

CHAPITRE 3

MATERIELS ET METHODES

Dans un premier temps, la buse utilisée dans le reste de l'étude est caractérisée au moyen de méthodes d'essai conventionnelles : la distribution transversale est mesurée sur un banc de répartition et le spectre des gouttelettes est mesuré par un granulomètre laser.

Ensuite, un dispositif permettant de mesurer l'effet des mouvements de la buse sur la répartition est présenté. Il est constitué d'un banc d'essai combiné à une méthode de mesure de la répartition. Le banc d'essai a pour fonction de reproduire en conditions contrôlées (en l'absence de vent) les principaux facteurs affectant la répartition, à savoir des variations de vitesse et de hauteur de la buse par rapport à la cible avec une pression de pulvérisation contrôlée. Différentes méthodes de mesure de la répartition sont proposées. Elles assurent une mesure bidimensionnelle de la répartition engendrée lors des essais.

3.1 Caractérisation de la buse de pulvérisation

Une buse à fente 110° en céramique 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. Comme il a été montré au chapitre précédent, 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. C'est pourquoi la distribution et la granulométrie de la buse utilisée

dans l'étude sont précisées ci-dessous. L'étude visant à dégager une approche méthodologique de quantification de la répartition, une seule buse et une seule pression correspondant à des conditions opératoires courantes ont été envisagées pour limiter le nombre de variables expérimentales et isoler l'effet des sollicitations sur la répartition. Cette hypothèse est parfaitement réaliste dans l'optique de l'utilisation du modèle à des fins de normalisation. En effet, ce type de tests est typiquement réalisé à vitesse constante et par conséquent à pression inchangée. En outre, une fois la méthode validée, sa généralisation au cas de pressions variables ne doit rencontrer aucune limitation d'ordre physique ou mathématique.

3.1.1 Mesure de la distribution transversale

a) Banc de répartition

La mesure de la répartition unidimensionnelle (transversale) de la buse est réalisée sur un banc de répartition constitué de 32 gouttières parallèles de 50 mm de large et 1500 mm de long. Le banc d'essai a été amélioré par rapport aux bancs d'essai traditionnels (ISO 5682/1 Anon. 1996) et a été conçu pour permettre une acquisition automatique des niveaux de liquide dans chacune des éprouvettes [Lebeau *et al*, 2000]. Ceci est réalisé de la manière suivante : les éprouvettes sont suspendues à des poutres Cantilever (Figure 3.1.) ; en cours de remplissage, elles subissent une flexion qui engendre des contraintes normales mesurées au moyen de jauges d'extensiométrie disposées en pont de Wheatstone.

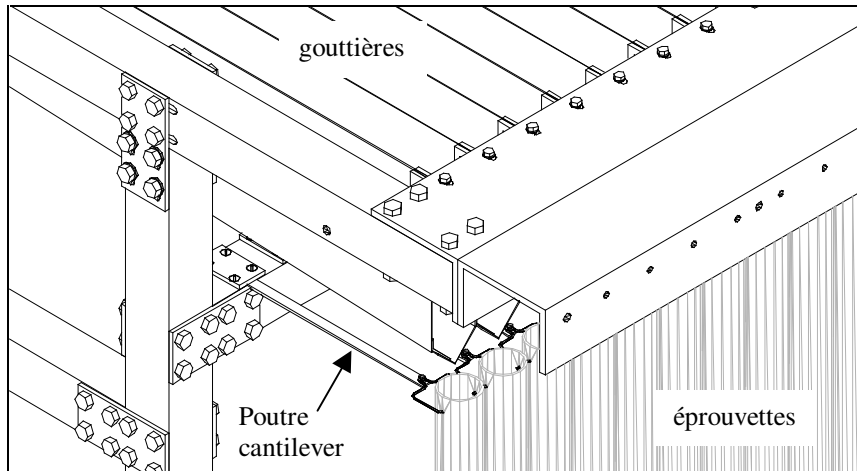


Figure 3.1. : Vue du dispositif de fixation des éprouvettes.

Les ponts de jauges sont reliés à un multiplexeur qui permet de balayer les signaux provenant des différentes éprouvettes et de les transmettre vers deux entrées d'une centrale d'acquisition 21X (Campbell Scientifics LTD). L'étalonnage des différentes éprouvettes montre une très bonne linéarité de la relation ($r^2 > 0,9999$) entre la tension de déséquilibre des ponts de jauges et le volume recueilli pour les différentes éprouvettes (Figure 3.2.).

