,vc4,'bar','plot');
set(h2,'color','red')
set(get(AX(1),'Ylabel'),'String','Volume relatif corrigé [%]')
set(get(AX(2),'Ylabel'),'String','Volume relatif corrigé cumulé [%]')
xlabel('Diamètre [µm]');
set(AX(2),'Ycolor','r')
set(AX(1),'YColor','b')
set(AX(1),'xlim',([0 600]),set(AX(2),'xlim',([0 600]))
title('Volume corrigé en fonction du diamètre');

```

```

%Graphique vitesse en fonction du diamètre
%-----
figure;plot(X,vit,'k--')
xlim([0 600])
ylim([0 10])
xlabel('Diamètre [µm]'),ylabel('Vitesse [m/s]')

```

### Correction des fractions volumiques

```

%Correction des fractions volumiques
%-----
%Calcul du champ de vision corrigé et de la profondeur de champ en fonction
%de la vitesse et de la taille des gouttes.
function [Corf]=Correction(vit,Dia,delai,reso)
FOV=((1024*reso-(Dia/2))-(vit*delai)).*((1280*reso-(Dia/2)));
DOF=Dia*10^6*.002309+.3655; %Relation établie sur base de la calibration du
système de mesure
P=(FOV.*DOF./vit);
Corf=1./P;

```

### Calcul de la taille d'un pixel à partir de la mire USAF 1951

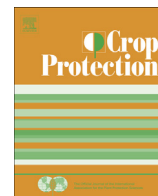
```

%Fonction résolution
%-----
%Fourni la résolution du système d'acquisition d'images
% à partir d'une image de la buse USAF 1951
function [resolution]=Resolution(image,groupe,element)
%Création du vecteur contenant le nombre de paire de ligne par mm en
%fonction du groupe et de l'élément
linepair=zeros(6,7);
for i=1:7
for j=1:6
linepair(j,i)=((1*2^(i-1))/(2^(-(j-1)/6)));
end
end
%Ouverture de l'image
figure,imshow(image)
%Clic sur les deux lignes blanches les plus proches d'un élément
[X Y]=getpts;
close
%Binarisation de l'image
imbw=im2bw(image,.5);
%Extraction du centre des objets
imlab=logical(imbw);
d=regionprops(imlab,'Centroid');
centre=cat(1,d.Centroid);
%Calcul des distances entre chaque objet et les deux clics
obj1=[[X(1)*ones(size(centre,1),1) Y(1)*ones(size(centre,1),1)]];
obj2=[[X(2)*ones(size(centre,1),1) Y(2)*ones(size(centre,1),1)]];
dist1=sqrt((obj1(:,1)-centre(:,1)).^2+(obj1(:,2)-centre(:,2)).^2);
dist2=sqrt((obj2(:,1)-centre(:,1)).^2+(obj2(:,2)-centre(:,2)).^2);
%Identification de l'objet le plus proche
[~, ind1]=min(dist1);
[~, ind2]=min(dist2);
centre1=centre(ind1,:);
centre2=centre(ind2,:);
%Calcul de la distance entre deux lignes blanches
distance=sqrt((centre1(1,1)-centre2(1,1)).^2+(centre1(1,2)-
centre2(1,2)).^2);
%Calcul de la résolution en µm
resolution=((1/linepair(element,groupe+1))/distance)*1000;
end

```

## Calcul de la carte des déplacements

```
%Déplacement
%-----
%Dessine la carte de déplacement des gouttes à partir des positions des
%gouttes sur les paires d'images.
function Deplacement(goutte,x1)
%Arrière fond de l'image
figure,imshow(x1);hold on;
for n=1:size(goutte,2)
G=goutte(n);
%Dessin de la goutte (cercle de même diamètre)
radius=round(G.diametre(1)/(2*9.6*10^-6));
center1=round(G.centre(1,:));
THETA=linspace(0,2*pi,50);
RHO=ones(1,50)*radius;
[X,Y] = pol2cart(THETA,RHO);
X=X+center1(1);
Y=Y+center1(2);
plot(X,Y,'-g');
%Dessin du déplacement
center2=round(G.centre(2,:));
line([center1(1) center2(1)],[center1(2) center2(2)],'color','w')
line([center2(1)-5 center2(1)],[center2(2)-5 center2(2)],'color','w')
line([center2(1)+5 center2(1)],[center2(2)-5 center2(2)],'color','w')
end
end
```



## Contribution of spray droplet pinning fragmentation to canopy retention



H.H. Boukhalfa<sup>a,b</sup>, M. Massinon<sup>a</sup>, M. Belhamra<sup>b</sup>, F. Lebeau<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>UMC, Gembloux Agro-Bio Tech, University of Liege, Passage des Déportés, 2, B-5030 Gembloux, Belgium

<sup>b</sup>University Mohamed Khidar, BP 145 RP, 07000 Biskra, Algeria

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 19 July 2013

Received in revised form

5 November 2013

Accepted 9 November 2013

#### Keywords:

Pinning fragmentation

Retention

Drop impact

Splashing

Wenzel wetting regime

### ABSTRACT

Drop behaviour during impact affects retention. Increasing adhesion is usually seen as an objective when applying crop protection products, while bouncing and shattering are seen as detrimental to spray retention. However, observation of drop impacts on barley (*Hordeum vulgare* L.) using high speed shadowgraphy shows that bouncing and fragmentation can occur in Cassie–Baxter as well as in Wenzel wetting regimes. In this last regime, a part of the drop may remain stuck on the surface, contributing to retention. Using simultaneous measurements of drop impacts with high speed imaging and of retention with fluorophotometry for spray mixtures on excised barley leaves using a Teejet 11003 nozzle at 0.2 MPa, it was observed that about 50% of the drops that fragmented in the Wenzel state remain on the horizontal leaf. Depending on the spray mixture, these impact outcomes accounted for 28–46% of retention, the higher contribution being correlated with bigger VMD (Volume Median Diameter). This contribution is not negligible and should be considered when modelling spray retention processes.

© 2013 Elsevier Ltd. All rights reserved.

### 1. Introduction

The efficiency of pesticide application methods has been a concern for decades. Numerous studies have addressed the issue using an experimental approach based either on pest control trials using various application technologies and settings, or on retention studies using chemical tracers (Shuterud et al., 1988). Stevens (1993) addressed primary adhesion effects showing that velocity and droplet size gave a high degree of correlation with adhesion. Model track sprayer studies have led to the design of models to explain the retention effect (Stock, 1997). Interpretation of these trials is always tricky because of the numerous parameters involved. However, most of the relevant parameters governing the retention process have been identified including, for example, the following (Wilson, 2003): drop velocity and diameter, resulting from application rate, forward speed, pressure and nozzle or atomizer type; spray formulation properties such as dynamic surface tension, dynamic viscosity, etc.; target surface properties such as plant species, leaf angle, hydrophobicity and growth stage. These parameters have been the foundation of a universal spray droplet adhesion model (Forster et al., 2005) based on four easily measured variables; dynamic surface tension, static contact angle for a 50%

water-acetone solution, droplet velocity and impact angle that predict spray droplet adhesion at initial contact with a leaf surface. Such models are still refined to include new parameters as hairs (Nairn et al., 2013). Maximising pesticide application efficiency therefore requires good control of droplet size and velocity distributions (Butler Ellis et al., 1997). Drift-reducing adjuvants and many other adjuvants used to improve droplet behaviour on the target influence spray formation, droplet transport to the target and droplet interaction with the target (Butler Ellis et al., 1999).

In order to evolve a better comprehension of pesticide application efficiency, it has been proposed that treatments should be divided into appropriate models of each successive step of deposition, retention, uptake and translocation (Zabkiewicz, 2007) and process driven models based on detailed fundamental studies developed that may substitute to laboratory screening methods, empirical tests and field trials. A global process-based efficacy model is still far from being achieved. However, substantial effort in this direction is underway. Amongst these processes, the wetting of leaf surfaces has long been known to govern retention and been the subject of numerous theoretical studies on lotus effect or super-hydrophobicity (Caviezel et al., 2008). Mechanisms for the wetting of leaf surfaces by agrochemicals are reviewed in Taylor (2011). Surface roughness enhances the hydrophobicity of the material compared to Young's ideal model. The theory of wetting for rough surfaces is often described by two models based on Young's equation:

\* Corresponding author. Tel.: +32 81 62 21 65.

E-mail address: [f.lebeau@ulg.ac.be](mailto:f.lebeau@ulg.ac.be) (F. Lebeau).

- Wenzel sticking or pinning wetting regime (Wenzel, 1936) where an increase in the surface area is observed due to the micro-texture, describes when the liquid fills the rough grooves completely and replaces the air trapped in the surface roughness to fit into the microstructure of the material.
- Cassie–Baxter wetting regime (Cassie and Baxter, 1944) describes the wetting of rougher (porous) surfaces where air pockets are trapped on the surface texture beneath the liquid. The drop contacts only the top of the surface asperities.

Retention and distribution of spray drops within the canopy have a direct effect on the biological efficacy of pesticides. For instance, higher spray deposition on the target leaves will likely result in more uptake by the plant in the case of a systemic pesticide and less pesticide available for environmental contamination (Smith et al., 2000). In order to maximise spray retention, droplets should remain on the plant at first impact.

Retention studies are an old story (Furmidge, 1962; Wirth et al., 1991) but they nevertheless have benefited recently from developments in theoretical physics, mainly because of industrial interest in self-cleaning surfaces as well as technical developments in artificial substrate synthesis. Customisable synthetic superhydrophobic substrates offer new tools to investigate the effect of the various geometrical and chemical parameters involved in drop impacts outcomes (Rioboo et al., 2008). These studies have resulted in phenomenological phase diagrams (Fig. 1) that map the transition from adhesion to bouncing and finally splashing for increasing impact energy according to Wenzel surface roughness, a topographical parameter (Massinon and Lebeau, 2013). For low roughness, a drop with low kinetic energy is deposited in the Wenzel state. By gradually increasing its kinetic energy, the drop is fragmented with a fraction of the droplet adhering at the impact point. Depending on the impact energy, a single satellite drop (referred to as 'partial rebound') or several satellite drops (referred to as 'pinning fragmentation') can leave the surface, whereas the rest of the drop adheres to the impact point. For intermediate Wenzel roughness, low velocity drops adhere in a Cassie–Baxter regime. With increasing speed, the drop bounces completely. If impact pressure is great enough, depending on liquid surface tension, the liquid can penetrate the surface roughness, modifying the outcome

from Cassie–Baxter to Wenzel wetting regime. Thus, sticking, partial rebound or pinning fragmentation outcomes can be observed. Finally, for higher Wenzel roughness, a drop can, depending on impact velocity, adhere in a Cassie–Baxter regime, rebound or shatter completely. If it splashes, all of the liquid is shattered into numerous satellite drops that leave the surface with no fraction of the drop remaining at the point of impact. Further information about droplet impact can be found in Yarin (2006).

As three outcomes are possible when a droplet impacts a leaf surface: adhesion, bouncing or splashing, these have a direct influence on spray retention. Leaf morphology plays an important role in spray deposition because different leaf structures such as waxes, hairs, edges and veins are important impingement and retention variables (Smith et al., 2000). Drops that bounce or splash can continue their journey through the canopy until a new interception by the plant or the ground (Cox et al., 2000). Physical process-based retention models based on drop bouncing, adhesion and splashing have been described (Mercer et al., 2010). This has allowed differences in total spray retention to plants, due to the spray formulation used or vegetative species studied, to be predicted (Forster et al., 2010) and included in a spray application software (Forster et al., 2012). This method was used to illustrate the effect of different spray formulation and application parameters on predicted retention and compared with measured retention. This approach proved very successful (Forster et al., 2013) but some increase of retention with the decrease of DST was not accounted for on barley. Indeed, in these models, splashing was considered to occur in the Cassie–Baxter wetting regime and to leave no residue on the plant. It has been observed using droplets produced by agricultural sprays that this simplification of the reality may result in systematic modelling errors, especially when surfactants are used, the most widely used adjuvant type in agrochemical applications and the most efficient in enhancing their efficacy (Wang and Liu, 2007). Indeed, surfactants affect the physicochemical properties of spray droplets in terms of their ultimate impaction and spreading behaviour (Holloway et al., 2000). This results in a transition from Cassie–Baxter to Wenzel regime on difficult-to-wet species. Therefore a significant part of fragmentation outcomes may occur in Wenzel regime. This pinning fragmentation results in a deposit of a fraction of the drop during impact. This partial splash

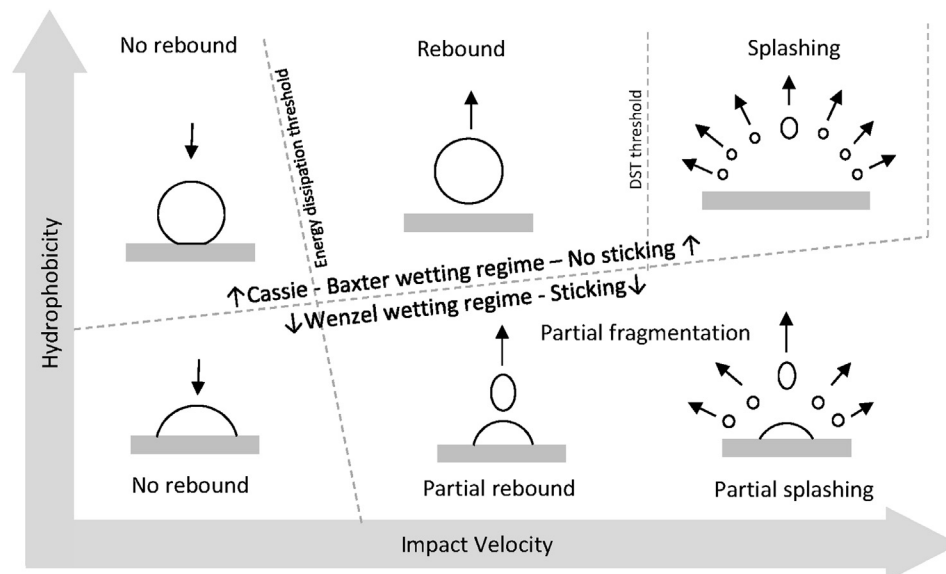


Fig. 1. Impact phase diagram for a drop depending on leaf hydrophobicity and droplet impact velocity.

may need to be accounted for in models for retention but the sticking proportion must be evaluated. This paper addresses this issue. The objective was to assess the contribution of pinning fragmentation to spray retention on barley leaves (*Hordeum vulgare* L.). The methodology relies on the simultaneous observation of impacts by high speed imaging of drops delivered by an agricultural nozzle and fluorescent tracer analysis of deposits.

## 2. Materials and methods

### 2.1. Test bench

A laboratory test bench was developed to record droplet impacts using high speed shadowgraphy (Massinon and Lebeau, 2012a). It consists of a spray nozzle mounted on a linear actuator with track roller guidance system and toothed belt drive unit and moved at constant speed above a spray area using a servo-motor and controller. A constant pressure was applied to the fluid using a pressurised vessel and controlled using a pressure gauge measurement at the nozzle level. A high speed camera (Y4 CMOS, Integrated Design Tools) records the droplet impacts on the target at 20,000 frames per second using backlighting to maximise the contrast and allow a good identification of drop impacts. A LED lighting (19-LED Constellation, Integrated Design Tools) with a beam angle of 12.5° was placed 500 mm behind the target surface to provide both high illumination and uniform background to the images. The lighting was used in a pulsed mode and triggered by the image acquisition. The optical system (12× zoom system, Navitar) offers a working distance of 341 mm and 11.47  $\mu\text{m pixel}^{-1}$  spatial resolution. A background correction was performed before tests with embedded camera software (Motion Studio, Integrated Design Tools) to provide a homogeneous image. A signal from the controller was used to trigger the camera recording. The measurement zone was about 2 mm high by 10 mm long. A linear translation stage was used to adjust the position of the horizontal barley leaf sample in the camera focal plane. In this configuration, drop size and velocity can be measured just before impact using image analysis and impact outcome observed. Leaves excised longitudinally 3 mm wide were fixed horizontally using tape between the two arms of a U-shaped bracket. Only the central part of the leaf samples (10 mm long) located between the arms and not laying on any support were used for imaging and chemical analysis. The leaf was fixed without stretching, free to bend between the fixation points. As consequence, airflow is similar to the one encountered by a horizontal leaf. Droplets missing the leaf were not considered.

### 2.2. Image analysis and data processing

In this step, velocities and sizes of impacting droplets are computed by a Particle Tracking Velocimetry Sizing (PTVS) Matlab algorithm developed by Massinon and Lebeau (2012a). The impact type and the splashing proportions retained by the leaf are determined by the operator. No rebound on initial impact either sticking or no sticking (Wenzel or Cassie–Baxter regime) was counted as adhesion; fragmentation with no visual evidence of a part of the droplet remaining on the surface where it impacted was counted as splashing in the Cassie–Baxter regime, while partial rebound and partial splashing leaving evidence of the droplet where it impacted is considered partial fragmentation in the Wenzel regime; complete rebound was counted as rebound in the Cassie–Baxter regime; the droplets that were not suited to computer processing because of field of view limitation – the border of some big droplets touching the edge of the image – were processed by the operator on the basis of a manual determination of the droplet centre and diameter and added to the results tables.

Because of evaporation, fluorescein concentrations in drops increase before impact depending on drop diameter and ambient conditions. Therefore, initial diameter is needed to determine the fluorescein quantity impacting the leaf on the basis of initial fluorescein concentration in the spray mixture. Initial drop sizes were calculated in a Matlab algorithm on the basis of the evaporation model developed by Guella et al. (2008) using the measured diameter 50 cm below the nozzle as input. Initial exit velocity from the nozzle was set at 15 m/s, and ambient conditions of the spray chamber were measured to take into account the experimental conditions and properly compute the initial droplet diameter.

### 2.3. Trials

Trials were performed using a Teejet XR11003VK nozzle at 0.2 MPa, 0.96 l/min, typically producing a fine to medium spray covering the 50–600  $\mu\text{m}$  range of drop diameters. The nozzle was moved at 2 m/s, corresponding to 160 l/ha application rate for 50 cm nozzle spacing. Three spray mixtures were tested:

- Tap water + 1% mass natrium fluorescein,
- Tap water + 0.1% Vol/Vol Break Thru S240® (Evonik Industries AG, Essen, Germany) + 1% mass natrium fluorescein,
- Tap water + 0.25% Vol/Vol Li-700 (350 g/l Soyal phospholipids 350 g/l propionic acid, United Agri Products Inc), +1% mass natrium fluorescein.

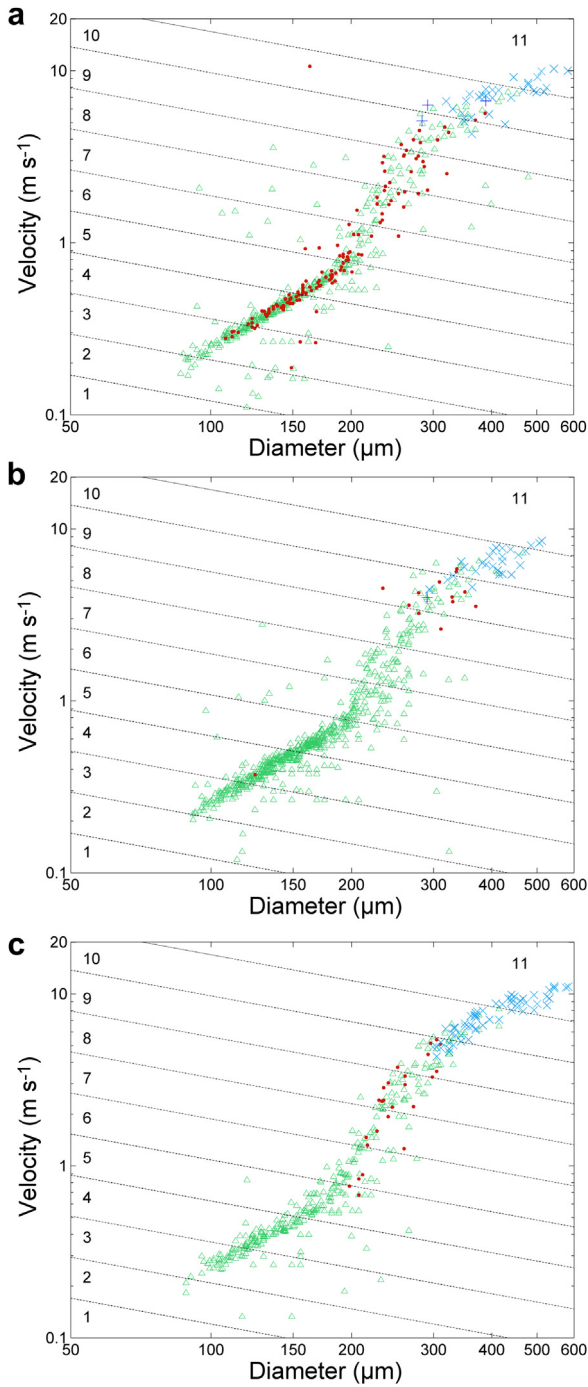
Sprays were performed on the test bench at 18 °C temperature and 40% relative humidity. Ten sample slices 10 mm long, 3 mm wide excised from barley leaves were sprayed for each tank mix tested. The barley was grown indoor at 23 °C under Metal Halide lamps at 200  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  on expanded clay pebbles using hydroponic nutritive solution. High speed shadowgraphy videos of spray impacts were recorded for image analysis. Each leaf sample sprayed was transferred in 20 ml of  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  (8.71 g/l) solution and kept in a dark refrigerated box until analysis. Each solution was analysed using a spectrophotometer (RF-1501, Shimadzu Corporation) at 460 nm excitation wave length and 540 nm emission wave length in order to quantify the spray mixture retained by the leaf samples. A calibration curve was performed for each spray mixture as adjuvants influence fluorometry measurements.

