

CHAPITRE 2

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Ce deuxième chapitre a pour objet l'étude bibliographique de la répartition générée par les buses de pulvérisation. Dans un premier temps, les principaux facteurs intervenant dans le processus de répartition sont analysés. Ensuite, les méthodes de mesure de la répartition et sa modélisation sont présentées.

2.1 Facteurs affectant la répartition

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 ($450 \mu\text{m} < VMD$)¹.

2.1.1 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.

¹ *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.

a) 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 en grandes cultures, les *buses à fente* (à jet plat) et les *buses à turbulence* (à jet conique) représentent les deux catégories les plus couramment utilisées. La Figure 2.1. illustre les distributions du jet des buses les plus courantes.

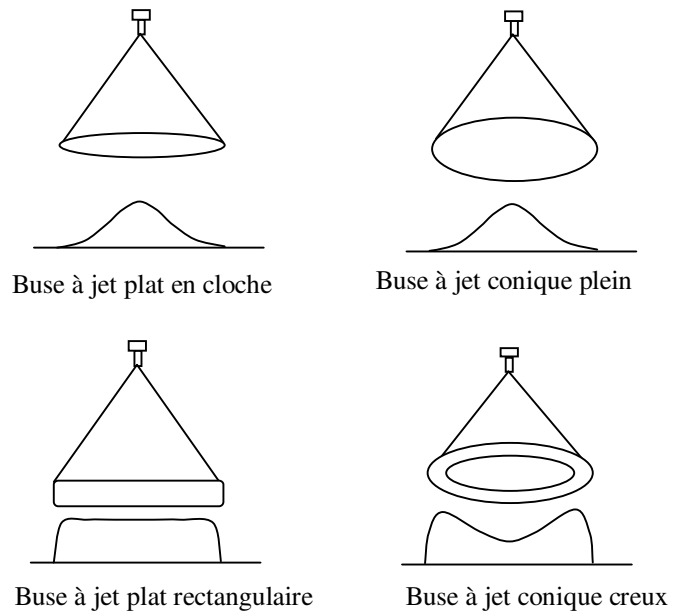


Figure 2.1. : Distribution du jet des buses les plus courantes (distribution spatiale et transversale).

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 [Anon., 1993]. 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 2.2. 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).

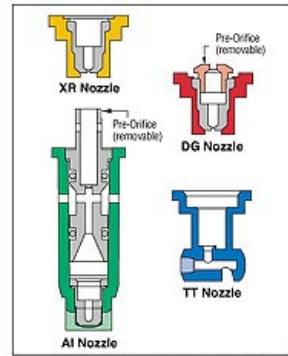


Figure 2.2. : Exemples de buses utilisées pour la pulvérisation en grandes cultures (document Teejet).

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. En Belgique, lors du contrôle technique obligatoire tous les trois ans, le dépassement de cette valeur entraîne l'obligation de changer de buses. Au niveau européen, certains pays procèdent à

une mesure de la distribution transversale sur le pulvérisateur en fonctionnement au moyen d'un banc d'essai répondant à la norme ISO 5682/2 [Anon., 1997].

b) 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 récents. 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 à un certain seuil (de l'ordre de 1 à 1,5 bars) qui assure la formation complète du jet.

c) 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.

2.1.2 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. La Figure 2.3. présente les 6 mouvements vibratoires rencontrés en pulvérisation selon les axes x , y et z : en rotation les roulis, tangage et lacet et en translation les moutonnement, tamis et pompage.

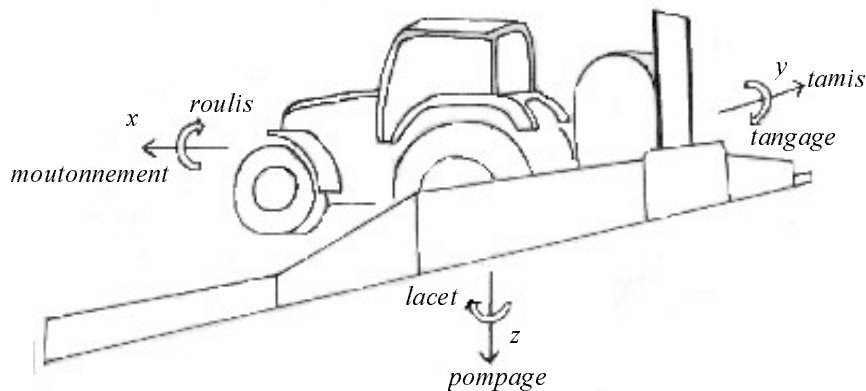


Figure 2.3. : Illustration des mouvements selon les six degrés de liberté.