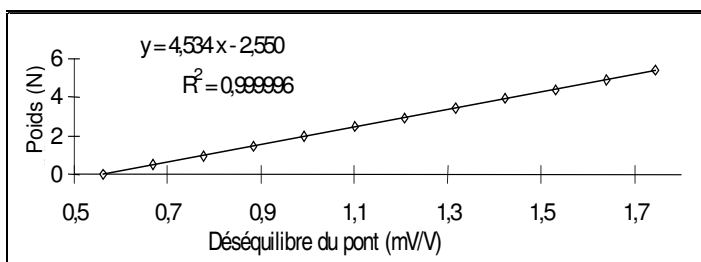


Figure 3.2. : Exemple de droite de calibrage (échantillon 1).

Un programme d'acquisition répète la mesure toutes les 10 secondes ce qui permet d'adapter la durée de la mesure au taux de remplissage. Les erreurs

de zéro dues à la période du remplissage des éprouvettes pour laquelle l'écoulement n'est pas encore en régime établi sont enlevées en post-traitement.

La buse est montée au centre du banc de répartition à une hauteur qui peut être réglée entre 0 et 1,5 mètres de la surface de réception. Elle est alimentée au moyen d'un groupe motopompe Delvano permettant d'obtenir une pression pouvant aller jusqu'à 15 bars. La pression d'essai est mesurée à l'aide d'un transmetteur Bourdon-Sedeme Y913. Pour une buse standard, le temps de remplissage varie entre 1 et 5 minutes. Avec l'ensemble des manipulations, une mesure prend en moyenne 10 minutes.

b) Distribution transversale

Le résultat des mesures est transformé en débit par éprouvette (ml/s) en divisant le volume collecté des 32 éprouvettes du banc de répartition par le temps de remplissage. Le résultat de deux mesures réalisées à 8 mois d'intervalle, en début et en fin d'expérimentation, pour la buse à fente Teejet XR11003VK avec de l'eau distillée est présenté à la Figure 3.3.

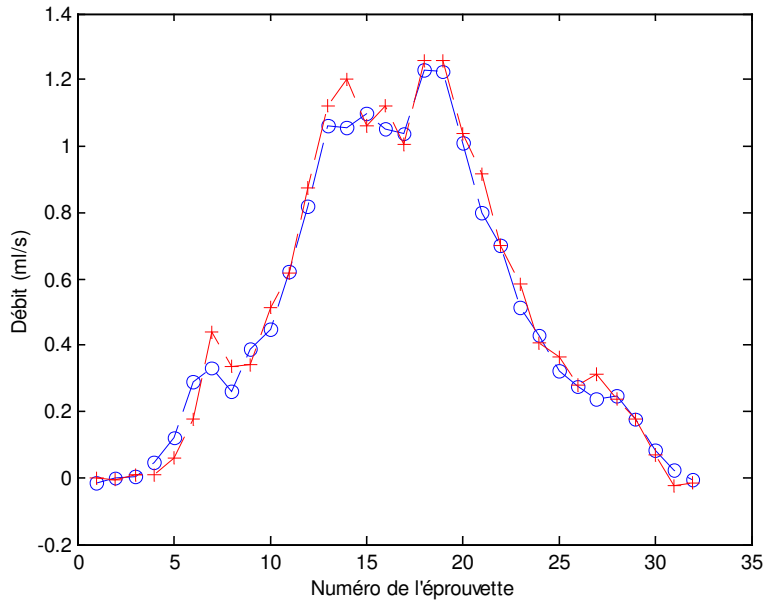


Figure 3.3. : Mesures de la distribution transversale de la buse Teejet XR11003VK à 2 bars, en début d'expérimentation (bleu) et fin d'expérimentation (8 mois plus tard, rouge), 50 cm de hauteur.

La distribution de la buse est asymétrique et présente des minima et maxima locaux assez marqués. En outre, on observe une certaine variabilité dans le temps. L'écart absolu type, eat (Equation 3.1.) entre les deux essais vaut 8,8 %. Il faut remarquer que ce rapport de sommes présente l'avantage d'être peu sensible aux erreurs sur les faibles valeurs du débit comparativement à une somme de rapports. A titre de comparaison, ce même rapport calculé pour deux essais réalisés le même jour (Figure 3.4.) vaut 0,5 %.

$$eat = \frac{\sum_{i=1}^n |d_{1i} - d_{2i}|}{\sum_{i=1}^n d_{1i}} \quad (3.1)$$

avec eat : écart absolu type;

d_{1i} : le débit mesuré dans l'éprouvette i lors de l'essai 1;

d_{2i} : le débit mesuré dans l'éprouvette i lors de l'essai 2.