## 3. Results and discussion

### 3.1. Observed impact outcomes

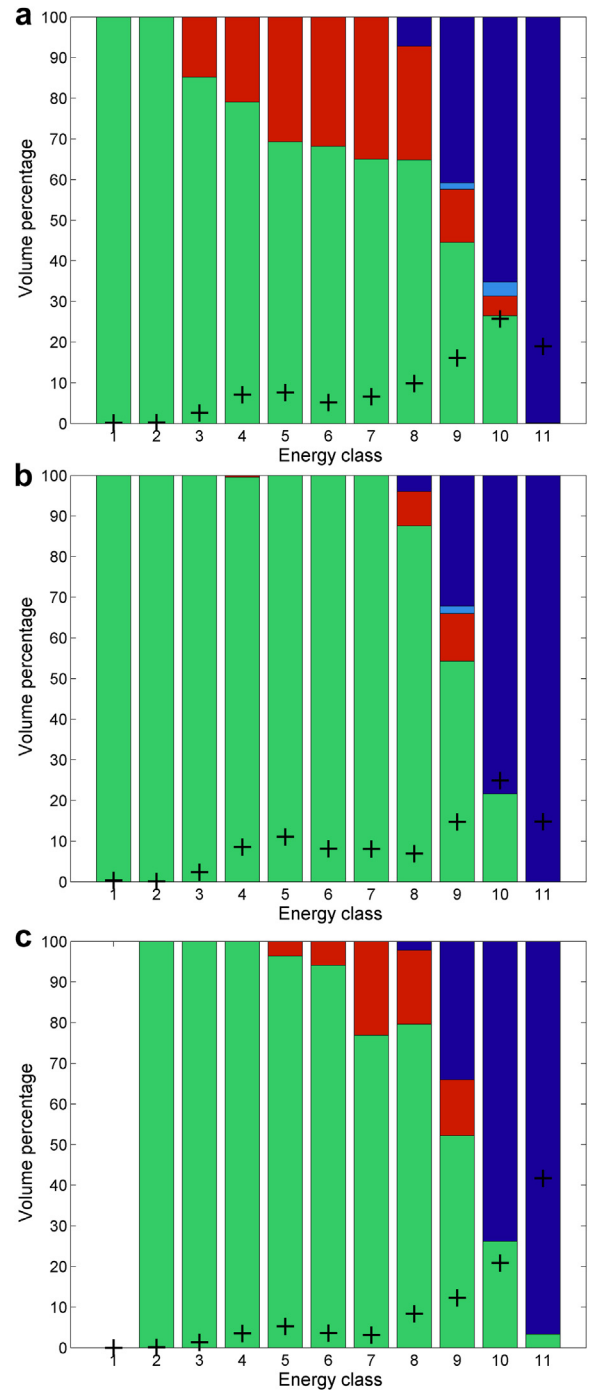
Fig. 2a–c presents the impact outcomes observed using the high speed imaging for the three spray mixtures. The diagrams are in a log–log scale for a clear representation of the wide drop size and speed. In such a graph, a constant Weber number corresponds to a straight line with a  $-0.5$  slope. The Weber number was computed for all formulations as  $\rho V^2 D / \sigma$  with  $\rho$  the fluid density,  $V$  the drop velocity,  $D$  the drop diameter,  $\sigma$  water static surface tension (72.2 mN/m). Eleven water Weber number energy classes separated by a 3 times increase of Weber number transition lines are shown on the graphs. The first limit was set to a 0.02 Wb number. This way, an energy scale that depends only on the physical parameters of the drops is created.

In trials with water (Fig. 2a) four different impact outcomes are observed. Adhesion is the only outcome for lower energy impacts (Weber energy classes 1 and 2 on the graph). For droplets as small as 150  $\mu\text{m}$  and as slow as 0.3  $\text{m s}^{-1}$  up to 300  $\mu\text{m}$  and 4  $\text{m s}^{-1}$  (Weber energy classes 3 to 8 on the graph), we observe a coexistence of drop adhesion and bouncing on a wide range of situations. This behaviour is clearly not what is expected if a clear transition



**Fig. 2.** Impact outcomes extracted from 10 trials:  $\Delta$  adhesion,  $\bullet$  rebound,  $+$  fragmentation in Cassie–Baxter regime,  $\times$  fragmentation in Wenzel regime - as a function of drop speed and diameter on horizontal barley leaf slice, Teejet XR11003VK, 0.2 MPa, 50 cm height, 2 m/s forward speed; a) Water, b) Water - Break Thru S240 0.1% v/v, c) Water - Li 700 0.25% v/v; inner Y-axis labels refer to the water Weber Number energy classes bordered by tilted dashed lines.

between adhesion and bouncing is stated. On some species such as barley, the high variability of the leaf surface results in a coexistence of both behaviours over a wide range of impact energies. This behaviour is usually taken into account using either a logistic regression in empirical models (Forster et al., 2005) or on the basis of advancing and receding angles for process-driven ones (Mercer et al., 2010). For diameters and speeds of about 300  $\mu\text{m}$  and 4 m/s range corresponding approximately to Weber energy class 9,



**Fig. 3.** Impact outcomes volumetric percentage as a function of Weber energy class on horizontal barley leaf slice -  $\square$  adhesion,  $\square$  rebound,  $\square$  fragmentation in Cassie–Baxter regime,  $\square$  fragmentation in Wenzel regime,  $+$  volume percentage in this class - a) Water, b) Water Break Thru S240 0.1% v/v, c) Water Li 700 0.25% v/v.

splashing appears in both Cassie–Baxter and Wenzel wetting regime as well as adhesion and rebound. For higher speed and diameters, corresponding to Weber energy class 11, only splashing, mainly in Wenzel regime occurs resulting in considerable pinning fragmentation. The observed behaviour is clearly not a simple transition at a fixed threshold. Some plants such as black-grass [*Alopecurus myosuroides* HUDS. (ALOMY)] for instance present a much clearer transition between the different possible impact outcomes (Massinon et al., 2012). The coexistence of bouncing and

adhesion may be related to the low high variability of contact angles at the scale of drops for the adaxial barley leaf surface, as observed by Mercer et al. (2010). The same coexistence has been observed for outdoor grown winter wheat (Massinon and Lebeau, 2012b). The splashing in the Wenzel regime is prevalent for the same reason. When the Break Thru S240 is added to the solution (Fig. 2b), rebound disappears up to drops of about 300  $\mu\text{m}$  and 3  $\text{m s}^{-1}$ , corresponding to energy class 8. This behaviour is the result of the low dynamic surface tension of this super-spreader organosilicone adjuvant. The bouncing outcomes are not observed anymore under this limit on this very difficult-to-wet surface, confirming the still poorly understood high superwetting efficacy of this superspreader (Venzmer, 2011). The Cassie Baxter regime is seldom observed in Weber energy class 9, with little bouncing and only a single splash observed.

Fig. 2c presents the results for Li 700, a more traditional adjuvant and that appears a less efficient wetting agent at the timescale of drop impact. The effect on the adhesion-rebound transition is therefore limited to about 200  $\mu\text{m}$ , 0.7  $\text{m/s}$  drops corresponding approximately to energy class 5/6, offering a significant increase comparatively to water but far from Break-thru S240 performance. However, splashing in Cassie–Baxter regime disappears, what may be linked to the increase of the contact surface with the drop diameter. Fig. 3a–c present the relative volumetric percentage for each impact outcome depending on eleven energy classes for the three spray formulations. These histograms typically summarize the information extracted by high speed imaging in a convenient form that offers a statistical view of droplet behaviours as a function of energy class for a spray formulation/surface combination. Such histograms could be used when modelling the capture of spray by the canopy. It is also very clear that the modification of the fragmentation threshold by surface active adjuvants is of a much lower importance than for the adhesion-bouncing transition. In addition, the volumetric percentages in each energy class are represented in histograms (+). This information coupled with the impact outcome determines the retention in the field. The final retention is therefore a sum of all the volumes in each impact outcome weighted by the relative volume proportion of each energy class. On Fig. 3a–c, it can be seen that the major part of the spray is located within the energy classes 10 and 11, proving the magnitude of errors in neglecting the fraction of droplet pinned on the surface during an impact.

Table 1 presents some average parameters observed during the trials for the three spray formulations. As expected, the total volume of drops ( $V_{\text{tot}}$ ) measured for 10 trials immediately before spray impact is very similar between formulations because the same application rate was used. A mean of 115  $\text{l ha}^{-1}$  was observed below the nozzle on the target, which is notably below the theoretical 160  $\text{l ha}^{-1}$  that would be expected if adjacent nozzles were present at 50 cm interval. Table 1 also offers a quantitative view of the effect of adjuvant used for this nozzle setting. As expected, comparatively to water, the Volumetric Median Diameter (VMD) is lower when Break Thru is used and increased for Li 700 (Butler Ellis et al., 1997; Holloway et al., 2000; Butler Ellis and Tuck, 1999). The number of drop impacts on the surface is modified accordingly, as a lower VMD leads to a higher droplet number. The volumetric proportions of impact outcomes are modified. Adhesion percentage (% Ad) is increased for Break Thru while reduced for Li 700. This last result may not be intuitive at first sight but is explained by the VMD increase. Rebound proportion (% R CB) is highly reduced by both adjuvants. Cassie–Baxter splashing (% Sp CB), already scarce for water on this surface, almost disappears. Wenzel splashing (% Sp W) is greatly increased for Li 700 while reduced for Break-Thru as a consequence of the VMD modification. As a consequence, 39–60%

**Table 1**

Total volume ( $V_{\text{tot}}$ ), Volumetric percentage of the spray outcome for impacting droplets on horizontal barley leaves; adhesion (%Ad), rebound in Cassie–Baxter regime (% R CB), splashing in Cassie–Baxter regime (% Sp CB), splashing in Wenzel regime (%SpW) and characteristics of sprays; Volumetric Median diameter (VMD), drop number as a function of tank formulations.

Mixture	$V_{\text{tot}}$ ( $\mu\text{l}$ )	% Ad	% R CB	% Sp CB	% Sp W	VMD	Drops number
Water	3.44	41.6	14.2	1.1	43.0	317	627
Water + Break Thru S240	3.35	58.0	2.4	0.3	39.4	272	736
Water + Li 700	3.31	35.6	4.3	0	60.1	328	448

of the spray volume observed at impact on the barley leaf for common nozzle and adjuvants are splashing in the Wenzel regime.

### 3.2. Retention observed by shadowgraphy and measured by spectrophotometry

The question that arises is what proportion of the spray mixture stays on the target from pinning fragmentation, also referred to as splash in the Wenzel regime. To address this issue, sodium fluorescein deposits on leaf samples observed by shadowgraphy were quantified by spectrophotometry. From Table 2 results, it appears that adhesion accounts only for a fraction of retention as the retention volume measured by fluorometry (VF) is always higher

**Table 2**

Retention volume of the different impact types using shadowgraphy and deposits measured by spectrophotometry for the three spray mixtures.

Spraying	$V_{\text{tot}}$ ( $\mu\text{l}$ )	V Ad ( $\mu\text{l}$ )	V RCB ( $\mu\text{l}$ )	V Sp CB ( $\mu\text{l}$ )	V Sp W ( $\mu\text{l}$ )	VF( $\mu\text{l}$ )
Tap water and sodium fluorescein tank mix						
1	0.345	0.055	0.144	0.000	0.146	0.124
2	0.379	0.194	0.015	0.000	0.171	0.289
3	0.311	0.27	0.014	0.000	0.028	0.292
4	0.335	0.188	0.005	0.000	0.142	0.286
5	0.448	0.142	0.078	0.000	0.228	0.294
6	0.401	0.052	0.055	0.030	0.264	0.088
7	0.189	0.075	0.065	0.009	0.040	0.087
8	0.298	0.192	0.023	0.000	0.083	0.262
9	0.189	0.045	0.063	0.000	0.082	0.068
10	0.542	0.216	0.030	0.000	0.295	0.396
Average	0.344	0.143	0.049	0.004	0.148	0.219
Std. dev.	0.108	0.081	0.042	0.010	0.092	0.115
Tap water, Break Thru and sodium fluorescein tank mix						
1	0.266	0.188	0.001	0.000	0.076	0.270
2	0.414	0.192	0.017	0.000	0.205	0.266
3	0.276	0.208	0.000	0.000	0.068	0.257
4	0.304	0.155	0.000	0.000	0.149	0.294
5	0.470	0.201	0.035	0.000	0.234	0.364
6	0.400	0.254	0.000	0.009	0.136	0.282
7	0.213	0.176	0.000	0.000	0.037	0.206
8	0.364	0.236	0.026	0.000	0.103	0.307
9	0.393	0.241	0.000	0.000	0.152	0.264
10	0.252	0.093	0.000	0.000	0.159	0.196
Average	0.335	0.194	0.008	0.001	0.132	0.271
Std. dev.	0.084	0.047	0.013	0.003	0.062	0.048
Tap water, Li 700 and sodium fluorescein tank mix						
1	0.351	0.211	0.000	0.000	0.140	0.300
2	0.349	0.168	0.017	0.000	0.164	0.202
3	0.452	0.103	0.023	0.000	0.326	0.342
4	0.282	0.059	0.024	0.000	0.199	0.142
5	0.433	0.117	0.009	0.000	0.306	0.292
6	0.298	0.099	0.010	0.000	0.189	0.199
7	0.274	0.113	0.000	0.000	0.161	0.282
8	0.275	0.056	0.029	0.000	0.190	0.086
9	0.215	0.121	0.025	0.000	0.069	0.160
10	0.384	0.132	0.007	0.000	0.246	0.200
Average	0.331	0.118	0.014	0.000	0.199	0.221
Std. dev.	0.076	0.046	0.011	0.000	0.077	0.081



than the volume that adheres at impact (V Ad). A variable fraction of the volume of drops splashing in the Wenzel regime should be added to reach the measured deposits. Indeed, high speed imaging records show that a variable proportion of the partially fragmented drop stays at the impact location. In some cases, the measurement of fluorescence slightly exceeds the total volume seen impacting, which may result from measurement uncertainties or unintended contamination of the leaf samples.

Table 3 was constructed from visual estimation of the retained fraction of each partially fragmented drop in Wenzel regime. The estimated percentage for each trial (%SpW Rt) and spray mixture is used to estimate the retention, by addition of then volume that adheres with the fraction splashing in the Wenzel regime. A comparison using the ratio (VF/RetP) between the measured retention using spectrophotometry and estimated retention using this method is performed. Although the ratio diverges unexpectedly from one in some cases, it is remarkable that the average of this parameter is very close to unity, as expected. The retained fraction of the partially fragmented drop in the Wenzel regime is the lowest for water at 45%, a bit higher for Li 700 at 48% and at 58% for Break Thru.

These observations confirm that pinning fragmentation is not a negligible component of retention, that in our trials accounted for 35% of retention for tap water, 46% for Li 700 mixture and 28% for Break Thru. The differences between mixtures are highly correlated with VMD because of the effect of this parameter on the proportion of different impact behaviours.

In conclusion, different drop behaviours during impact have long been identified in crop protection, and dimensional analysis has been applied to find relevant parameters such as the Weber number (Lake and Marchant, 1983). On this basis models have been developed to calculate the capture of pesticides by the canopy on the basis of the droplet, spray formulation and leaf water repellency characteristics (Cox et al., 2000). However, adhesion has been considered the only contributor to spray retention in most studies. In recent works Mercer et al. (2010) have developed a physical model of retention based on drop behaviour as a function of the energy balance during impact, taking into account shattering. However, the authors considered that during the spreading phase, the droplet breaks into smaller droplets that leave the leaf, a typical Cassie–Baxter regime.

Forster et al. (2012) have presented a physical process based retention model that has been implemented within an experimental build of the spray application simulation software AGDISP using a similar hypothesis, considering the recapture of secondary droplets by the same leaf. Simulations performed on wheat, which presents a very similar leaf surface to barley, are in good agreement with retention measurements. However, it is possible that on an

advanced target growth stage the overall error in predicted retention may be minimized due to secondary drops being predicted to intercept and be retained. However, on small plants, a typical stage for weeding, the errors in overall retention could be higher because of reduced chance of secondary interception. Observations prove that neglecting the occurrence of partial splash in the Wenzel wetting regime may account for a significant underestimation of retention at interception, as about 50% of the drop volume has been found to remain on the leaf. The effect may be even higher when modelling the retention of low drift nozzles because of the larger droplets produced that are more likely to fragment at impact. Another phenomenon that is often neglected in state of the art retention models is the coexistence of different impact behaviours for the same energy level. Logistic regression curve based on experimental data should be preferred to fixed threshold between the different outcomes. Experimental methods based on high speed imaging (Massinon and Lebeau, 2012a) may contribute to the ultimate goal of highly accurate process-driven retention models as realistic phase diagrams of impact behaviour are obtained for more spray-mixture/leaf combinations this way.

## Acknowledgements

The work was performed thanks to the funding from the Higher Education and Scientific Research Ministry of People's Democratic Republic of Algeria.

## References

- Butler Ellis, M.C., Tuck, C.R., Miller, P.C.H., 1997. The effect of some adjuvants on sprays produced by agricultural flat fan nozzles. *Crop Prot.* 16, 41–50.
- Butler Ellis, M.C., Tuck, C.R., 1999. How adjuvants influence spray formation with different hydraulic nozzles. *Crop Prot.* 18, 101–109.
- Butler Ellis, M.C., Tuck, C.R., Miller, P.C.H., 1999. How surface tension of surfactant solutions influences the characteristics of sprays produced by hydraulic nozzles used for pesticide application. *Coll. Surf.* 180, 267–276.
- Cassie, A.B.D., Baxter, S., 1944. Wettability of porous surfaces. *Trans. Faraday Soc.* 40, 546–551.
- Caviezel, D., Narayanan, C., Lakehal, D., 2008. Adherence and bouncing of liquid droplets impacting on dry surfaces. *Microfluid Nanofluid* 5, 469–478.
- Cox, S.J., Salt, D.W., Lee, B.E., Ford, M.G., 2000. A model for the capture of aerially sprayed pesticide by barley. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 87, 217–230.
- Forster, W.A., Kimberley, M.O., Zabkiewicz, J.A., 2005. A universal spray droplet adhesion model. *Trans. ASAE* 48 (4), 1321–1330.
- Forster, W.A., Mercer, G.N., Schou, W.C., 2010. Process driven models for spray droplet shatter, adhesion or bounce. *Int. Proc. 9th Int. Symp. Adj. Agrochem.*, pp. 277–285.
- Forster, W.A., Mercer, G.N., Schou, W.C., 2012. Spray droplet impaction models and their use within AGDISP software to predict retention. *N. Z. Plant Prot.* 65, 85–92.
- Forster, W.A., Schou, W.C., Mercer, G.N., 2013. In: Evaluation of a Modified AGDISP Model to Predict Spray Canopy Retention. *Proc. ISAA 2013*, pp. 301–309. Foz do Iguaçu, Brazil April 22–26, 2013.
- Furmidge, C.G.L., 1962. Physico-chemical studies on agricultural sprays IV, the retention of spray liquids on leaf surfaces. *J. Sci. Food Agric.* 13, 127–140.
- Guella, S., Alexandrova, S., Saboni, A., 2008. Evaporation d'une gouttelette en chute libre dans l'air. *Int. J. Therm. Sci.* 47, 886–898.
- Holloway, P.J., Butler Ellis, M.C., Webb, D.A., Western, N.M., Tuck, C.R., Hayes, A.L., Miller, P.C.H., 2000. Effects of some agricultural tank-mix adjuvants on the deposition efficiency of aqueous sprays on foliage. *Crop Prot.* 19, 27–37.
- Lake, J.R., Marchant, J.A., 1983. The use of dimensional analysis in a study of drop retention on barley. *Pestic. Sci.* 14, 638–644.
- Massinon, M., Lebeau, F., 2012a. Experimental method for the assessment of agricultural spray retention based on high-speed imaging of drop impact on a synthetic superhydrophobic surface. *Biosyst. Eng.* 112 (1), 56–64.