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.

Les constructeurs de pulvérisateurs ont recours à des supports de rampe mobiles plus ou moins complexes pour limiter l'amplitude des mouvements de la rampe. En ce qui concerne les mouvements verticaux, tous les pulvérisateurs récents sont équipés de dispositifs de suspension verticale permettant de limiter l'effet du roulis. Il en existe de nombreux modèles qui peuvent être groupés en suspensions pendulaires, trapèzes et mixtes. Des suspensions actives qui agissent sur la géométrie de la suspension à partir d'informations fournies par des capteurs de distance sont commercialisées pour pallier aux limitations des systèmes passifs. Du point de vue des mouvements horizontaux, de plus en plus de rampes sont équipées de dispositifs de suspension horizontale passive permettant de limiter les effets des mouvements de lacet et de moutonnement.

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.

a) 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.

Dans les années 70, des travaux du NIAE (National Institute of Agricultural Engineering) se sont intéressés à la relation entre la hauteur de rampe et l'hétérogénéité de la répartition, définie par le coefficient de variation [Nation, 1976]. 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 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 essais statiques de ce type, réalisés avec une ou plusieurs buses simultanément, ont été répétés de manière intensive à travers le monde. Toutefois, on doit déplorer, et ce malgré l'existence d'une procédure de mesure standardisée ISO 5682/1 [Anon., 1996-2], qu'il n'existe pas de travaux de synthèse rassemblant les nombreux résultats de mesure de répartition obtenus, ces derniers restant le plus souvent confidentiels [Wang *et al.*, 1995].

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) [de Jong, 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.

b) Vitesse de la buse

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

$$d = \frac{q \times v \times e}{600} \quad (2.1)$$

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 véhicule 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 du véhicule. 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 véhicule. 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 (2.1) 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.

2.2 Mesures de la distribution et de la répartition

2.2.1 Mesures de la répartition statique unidimensionnelle

Historiquement, 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 spectaculaire quand elle est mal maîtrisée. Dès 1976, une note interne du NIAE (National Institute of Agricultural Engineering) [Nation, 1976]

précise que la répartition des pulvérisateurs est évaluée au moyen de *bancs de répartition* ("patternators") depuis de nombreuses années 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. 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. La mesure de la répartition est souvent utilisée 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 cm²) 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 œuvre, 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].

La diversité des solutions techniques possibles pour l'étude de la distribution transversale a rendu nécessaire la normalisation en ce domaine. Dès 1981, la norme internationale ISO 5681/1 sur les méthodes d'essai des buses de pulvérisation a vu le jour [Anon., 1981]. Elle a posé les jalons d'une nécessaire standardisation des tests de buses. Actuellement, la majorité des laboratoires actifs dans la recherche sur la pulvérisation disposent d'un banc de répartition répondant à cette norme. Il est dès lors intéressant de s'intéresser d'un peu plus près au contenu de cette norme et d'en analyser les implications du point de vue de la mesure de la répartition. 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].

2.2.2 Mesures de la répartition statique bidimensionnelle

La distribution uni-dimensionnelle mesurée perpendiculairement à la direction d'avancement influence essentiellement la répartition transversale (perpendiculaire au sens d'avancement). Les importantes variations longitudinales (dans le sens d'avancement) de la répartition observées sur le terrain sont, elles, liées à l'épaisseur du jet. Lorsque la répartition globale sous une rampe de pulvérisation est étudiée, la distribution bidimensionnelle des buses de pulvérisation est un paramètre essentiel. 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 cm² 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 similaire à celui qui équipe le "Hardy Spray Scanner", 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 proposée par l'IMAG 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. Actuellement, il n'existe pas à notre connaissance d'étude publiée sur la distribution des buses agricoles mesurées au moyen de ces techniques. Il est probable que la généralisation de ces instruments dans les laboratoires de recherche comble rapidement cette lacune.

2.2.3 Mesures de la répartition dynamique

La répartition dynamique est un paramètre essentiel pour obtenir une évaluation de la qualité du traitement. Les méthodes mises en œuvre 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 mis au point par la firme Ciba-Geigy 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 depuis longtemps et jusqu'à aujourd'hui réalisée au moyen de scanners ou de dispositifs spécialement réalisés à cette fin [De Moor et al. 2000].