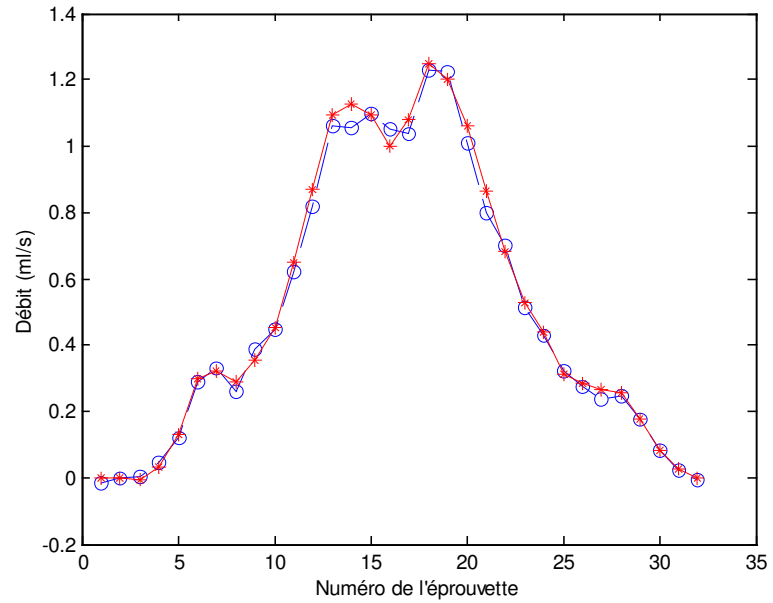


Figure 3.4. : Mesures de la distribution transversale de la buse Teejet XR11003VK à 2 bars, à quelques heures d'intervalle, 50 cm de hauteur.

Une variation de hauteur se marque par un étalement de la distribution et une légère altération de la forme. La Figure 3.5. présente la distribution transversale de la même buse à 700 mm de hauteur au lieu de 500 mm. Il faut remarquer que pour cette hauteur, les dimensions de la zone de collecte deviennent limites pour une buse à fente 110°.

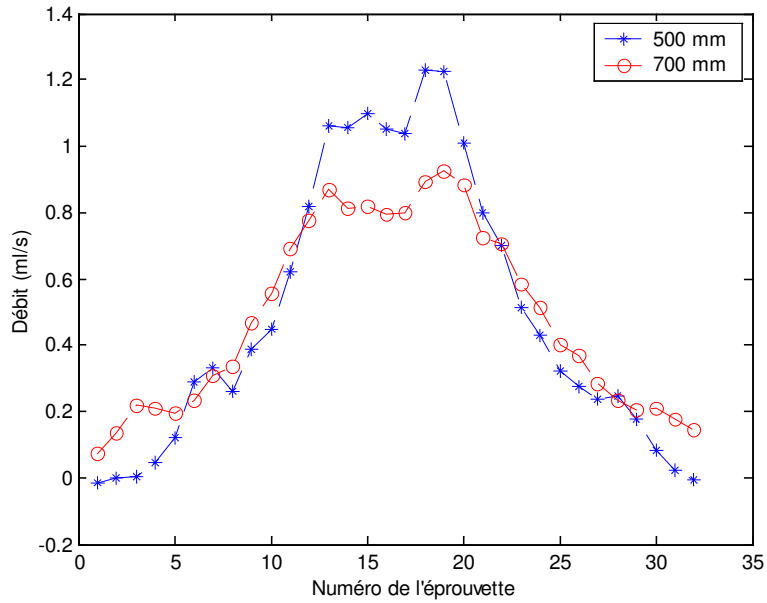


Figure 3.5. : Effet de la hauteur. Mesure de la distribution unidimensionnelle de la buse Teejet XR11003VK à 2 bars, 500 et 700 mm de hauteur.

3.1.2 Mesure du spectre des gouttes

La Figure 3.6. présente une photographie au flash du jet issu de la buse. 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*.