- Massinon, M., Lebeau, F., 2012b. Comparison of Spray Retention on Synthetic Superhydrophobic Surface with Retention on Outdoor Grown Wheat Leaves. In: *Int. Adv. Pest. Ap.: Asp. Appl. Biol.*, vol. 114. Association of Applied Biologists, Warwick, UK, pp. 261–268.
- Massinon, M., Boukhalfa, H.H., Marechal, P., Lebeau, F., 2012. The Effect of Leaf Orientation on Spray Retention on Blackgrass. In: *Proc. 11th Int. Conf. Precision Agriculture*. Indianapolis, USA.
- Massinon, M., Lebeau, F., 2013. Review of physicochemical processes involved in agrochemical spray retention. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 17 (3), 494–504.
- Mercer, G.N., Sweetman, W.L., Forster, W.L., 2010. A model for spray droplet adhesion, bounce or shatter at a crop leaf surface. *Math. Ind.* 15. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-12110-4\\_151](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-12110-4_151).

**Table 3**

Contribution of partial fragmentation in the Wenzel regime to retention by barley leaves for the three tank formulations.

Spraying	Water		Water + Break Thru		Water + Li 700	
	%SpW Rt	VF/RetP	%SpW Rt	VF/RetP	%SpW Rt	VF/RetP
1	44.4	1.03	66.8	1.12	56.4	1.04
2	71.9	0.91	42.0	0.96	39.0	0.87
3	14.4	1.07	67.3	1.01	68.1	1.05
4	38.0	1.18	70.5	1.13	32.7	1.15
5	48.2	1.17	63.7	1.04	50.8	1.07
6	29.8	0.67	36.5	0.92	74.3	0.83
7	5.0	1.13	30.0	1.10	45.3	1.52
8	83.9	1.00	46.6	1.08	43.4	0.62
9	57.0	0.75	91.4	0.70	36.2	1.10
10	62.4	0.99	70.2	0.96	37.0	0.90
Average	45.5	0.99	58.5	1.00	48.3	1.01
Std. dev.	24.75	0.17	19.00	0.13	14.05	0.24

- Nairn, J.J., Rorster, W.A., IJzerman, A.J., 2013. 'Universal' spray droplet adhesion model – accounting for hairy leaves. *Weed Res.* <http://dx.doi.org/10.1111/wre.12039>, pp. 11.
- Rioboo, R., Voué, M., Vaillant, A., De Coninck, J., 2008. Drop impact on porous superhydrophobic polymer surfaces. *Langmuir* 24 (24), 14074–14077.
- Smith, D.B., Askew, S.D., Morris, W.H., Shaw, D.R., Boyette, M., 2000. Droplet size and leaf morphology effects on pesticide spray deposition. *Trans. ASAE* 43 (2), 255–259.
- Shuterud, R., Nordby, A., Tyldum, A., 1988. Effect of application methods, spray volumes, pressures and herbicide rates on weed control in spring cereals. *Crop Prot.* 7, 303–308.
- Stevens, P.J.G., 1993. Organosilicone surfactants as adjuvants for agrochemicals. *Pest Sci.* 38, 103–122.
- Stock, D., 1997. Do we need adjuvants? Mechanistic studies and implications for future developments. In: *Proc. 50th N.Z. Plant Prot. Conf.*, pp. 185–190.
- Taylor, P., 2011. The wetting of leaf surfaces. *Curr. Opin. Coll. Interface Sci.* 16(4), 326–334.
- Venzmer, J., 2011. Superspreading – 20 year of physicochemical research. *Curr. Opin. Coll. Interface Sci.* 16 (4), 335–343.
- Wang, C.J., Liu, Z.Q., 2007. Foliar uptake of pesticides-present status and future challenge. *Pestic. Biochem. Physiol.* 87, 1–8.
- Wenzel, R., 1936. Resistance of solid surface to wetting by water. *Ind. Eng. Chem.* 28 (8), 988–994.
- Wilson, M., 2003. *Optimising Pesticide Use*. John Wiley and Sons Ltd, England, ISBN 0-471-49075-X.
- Wirth, W., Storp, S., Jacobsen, W., 1991. Mechanisms controlling leaf retention of agricultural spray solutions. *Pestic. Sci.* 33 (4), 411–420.
- Yarin, A.L., 2006. Drop impact dynamics: splashing, spreading, receding. *Bouncing Annu. Rev. Fluid Mech.* 38, 159–192.
- Zabkiewicz, J.A., 2007. Spray formulation efficacy - holistic and futuristic perspectives. *Crop Prot.* 26, 312–319.

# The effect of surface orientation on spray retention

Mathieu Massinon · Hassina Boukhalfa · Frédéric Lebeau

© Springer Science+Business Media New York 2014

**Abstract** Research in precision spraying investigates the means to reduce the amount of herbicide applied by directing droplets more accurately towards the weeds. The trend in the development of spot spraying equipment is an increase of the spatial resolution and new actuators that are able to target very small areas. However, there is a lack of methods for assigning rates of herbicides relating target to optimal droplet features. A wide range of droplet impact angles occurs during the spray application process because of droplet trajectories and the variability of leaf orientation. In this study, laboratory experiments were conducted to highlight the effect of surface orientation on droplet impact outcomes (adhesion, rebound or splashing) on two very difficult-to-wet surfaces: an artificial surface with a regular roughness pattern and an excised black-grass leaf with an anisotropic roughness pattern. Measurements were performed for different surface orientations with a high-speed camera coupled with backlighting LED. Droplets of two formulations (distilled water and distilled water + a surfactant) were produced with a moving flat-fan hydraulic nozzle to obtain a wide range of droplet sizes and velocities, which were measured by image analysis. Increasing surface angle reduces surface area available for droplet capture. Droplet impact behaviors are then modified since surface tilt induces a tangential velocity component at impact and, consequently, a reduction of the normal component. Impact modifications have also been observed due to the anisotropic roughness pattern of a black-grass leaf. The integration of droplet-surface interaction information offers a significant way to further improve the precision spraying efficiency by considering the optimal droplet size, speed and ejection angle depending on the target surface and architecture.

**Keywords** Precision spraying · Spray retention · Leaf orientation · Droplet impact · High-speed imaging · Spot spraying

---

M. Massinon (✉) · H. Boukhalfa · F. Lebeau  
Gembloux Agro-Bio Tech, ULg, Gembloux, Belgium  
e-mail: m.massinon@ulg.ac.be

## Introduction

Chemical weed control continues to play a pivotal role to ensure a sufficient level of yield. Agrochemical use, however, is associated with ever increasing environmental, safety and cost concerns. Targeting pesticides more accurately is then of major concern for reducing the negative impact of weed chemical control. Conventional uniform application with hydraulic nozzles was optimized over many years to achieve better spray distribution over the crop and better biological efficiency while minimizing spray drift. Studies aimed at finding the best use of this spraying equipment depending on applied volumes, pesticide dose and crop growth stage and species, most often using field trials (Butler Ellis et al. 2004). Regarding spraying equipment, the development of the so-called controlled droplet application allowed reduction of the volume of pesticides per hectare applied with emphasis on the importance of applying the correct size of droplets for a given target with uniform droplet size distributions (Matthews 2008). Besides, the notion of differential management of field areas derived from precision farming concepts has further resulted in a more precise application technique consisting of applying control measures only where weeds are located. The first advance was the introduction of variable rate technology that controls the applied amount of pesticide according to site-specific demand in the field based on spray maps generated before the treatment. This method requires large scale remote sensing techniques to build offline spray application prescription maps later used in the field to drive GPS spray controllers. Precision agriculture flow control has recently evolved to high resolution machine vision detection systems allowing real-time capabilities (Thorp and Tian 2004). The detection and identification of individual weeds requires both high resolution machine vision technology systems (Tellaeche et al. 2008; Nieuwenhuizen et al. 2010) and an actuator for pesticide, delivering to the right target (Lee et al. 1999; Giles et al. 2002; Miller et al. 2012a).

The main factor driving the development of spot spraying equipment is to maximize the number of droplets reaching their target. Droplet transport (Walklate 1987; Ghosh and Hunt 1998) and spray drift potential (Holterman et al. 1997; Mokeba et al. 1997; Baetens et al. 2007; Butler Ellis and Miller 2010) were described intensively and many solutions were proposed to reduce their adverse effects. However, mechanisms governing spray retention, which is the amount of sprayed product actually retained by plant leaves, are still misunderstood despite the growing interest of researchers. On their part, the losses occurring during droplet impact on leaves amount to 5–92 % of the off-target component load of a herbicide application (Zabkiewicz 2007). Miller et al. (2012b), in a quest for a suitable nozzle to perform plant scale control for use in spot spraying applications, highlighted that the use of larger and faster droplets in the spray gave an additional component of selectivity: retention on the onion crop was reduced from 6.35  $\mu\text{l}$  for the nozzle delivering the slower and smaller droplets to 0.87  $\mu\text{l}$  for the bigger and faster ones, a 7.5:1 ratio, while retention on filter paper was only modified in a 2:1 ratio. This means that, even if droplets impact their target, treatment efficiency differences may arise from retention variability depending on plant (species, wettability, growth stage and architecture) and droplet properties (size, velocity, dynamic surface tension). This has to be taken into account for development of spot spraying equipment and advantage can even be taken from differences of wettability between species for targeting specific weeds or reducing contamination of crops. The need for further investigation on the effect of coverage, dosage and placement on the leaves was also highlighted for further micro-spray systems development (Søgaard and Lund 2007). The next gap to fill in the development of variable-rate technologies is the lack of methods for assigning rates of herbicide based on the results

of a weed sensing procedure (Thorp and Tian 2004). A better knowledge of droplet-leaf interactions by precision farming specialists is therefore requested to drive the development of the next generation of pesticide application technology.

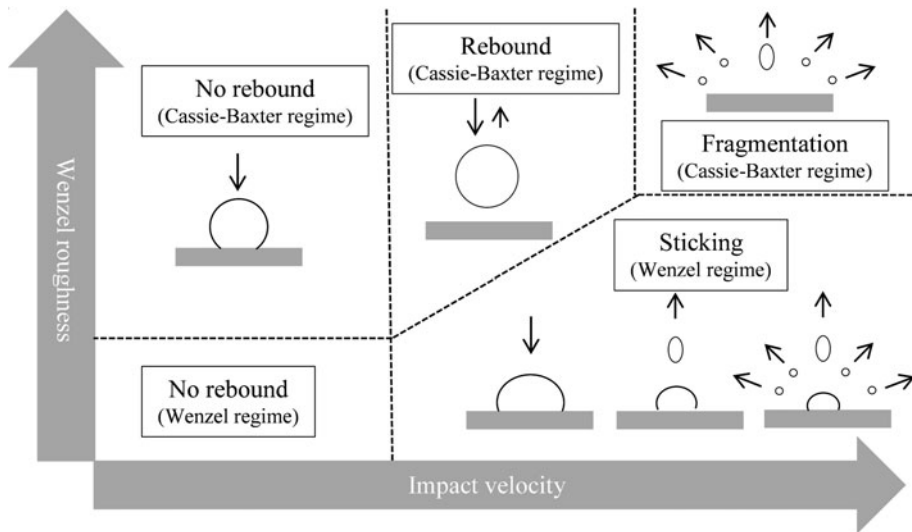
Many parameters influence droplet behavior at impact, from droplet physico-chemical properties to target properties. Predominant factors affecting the spray retention are related to the target surface (Furmidge 1962; Wirth et al. 1991; Journaux et al. 2011). Plant leaves exhibit various degrees of wettability from very-easy to very-difficult-to-wet, depending on species and growth stages (Gaskin et al. 2005) owing to the coating of epicuticular wax at leaf surface (Barthlott et al. 1998). Surface wettability is often quantified using the static contact angle  $\theta$ , which is the angle measured between the solid surface and the tangent to droplet at the point where liquid, solid and air meet. It reflects the relative strength of the liquid, solid and vapor molecular interactions. High static contact angle ( $90^\circ < \theta < 150^\circ$ ) reflects hydrophobic surfaces. Static contact angle above  $150^\circ$  determines superhydrophobic surfaces. The superhydrophobic behavior of some leaves arises from the presence of a microstructure of the epicuticular wax. The superhydrophobicity is therefore a physical property of hydrophobic materials. In other words, the hydrophobicity provided to some leaves by waxes is enhanced by hairs that dramatically increase the small scale roughness of the leaf surface. In consequence, a droplet exhibits a very large static contact angle on such surfaces and is not able to stay on it at impact. It is well established that superhydrophobic species, such as blackgrass, are the most challenging target for efficient pesticide application. The present paper focuses therefore on such surfaces.

Two models describe the wetting of such surfaces based on Young's equation and liquid surface tension (Callies and Quere 2005; Taylor 2011) at microscopic scale. In the Wenzel non-composite regime (Wenzel 1936), often referred to as homogeneous wetting regime, the liquid wets and fills the surface cavities completely thanks to a sufficiently low liquid surface tension. The Cassie–Baxter composite regime (Cassie and Baxter 1944) considers an interface composed of both solid and surrounding air trapped under the drop (Zu et al. 2010). The liquid is only in contact with the upper part of the relief because its surface tension is too high. Height and distance between pillars or pikes that make up the roughness of the surface are critical parameters to keep the drop in the Cassie–Baxter regime. A transition between the Cassie–Baxter to the Wenzel regime is possible and may be caused by droplet surface fluctuations when the droplet is resting on the surface at impact.

On superhydrophobic leaves, the outcome of droplet impact is a complex function of surface roughness, surface orientation, droplet size and velocity and liquid physico-chemical properties. Many studies focused on optimal droplet size required maximization of retention by plants under field conditions (Knoche 1994; Butler Ellis et al. 2004). However, systematic laboratory tests are needed to gain more precise information at droplet scale. Impact outcomes of a single droplet on horizontal and dry superhydrophobic surfaces are known to be a function of droplet Weber number and surface roughness (Rein 1993; Yarin 2006). The Weber number represents the ratio of droplet kinetic energy to surface energy (Eq. 1).

$$We = \frac{\rho v^2 d}{\sigma} \quad (1)$$

where  $d$  is the droplet diameter (m),  $v$  is the droplet velocity ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $\rho$  is the liquid density ( $\text{kg m}^{-3}$ ) and  $\sigma$  is the liquid surface tension ( $\text{N m}^{-1}$ ). The Wenzel's roughness factor, defined as the ratio of actual and projected planar or geometrical (measured in the plane of



**Fig. 1** Possible droplet impact outcomes on a superhydrophobic surface depending on surface roughness and droplet impact velocity

the interface) surface areas (Rioboo et al. 2008), indicates the surface roughness level. This ratio tends to one for a flat and smooth surface. For small Wenzel roughness and for low Weber number (Fig. 1), a drop is deposited in the Wenzel regime. Higher Weber numbers lead to drop fragmentation, part of which sticks at the impact point. Depending on impact energy, a droplet can either bounce which is called partial rebound, or shatters into several satellite drops, which is called partial splashing. For intermediate Wenzel roughness, slow drops adhere in a Cassie–Baxter regime. For higher Weber number, the droplet bounces completely, which is only possible on superhydrophobic surfaces (Quééré 2005). For even higher Weber number, impact pressure is so large that the liquid can penetrate surface cavities, which modifies the wetting regime from Cassie–Baxter to Wenzel. Transition from Cassie–Baxter to Wenzel wetting regime may also occur by reducing liquid surface tension. As a consequence, sticking, partial rebound or partial splashing may occur. Finally, for high Wenzel roughness, drops may either adhere in a Cassie–Baxter regime, rebound or splash completely depending on Weber number.

The structure of surface micro-topography further modifies liquid macroscopic wetting. On unidirectional grooved surfaces, contact angles measured from the direction parallel to the grooves are larger than those measured from the perpendicular direction (Zhao et al. 2007). Surface micro-pattern also influences the macroscopic flows as directional splashing can occur (Tsai et al. 2011).

Treating superhydrophobic leaves is a challenge accentuated by the angle of droplet impact due both to plant architecture and droplet trajectories. Jensen (2012) showed that angling a nozzle at 60° forward relative to the direction of travel increased herbicide efficacy on annual grasses, such as blackgrass, using flat-fan nozzles in field experiments. Obviously, surface angle reduces projected area intercepting droplet spray. Up to now, the effect of surface angle on droplet impact outcome has been weakly documented. Most studies (Stow and Hadfield 1981; Mundo et al. 1995; Šikalo et al.

2005; Bird et al. 2009) advocated the use of velocity normal component in computing dimensionless numbers to forecast impact outcome thresholds (Lake and Marchant 1983). The optimal droplet features depending on those of the target are required to guide the further development of precision spraying technology. This paper shows how to consider the droplet angle at impact to find this optimum using a laboratory method devised to rank adjuvants according to their effect on retention in controlled conditions (Massinon and Lebeau 2012b). More particularly, this study focuses on how leaf orientation may affect retention by plants. First, an artificial superhydrophobic surface was used to investigate adjuvant effect on retention as a function of surface angle. The artificial surface was used as a reference for systematic tests since variability owing to leaf position and age could hide differences between impact behaviors (Reichard et al. 1998). Afterwards blackgrass, a common weed in cereal crops, was investigated to see whether mechanisms highlighted on an artificial surface can be extended to natural surfaces.

## Materials and methods

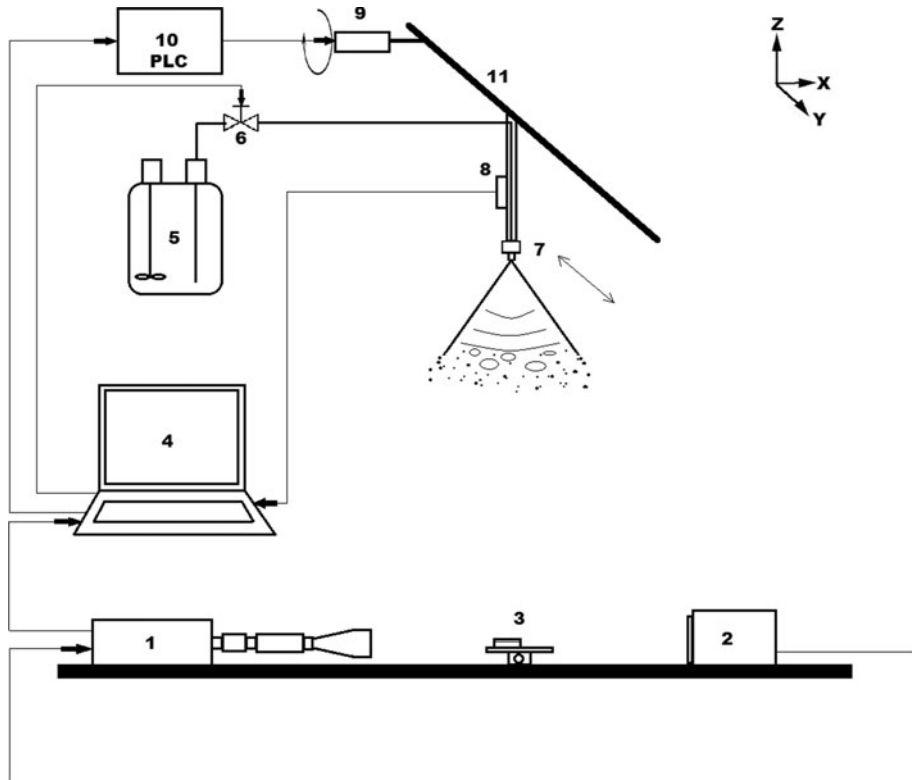
### Dynamic spray application bench

#### *Spraying system*

The setup (Fig. 2) was composed of a dynamic spray application test bench contained in a room where temperature and relative humidity were controlled. The dynamic bench consisted of a single extended range flat-fan nozzle (XR Teejet 11003VK, Spraying Systems Co, Wheaton, IL, USA) operating at 200 kPa. The nozzle was mounted 500 mm vertically above the target surface on a linear guide rail actuated by a servomotor at a forward speed of  $2 \text{ m s}^{-1}$ . A single pass was performed for each spraying so that a volume of  $160 \text{ l ha}^{-1}$  was delivered during tests.

#### *Backlit imaging system*

Drop impacts were recorded with a high-speed camera (Y4, Integrated Design Tools, Tallahassee, FL, USA) at a frequency of 20 000 frames per second with a  $9 \mu\text{s}$  exposure time to provide experimental information on number, size and velocity of drops before impact, as well as drop impact behavior. An optical system (12X zoom system, Navitar, Rochester, NY, USA) provided  $1016 \times 185$  pixels digital images with  $11.3 \mu\text{m pixel}^{-1}$  spatial resolution, calibrated using the United States Air Force resolution test chart (MIL-STD-150A, section 5.1.1.7) and a camera depth of field at about 2 mm. Consequently, number density and spatial statistics were given from a probe volume of  $11.48 \times 2.09 \times 2 \text{ mm}$  (image size  $\times$  depth of field). The setup involved a pulsed LED lighting array (19-LED Constellation, Integrated Design Tools, Tallahassee, FL, USA), which was synchronized with the image acquisition in a backlit arrangement. Distance between LED array and camera was 500 mm. No heating problems arose in the probe volume. Light intensity on images was expressed in 8 bits grey levels with pixel value ranging from 0 for black to 255 for white. The whole optical system was tilted with respect to the target from  $0^\circ$  to  $60^\circ$ , so that image width was kept parallel to the surface independently of the angle of surface inclination.