La précision de ces différentes méthodes est malheureusement mal documentée, mais en règle générale, il apparaît que les méthodes analytiques sont les plus précises, suivies par les techniques faisant appel à la fluorométrie et enfin les techniques colorimétriques. La facilité de mise en œuvre de la méthode apparaît par contre plutôt comme une fonction inverse de la précision. 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 œuvre. 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.

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 œuvre 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. 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].

2.3 Modélisation

2.3.1 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.

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 conventionnel (Anon., 1996) : elle est donc 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 2.2.) :

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left[\left(\frac{x-m_x}{\sigma_x}\right)^2 - 2\rho\frac{x-m_x}{\sigma_x}\frac{y-m_y}{\sigma_y} + \left(\frac{y-m_y}{\sigma_y}\right)^2\right]\right\} \quad (2.2)$$

avec X et Y : variables aléatoires variant entre $-\infty$ et $+\infty$;
 m_x et m_y : moyennes marginales ;
 σ_x et σ_y : écarts-types marginaux ;
 ρ : coefficient de corrélation.

2.3.2 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.

- 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. La majorité des équipes de recherche actives dans le domaine se basent sur cette hypothèse [Ramon *et 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 sur-dosée (taux d'application supérieur de 25% à la moyenne) et sous-dosées (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, la modification de vitesse de chute des gouttes, ... associés à la variation de hauteur de la buse.

- 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. 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. 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. A titre d'exemple, pour une vitesse d'avancement de 1 m/s, des buses à fente situées à 50 cm de hauteur et une sollicitation horizontale de 10 cm

d'amplitude et 1 Hz de fréquence, les sous-dosages (< de 25 % au taux d'application moyen) mesurés et simulés correspondent respectivement à 32 et 50 % de la surface pulvérisée tandis que les sur-dosages (> de 25% au taux d'application moyen) modélisés et simulés correspondent respectivement à 28 et 30 % de cette même surface.

De manière générale, si un consensus apparaît sur la méthode de modélisation de l'effet des mouvements de buse sur la répartition, les résultats des validations montrent des imprécisions et ne permettent pas de poser un jugement définitif sur la précision que les modèles permettent d'atteindre. 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.

La difficulté d'obtenir des mesures quantitatives fiables de la répartition est une autre raison qui peut expliquer la faible qualité des validations qui ont été

réalisées. Les nombreuses techniques de mesure utilisées présentent des désavantages qui peuvent nuire à la qualité de l'interprétation des résultats.

Enfin, 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.

2.4 Conclusion

En négligeant les paramètres atmosphériques responsables de la dérive (évaporation des gouttes et transport par le vent en-dehors de la cible), les principaux facteurs affectant la répartition sont:

- la distribution des buses qui est liée aux caractéristiques géométriques des buses, à la pression de pulvérisation et aux propriétés de la bouillie pulvérisée ;
- la trajectoire des buses, soumises aux mouvements de la rampe de pulvérisation, qui conditionne la hauteur des buses ainsi que leur vitesse.

La répartition statique des buses est mesurée soit selon un axe, le plus souvent au moyen de bancs de répartition standardisés, soit selon deux axes au moyen de méthodes particulières. La mesure de la répartition statique permet de caractériser la distribution de la buse.

De nombreuses méthodes ont été développées pour mesurer la répartition dynamique des buses. Le problème majeur est lié à la variabilité des dépôts, qui est très grande et a priori inconnue. Les méthodes se différencient notamment par leur caractère discontinu (ex. papier sensible) ou continu (ex. banc de répartition)

et par la technique d'analyse (analyse chimique, analyse d'images, ...). Il en résulte des différences au niveau de la résolution, de la précision, de la facilité de mise en œuvre et du coût. Le choix d'une méthode doit se baser sur les objectifs de l'expérimentation et ses conditions (terrain ou laboratoire). La modélisation de la répartition dynamique doit nécessairement tenir compte de la distribution de la buse (soit mesurée, soit modélisée), de sa hauteur par rapport à la cible et de sa vitesse longitudinale. Les équipes de recherche qui modélisent la répartition convergent sur la structure de modèle qu'il convient d'utiliser. Tous les modèles prédisent assez fidèlement l'effet des paramètres influençant la répartition mais présentent des limitations au niveau de la validation expérimentale, ce qui handicape la prédiction correcte des taux d'application dans des circonstances réelles.

Cette dernière considération montre la nécessité de mettre en œuvre une procédure complète de modélisation de la répartition, depuis la mesure de la distribution d'une buse jusqu'à la validation du modèle par des essais réalisés dans des conditions représentatives. Cette approche doit permettre de juger précisément de la pertinence de ce type de modèle et d'en estimer les limitations et avantages.