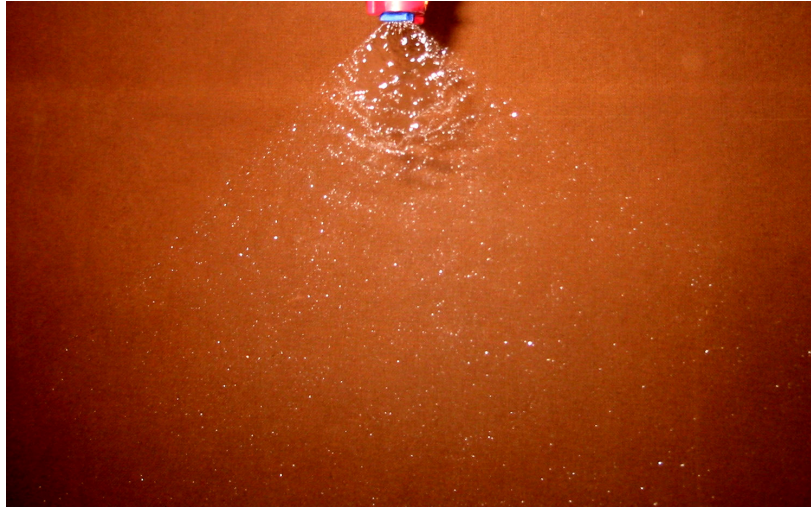


Figure 3.6. : Jet issu de la buse XR11003VK pulvérisant à 2 bar.

a) Granulomètre laser

La granulométrie de la buse Teejet XR11003VK à deux bars a été mesurée à l'aide du granulomètre laser PDPA-1D (TSI Aerometrics) de la Station de Recherche de Merelbeke "Centrum voor Landbouwkundig Onderzoek (CLO), Departement Mechanisatie, Arbeid, Gebouwen, Dierenwelzijn en Milieubeveiliging". Cet analyseur de particules à effet Doppler utilise un rayon laser de faible puissance qui est divisé en deux par une lame séparatrice (en anglais: "beam splitter"). Les deux rayons sont ensuite dirigés de manière à se croiser à nouveau pour former un volume de mesure. Quand une goutte passe dans ce volume, la lumière réfléchie produit des franges d'interférence mesurées par un interféromètre. Comme elle est en mouvement, le signal d'interférence diffus qui est mesuré par le récepteur a une différence de fréquence Doppler qui est proportionnelle à la vitesse de la goutte. La fréquence spatiale de la frange d'interférence est inversement proportionnelle au diamètre de la goutte. Un traitement de signal permet de convertir les données brutes en diamètres et vitesses de gouttes. Selon les configurations optiques, cet analyseur permet de mesurer des gouttes de diamètres compris entre 0,1 à 10000 microns.

La Figure 3.7. présente une photographie du dispositif de mesure. La bouillie est fournie à partir d'un récipient mis sous pression au moyen d'air comprimé. La pression est maintenue constante par un régulateur de pression et contrôlée par un manomètre.

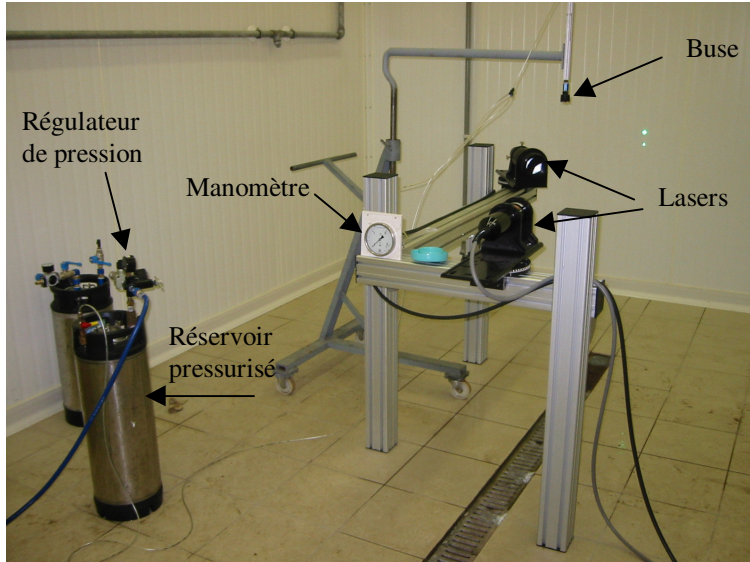


Figure 3.7. : Granulomètre laser du CLO.

La zone de mesure est très restreinte, elle est limitée au volume d'intersection des deux rayons laser (Figure 3.8.), ce qui permet une très bonne résolution spatiale.



Figure 3.8. : Zone de mesure du granulomètre laser.

b) Spectre des gouttes par granulométrie laser

La Figure 3.9. présente une image des DV10, DVM et DV90¹ mesurés à 550 mm de hauteur sur laquelle les points d'échantillonnage sont indiqués par des astérisques jaunes. Il apparaît clairement que la granulométrie des gouttelettes est plus faible au centre de la distribution. A cet endroit, 10 pourcents du jet est constitué de gouttelettes de moins de 100 μm pour 50 pourcents de moins de 180 μm et 90 pourcents de moins de 260 μm . Par contre en périphérie du jet, le DV10 est d'environ 200 μm , le DVM atteint 250 μm et le DV90 300 μm . Une légère dissymétrie telle que celle observée au banc de répartition semble apparaître également au niveau de la granulométrie du jet.