**Fig. 2** Dynamic spray application bench: 1 high-speed camera 2 LED lighting 3 target surface on linear stage 4 computer 5 pressurized tank 6 solenoid valve 7 nozzle 8 pressure gauge 9 servomotor 10 programmable controller and 11 linear stage

### Image analysis

The image processing technique used for measuring droplet size and velocity was non-intrusive. Owing to spray density, some droplets were located outside the probe volume. Such defocused drops were rejected since they represented a source of error. Similarly, droplets truncated by image edge or too small particles were not integrated in the procedure.

Image processing began with an automated identification of relevant images based on droplet movement to reduce the number of images to be treated. Since robust automated impact type identification was not available yet, pre-selected images were viewed by a human operator who recorded subsequent impact behavior on the basis of Fig. 1. An image pair was selected for each droplet where the first image contained an incoming droplet at its top, with its center at approximately 1.3 mm from the target (depending on droplet size), and the second contained the droplet immediately before impact, the bottom of the droplet being at a distance depending on the droplet velocity and the camera acquisition rate. The algorithm loaded the first image and performed a background correction to enhance image quality and reduce background illumination inhomogeneities (based on 50 images without any droplet). Then the image was binarized and particles were detected and



identified. Only in-focus droplets were selected based on gradient detection at the edges of droplets (Lecuona et al. 2000). The droplet diameter was computed using the Eq. 2:

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (2)$$

where  $A$  was the surface area calculated by summing all pixels belonging to the droplet. If several droplets appeared in the image due to a splashing event (10–20 droplets) or multiple incoming droplets (up to 5 droplets), the operator was prompted to select the droplet of interest on the two images by clicking on it with the computer mouse. The algorithm found the nearest droplet from the co-ordinates of the click. Droplet center co-ordinates ( $X, Y$ ) are saved for subsequent determination of droplet velocity. An identical operation was performed with the second image. The droplet velocity was then computed using Eq. 3:

$$\vec{v}_{ij} = \frac{(X_j - X_i, Y_j - Y_i)}{\Delta t} \quad (3)$$

where subscripts  $i$  and  $j$  were respectively related to the drop on the first and second image,  $X$  and  $Y$  were the center co-ordinates and  $\Delta t$  is the time interval between both selected images. The time between the two images of a pair was maximized to reduce the uncertainties on the droplet velocity determination, with the assumption that the computed velocity is the droplet velocity at impact on the target. The norm of the velocity vector computed in Eq. 3 was further used to build the results.

## Results

### Experimental conditions

Tap water constitutes the main carrier of agrochemicals. Since water hardness modifies surface tension, pure distilled water (static surface tension of  $72.10^{-3} \text{ N m}^{-1}$ ) was firstly sprayed using the application bench. Agrochemicals mixture wettability is often improved by adding surfactants. In our experiments, mixture static surface tension was reduced to  $21.10^{-3} \text{ N m}^{-1}$  (CAM200, KSV Instruments, Helsinki, Finland, sessile drop method, 5 replicates) thanks to a trisiloxane tank-mix surfactant (Break-Thru<sup>®</sup> S240, Evonik Industries AG, Germany) added to distilled water at the recommended use concentration (0.1 % v/v). These superspreaders (Venzmer 2011) have a very low dynamic surface tension (DST), which inhibits droplet rebound (Massinon and Lebeau 2012b) and may increase retention. A surfactant molecule contains a hydrophilic head and a hydrophobic tail. Surfactant molecules will diffuse in water and adsorb at interfaces between air and liquid and align themselves with the tails to air and heads to the water, which reduce the surface tension. During impact on the target, the droplet is deformed. The interface is stretched and gaps in the surfactant alignment appear at the interface. Surfactant molecules will spontaneously fill the gaps to restore the equilibrium. Surfactants are characterized by their adsorption rate, or ability to fill the interface gaps more or less rapidly. Super-spreader surfactants exhibit a very fast adsorption rate. This kinetic of adsorption can be described by the DST, which is the variation over time of the surface tension. If the adsorption time is smaller than the droplet impact time, which is about 2 ms, the droplet impact behavior can

**Table 1** Spray features immediately before impact on an artificial superhydrophobic surface with a regular roughness pattern (merged from ten sprayings)

Surface angle ( $\alpha$ ) (°)	Distilled water			0.1 % (v/v) Break-Thru S240® in distilled water		
	0	30	60	0	30	60
Number of observed droplets at impact ( $N$ )	236	197	62	270	141	63
$N \cdot \cos(\alpha)$	236	204	118	270	233	135
Total droplet volume ( $V$ ) ( $10^{-10}$ m <sup>3</sup> )	7.0	5.9	1.9	5.8	4.6	2.1
$V \cdot \cos(\alpha)$	7.0	6.1	3.5	5.8	5.0	2.9
$D_{V50}$ ( $\mu$ m)	231	219	219	207	236	224
Adhesion (vol%)	7.4	2.3	4.8	69.3	52.7	50.3
Rebound C–B (vol%)	42.8	57.0	75.7	1.6	3.8	10.1
Rebound W (vol%)	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Splashing C–B (vol%)	10.6	26.4	19.5	1.2	0.0	4.4
Splashing W (vol%)	38.1	14.3	0.0	27.9	43.5	35.2

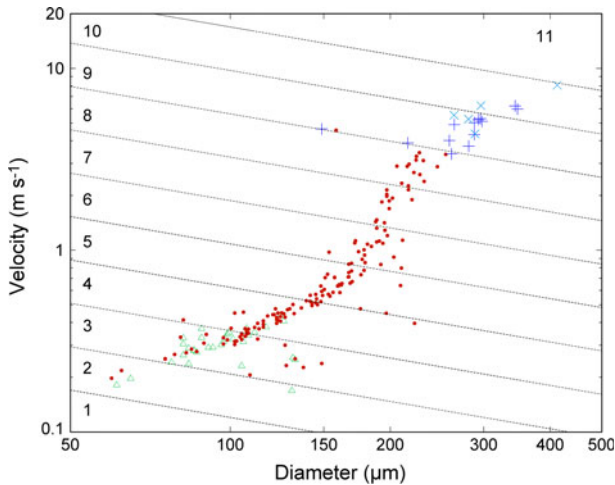
be greatly altered (Massinon and Lebeau 2013) since surfactants are able to maintain a very low surface tension.

An artificial superhydrophobic surface (completely PTFE coated microscope blade, part number X2XES2013BMNZ, Thermo Fisher Scientific Inc., Waltham, MA, USA) was first sprayed at different orientations by a rotation of the camera-surface-lighting system of 0°, 30° and 60° around the axis X (Fig. 2). The static contact angle of a distilled water droplet is 169° on the surface (CAM200, KSV Instruments, Helsinki, Finland), which is representative of very difficult-to-wet leaves (Massinon and Lebeau 2012a). Ten sprayings were performed for each orientation and a new artificial surface was used for each spraying. Afterward, spray behavior was studied on excised leaf from indoor-grown blackgrass [*Alopecurus myosuroides* HUDS. (ALOMY), BBCH 13], which is a very-difficult-to-wet species (distilled water static contact angles around 155°) depending on position on leaf and surface groove direction. Five sprayings were performed on the adaxial leaf surface, which was positioned along the axis Y (Fig. 2).

#### Retention by reference artificial superhydrophobic surface

Spray impact characteristics, such as observed number of drops, volume median diameter ( $D_{V50}$ ) and total droplets volume as well as impact characteristics are given in Table 1. Features in Table 1 were merged from ten sprayings to reduce the inherent variability existing between spraying trials, which is related to the random droplet formation process. It is recognized that about 10 000 droplets are required to obtain a stabilized particle size distribution. The values of  $D_{V10}$ ,  $D_{V50}$ ,  $D_{V90}$  and number of droplets are presented in Table 1 to get an idea of the spray characteristics during the trials with the specific nozzle and formulation, but do not present values built on a sufficiently large droplets sample.

As expected for both liquids, the number of droplets landing on the surface diminishes by increasing surface angle. The observed volume reaching the surface decreases accordingly. A reducing of droplet interception by the target proportional to the cosine of the surface angle was expected. This is not observed and discrepancies between observed and projected values grow with the surface angle. For both formulations, increasing surface



**Fig. 3** Relation between drop velocity and diameter (Teejet® XR11003VK flat fan nozzle, 200 kPa, distilled water) and impact outcomes (adhesion *triangle*, total rebound *circle*, partial splashing *cross* and total splashing *plus*) ranked in eleven energy classes for the artificial super-hydrophobic surface tilted of 30° from horizontal

angle reduces adhesion and increases rebound occurrence. On an already tilted target surface, further increase of surface angle does not seem to have any effect on adhesion proportion. Partial rebound (Wenzel wetting regime) is only and scarcely observed for distilled water on a horizontal surface. By increasing surface angle, the normal velocity component is reduced. There is, therefore, not enough impact pressure to overcome the energy transition threshold between Cassie–Baxter and Wenzel wetting regimes. The super-spreader solution is able to expel the air trapped in surface roughness and spreads on the surface in Wenzel wetting state thanks to its lower DST. Rebound is therefore widely reduced using the super-spreader. Some drops containing surfactant molecules can however still bounce off a tilted surface. This effect increases with surface angle. Both fragmentation outcomes represent together nearly half of the volume sprayed on a horizontal surface for distilled water. Fragmentation decreases as surface angle increases for water while it increases for surfactant solution because of its lower surface tension. Partial splashing is beneficial for retention since a significant proportion of the drop may stick on the surface. For water, this proportion decreases with increasing surface angle, as partial rebound. With a surfactant solution, a few drops splash totally again because of their weak DST.

An impact phase diagram of the response to an application method of a target surface is presented in Fig. 3, depending on droplet size and velocity immediately before impact on the target, taking into account real evaporation and drag force during transport. Depending on the drop impact energy, impact outcomes succeed as described in Fig. 1. The impact phase diagram (Fig. 3) is divided into eleven energy classes. Class boundaries correspond to a constant Weber number. The first limit was set to a Weber number of 0.02. The first energy class contains drops with a Weber number below 0.02. Successive boundaries correspond to a three times increase of drop Weber number. Boundary progression was chosen to collect enough drops to compute a representative probability of occurrence for each impact outcome within classes. Weber numbers are computed with static surface

tension of distilled water and velocity modulus. Since surface tension is the main drop factor involved in impact outcome, the energy scale can be used for formulation comparison.

Figure 4 presents volume distribution maps for six trials performed for two liquids at various surface orientations. Proportions of impact outcomes relative to the total volume are computed within eleven impact energy classes. For distilled water (Fig. 4a–c), adhesion proportion decreases monotonically to reach zero for the sixth energy class ( $We < 4.86$ ) on the horizontal surface (Fig. 4a) and energy class 5 ( $We < 1.62$ ) at 30° and 60° (Fig. 4b and c respectively). Adhesion is gradually substituted by rebound below these thresholds. For instance, adhesion has 55 % probability of occurrence in the third energy class on the horizontal surface (Fig. 4a). Finally, for higher Weber numbers, rebound is substituted by splashing. The rebound/splashing boundary is sharper than the adhesion/rebound transition. A splashing threshold is located between the eighth and ninth energy class for 0° (Fig. 4a) and 30° (Fig. 4b) but between ninth and tenth class at 60° (Fig. 4c). For surfactant solution (Fig. 4d–f), the situation is quite different. As already seen in Fig. 3, total rebound is dramatically reduced in favor of adhesion. However, increasing surface angle induces a slight rise in rebound occurrence. As for distilled water, the fragmentation threshold is reduced with angle increase (eighth class at 60°, Fig. 4f). Due to reduction of observed droplets with increasing surface angle (Table 1), some classes are empty in the measurements (Fig. 4f).

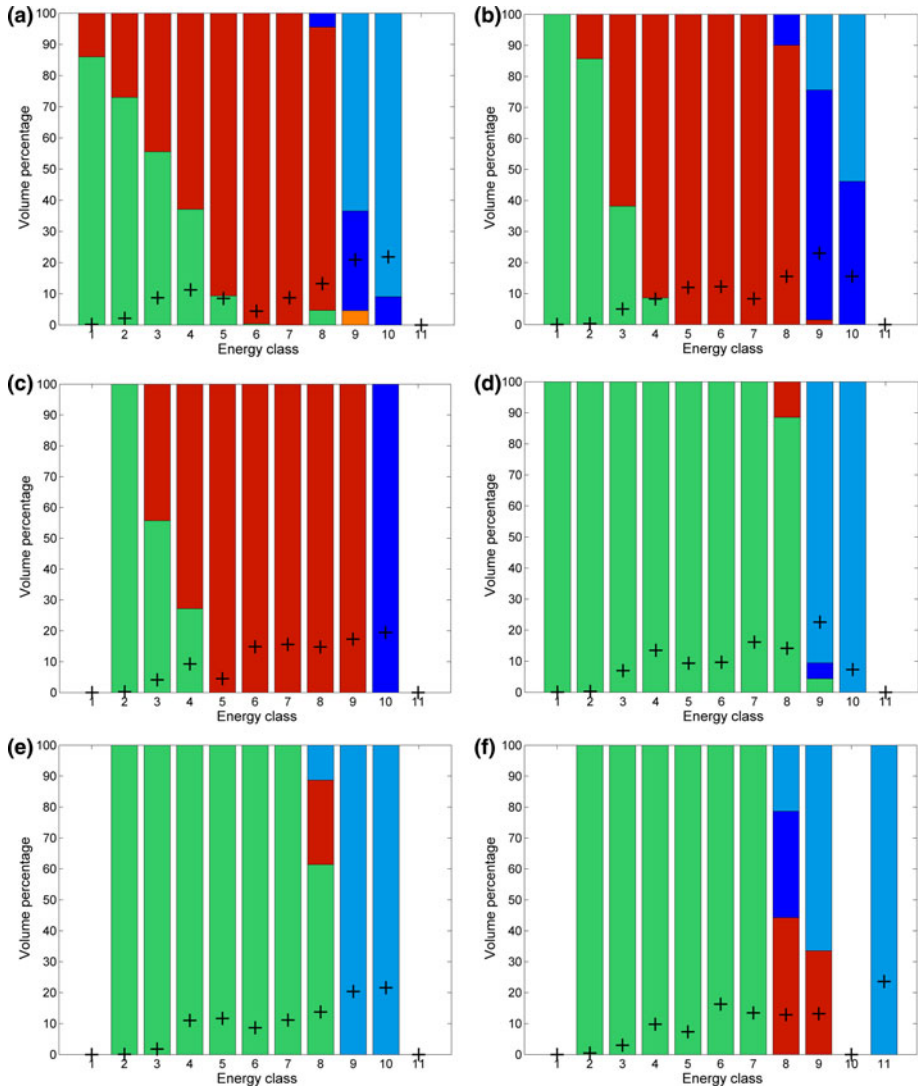
#### Retention by blackgrass leaf

The number of droplet impacts was quite low during these experiments for practical reasons. Interpretations are then difficult but the trends can however be outlined. The probability of adhesion at first impact is in the low tens whatever leaf angle for distilled water (Table 2). A slight growth of rebound proportion is observed with increasing leaf angle. Fragmentation proportion decreases accordingly, essentially in the Cassie–Baxter wetting regime. For surfactant, adhesion proportion is in the low twenties, with a slight decrease with increasing leaf angle. Rebound is non-existent on horizontal blackgrass leaf, measurements that may be related to low number of droplets in the relevant energy class for this trial. About 60 % of spray volume splashes. On a horizontal surface, a high proportion of partial splashing is corroborated by the absence of rebound. By increasing leaf inclination, total splashing (Cassie–Baxter wetting regime) takes over partial splashing (Wenzel wetting regime) because of the lower normal velocity component, which increases splashing threshold energy.

The epidermis outermost layer of a blackgrass leaf is comprised of hairs and a structure of unidirectional grooves. This specific leaf roughness pattern clearly affects drop impact behavior compared with an artificial surface with a regular pyramidal roughness pattern. First, a slight occurrence of partial rebound is only observed on a leaf inclined at 30° for both liquids, which seems to correspond to the mean hair inclination on a blackgrass leaf. Secondly, fragmentation outcomes are directional and symmetrical since secondary droplets are ejected preferentially in both ways along surface grooves. All this highlights the variability at the leaf scale.

#### Surface comparison

From the comparison of results for both surfaces (Table 1 and 2), increasing surface angle leads to increased rebound proportion for distilled water. The splashing energy threshold is



**Fig. 4** Impact outcome probability as a function of energy classes on artificial super-hydrophobic surface (green adhesion, red total rebound, orange partial rebound, dark blue total splashing and sky blue partial splashing), + volume proportion of each energy class relative to total volume observed before impact: **a–c** distilled water, **d–f** Break-Thru<sup>®</sup>S240 at 0.1 % (v/v) in distilled water, **a, d** horizontal surface, **b, e** 30° surface angle and **c, f** 60° surface angle (Color figure online)

lower on a blackgrass leaf, which increases splashing and decreases rebound volume proportions accordingly. As expected, surfactant increases adhesion at first impact compared to distilled water. The effect is more pronounced on an artificial surface than on the blackgrass leaf surface. Rebound is almost annihilated on both surfaces by decreasing DST. Rebound is replaced by adhesion on a synthetic surface and by fragmentation on the leaf surface, which was not expected. Nevertheless rebound proportion increases with increasing surface angle on both surfaces. Splashing energy threshold is also reduced

**Table 2** Spray features immediately before impact on blackgrass leaf with an anisotropic roughness pattern (merged from five sprayings)

Surface angle ( $\alpha$ ), °	Distilled water			0.1 % (v/v) Break-Thru S240® in distilled water		
	0	30	60	0	30	60
Number of observed droplets at impact ( $N$ )	42	29	25	22	33	12
$N \cdot \cos(\alpha)$	42	36	21	22	19	11
Total droplet volume ( $V$ ) ( $10^{-10}$ m <sup>3</sup> )	1.4	1.0	0.9	0.6	1.7	0.3
$V \cdot \cos(\alpha)$	1.4	1.2	0.7	0.6	0.5	0.3
$D_{V50}$ ( $\mu$ m)	230	213	265	230	269	218
Adhesion (vol%)	2.7	13.7	5.8	17.5	19.6	12.3
Rebound C–B (vol%)	25.1	34.1	46.8	0.0	9.0	3.1
Rebound W (vol%)	0.0	2.8	0.0	0.0	6.5	0.0
Splashing C–B (vol%)	70.1	49.4	38.3	39.1	61.4	63.1
Splashing W (vol%)	2.1	0.0	9.1	43.4	3.5	21.5

owing to the directional roughness patterns of the leaf surface. The amount of liquid left on the surface after a splashing in the Wenzel regime is not negligible in the overall retention by the plant as this impact outcome occurs always for larger droplets, which represents a huge part of the total volume despite their lower occurrence. It could be interesting to relate the impact outcomes with the overall retention in further studies.

## Conclusions

An experimental technique for investigating droplet behavior at impact was proposed to guide the improvements of spray application technologies needed in the context of precision farming. Concerning spot spraying, the discontinuous nature of application drives the development of small nozzles able to target a single plant. For such a small area, there is a temptation to use bigger droplets directed straight downwards to be less prone to drift and offer a better control of their trajectory toward the target, what may be highly detrimental to retention. A complete understanding of the behavior at impact of these droplets as a function of the plant surface and architecture is therefore highly necessary to choose the optimal compromise between droplet size, speed and ejection angle.

In this paper, the technique has been used to investigate how the spray application features may influence spray retention efficiency depending on target properties. The broad droplet size and velocity distribution of a hydraulic nozzle was used to explore a wide range of impact energy classes. The emphasis was set on the effect of droplet impact angles since a wide range of orientation can be encountered during spray application because of droplet trajectory and leaf angle variabilities. At first glance, increasing leaf angle reduces the surface area available to droplet capture by plants, which reduces retention. Droplet impact behavior is modified since surface tilt induces a tangential velocity component and, consequently, a reduction of the normal component. Reduction of the normal velocity component mitigates transition from the Cassie–Baxter to the Wenzel wetting regime during impact on a regular roughness pattern surface. A blackgrass leaf that presents an anisotropic roughness pattern favors fragmentation compared to the artificial surface where

the rebound proportion is higher. Direct adhesion represents a low spray volume proportion whatever the surface tested except when using the super-spreader on an artificial surface. In general, direct adhesion is almost constant with increasing surface angle. For distilled water, fragmentation proportion decreases with increasing surface angle on both surfaces. Fragmentation is essentially comprised of total splashing.

Treating grass weeds with a predominant vertical leaf orientation such as blackgrass appears to be very difficult using sprays directed more or less vertically downwards. If bigger droplets are preferred to gain trajectory controllability, a super-spreader is highly recommended to reduce losses on these superhydrophobic targets. An angled spray for maximizing the impact occurrence on the leaf should be used to further improve retention.

**Acknowledgments** This research was funded by Service Public Wallonie DG06 (Belgium) in the framework of the EUREKA (<http://www.eurekanetwork.org/>) project 4984 VEGEPHY.

## References

- Baetens, K., Nuyttens, D., Verboven, P., De Schampheleire, M., Nicolaï, B., & Ramon, H. (2007). Predicting drift from field spraying by means of a 3D computational fluid dynamics model. *Computers and Electronics in Agriculture*, *56*(2), 161–173.
- Barthlott, W., Neinhuis, C., Cutler, D., Ditsch, F., Meusel, I., Theisen, I., et al. (1998). Classification and terminology of plant epicuticular waxes. *Botanical Journal of the Linnean Society*, *126*(3), 237–260.
- Bird, J. C., Scott, S. H., Tsai, S. S. H., & Stone, H. A. (2009). Inclined to splash: triggering and inhibiting a splash with tangential velocity. *New Journal of Physics*, *11*, 063017.
- Butler Ellis, M. C., & Miller, P. C. H. (2010). The Silsoe Spray Drift Model: A model of spray drift for the assessment of non-target exposures to pesticides. *Biosystems Engineering*, *107*(3), 169–177.
- Butler Ellis, M. C., Webb, D. A., & Western, N. M. (2004). The effect of different spray liquids on the foliar retention of agricultural sprays by wheat plants in a canopy. *Pest Management Science*, *60*(8), 786–794.
- Callies, M., & Quere, D. (2005). On water repellency. *Soft Matter*, *1*(1), 55–61.
- Cassie, A. B. D., & Baxter, S. (1944). Wettability of porous surfaces. *Transactions of the Faraday Society*, *40*, 546–551.
- Furmidge, C. G. L. (1962). Physico-chemical studies on agricultural sprays. IV.—The retention of spray liquids on leaf surfaces. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *13*(2), 127–140.
- Gaskin, R. E., Steele, K. D., & Forster, W. A. (2005). Characterising plant surfaces for spray adhesion and retention. *New Zealand Plant Protection*, *58*, 179–183.
- Ghosh, S., & Hunt, J. C. R. (1998). Spray jets in a cross-flow. *Journal of Fluid Mechanics*, *365*, 109–136.
- Giles, D. K., Slaughter, D. C., & Upadhyaya, S. K. (2002). Biological target sensing and sprayer control. *Aspect of Applied Biology*, *66*, 129–138.
- Holterman, H. J., van de Zande, J. C., Porskamp, H. A. J., & Huijsmans, J. F. M. (1997). Modelling spray drift from boom sprayers. *Computers and Electronics in Agriculture*, *19*(1), 1–22.
- Jensen, P. K. (2012). Increasing efficacy of graminicides with a forward angled spray. *Crop Protection*, *32*, 17–23.
- Journaux, L., Simon, J. C., Destain, M. F., Cointault, F., Miteran, J., & Piron, A. (2011). Plant leaf roughness analysis by texture classification with generalized Fourier descriptors in a dimensionality reduction context. *Precision Agriculture*, *12*(3), 345–360.
- Knoche, M. (1994). Effect of droplet size and carrier volume on performance of foliage-applied herbicides. *Crop Protection*, *13*(3), 163–178.
- Lake, J. R., & Marchant, J. A. (1983). The use of dimensional analysis in a study of drop retention on barley. *Pesticide Science*, *14*(6), 638–644.
- Lecuona, A., Sosa, P. A., Rodríguez, P. A., & Zequeira, R. I. (2000). Volumetric characterization of dispersed two-phase flows by digital image analysis. *Measurement Science & Technology*, *11*(8), 1152–1161.
- Lee, W. S., Slaughter, D. C., & Giles, D. K. (1999). Robotic Weed Control System for Tomatoes. *Precision Agriculture*, *1*(1), 95–113.
- Massinon, M., & Lebeau, F. (2012a). Comparison of spray retention on synthetic superhydrophobic surface with retention on outdoor grown wheat leaves. *Aspect of Applied Biology*, *114*, 261–268.

- Massinon, M., & Lebeau, F. (2012b). 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.
- Massinon, M., & Lebeau, F. (2013). Review of physicochemical processes involved in agrochemical spray retention. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, *17*(3), 494–504.
- Mathews, G. (2008). *Pesticide Application Methods* (3rd ed.). Oxford: Blackwell.
- Miller, P., Tillett, N., Hague, T., & Lane, A. (2012a). The development and field evaluation of a system for the spot treatment of volunteer potatoes in vegetable crops. *Aspect of Applied Biology*, *112*, 113–120.
- Miller, P., Tillett, N., Swan, T., Tuck, C., & Lane, A. (2012b). The development and evaluation of nozzle systems for use in targeted spot spraying applications. *Aspect of Applied Biology*, *114*, 159–166.
- Mokeba, M. L., Salt, D. W., Lee, B. E., & Ford, M. G. (1997). Simulating the dynamics of spray droplets in the atmosphere using ballistic and random-walk models combined. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *67–68*, 923–933.
- Mundo, C., Sommerfeld, M., & Tropea, C. (1995). Droplet-wall collisions: Experimental studies of the deformation and breakup process. *International Journal of Multiphase Flow*, *21*(2), 151–173.
- Nieuwenhuizen, A. T., Hofstee, J. W., & Henten, E. J. (2010). Adaptive detection of volunteer potato plants in sugar beet fields. *Precision Agriculture*, *11*(5), 433–447.
- Quérel, D. (2005). Non-sticking drops. *Reports on Progress in Physics*, *68*(11), 2495–2532.
- Reichard, D. L., Cooper, J. A., Bukovac, M. J., & Fox, R. D. (1998). Using a videographic system to assess spray droplet impaction and reflection from leaf and artificial surfaces. *Pesticide Science*, *53*(4), 291–299.
- Rein, M. (1993). Phenomena of liquid drop impact on solid and liquid surfaces. *Fluid Dynamics Research*, *12*(2), 61–93.
- Rioboo, R., Voué, M., Vaillant, A., & De Coninck, J. (2008). Drop Impact on Porous Superhydrophobic Polymer Surfaces. *Langmuir*, *24*(24), 14074–14077.
- Šikalo, Š., Tropea, C., & Ganić, E. N. (2005). Impact of droplets onto inclined surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*, *286*(2), 661–669.
- Søgaard, H. T., & Lund, I. (2007). Application Accuracy of a Machine Vision-controlled Robotic Microdosing System. *Biosystems Engineering*, *96*(3), 315–322.
- Stow, C. D., & Hadfield, M. G. (1981). An Experimental Investigation of Fluid Flow Resulting from the Impact of a Water Drop with an Unyielding Dry Surface. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, *373*, 419–441.
- Taylor, P. (2011). The wetting of leaf surfaces. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, *16*(4), 326–334.
- Tellaeché, A., BurgosArtizú, X. P., Pajares, G., Ribeiro, A., & Fernández-Quintanilla, C. (2008). A new vision-based approach to differential spraying in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, *60*(2), 144–155.
- Thorp, K. R., & Tian, L. F. (2004). A review on remote sensing of weeds in agriculture. *Precision Agriculture*, *5*(5), 477–508.
- Tsai, P., Hendrix, M. H. W., Dijkstra, R. R. M., Shui, L., & Lohse, D. (2011). Microscopic structure influencing macroscopic splash at high Weber number. *Soft Matter*, *7*(24), 11325–11333.
- Venzmer, J. (2011). Superspreading: 20 years of physicochemical research. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, *16*(4), 335–343.
- Walklate, P. J. (1987). A random-walk model for dispersion of heavy particles in turbulent air flow. *Boundary-Layer Meteorology*, *39*(1–2), 175–190.
- Wenzel, R. (1936). Resistance of solid surface to wetting by water. *Industrial and Engineering Chemistry*, *28*(8), 988–994.
- Wirth, W., Storp, S., & Jacobsen, W. (1991). Mechanisms controlling leaf retention of agricultural spray solutions. *Pesticide Science*, *33*(4), 411–420.
- Yarin, A. L. (2006). Drop impact dynamics: Splashing, spreading, receding, bouncing.... *Annual Review of Fluid Mechanics*, *38*, 159–192.
- Zabkiewicz, J. A. (2007). Spray formulation efficacy: Holistic and futuristic perspectives. *Crop Protection*, *26*(3), 312–319.
- Zhao, Y., Lu, Q., Li, M., & Li, X. (2007). Anisotropic wetting characteristics on submicrometer-scale periodic grooved surface. *Langmuir*, *23*(11), 6212–6217.
- Zu, Y. Q., Yan, Y. Y., Li, J. Q., & Han, Z. W. (2010). Wetting behaviours of a single droplet on biomimetic micro structured surfaces. *Journal of Bionic Engineering*, *7*(2), 191–198.



## HIGH-SPEED IMAGING USE TO PREDICT SPRAY RETENTION ON BARLEY LEAVES.

H.H. BOUKHALFA<sup>1,2</sup>, M. MASSINON<sup>2</sup> and F. LEBEAU<sup>2</sup>

<sup>1</sup> University Mohamed Khider Biskra, Faculty of Sciences and sciences of nature and life  
Dept. Agronomy, BP 145 RP 07000 Biskra, Algeria

<sup>2</sup> University of Liege, Gembloux Agro-Bio Tech, Mechanic and building unit  
Dept. Sciences and technologies of the Environnement. Bât. 2, Passage des déportés, 2. 5030 Gembloux, Belgium

Corresponding author E-mail: hassinaboukhalfa@gmail.com

### SUMMARY

**Key words:** spray retention, spectrofluorometry, drop impact, high-speed imaging. Measuring spray retention by plant leaves was the aim of many experiments in plant protection researches. Different methods have been used to measure spray proportion retained on vegetative surfaces, such as chemical methods using dyes and other methods using image analysis. We conducted Laboratory studies in order to validate the effectiveness of using high-speed imaging method developed by Massinon & Lebeau (2012a) to replace chemical analysis by spectrofluorometry. Measurements were performed with a high speed camera coupled with a retro-LED lighting. Sizes and velocities of the drops were extracted by image analysis and drop impact behaviours were determined by the operator. Drops were produced with a flat-fan nozzle mounted on a movable ramp. Two surfactants (Break Thru S240® and Li700®) were sprayed to highlight the effect of the reduction of surface tension. Sprays contained a fluorescent tracer for the chemical analysis, fluoresein. Relative volume proportions were computed within of an energy scale based on the Weber number. Results of high-speed imaging were compared to those of the chemical analysis by spectrofluorometry.

### INTRODUCTION

Pesticides are still going to be used for many decades to ensure the food supply for the ever growing world population (Wang et al., 2007). That's why phenomena governing spray retention on plants are investigated for a very long time in order to optimise pesticide application.

Higher spray deposition on the target leaves will likely result in more uptake by plant and less pesticide available for environmental contamination (Smith et al., 2000). Retention is the overall capture by plant surfaces of droplets either on initial or subsequent impact. Droplet adhesion is a consequence of dynamic interactions of formulants within the spray droplet during flight and on impact, physical properties of the droplet (size and velocity), leaf surface morphology, and leaf orientation (Forster et al., 2005). However, leaf morphology may play an important role in spray deposition because, different leaf structures such as wax, hairs, edges and veins are important impingement and retention variables (Smith et al., 2000).

Works of Holloway et al. (2000) confirmed also that, tank-mix adjuvants can have a considerable influence on the efficiency of delivery of water sprays. They affect the physico-chemical properties of spray droplets in terms of their ultimate impaction and spreading behaviour. Surfactants are the most widely used adjuvant type in agrochemical applications and the most efficient in enhancing their efficacy (Wang et al., 2007). So maximising pesticide efficacy requires good control of droplet size and velocity distributions (Butlet Ellis et al., 1997).

Drift-reducing adjuvants and many other adjuvants used to improve droplet behaviour on the target influence droplet sizes (Butlet Ellis et al., 1999). Spray formation, droplet transport to the target and droplet interaction with the target can all be affected (Butlet Ellis et al., 1997).

Model track sprayer studies have been conducted to investigate this phenomenon and have led to the design of models to explain the retention effect (Stock, 1997). The model of Stevens et al. (1993) was the first one to address primary adhesion effects. It showed that velocity and droplet size gave a high degree of correlation with adhesion and was the starting point for a universal model of adhesion produced by Forster et al. (1998) which was further improved (Forster et al., 2002) by extending the number of droplet sizes studied, and adding droplet size and droplet velocity at time of impact as variables as well as improving the method for distinguishing between species (Forster et al., 2005).

Laboratory experiments used to elaborate these models were based on single droplets issued from droplet generators were used to determine retention on plant leaves by washing the dye tracers sprayed on them.

High-speed imaging used in the present study is an experimental measurement method giving informations on all impact outcomes and can highlight the effect of any modification of operational parameters on retention (Massinon and Lebeau, 2012a). The aim is to verify its effectiveness of measuring quantitative retention on plants in order to extend its use as a global measurement method of retention.

## **MATERIALS AND METHODS**

### ***Test bench***

A laboratory test bench was developed to record droplet impacts using high speed shadowgraphy (Massinon & Lebeau, 2012a). It consists in a spray nozzle mounted on a linear timing-belt unit and moved at constant speed above a spray area using a servo-motor and controller. The nozzle is feed at constant pressure using a pressurised vessel on the basis of a pressure gage measurement. In the presented study, impacts occurring on barley excised leaves (0,3 cm<sup>2</sup>) using 2 different tank mixes witch are compared to water. In both 3cases fluorescent tracer is used at the rate of 1g/l.

### ***Image analysis***

In this step, velocities and sizes of droplets are computed by a Particle Tracking Velocimetry Sizing (PTVS) Matlab program developed by Massinon & Lebeau (2012a). The impact type and the splashing proportions sticking on the leaf are determined by the operator. Sizes of droplets were corrected for compensating the evaporation losses of water volumes with an evaporation model developed by Guella et al. (2007) computed in a Matlab program.

### ***Trials***

Trials were performed using a Teejet XR11003VK nozzle at 0.2 MPa, 0.96 l/min. The nozzle was moved at 2m/s, corresponding to 160 l/ha application rate for 50cm nozzle spacing. Three spray mixtures were tested: Tap water + 1% mass natrium fluorescein, Tap water + 0, 1% Vol/Vol Break-Thru S-240 + 1% mass natrium fluorescein, and Tap water + 0, 25% Vol/Vol Li-700, + 1% mass natrium fluorescein.

Sprays were conducted in environment conditions of 18° temperature and 40% relative humidity.

Ten sprays were done for each tank mix, and videos of spraying were registered for image analysis. Each leaf sprayed was conserved in 20ml of K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> solution and put out of light.

Those solutions were examined by a spectrofluorometer SHIMADZU CORPORATION model RF-1501 at Excitation wave length of 460 nm and Emission wave length of 540 nm in order to measure the quantity of spraying retained by the excised leaves.

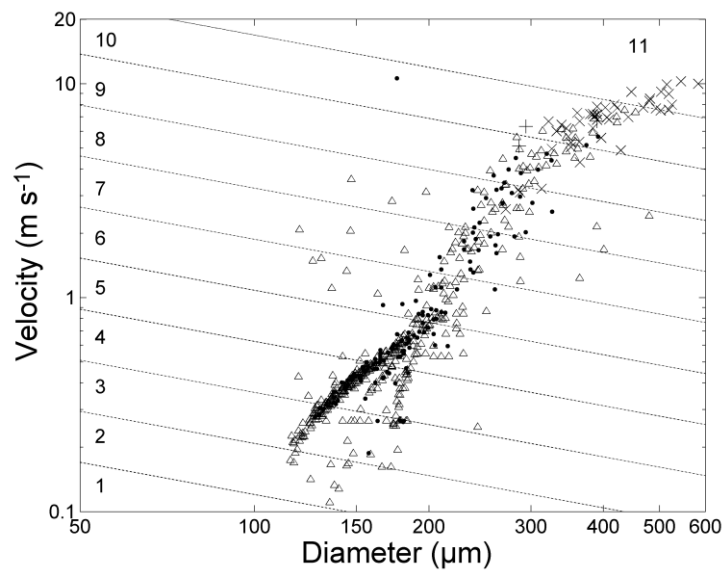
## RESULTS AND DISCUSSION

### *Droplets impact behaviour:*

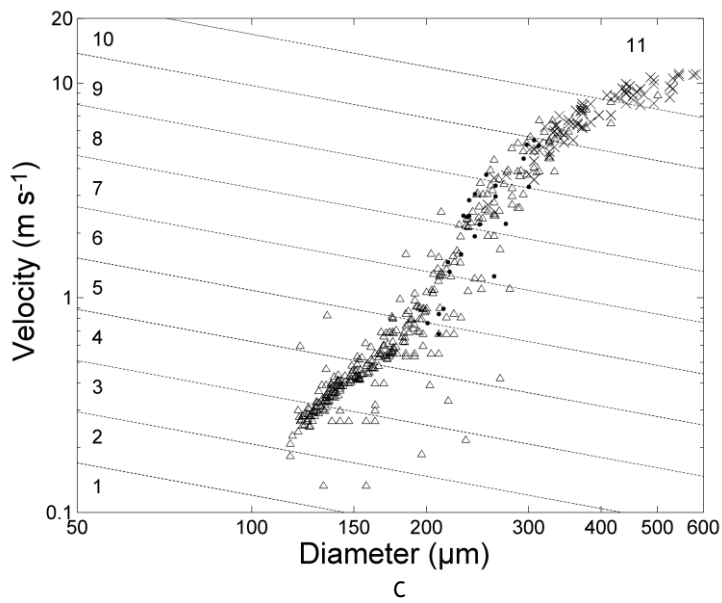
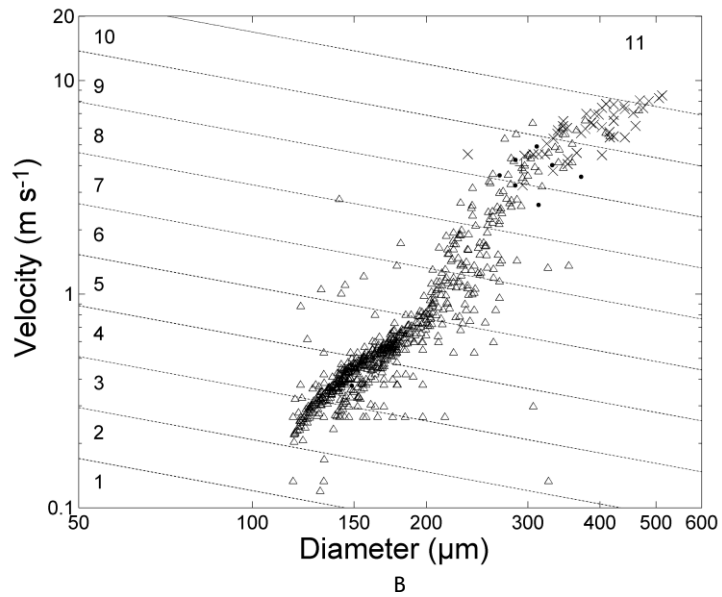
In figures 2 a, b and c, results obtained by image analysis for the three spray mixtures are represented by diagrams showing the distribution of different impact behaviours of droplets relating to their diameters and velocities.

The diagrams are in a log-log scale for a clear representation of the wide drop size and speed.

Each impact type is represented by a symbol as :  $\Delta$  adhesion,  $\bullet$  rebound, + fragmentation (Cassie-Baxter) and x fragmentation (Wenzel).



A



**Figure 1.** Impact behaviour Distribution of diameters and velocities of droplets extracted from 10 trials for the three tank mixtures -  $\Delta$  adhesion,  $\bullet$  rebound, +fragmentation in Cassie-Baxter regime,  $\times$  fragmentation in Wenzel regime; a) Tap water, b) Tap water+Break-Thru S240 0.1% v/v, c) Tap water+Li700 0.25% v/v.