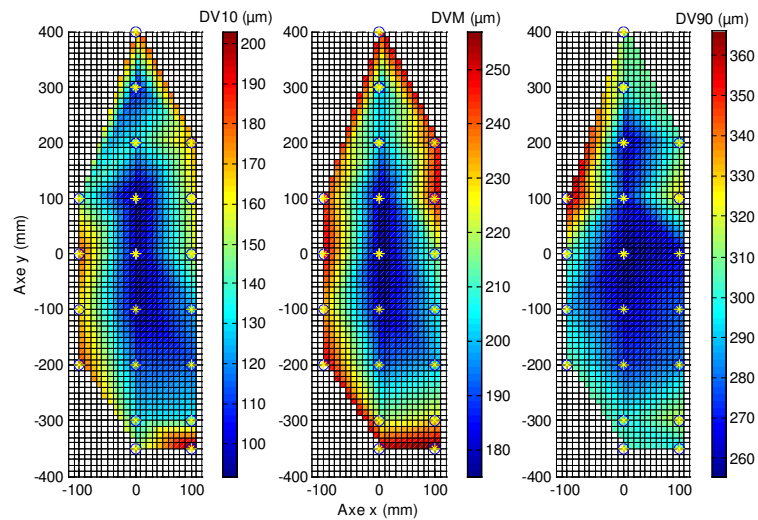


Figure 3.9. : DV10, DVM et DV90 de la buse XR11003VK à 2 bars et 55 cm de hauteur.

Cette distribution irrégulière de la granulométrie des gouttes au sein du jet des buses à fente est confirmée dans les travaux de différents auteurs. L'étude de la distribution spatiale du spectre des gouttes sous une buse à fente [Lund et

¹ DV10, DVM et DV90: diamètres de goutte pour lesquels respectivement 10, 50 et 90 % du volume du jet est constitué de gouttes plus fines

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].

3.2 Dispositif de mesure de la répartition dynamique

3.2.1 Banc d'essai de répartition dynamique

Un dispositif expérimental a été conçu pour mesurer la répartition dynamique des buses. (Figure 3.10.) Il consiste en un tronçon de rampe de pulvérisation (1) monté sur une table de déplacement linéaire de 4 mètres de course. Il est alimenté en bouillie par une pompe centrifuge (5000/5 Inox i, Gardena) à partir d'une cuve en plastique. La pression est maintenue constante par un régulateur de pression (*Hydromodul*, BWT) et est contrôlée à l'aide d'un manomètre (*E813*, Bourdon Sedeme) dont la gamme de mesure va de 0 à 16 bars. La translation du tronçon dans le sens d'avancement (selon l'axe x) est contrôlée via un ordinateur et un régulateur électronique (2) (*Compax-s*, Parker) dans la gamme -2 à $+2$ m/s au moyen d'un servomoteur (3) (*HDY92C4-44S1*, Parker). Le régulateur est paramétré en mode régulation de vitesse. La trajectoire est imposée en fournissant une nouvelle consigne de vitesse toutes les 30 millisecondes, ce qui permet de réaliser tout mouvement de translation dans la limite de la puissance disponible. Jusqu'à cinq buses peuvent être montées sur le tronçon de rampe mais, lors de nos essais, seule la buse Teejet XR11003VK est installée au centre du tronçon (4). Les collecteurs (5) sont posés sur une table dont la hauteur et la pente sont ajustables (6).

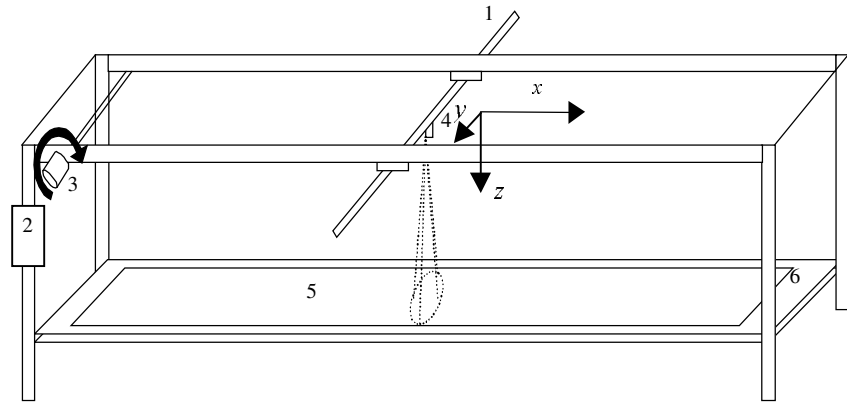


Figure 3.10. : Dispositif expérimental de validation du modèle de simulation de la répartition dynamique.