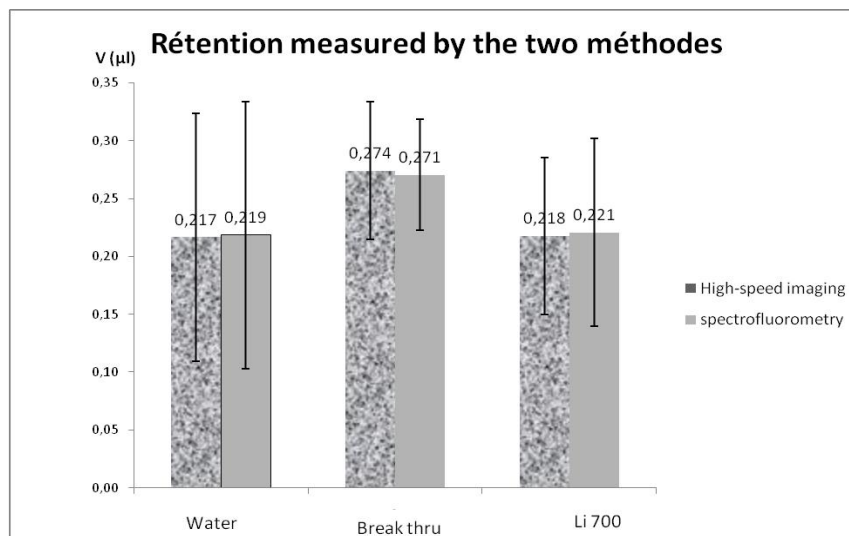
Results of water (figure 1a) show a coexistence of drop adhesion and bouncing. In theoretical model, a clear transition between adhesion and bouncing is stated. In higher energy classes, splashing appears in both Cassie-Baxter and Wenzel wetting regimes as well as adhesion and rebound. For the highest energy classes, only splashing, mainly in Wenzel regime occurs. There is no a net transition between the different impact behaviours. A much clearer transition between the different possible impact outcomes is observed with some plants as black-grass (Massinon et al., 2012). The coexistence of bouncing and adhesion is related to the low homogeneity of contact angles at the scale of drops for the adaxial barley leaf surface. The same coexistence has been observed for outdoor grown winter wheat (Massinon & Lebeau, 2012b). The splashing in Wenzel regime is prevalent for the same reason.

For the mixture containing Break Thru S240 (figure 1b), bouncing is not observed up to energy class 8. This behaviour is characteristic of the low dynamic surface tension of this super-spreader organosilicone adjuvant. Cassie Baxter regime is only seldom observed in the Weber energy class 9, with few bouncing and a splashing. Break-thru increase greatly adhesion and decrease highly rebound comparing to water

The results for the wetting agent Li700 presented in Figure 1c, show that The effect is therefore limited on energy class 5. However, splashing occurs only in Wenzel wetting regime. Decrease of adhesion is compensated by the increase of shattering in Wenzel regime related to the higher VMD( volume median diameter).

#### ***Retention observed by shadowgraphy and measured by spectrofluorometry:***

Sprays containing fluorescein deposits on leaf samples observed by high-speed imaging were quantified by spectrofluorometry.



**Figure 2.** Comparison of retention measured by spectrofluorometry and observed by high-speed imaging.

Figure 2 represents volumes of spray retained by excised leaves of barley measured by the two methods, high-speed imaging and spectrofluorometry.

For high-speed imaging, retention was quantified on the basis of observations by addition of adhesion volume and the part sticking on the leaves from splashing volume.

The diagram confirms that both methods give almost the same results. But high-speed imaging method provides much more information on each droplet of the spray and can explain the effect of adjuvants on the spray characteristics. This encourages us to adopt this experimental method for its efficiency.

In his studies, Stock (1997) confirmed that the superspreading effect of organosilicone materials can have a significant impact upon retention efficiency. But he thought that the subsequent superspreading may, depending on spray volume, lead to excessive runoff and a reduced net retention whilst the initial effect on retention may be beneficial.

Our results confirm, by the observation of the droplet behaviour on a small scale at the moment of impact, that consideration of splashing and bouncing in Wenzel regime is necessary for measuring spray retention on plant leaves.

## CONCLUSION

High-speed imaging method provides mainly the same quantitative results obtained by spectrofluorometry. However, it can give also qualitative information on the effect of adjuvants on impact behaviour. Such information can help researchers to understand phenomena controlling the drop behaviour when impacting the plant surface.

Experimental method based on high speed imaging (Massinon & Lebeau, 2012a) may contribute to the ultimate goal of highly accurate process driven retention models as realistic phase diagram of impact behaviour are obtained for spray-mixture / leaf combinations this way.

This method has confirmed its efficiency and the possibility of replacing the chemical method based on dyes analysis.

## LITERATURE

- Butler Ellis M.C., & Tuck C.R. (1999). How adjuvants influence spray formation with different hydraulic nozzles. *Crop Protection*. **18**:101-109.
- Butler Ellis M.C., Tuck C.R., & Miller P.C.H. (1997). The effect of some adjuvants on sprays produced by agricultural flat fan nozzles. *Crop Protection*. **16**:41-50.
- Forster W.A., Kimberley M.O. & Zabkiewicz J.A. (2005). A universal spray droplet adhesion model. *Transactions of the ASAE*. **48**(4):1321-1330.
- Massinon, M., Lebeau, F. (2012a). 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.
- Massinon, M., Lebeau, F. (2012b). Comparison of spray retention on synthetic superhydrophobic surface with retention on outdoor grown wheat leaves. *International Advances in Pesticide Application: Aspects of Applied Biology*. **114**:261-268. Warwick, UK: Association of Applied Biologists.
- Massinon, M., Boukhalifa, H. H, Marechal, P, Lebeau, F. (2012). The effect of leaf orientation on spray retention on blackgrass. 11 th international conference on precision Agriculture, Indianapolis, USA.
- Smith D.B., Askew S.D., Morris W.H., Shaw D.R. & Boyette M. (2000). Droplet size and leaf morphology effects on pesticide spray deposition. *Transactions of the ASAE*. **43**(2): 255-259.
- Stock D. (1997). Do we need adjuvants? Mechanistic studies and implications for future developments. *Proc. 50<sup>th</sup> N.Z. Plant protection Conf.*: 185-190.
- Wang C.J. & Liu Z.Q. (2007). Foliar uptake of pesticides-Present status and future challenge. *Pesticide Biochemistry and Physiology*. **87**:1-8.

## **Spray retention assessment combining high-speed shadow imagery and fluorescence techniques**

By M MASSINON<sup>1</sup>, H BOUKHALFA<sup>2</sup> and F LEBEAU<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*University of Liège (ULg), Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT), Gembloux, Belgium*

<sup>2</sup>*University Mohamed Khidar, Biskra, Algeria*

Corresponding Author Email: m.massinon@ulg.ac.be

### **Summary**

Droplet behaviour during impact affects retention by leaves. The increase of droplet adhesion to plant leaves is the objective when applying crop protection products, while droplet bouncing and fragmentation are usually seen as detrimental to spray retention. However, observation of droplet impacts on barley using high speed imaging showed that fragmentation impact outcome can occur in two different wetting regimes: Cassie-Baxter or Wenzel's regime. In the latter, a fraction of the droplet is anchored in the surface roughness, what contributes to retention. Three mixtures were sprayed on excised barley leaves with an 11003 flat-fan nozzle operating at 0.2 MPa. Simultaneous measurements were performed using high speed imaging for droplet impact characterisation. A fluorescent tracer was added to the spray mixture for retention assessment. Retention was related to impact type considering the fraction of the droplet remaining on the leaf surface after a droplet splashing occurring in Wenzel's wetting regime. This fraction varied from 28–46% depending on the spray mixture and was correlated to the Volume Median Diameter  $D_{v0.5}$  of the impacting droplets.

**Key words:** Spray retention, spray impact, pinning fragmentation, splashing, Wenzel wetting regime

### **Introduction**

An efficient spraying requires minimising the risk of spray drift while increasing the amount of mixture retained by crop leaves. Much work has been devoted over years to measure and model the off-target spray deposition, which resulted in improved spraying application efficiency. In the last decade many studies focused on the on-target deposition through the development of more precise application equipment for spot spraying. A further efficiency improvement can therefore be achieved through a better understanding of the droplet-leaf interactions, which is profitable whatever the application technique used.

Currently, surfactants are widely used to provide a better spreading of droplets on the leaves, especially when their dynamic surface tension (DST) is very low (Venzmer, 2011). Such adjuvants affect the mixture wetting behaviour and consequently the droplet impact behaviour, providing a direct influence on spray retention by leaves. Overall maximizing droplet adhesion is the objective when applying plant protection products, while droplet bouncing and fragmentation are often seen as detrimental to spray retention, this simplification leads to systematic errors when modelling spray retention.

Leaf surfaces vary widely between species, from relatively smooth to highly rough surfaces owing to a coating of epicuticular wax crystals that exhibit great morphological diversity including films, crusts, tubules, platelets, rodlets and transversely ridged rodlets (Barthlott *et al.*, 1998). These characteristics give leaf surfaces extreme water repellency making such targets very difficult-to-treat, especially at early growth stages. Two regimes of leaf wetting are possible depending on the liquid surface tension and the surface roughness (Taylor, 2011) (Fig. 1). When the surface tension is too high to expel the air layer between the droplet and the wax coating, the droplet is held on a thin air layer above the surface roughness, which is the Cassie-Baxter's wetting state. If the surface tension of the liquid is sufficiently low to displace air and penetrate between the crystals, this is called the Wenzel or pinning wetting state. During spray impact on such surfaces, the droplet energy influences the wetting state (Massinon & Lebeau, 2013) and consequently, affects the droplet impact behaviour (Fig. 1). For instance, the droplet may undergo a transition from the Cassie-Baxter to the Wenzel's state by expelling the trapped air due to the impact pressure. Droplet rebound and splashing on a leaf surface may exist in the Wenzel's wetting state when using surfactant or for a sufficient impact energy threshold. A fraction of the droplet remains therefore on the surface, what contributes to retention.

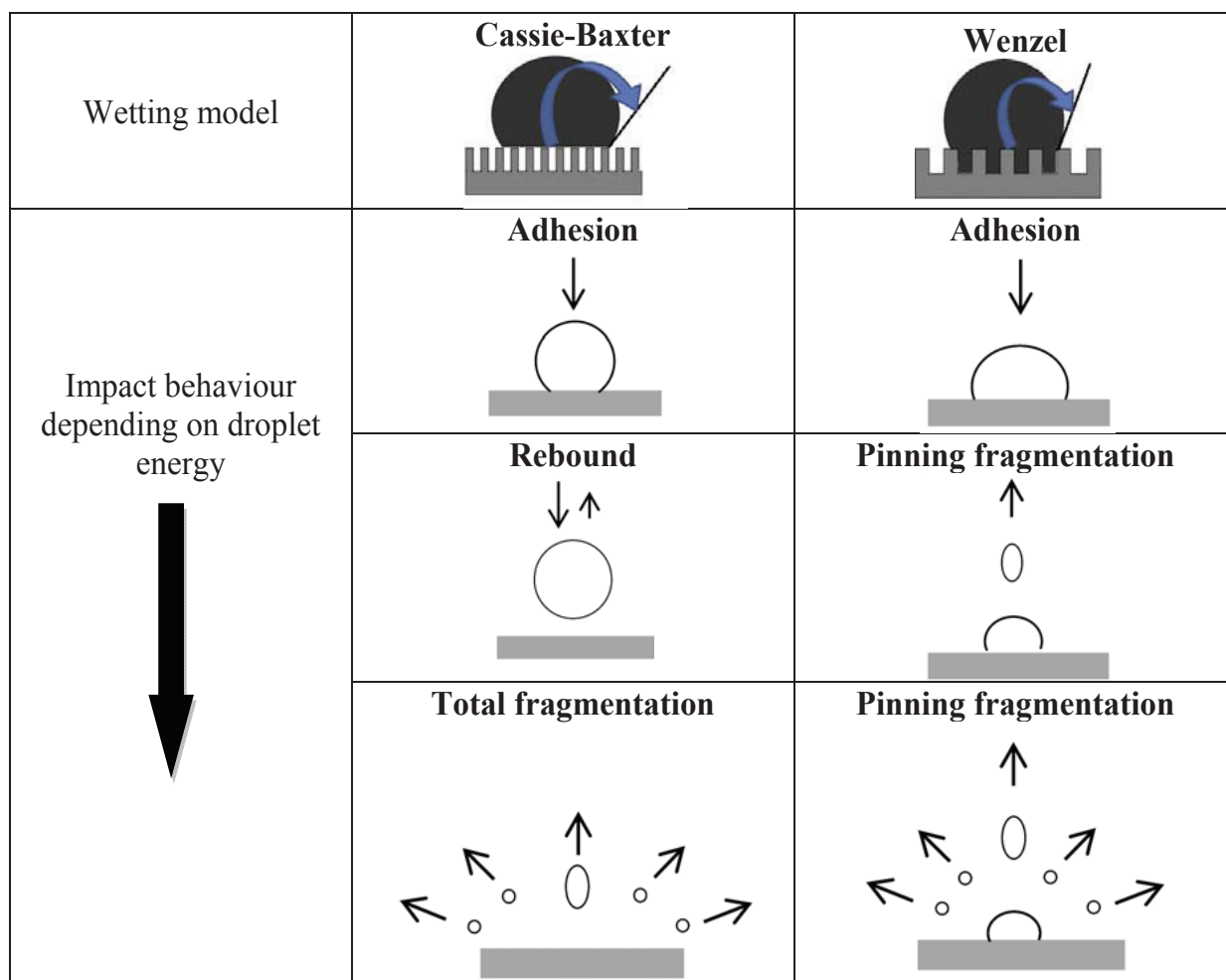


Fig. 1. Droplet impact outcomes depending on leaf wetting regime and droplet energy.

This paper aims to assess the contribution of the droplet impact outcome in Wenzel's wetting regime to spray retention on barley leaves. The methodology relies on the simultaneous measurement of the spray deposits by the observation of droplet impact using high speed shadowgraphy and the dosage of a fluorescent tracer (fluorescein) solved in the spray mixture. Results from imaging method will be compared with the reliable results derived from the chemical method.



## Materials and Methods

### *Laboratory test bench*

Spray impact characterisation was performed with high-speed shadowgraphy technique (Massinon & Lebeau, 2012), which consists in the observation of the droplet shadow projected on the camera sensor during their passage between the camera and lighting source. Quantitative information such as droplet size and velocity and qualitative information such as droplet impact behaviour are available with this technique. High-speed imaging is moreover required to visualise the fast (~2 ms) droplet impact event. The camera probe volume (image width × image height × camera depth of field) was placed 500 mm downward the nozzle output at the target surface level.

### *Trials*

All sprays were produced through a single flat fan Teejet XR11003VK nozzle operated at pressure of 0.2 MPa, flow rate of 0.96 L.min<sup>-1</sup> and moved at 2 m.s<sup>-1</sup>, corresponding to an applied volume of 160 L.ha<sup>-1</sup> for 500 mm spacing between nozzles. Three spray mixtures were tested with 1% m/v fluorescein for quantitative measurement of spray retention by leaves: tap water, tap water + 0.1%v/v Break-Thru S240 (organomodified trisiloxane, Evonik Industries AG) and tap water + 0.25% v/v Li-700 (350 g.L<sup>-1</sup> Soyal phospholipids, 350 g.L<sup>-1</sup> propionic acid, United Agri Products Inc). Spraying was performed at 18°C and 40% RH.

Ten sample slices 10 mm long on 3 mm wide excised from barley leaves were placed horizontally and sprayed with each of the mixtures. The barley was grown indoor at 23°C under Metal Halide lamps at 200 μmol.m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> on expanded clay pebbles using hydroponic nutritive solution. High speed shadowgraphy videos of spray impacts were recorded for image analysis. Each leaf sample sprayed was transferred in 20 mL of K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> (8.71 g.L<sup>-1</sup>) solution and kept in a dark refrigerated box until analysis. Each solution was analysed afterwards using a fluorescence spectrophotometer (RF-1501, Shimadzu Corporation) at 460 nm excitation wave length and 540 nm emission wave length in order to quantify the spray mixture retained by the leaf samples. A calibration curve was performed for each spray mixture.

## Results

### *Spray impact characterisation by high-speed image analysis*

Spray impact characterisation from image analysis is shown in Fig. 2 for 10 sprayings. Subfigures a–c present the impact outcome maps as a function of droplet velocity and diameter in a log-log scale. Impact maps are segmented into eleven energy classes whose thresholds correspond to a constant Weber number using the water static surface tension. Thresholds are separated by a three times increase of the Weber number, the first limit was set to Weber number of 0.02. In this way, the volume proportion of each impact outcome is assessed depending on the impact energy in a histogram that summarises the information in a convenient form and offering a statistical view of spray behaviour as a function of droplet energy and target wettability (Fig. 2d–f).

For instance, in the energy class 7 of the Fig. 2d, there is approximately 65% of the volume that adhered in this energy class. The volume percentages of each impact energy class are represented by “+” in Fig. 2d–f, which helps to account for the relative importance of each class. For instance, the energy class 10 of the Fig. 1d represents about 25% of the total volume which was intercepted by the leaf.

For tap water and Li 700 (Fig. 2c,f), the variability of barley leaf surface results in a coexistence of adhesion and rebound on a wide range of impact energy while the superspreader Break Thru S240 (Fig. 2b,e) annihilates almost completely the droplet bouncing. The Li 700 mixture contains less wetting agent than the Break Thru S240. Splashing thresholds are quite identical whatever the mixture tested, proving their dependence to the target surface.

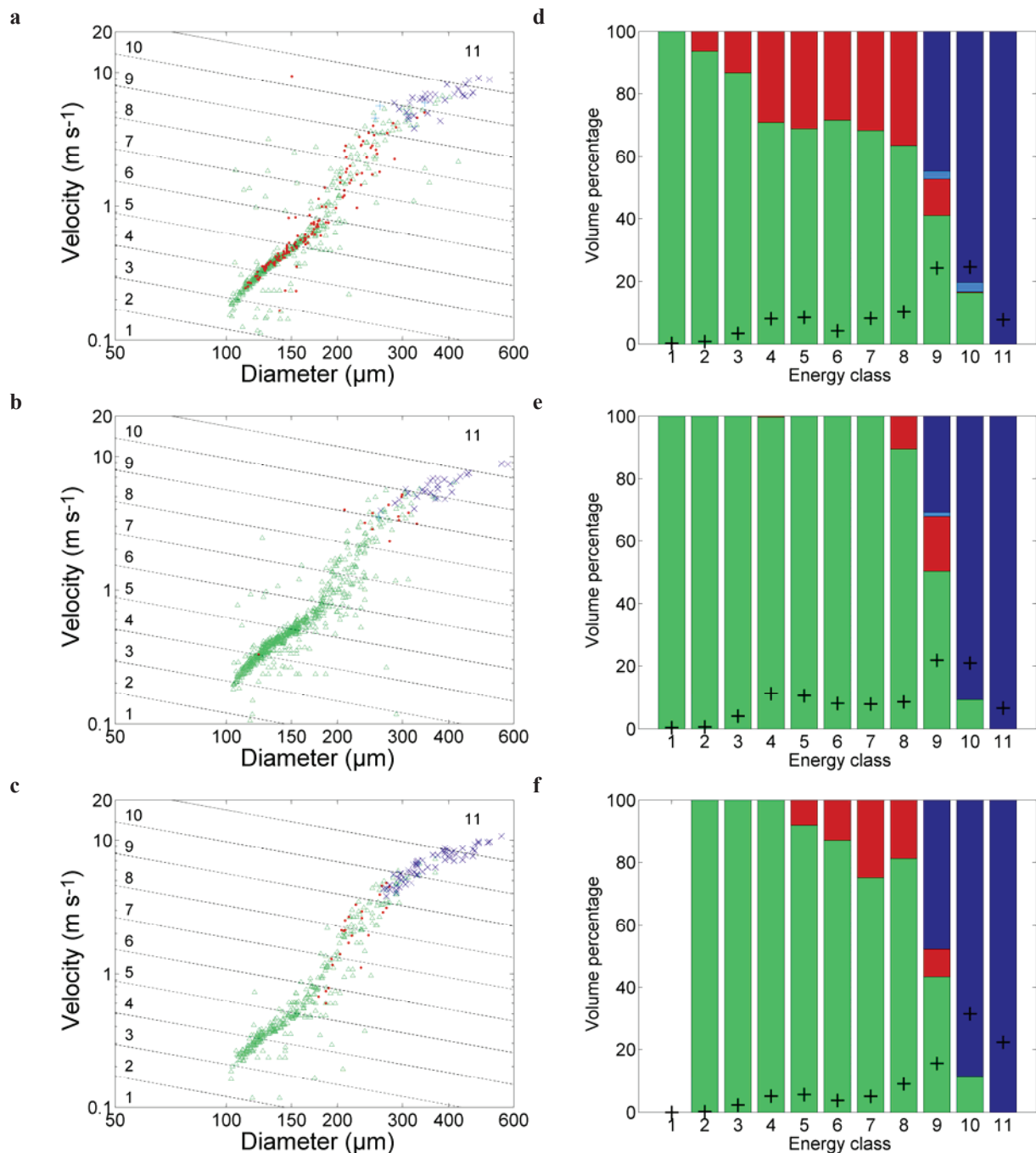


Fig. 2. Spray impact characterisation by high-speed image analysis for ten trials on horizontal barley leaf slice, Teejet XR11003VK, 0.2 MPa, 500 mm height, 2 m.s<sup>-1</sup> nozzle forward speed. (a,d) Tap water, (b,e) Tap water + Break Thru S240 0.1% v/v, (c,f) Tap water + Li 700 0.25% v/v. (a,b,c) Impact outcomes as a function of droplet speed and diameter:  $\Delta$  adhesion,  $\bullet$  rebound,  $+$  fragmentation in Cassie-Baxter wetting regime,  $\times$  fragmentation in Wenzel wetting regime. (d, e, f) Normalized volume percentage as a function of Weber energy class:  $\blacksquare$  adhesion,  $\blacksquare$  rebound,  $\blacksquare$  splashing in Cassie-Baxter wetting regime,  $\blacksquare$  splashing in Wenzel wetting regime,  $+$  volume percentage of this class relative to the total volume observed.