La buse est montée sur un porte buse PWM (Pulse Width Modulation). Il s'agit d'un prototype mis à notre disposition par la société Teejet. Cette technologie, développée pour la lutte contre la dérive et l'agriculture de précision, offre la possibilité de réaliser l'ouverture et la fermeture en un temps très court sans affecter les caractéristiques du jet de pulvérisation. [Giles *et al.* 1990]. Dans notre application, elle permet de commander à volonté l'ouverture et la fermeture de la buse au moyen de commandes électriques. La Figure 3.11. présente un schéma de principe du porte buse PWM.

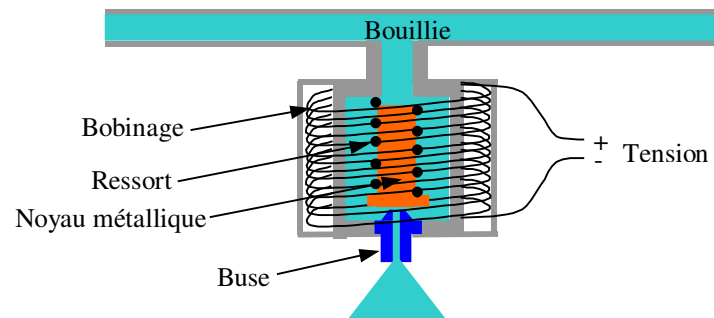


Figure 3.11. : Schéma de principe du porte buse PWM.

En position de repos, un ressort positionne le noyau métallique de manière à bloquer le passage de la bouillie vers la buse. Sous l'effet de la force électromagnétique induite par un courant électrique dans le noyau, ce dernier se déplace en position ouverte, ce qui permet le passage de la bouillie vers la buse. L'action directe au niveau de la buse permet d'agir très rapidement sur l'ouverture de la buse. L'ouverture de la buse est commandé par une tension continue de 24 V.

3.2.2 Méthodes de mesure de la répartition

Trois méthodes de mesure de la répartition sous la buse en mouvement sont utilisées en fonction des objectifs : une méthode par analyse d'images, une méthode de dosimétrie par colorimétrie et une méthode par pesée de résidus après séchage.

a) Analyse qualitative par analyse d'image

La méthode utilisée s'inspire de celle qui est proposée par Enfält *et al.* [1997]. Ces derniers pulvérisent un collecteur en papier avec une bouillie colorée par de la nigrosine et évaluent le niveau de gris moyen de carrés élémentaires par l'analyse d'images numériques acquises au moyen d'une caméra et d'un dispositif de prise d'images spécialement développé à cette fin. Ils ont montré que la méthode est adaptée à l'évaluation de la répartition dynamique entre 0 et 1000 litres par hectare (0 à 100 ml/m²).

Une solution aqueuse de nigrosine à 3 ‰ est utilisée comme bouillie. Ce colorant est collecté sur du papier blanc de qualité laser (80 g/m²) de 4 mètres de long et 914 mm de large. La mesure des dépôts collectés est réalisée par un scanner A0 à une résolution de 100 pixels par pouce. Le volume collecté sur des carrés de 50 mm de côté est estimé sur la base de la surface des traces grises que laissent les gouttelettes colorées sur le papier blanc. Cette surface est calculée au moyen d'un algorithme de seuillage (Image Processing Toolbox,

Mathworks Inc.). Le taux de couverture est le rapport entre la surface couverte et la surface de mesure.

La méthode utilisée diffère de celle de Enfalt *et al.* qui, au lieu d'évaluer le taux de couverture, se base sur le niveau de gris moyen de carrés élémentaires. Les deux méthodes fournissent des résultats similaires mais le taux de couverture présente l'avantage d'être moins sensible à la variabilité des conditions d'acquisition de l'image. En effet, il existe un fort contraste entre les gouttelettes et le papier immaculé, ce qui facilite le seuillage.

Un étalonnage de la mesure des dépôts par analyse d'images a été réalisé par gravimétrie (Figure 3. 12.). Des échantillons carrés de 50 mm de côté du papier préalablement pesés et numérotés sont posés sur la table du banc d'essai dynamique. Pour assurer un étalonnage dans l'ensemble des conditions expérimentales, 60 échantillons ont été utilisés, 20 provenant de chacun des trois mouvements utilisés pour la validation du modèle. Les papiers pulvérisés sont pesés au moyen d'une balance (AV-65 Ohaus Adventurer) dont la précision de lecture est de 0,1 mg, la répétabilité 0,1 mg et la linéarité de $\pm 0,2$ mg dans la gamme 0 à 65 grammes. Le taux d'application² est calculé en mesurant la différence de masse après et avant pulvérisation et en la divisant par la surface des collecteurs.