In order to properly assess the correspondence between observed volume by the imaging method and that measured by fluorescent technique, the droplet evaporation during the flight should be considered because the fluorescent tracer concentration in the droplets will increase due to evaporation. This was achieved by resolving the droplet motion and evaporation equations (Guella *et al.*, 2008) with still air hypothesis for every observed droplet. The volume observed by the imaging method is therefore increased by the calculated evaporated volume. The difference in droplet volume due to evaporation for 10 trials accounted for 0.52, 0.41 and 0.38  $\mu$ L for tap water,

tap water + Break Thru S240 and tap water + Li 700 tank mixes respectively. Table 1 presents also the spray impact characteristics at impact. It can be seen that about 39–60% of the spray volume belongs to pinning fragmentation.

Table 1. *Characteristics of the sprays for the three tank mixes from the imaging technique for 10 trials*

Mixture	Drops	VMD ( $\mu\text{m}$ )	Total vol. <sup>1</sup> ( $\mu\text{L}$ )	Volume percentage for each droplet impact outcomes			
				Ad.	R. C-B	Sp. C-B	Sp. W
Tap water	627	317	3.44	41.6	14.3	1.1	43.0
Tap water + Break Thru S240	736	272	3.35	58.0	2.3	0.3	39.4
Tap water + Li 700	448	328	3.31	35.6	4.3	0.0	60.1

<sup>1</sup>Total volume of droplets landing on the leaf increased to account for evaporation.

#### *Simultaneous measurements of retention*

Simultaneous measurements were performed to determine the proportion in pinning fragmentation that remains on the target (Table 2). For the imaging method, the average volume observed is quite similar whatever the mixture used and corresponds to an application rate of 113 L.ha<sup>-1</sup> instead of the intended 160 L.ha<sup>-1</sup> (single nozzle). Adhesion accounts only for a fraction of retention, about 50%. A variable fraction of the volume of droplets impacting in pinning splashing should therefore be added to properly link both measurements. Overall, retentions of tap water and Li700 mixture are quite similar (0.22  $\mu\text{L}$ ). With Break Thru S240, the average retention is better (0.27  $\mu\text{L}$ ) and the dispersion around the mean is reduced, which can be explained by the very low surface tension that mitigates the effect of leaf surface variability.

The proportion of droplet that remains on the target after a fragmentation in Wenzel regime (% Sp. W ret.) was estimated with the imaging method by a visual estimation (Table 3). This percentage was used to weight the volume observed in pinning fragmentation and finally added to the volume in adhesion to determine the amount of spray actually retained by the plant leaf (Ret. img.). The ratio between the retention obtained by fluorescence spectrophotometry to the weighted retention from the imaging method is computed for comparing the two measurement techniques. Even if this ratio diverges in some sprayings, it is very close to unity for the averaged values. The pinning fragmentation accounted for 31, 28 and 44% of retention for tap water, Break Thru S240 and Li700 respectively.

Table 2. *Average volumes ( $\mu\text{L}$ ) measured (and standard deviations) from 10 sprayings for the three mixtures from both analysis techniques; spray deposition and spray retention by image analysis*

Technique	Volume ( $\mu\text{L}$ )	Tap water		Break Thru S240		Li700	
		Av.	StD	Av.	StD	Av.	StD
High speed imaging	Observed volume <sup>1</sup>	<b>0,34</b>	<b>0,11</b>	<b>0,34</b>	<b>0,08</b>	<b>0,33</b>	<b>0,08</b>
	Adhesion	0,14	0,08	0,19	0,05	0,12	0,05
	Rebound C-B	0,05	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01
	Splashing C-B	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	Splashing W	0,15	0,09	0,13	0,06	0,20	0,08
Spectrophotometry	Retention	<b>0,22</b>	<b>0,12</b>	<b>0,27</b>	<b>0,05</b>	<b>0,22</b>	<b>0,08</b>

<sup>1</sup>Total volume of droplets landing on the leaf increased to account for evaporation.

Table 3. Percentages of droplet remaining on barley leaf and the ratio between chemical and optical retention assessment for the three mixtures

Spraying	Tap water		Break Thru S240		Li700	
	% Sp. W ret.		% Sp. W ret.		% Sp. W ret.	
1	44,40	1,03	66,80	1,12	56,40	1,04
2	71,90	0,91	42,00	0,96	39,00	0,87
3	14,40	1,07	67,30	1,01	68,10	1,05
4	38,00	1,18	70,50	1,13	32,70	1,15
5	48,20	1,17	63,70	1,04	50,80	1,07
6	29,80	0,67	36,50	0,92	74,30	0,83
7	5,00	1,13	30,00	1,10	45,30	1,52
8	83,90	1,00	46,60	1,08	43,40	0,62
9	57,00	0,75	91,40	0,70	36,20	1,10
10	62,40	0,99	70,20	0,96	37,00	0,90
<b>Average</b>	<b>45,50</b>	<b>0,99</b>	<b>58,50</b>	<b>1,00</b>	<b>48,32</b>	<b>1,02</b>
<b>StD</b>	<b>24,74</b>	<b>0,17</b>	<b>18,99</b>	<b>0,13</b>	<b>14,05</b>	<b>0,24</b>

## Discussion

The imaging method provides a better view of spray retention thanks to the quantitative results extracted from image analysis, such as droplet size and velocity, and qualitative information such as droplet impact outcomes. The technique is particularly suited to characterize the coexistence of the various impact outcomes for the same droplet energy level (Fig. 2), which is valuable when modelling retention by leaves. Moreover, the transitions between impact outcomes based on the droplet energy level and built with a single nozzle can be extrapolated to other nozzle sizes using the droplet size and velocity distribution. It has been showed that pinning fragmentation accounts for a significant part of spray retention by superhydrophobic leaves, especially when using anti-drift nozzles producing larger droplets. This fraction was estimated by high-speed imaging and validated by chemical method by performing simultaneous measurements. It ranged from 45% for water to 58% for the superspreader Break Thru S240 on barley leaf, these results being validated by the chemical method. This trend is related to the transition from Cassie-Baxter to Wenzel wetting regime due to the reduction of surface tension. Such results may contribute to explain discrepancies highlighted by Forster *et al.* (2012) in their canopy interception model employed in AGDISP for superhydrophobic leaves when using higher surfactant concentration. Further work may be conducted to study the effect of leaf angle on the transition between the two wetting models, some advances being described in (Massinon *et al.*, 2014). In conclusion, coupling both approaches, spray deposition by spectrophotometry and retention by image analysis, represents a powerful screening tool as a basis for retention modelling, providing quantitative and qualitative results.

## Acknowledgements

The work was performed thanks to the funding from the Higher Education and Scientific Research Ministry of People's Democratic Republic of Algeria.

## References

- Barthlott W, Neinhuis C, Cutler D, Ditsch F, Meusel I, Theisen I, Wilhelmi H. 1998.** Classification and terminology of plant epicuticular waxes. *Botanical Journal of the Linnean Society* **126**(3):237–260.
- Forster W A, Mercer G N, Schou W C. 2012.** Spray droplet impaction models and their use within AGDISP software to predict retention. *New Zealand Plant Protection* **65**:85–92.
- Guella S, Alexandrova S, Saboni A. 2008.** Evaporation d'une gouttelette en chute libre dans l'air. *International Journal of Thermal Sciences* **47**(7):886–898.
- Massinon M, 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.
- Massinon M, Lebeau F. 2013.** Review of physicochemical processes involved in agrochemical spray retention. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment* **17**(3):494–504.
- Massinon M, Boukhalfa H, Lebeau F. 2014.** The effect of surface orientation on spray retention. *Precision Agriculture*, (submitted).
- Taylor P. 2011.** The wetting of leaf surfaces. *Current Opinion in Colloid & Interface Science* **16**(4):326–334.
- Venzmer J. 2011.** Superspreading – 20 years of physicochemical research. *Current Opinion in Colloid & Interface Science* **16**(4):335–343.



## **Use of rotary atomiser to optimize retention on barley leaves while reducing driftable droplets**

By S OULED TALEB SALAH<sup>1</sup>, M MASSINON<sup>1</sup>, H BOUKHALFA<sup>2,1</sup>, B SCHIFFERS<sup>1</sup>  
and F LEBEAU<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*University of Liège (ULg), Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT), Gembloux, Belgium*

<sup>2</sup>*University Mohamed Khidar, Biskra, Algeria*

Corresponding Author Email: s.ouled@doct.ulg.ac.be

### **Summary**

Controlled Droplet Application using rotary atomiser is based on an improved control of droplet size and trajectory comparatively to hydraulic nozzles. On the basis of literature, it was stated that the use of 60° forward angled spray combined with the narrow drop size distribution of a rotary atomiser could lead to low drift and high retention on monocotyledonous and superhydrophobic weeds at early stage. A Micromax120 atomiser was tuned to emit 270 µm VMD, 60° angled forward, to increase interception by the canopy structure. A spray mixture containing a superspreader adjuvant was used to avoid drop bouncing. An increase of spray retention comparatively to a Teejet 11002 at 1.4 bars was observed, although not proved statistically significant by these preliminary trials. On the drift side, the tilted spinning disc seemed to be advantageous since droplet spectra contains a low percentage of droplets under 100 µm and presents an ejection velocity of 25 m.s<sup>-1</sup> at 5000 RPM. The spray drift was reduced about 50%. However, these setting were not found as efficient as expected. Indeed, angled spray proved to be more sensitive to advection and turbulence, as the spray was more exposed to the airflow than for the vertical position. It appears that angling the spray and choosing a drop size spectrum with a Volume Median Diameter as big as 270 µm is not sufficient to reduce significantly this issue. Some alternatives as decreasing the emission height are possible with angled sprays but require height control that seems difficult to reach in practical situations.

**Key words:** Controlled droplet application, rotary atomiser, hydraulic nozzle, spray retention, droplet spectrum, spray drift

### **Introduction**

In the crop protection field, decades of technical developments have led to a wide spectrum of designs to apply Plant Protection Products (PPP). PPP application methods rely extensively on hydraulic nozzles that employ only energy from the spray liquid itself to produce droplets. Orifices shaped to develop thin liquid sheets are the preferred solution, either relying on swirl, flat fan or anvil design. Several parameters are known to influence the droplet size distribution, namely pressure, liquid physico-chemical properties, nozzle shape and size, air induction. On this basis, practitioners have at their disposal nozzles offering a wide range of flow rates and producing various drop size distributions to reach their target. Spray quality is classified using standard reference nozzles and pressures to define limits between very fine/fine/medium/coarse/very coarse/extra

coarse/ ultra coarse classes (Southcombe *et al.*, 1997). Pesticide application efficiency as a function of drop size has been subject of extensive investigation. Although some confounding results have been published because of the complex nature of PPP retention process on crops, some trends are well established. As a rule of thumb, finer droplets are known to usually result in better coverage but are prone to drift while bigger droplet follow a more predictable trajectory but may result in inadequate coverage.

Retention of sprays on a crop or weed is influenced by numerous parameters as canopy structure, surface hydrophobicity, spray mixture physico-chemical properties, drop speeds and diameters before impact. Processes involved in spray retention have been reviewed (Massinon & Lebeau, 2013; Zabkiewicz, 2000). On this basis, a thoughtful understanding is within specialists' reach with the development of a process-driven retention model (Forster *et al.*, 2013). It has been shown that surface tension of PPP formulations and active ingredients can improve retention on superhydrophobic plants, avoiding bouncing of medium sized drops but may result in run-off on easy-to-wet species as the drop spreading results in a continuous water film and drain from the leaf. Drops with a high kinetic energy relative to their surface tension (i.e. a 300  $\mu\text{m}$  drop with a Weber number  $>50$ ) may shatter at impact, what results in losses if adhesion at first interception is needed. As a result, finer sprays are generally more efficient but may result in unacceptable drift to non-target area and coarser sprays are inefficient on small superhydrophobic targets as monocotyledonous weeds at early growth stages. Furthermore, annual grass species present vertically oriented leaves which for standard flat fan application technique is an ineffective method. It has been shown that using a 60° forward angled spray results in a large increase in herbicide efficacy (Jensen, 2012). However, such an approach may cause a drift issue because downward entrained air is a key component of drift reduction for hydraulic nozzles. Indeed, hydraulic nozzles used in agriculture produce a wide spectrum of droplet sizes because of the sheet break-up mode resulting from aerodynamic instabilities. Smallest drops are usually entrained downward by the spray generated airflow, the momentum of drops being transferred through the air because of drag. Therefore, small drops should be avoided using angled sprays. Rotary atomizers produce drops using either single droplet sizes, ligament or sheet mode depending on flow rate. Some mechanical designs have resulted in a narrow range of drop sizes for high flow output using grooves on the surface of a serrated cup. Indeed, the relative span factor ( $(DV_{90}-DV_{10})/DV_{50}$ ) that characterizes these designs can be as low as 0.5 when for most hydraulic designs this parameter exceeds 1 (Derksen & Bode, 1986). Using rotary atomizers that can be adjusted over a range of rotary speeds and flow rates, many drop sizes and drop speeds can be selected using proper settings.

This paper investigates the capabilities of combining high retention and low spray drift on an annual grass species at an early growth stage using a narrow spectrum of medium sized drops generated by a rotary atomizer.

## Material and Methods

### *Spray generators*

For comparison purpose, two types of spray generators were used :

- a rotary atomiser equipped with a shield to capture spray outside the 120° spray opening (Micromax 120, Micron Sprayers Ltd) and featuring an internal Venturi system to recirculate unsprayed liquid.
- a hydraulic flat fan nozzle Teejet XR11002 (spraying systems) which is of widespread use in early stage weed control.

The settings of these nozzles were chosen to apply the same volume application rate (Table 1).

### *Spray mixture*

The spray mixture was mixed and pressurised in a 10 L stainless steel tank. It contained 0.1% vol/vol Break-Thru S240 superspreader (Evonik, Germany) and 0.2 g L<sup>-1</sup> sodium fluorescein tracer in water. The superspreader was added to avoid droplet bouncing at impact.



Table 1. *Spray settings used in the experiments*

Nozzle model	Liquid pressure (bar)	Flow rate (L.min <sup>-1</sup> )
Micromax 120-5000 RPM	1.2	0.563
Teejet XR11002	1.4	0.563

*Droplet sizing*

A high-speed camera (XS-3, Integrated Design Tools) used in double exposure mode coupled to a LED backlighting records shadow images of water droplets produced by each spray generator. Droplet size measurements for the spinning disc were carried out at 120 mm of the edge while the disc remained static because it is expected that the spray characteristics remain constant throughout the disc opening angle (the oblique disc orientation makes drop size measurements so hard). To measure drop sizes of the single hydraulic sprayer, the nozzle was fixed on a 2-D movable carrier in order to sample the whole spray pattern. Droplet image acquisitions were performed 300 mm down the nozzle (The set up of the drop acquisition bench allows only droplet size measurements at this distance). Images were analyzed with a Particle Tracking Velocimetry Sizing (PTVS) algorithm developed in Matlab® that provided droplet size and velocity components perpendicular to optic axis.

*Retention trials*

A dynamic spray application bench with a single nozzle spraying was used to assess spray retention. Nozzle height was set 500 mm above the target and spray application was performed at 2 m.s<sup>-1</sup> forward speed. The Micromax 120 designed to emit droplets on a 120° wide opening angle was tilted 30° to produce 60° forward angled spray (15° tilt is the usual recommended setting).

Barley plants were grown under artificial conditions until the 2–3 leaf stage (BBCH13). Each application was performed on five barley plants, placed in the length of the driving direction, spaced by 100 mm and sprayed two times with the same nozzle, directly under the nozzle axis and translated laterally 500 mm, to account for usual nozzle overlapping. This double spraying corresponds to 93 L ha<sup>-1</sup> volume application rate. During nozzle passage, water sensitive papers were placed on the floor at the centre of the spray pattern where barley plants are sprayed the first time and 500 mm right in order to assess deposits from nozzle output across the spray pattern (Fig. 1).

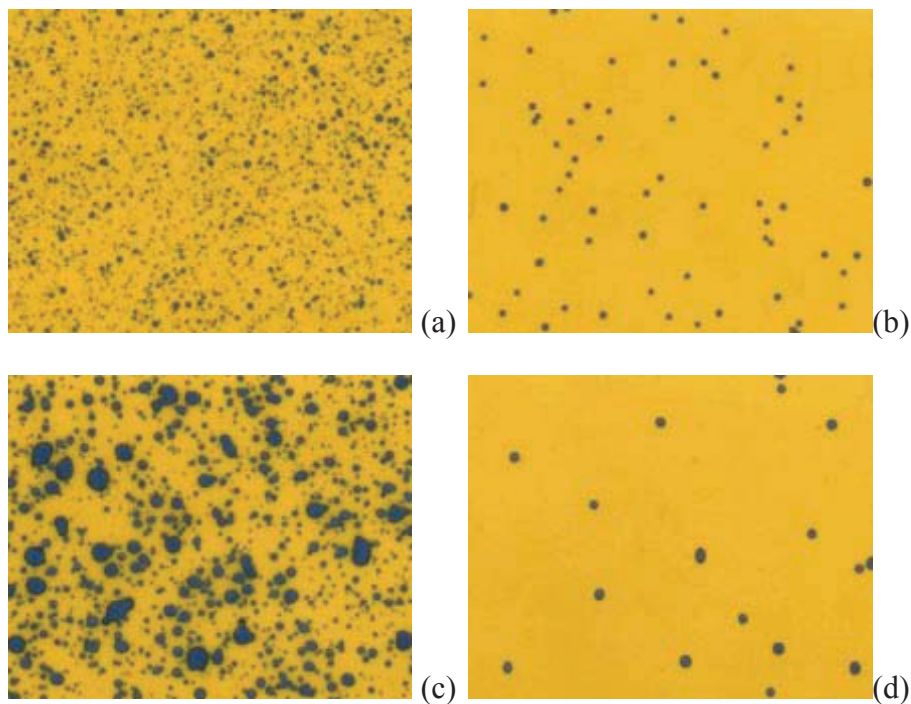


Fig. 1. Spray deposits for the two spray applicators: Micromax 120 centre (a), Micromax 500 mm right (b), Teejet XR11002 centre (c), Teejet XR11002 500 mm right (d).

Trials were made under ambient climatic conditions (temperature 22°C and relative humidity 55%). Five replicates were conducted for each modality. After the spray application, the plants were rapidly cut, washed off in plastic containers with 20 mL of buffer solution  $K_2HPO_4$ . The solution was stored dark and cool before analysis. Leaf surface area was measured using a A4 flat-bed scanner and image analysis to determine spot sizes were performed using Matlab©.

### *Drift trials*

Experiments were conducted in the wind tunnel facility of Gembloux Agro-Bio Tech. This tunnel is a closed circuit wind tunnel which has overall dimensions of 25.0 m total length, 7.0 m working length, 2.0 m width and 2.0 m height for the working section. Wind speed in the tunnel was set at 2 m.s<sup>-1</sup> measured by a hot wire anemometer placed 500 mm above the floor and 800 mm from the nozzle. Sample collectors lines were 2 mm diameter cylindrical polyethylene (PTFE) wires (Carlisleit), stretched horizontally and set perpendicular to the wind direction at 2.0 m downwind of the nozzle displacement axis. Collector wires, resulting from a bobbin, are cut into pieces of a 100 mm length. Three pieces are attached together with electrical connectors at each level line (a collector corresponds to 3 sections of 100 mm). The lines were spaced at 100 mm vertical intervals. The highest line was 600 mm above the floor, 100 mm higher than the nozzle height. The nearest line relative to the wind tunnel floor corresponds to a virtual floor which is located at 150 mm above the real floor. Nozzles were always 500 mm above the wind tunnel floor in all tests. A linear movement of the single sprayer at a forward speed of 2 m.s<sup>-1</sup> is ensured by a servomotor. Ten nozzle passes were done across the tunnel per measurement. The Micromax was angled 30° relative to the horizontal nozzle axe. Nozzles were set to a flow rate of 0.563 L.min<sup>-1</sup> corresponding to a pressure of 1.2 bar for the Micromax and 1.4 bar for the Teejet XR11002 nozzles. Three replicates for each nozzle were conducted. Trials were carried out under recommended conditions by ISO 22856 standard: Temperature was 20 °C ± 1°C and relative humidity was 80% ± 5%.

After spray applications, collectors of each line were stored in plastic containers with 10 mL of buffer solution  $K_2HPO_4$  to wash the spray liquid. The washed solutions were put in the dark until deposits were measured with a spectrofluorometer RF-1501 (Shimadzu).