² taux d'application : volume de bouillie appliqué par unité de longueur, de surface ou de volume traité (en anglais: "application rate").

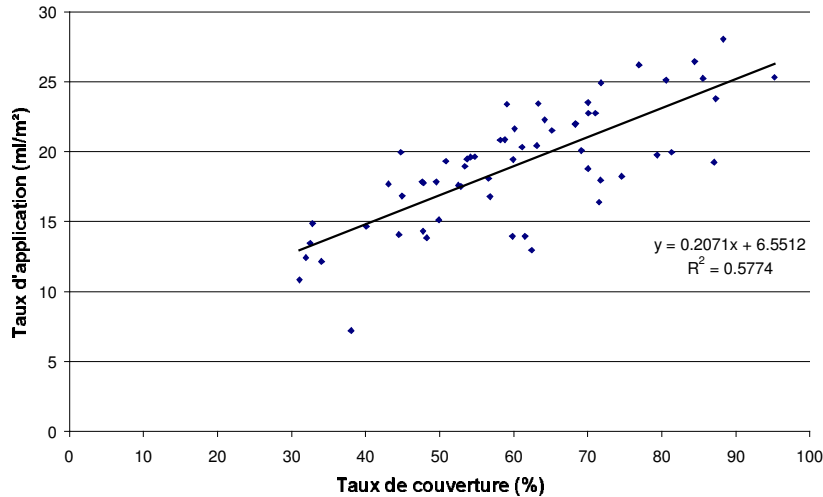


Figure 3.12. : Etalonnage de la mesure du taux d'application par analyse d'image des dépôts de nigrosine.

L'étalonnage montre l'existence d'une relation de médiocre qualité entre le taux de couverture et le taux d'application. Ce dernier résultat est surprenant quand il est comparé à la qualité de la relation du 3^{ème} ordre proposée par Enfält *et al.* dont le coefficient de détermination est de 0,9877. Plusieurs raisons expliquent cette différence. L'ordre de la relation a peu d'influence, une relation du troisième ordre ne fournit dans notre cas qu'une faible amélioration du coefficient de détermination qui atteint 0,58. Par contre, Enfält *et al.* travaillent dans une gamme de variation du taux d'application qui va de 0 à 100 ml/m² qui est beaucoup plus large que la nôtre (0 à 30 ml/m²). Ceci limite l'influence de la variabilité de la mesure dans le calcul du taux d'application. De plus, il est possible que les conditions d'étalonnage que nous nous sommes imposés soient plus variées. En effet, elles présentent des variations du taux d'application provenant de modifications de vitesse d'avancement, de modifications de hauteur de pulvérisation et de positions diversement excentrées par rapport à l'axe de la buse, alors que Enfält *et al.* travaillent à hauteur constante et sous l'axe de la buse. Enfin, les propriétés de surface du collecteur

utilisé peuvent différer de celui utilisé par Enfält *et al.* Des expérimentations mises en place spécialement pour déceler l'origine de la variabilité de la relation parmi les hypothèses énoncées ci-dessus n'ont néanmoins pas permis de mettre en évidence un effet systématique de ces paramètres.

Malgré ces résultats peu encourageants du point de vue quantitatif, l'analyse d'image des dépôts de nigrosine présente certains avantages qui en font un outil utile pour l'analyse de la répartition. Afin d'établir une relation générale entre le taux de couverture et le taux d'application à partir d'un grand nombre d'échantillons, le taux de couverture moyen mesuré sur des collecteurs de 3 mètres de longueur sur 90 cm de largeur pour différentes vitesses est comparé au taux d'application moyen correspondant. Ces essais mettent en évidence la relation moyenne suivante (Equation 3.2.):

$$d = 0,3861 * T \quad (3.2)$$

avec d : le taux d'application en ml/m²;
 T : le taux de couverture en %.

Cette relation expérimentale est établie pour la buse Teejet à une pression de 2 bars lors d'essais à 55 cm de hauteur pour 9 vitesses comprises entre 0,1 et 2 m/s. Elle présente l'avantage de représenter un grand nombre de points de mesure (environ 4000 pour chaque vitesse). Elle est utilisée dans le seul but d'effectuer une analyse qualitative entre le modèle et la répartition, une relation quantitative précise se révélant illusoire.

b) Analyse quantitative par dosage du KCl

Comme observé au point précédent, la mesure de la répartition par analyse d'image montre ses limitations lorsqu'on s'intéresse à une évaluation quantitative. Parmi les nombreuses autres méthodes de mesure de la répartition possibles, une méthode de dosage du KCl collecté dans des boîtes de Pétri a été

retenue pour procéder aux analyses quantitatives. Les boîtes de Pétri sont disposées selon un maillage fonction des objectifs de l'essai.

La méthode de dosage du KCl a été mise en œuvre avec l'appui de l'Unité de Chimie Analytique et de Phytopharmacie de la FUSAGx. Elle permet un bilan massique précis (environ 1 pourcent de la gamme de mesure) de la répartition obtenue lors d'une pulvérisation. La solution de pulvérisation constituée d'eau distillée additionnée d'environ 7 grammes/litre de KCl pour analyses est pulvérisée dans des boîtes de Pétri en plastique de 88 mm de diamètre. Les échantillons sont ensuite préparés pour l'analyse. Les boîtes de Pétri sont rincées à l'eau distillée en 6 fois (2 fois 2 ml, 3 fois 4 ml et 1 fois 5 ml). L'eau de rinçage est à chaque étape versée dans un ballon jaugé de 25 ml. Le ballon reçoit ensuite 0,5 ml d'HCl 4,8 N et 2,5 ml de tampon spectral. Enfin, le volume est porté au trait avec de l'eau distillée. Des échantillons de la solution prélevés dans la cuve et à la buse sont également préparés pour déterminer la concentration exacte de la solution pulvérisée. Ces échantillons sont dilués 200 fois pour atteindre la même gamme de concentration que les autres échantillons. Des solutions de référence contenant une concentration précise de KCl sont préparées pour effectuer le calibrage de la méthode. Une fois préparés, les échantillons sont dosés par spectrophotométrie d'émission atomique dans la flamme.

c) Analyse quantitative par pesée de résidus de KCl après séchage

Pour des raisons de rapidité d'analyse, une méthode par pesée des résidus de KCl a été mise au point. La même solution de KCl à 7‰ que pour la méthode précédente est collectée dans des boîtes de Pétri en verre de 52,5 mm de diamètre préalablement pesées au dixième de milligramme au moyen d'une balance analytique. Après séchage à l'étuve à 105 °C jusqu'à poids constant, les boîtes sont repesées une fois revenues à température ambiante. La mesure des dépôts est effectuée par différence. La solution pulvérisée est dosée par pesée des résidus de cinq échantillons de 5 ml de solution déposée dans cinq boîtes de Pétri au moyen d'une pipette jaugée de 5 ml. La précision de la balance Ohaus

Adventurer AV-65 utilisée ne permet naturellement pas de mesurer de manière satisfaisante les dépôts d'une pulvérisation car les quantités de bouillie recueillies sont trop faibles. Par contre, en procédant à un nombre adéquat de répétitions de l'essai, le volume de bouillie collecté devient suffisant pour obtenir une précision de la mesure de 1% de la gamme de mesure. En effet, pour 3 ml de solution collectés dans la boîte la plus remplie, les résidus secs s'établissent à 21mg pour une précision de pesée de 0,2 mg.

3.3 Conclusion

La distribution transversale d'une buse Teejet XR11003VK est mesurée au moyen d'un banc de répartition répondant à la norme ISO 5682/1, amélioré par un dispositif automatisé de mesure du volume collecté dans les éprouvettes au moyen de jauges d'extensiométrie. La distribution de la buse possède une forme bimodale asymétrique qui évolue légèrement dans le temps et dépend de la hauteur. Le spectre des gouttes à deux bars de cette même buse a été mesuré au moyen d'un granulomètre laser. Il apparaît que la granulométrie est plus fine au centre du jet qu'à sa périphérie.

Un banc d'essai qui permet de déplacer la buse selon une trajectoire contrôlée a été réalisé pour reproduire au laboratoire des mouvements de buse similaires à ceux rencontrés sur le terrain.

Différentes méthodes de mesure de la répartition dynamique sont proposées. La méthode par analyse d'images fournit une mesure qui permet de mettre en évidence la variabilité de la répartition sans permettre de la chiffrer précisément. La deuxième méthode, le dosage de KCl par colorimétrie, fournit une mesure de référence précise mais malheureusement fastidieuse de la répartition. Finalement, la dernière méthode utilisée, à savoir la pesée de résidus de KCl, ne permet de mesurer précisément la répartition que pour un grand nombre de répétitions de l'essai. L'une ou l'autre des méthodes doit être mise en œuvre en fonction des objectifs.