The drift percentage for each line is calculated by:  $d_{line} = V_b * 100 / V_p * f_c$  and the total drift at 2.0 m downwind is  $d_{total} = \sum d_{line}$ .

Where  $V_b$  corresponds to the sprayed volume deposited on each collector (μL). It is calculated by multiplying the measured fluorescein concentration (μg.mL<sup>-1</sup>) by the volume of buffer solution added to each tube and dividing the result by the fluorescein concentration of the sprayed solution (μg.mL<sup>-1</sup>);  $V_p$  corresponds to the nominal spray volume. It is determined by multiplying the nozzle flow rate by the application time. The application time is therefore calculated as the product of the collector length and number of nozzle passages divided by the nozzle speed;  $f_c$  is the fraction of drift sampled by the collector. It is calculated as the ratio between the width of the sample collector (2 mm) and the interval between collectors (100 mm).

## **Results**

### *Droplet size distribution*

As expected, the Micromax sprayer (Fig. 3a) produces narrower droplet size distributions than the hydraulic nozzle (Fig. 3b). Some spray characteristics measured for the two nozzles are presented in Table 2.  $D_{v10}$ ,  $D_{v50}$  and  $D_{v90}$  indicates that 10%, 50% and 90% of the spray volume is composed of drops whose diameters are smaller than this value (μm). The span is a uniformity index of droplets spectrum calculated as  $(D_{v90} - D_{v10}) / D_{v50}$ . Vol <100 and Vol >350 represent the volume percentage of drops whose diameters are under 100 μm and above 350 μm, respectively corresponding to easily driftable drops and the ones expected to splash.

Table 2. Characteristics of the droplet spray of a Micromax(5000 rpm) rotary atomiser and a Teejet XR11002 flat fan nozzle (1,4 bar spray pressure)

Nozzle model	Flow rate (L.min <sup>-1</sup> )	D <sub>v10</sub> (µm)	D <sub>v50</sub> (µm)	D <sub>v90</sub> (µm)	Span	Vol <100 (%)	Vol >350 (%)	Droplet Numbers
Micromax (5000 rpm)	0.563	181	271	347	0.60	0.70	8	4388
Teejet XR11002	0.563	113	208	361	1.18	6	11	8222

The uniformity of the rotary atomiser droplet spectrum is highlighted by a lower span. These results are corroborated by recent studies (Qi *et al.*, 2008). Despite the uniformity of the Micromax atomiser, droplet size distributions are often bimodal, corresponding to the main and satellite droplets. Fig. 2 illustrates satellite drops formation due to natural ligament break-up. The rotary atomiser emits theoretically a low percentage of droplets smaller than 100 µm and larger than 350 µm compared to a flat fan nozzle at the same flow rate. The large droplet size distribution of hydraulic nozzle shown in Fig. 3b can be highlighted by the deposits on water sensitive papers (Fig. 1) where satellite droplets are only located in the centre of the spray while coarser droplets characterise the spray edge. However, the droplet size distribution of rotary atomiser seems to be more homogeneous at both spray sampling locations.



Fig. 2. Drop formation for Micromax 120.

#### *Spray retention*

Measurements of spray retention for the two single spray generators are presented in Table 3. At this early growth stage of barley, results show that a higher retention can be achieved by the Micromax compared to the XR11002 flat fan nozzle. This difference is not statistically significant because of the high variation in deposits (Table 3). This can be linked to the natural variability of barley plants shapes and orientations which are slightly different from one trial to another. Furthermore, each plant is not exposed exactly to the same droplet flow during the spray generator passage.

It can be concluded that the coarser spray quality of the Micromax was not detrimental to retention when a surface active ingredient was used in the spray mixture to avoid bouncing. The forward angled spray may have also a positive influence as forward angling trends toward a higher retention.

#### *Spray drift measurements*

The spray drift percentage for each sampling line at 2.0 m distance from the nozzle for the two nozzles are plotted to illustrate the vertical drift profile (Fig. 4). It appears that the two single spray generators present different drift profiles. The hydraulic nozzle does not contaminate the collectors located above (600 mm) and at nozzle height (500 mm). The drift contamination starts 10 cm below the nozzle height and then increases rapidly. The profile of the rotary atomiser is much more regular and starts 10 cm above the ejection height. The curves for both nozzle types cross at 30 cm

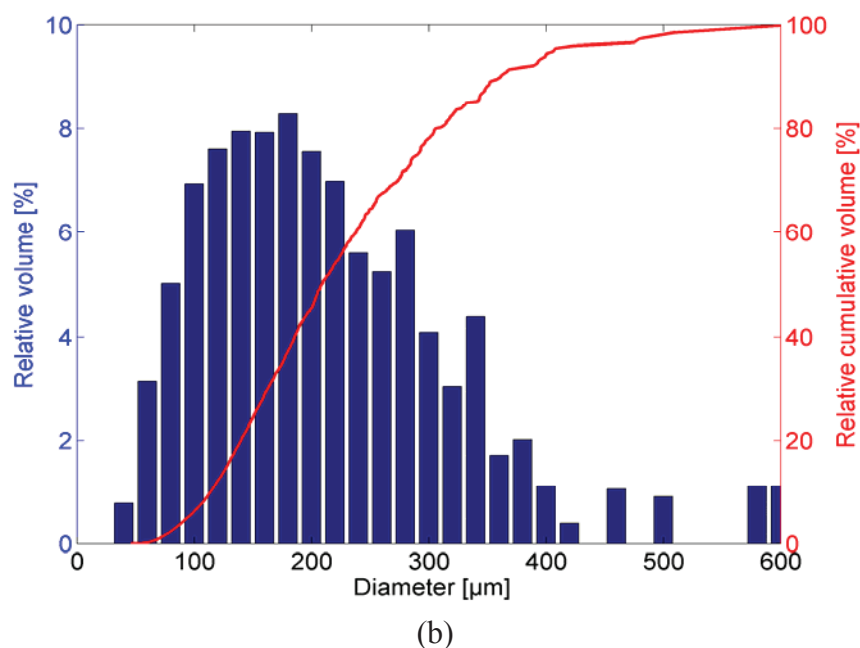
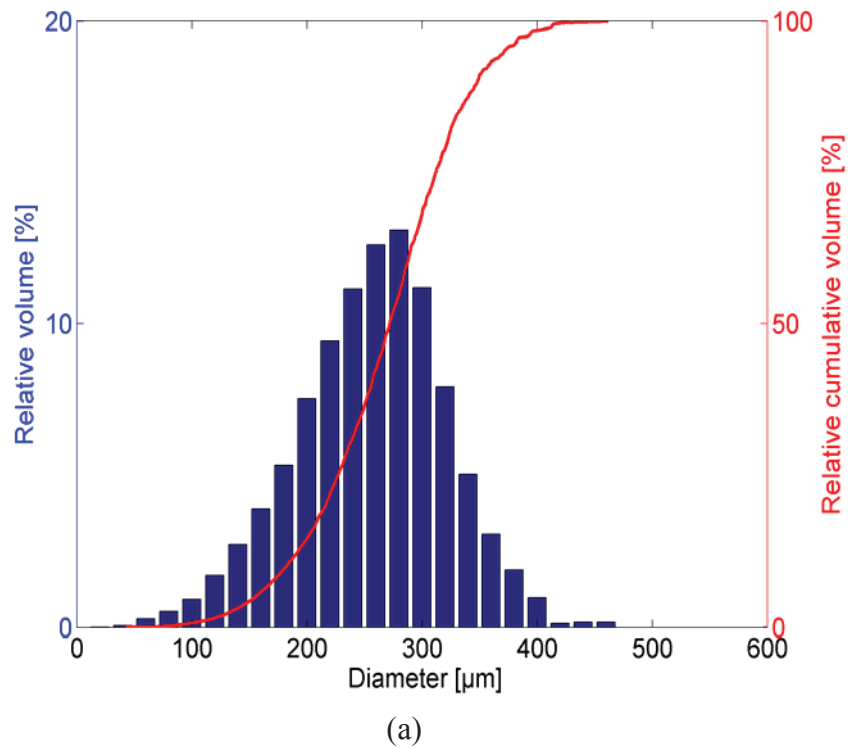


Fig. 3. Relative and cumulative droplet size distributions for both nozzles: (a) Micromax120 rotary atomiser (5000 rpm) (b) Teejet XR11002 flat fan nozzle (1,4 bar spray pressure).

height, the hydraulic nozzle deposits increase much faster with lower heights. These differences are linked to the combined action of top angle differences, drop size span and entrained air. For the hydraulic nozzle, the entrained air acts as the ejection height of drops was reduced. The high drop density near the orifice prevents the airflow to penetrate the spray, creating an obstruction. When the spray density decreases, the airflow penetrates the spray and drops are entrained according to their size. For the Micromax, the air entrainment is not marked, probably because of the atomiser geometry that results in a less dense spray and the forward angle used and the drop density in the spray. Drops, of much more homogeneous size ejected  $60^\circ$  forward, drift under the combined effect of advection and turbulence that brings some big drops above the ejection point. The hydraulic

Table 3. Spray retention (fluorescein dose per cm<sup>2</sup>) on barley 2–3 leaves (BBCH13 )for a Micromax rotary atomiser and a Teejet XR11002 flat fan nozzle both delivering a flow rate of 0.563 L min<sup>-1</sup> at a forward speed of 2 m s<sup>-1</sup>

Trial #	Micromax 120			Teejet 11002		
	Leaves area (cm <sup>2</sup> )	Deposits (μL)	Volume rate (μL cm <sup>-2</sup> )	Leaves area (cm <sup>2</sup> )	Deposits (μL)	Volume rate (μL cm <sup>-2</sup> )
1	41.55	8.53	0.21	41.59	5.32	0.13
2	43.36	6.57	0.15	39.4	3.17	0.08
3	41.19	4.87	0.12	55.61	5.86	0.11
4	71.64	7.21	0.10	47.87	5.28	0.11
5	63.64	6.27	0.10	54.06	2.67	0.05
Mean	52.28	6.69	0.13	47.71	4.46	0.09
STD	14.33	1.34	0.04	7.23	1.44	0.03

nozzle whose total drift is 9.10% drifts generally more than the rotary atomizer characterized by a total drift of 4.73%.

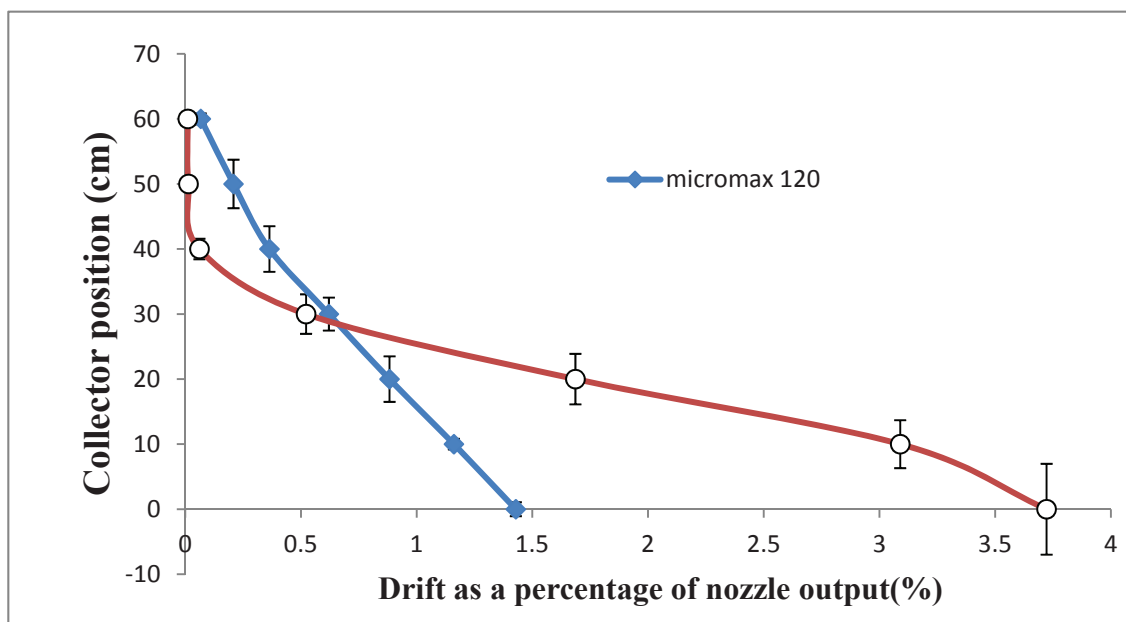


Fig. 4. Vertical drift profile as a percentage of nozzle output: (% of what?) the Micromax 120 rotary atomiser and the Teejet XR11002 flat fan nozzle at 2.0 m from the nozzle in a wind tunnel operating at a wind speed of 2 m s<sup>-1</sup> and the nozzle moving perpendicular to the wind direction with a speed of 2 m s<sup>-1</sup>.

## Discussion

Based on literature, it was stated that the use of 60° forward angled spray combined with the narrow and coarser drop size distribution of a rotary atomiser could be a mean to combine low drift and higher retention on monocotyledonous weeds at early stage. The tilted atomiser with 270 μm VMD seems to be an efficient approach since higher retention was achieved using the Micromax 120 and a superspreader adjuvant even if the increase was not proved statistically significant by these trials. This can be explained by the fact that upstanding barley leaves target represents the ideal structure to intercept the spinning disc droplets with an angled trajectory (Jensen, 2012). On the drift side, the tilted rotary atomiser seemed to be advantageous since droplet spectra contains a low percentage of droplets under 100 μm and present a high ejection velocity, 25 m.s<sup>-1</sup> at 5000 RPM. However, these

settings were not as efficient as expected and angled spray proved to be more sensitive to advection and turbulence, as the spray was more exposed to the airflow than for the vertical position. Drift studies performed by Qi *et al.* (2008) showed that horizontal spinning disc produced general more drift than flat fan nozzles. An attempt to compare their results seems difficult since the settings are quite different but it appears that angling the spray and choosing drops as big as 270 µm are not sufficient to reduce significantly this issue. Some alternatives as decreasing the emission height are possible with an angled spray but require height control in the field that may be out of reach in practical situations. A complete modelling of the spray application process is needed to seek an optimal angle and diameter according to the canopy structure to guide future trials.

## References

- Derksen R C, Bode L E. 1986.** *Droplet Size Comparisons from Rotary Atomizers* **29**(5).
- Forster W A, Schou W C, Mercer G N. 2013.** Evaluation of a modified AGDISP model to predict spray canopy retention. *Proceedings of the ISAA*.
- Jensen P K. 2012.** Increasing efficacy of graminicides with a forward angled spray. *Crop Protection* **32**(0):17–23.
- Massinon M, Lebeau F. 2013.** Review of physicochemical process involved in agrochemical spray retention. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* **17**(3):394–504.
- Matthews G. 1992.** *Pesticide Application Methods*, 2<sup>nd</sup> Edn.
- Qi L, Miller P C H, Fu Z. 2008.** The classification of the drift risk of sprays produced by spinning discs based on wind tunnel measurements. *Biosystems Engineering* **100**(1): 38–43.
- Zabkiewicz. 2000.** Adjuvants and herbicidal efficacy – present status and future prospects. *Weed Research* **40**(1):139–149.

## ملخص

جودة رذاذ منتجات وقاية النبات يحدد كفاءة العلاج و التلوث البيئي . التصوير الظلي السريع إلى جانب إشعاعية الفليور يمثل بديل مرضي لتوصيف هذا الرذاذ المتفرق و البطيئ. على وجه الخصوص ، استخدام مصادر الضوء LED يضمن نمطية . الهدف من هذا العمل هو تقديم لمحة عامة عن الاشكاليات التي تحدد نوعية هذا الرذاذ لتحقيق الاستفادة المثلى من تطبيق الرش الزراعي من أجل الحد من الخسائر نحو البيئة و الحفاظ الصحة العامة.

معرفة اقياس قطرات الرذاذ مرتبطة بالشروط الفنية للآليات المستخدمة يمكننا من التحكم في مجموعات الإعدادات المناسبة لظروف مختلفة من التطبيق من حيث الضغط ، الارتفاع ، نوع الفوهة ، صياغة المحاليل و الظروف البيئية. أظهرت نتائجنا أن الكميات المحتفظة بأوراق النبات ليست سوى جزء من رذاذ منتجات وقاية النبات ، وبالتالي ينبغي زيادة الكميات المرشوشة لكل هكتار من هذه المنتجات لتحقيق الفعالية البيولوجية. و هذه الزيادة تؤدي بالضرورة إلى زيادة في الخسارة نحو البيئة.

صياغات المحاليل المختبرة في هذا العمل تبين أن استخدام المواد المضافة النشطة على السطح هو حل جيد لأنها تؤثر على حجم قطرات الرذاذ عن طريق تغيير VMD وبالتالي التأثير على نوع الاتصال مع سطح الورقة. هذا له تأثير مباشر على الاحتفاظ.

سمح لنا هذا العمل تسليط الضوء على الفرق بين الاحتفاظ والالتصاق في مجال الرش من خلال توضيح قطرات مساهمة رذاذ مجزأة نزل الاحتفاظ النظام على سطح النبات.

أخيرا ، نود أن نلفت الانتباه إلى تنوع الاحتفاظ على سطح النبات والتي هي ذات صلة بطبيعة هذه الأخيرة و التي تؤثر تأثيرا قويا في نوع من التأثير وكمية منتج وقاية النباتات المستخدمة.

**الكلمات الرئيسية :** الاحتفاظ بالرذاذ ، نهج الجودة ، صياغة المحاليل ، إشعاعية الفليور، التصوير الظلي.

## Résumé

La qualité des jets de pulvérisation de produits phytopharmaceutiques conditionne l'efficacité des traitements et la contamination de l'environnement. L'imagerie rapide par ombroscopie couplée à la spectrofluorométrie présente une alternative satisfaisante pour la caractérisation de ces jets peu denses et lents. En particulier, le recours à des sources d'éclairage LED assure une grande modularité. L'objectif de ce travail est de présenter une vue d'ensemble des problématiques qui conditionnent la qualité de ces jets pour arriver à une optimisation de l'application de la pulvérisation agricole afin de pouvoir limiter les pertes dans l'environnement et de préserver la santé publique.

La connaissance de la granulométrie des jets liée aux conditions techniques de matériel utilisé permet de maîtriser les combinaisons de paramètres adéquats aux différentes conditions d'application en termes de pression, de hauteur de type de buse, de formulation et de conditions environnementales.

Les résultats montrent que les quantités retenues par les feuilles végétales ne constituent qu'une partie des jets de produits phytopharmaceutiques et de ce fait la satisfaction des volumes appliqués par hectare de ces produits doit être augmentée pour arriver à l'efficacité biologique. Cette augmentation conduira forcément à une hausse de perte de produits dans l'environnement.

Le recours à l'utilisation d'adjuvants tensio-actifs constitue une bonne solution car ils influencent la granulométrie des jets en modifiant le VMD et modifient par conséquent le type d'impact au contact de la surface foliaire. Ceci a une influence directe sur la rétention.

Le présent travail permet de mettre en évidence la différence entre rétention et adhésion en pulvérisation agricole par l'éclaircissement de la contribution des gouttes du jet de pulvérisation fragmentées en régime Wenzel à la rétention sur surface végétale.

Enfin, nous attirons l'attention sur la variabilité de rétention sur surface végétale qui est liée à la nature de cette dernière et qui influence fortement le type d'impact et la quantité de produit phytopharmaceutique retenue.

**Mots clés :** pulvérisation, rétention, démarche qualité, formulation, ombroscopie, fluorométrie.



## **Abstract**

Agricultural sprays quality determines the efficiency of treatment and environmental contamination. High speed imaging ombroscopy coupled with spectrofluoremetriey has a satisfactory alternative for the characterization of these sparse and slow sprays. In particular, the use of LED light ensures modularity. The aim of this work is to present an overview of the issues that determine the quality of these sprays in order to achieve optimization of the application of agricultural spraying in the objective of limiting losses in the environment and preserve public health.

Knowing the sizing of sprays associated with the technical conditions of material used can master the combinations appropriate settings for different conditions of application in terms of pressure, height, nozzle type, formulation and environmental conditions.

Our results showed that the amounts retained by the plant leaves are only part of sprays and thus satisfaction volumes applied per hectare of these products should be increased to achieve the biological effectiveness. That will lead necessarily to an increase of losses to the environment.

The formulations tested in this work show that the use of the surface-active additives is a good solution because they influence the size of the droplets by changing the VMD and by consequence the type of impact at leaf contact surface. This has a direct influence on retention.

Our work has highlighted the difference between retention and adhesion by clarifying the contribution of spray fragmented Wenzel regime drops to retention on plant surface.

Finally, we draw attention to the variability of retention on plant surface which is related to the nature of the surface and which strongly influences the type of impact and quantity of plant protection product used.

**Keywords:** spray retention, quality approach, formulation, shadowgraphy, fluoremetry.