

COMMUNAUTE FRANCAISE DE BELGIQUE

FACULTE UNIVERSITAIRE DES SCIENCES
AGRONOMIQUES DE GEMBLoux

**MODELISATION DE LA REPARTITION
DYNAMIQUE DES PRODUITS
PHYTOPHARMACEUTIQUES SOUS UNE RAMPE
DE PULVERISATION**

Frédéric LEBEAU

Dissertation originale présentée
en vue de l'obtention du grade de
docteur en Environnement

Promoteur : Prof. Marie-France DESTAIN

2003

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.

Le promoteur de ce travail en premier lieu, Marie-France Destain, qui a encadré cette recherche avec attention et qui a relu ce texte avec la persévérance nécessaire.

Les membres du jury, et particulièrement les rapporteurs, Messieurs Debouche et Schiffers, qui ont apporté le recul nécessaire pour juger du travail. Leur lecture attentive a permis de limiter les erreurs et imprécisions qui subsistaient.

Il ne faut pas passer sous silence non plus l'aide amicale du personnel de la Faculté, de l'Unité de Mécanique et Construction bien sûr, mais également de toutes les Unités auxquelles il m'a été agréable de demander aide et conseil et en particulier l'Unité de Chimie analytique et Phytopharmacie.

Je terminerai par remercier mes amis et ma famille pour les encouragements et le soutien, et particulièrement Nelawu et Nlandu dont l'intervention fut quotidienne.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Utilisation des produits phytopharmaceutiques

1.1.1 Les produits phytopharmaceutiques

La Commission européenne [Anon., 2002] définit les produits phytopharmaceutiques comme des substances actives et des préparations contenant une ou plusieurs substances actives utilisées pour protéger les productions végétales contre les organismes nuisibles (maladies ou ravageurs) ou pour prévenir l'action de ces organismes. Ils peuvent fonctionner de différentes manières en tuant les organismes nuisibles (pesticides), mais aussi en créant une barrière physique, en agissant comme répulsifs, en attirant les organismes nuisibles loin des plantes, en régulant la croissance des plantes ou des insectes, etc.

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 en Europe. Les quantités de substances actives vendues chaque année avoisinent 320 000 tonnes dans l'Union européenne, ce qui représente actuellement un quart du marché mondial.

Les produits phytopharmaceutiques peuvent être classés selon leur mode d'action, leur composition chimique ou leur activité biologique. Suivant cette

dernière classification, les principaux types de produits sont les fongicides (environ 43% du marché), suivis des herbicides (36%), des insecticides (12%) et autres pesticides (9%). Cette dernière catégorie comprend notamment les molluscicides, avicides, stérilisants chimiques, dessiccants, phéromones, piscicides, régulateurs de croissance, répulsifs, rodenticides.

En termes monétaires, le marché des produits phytopharmaceutiques est estimé à 6 milliards d'euros pour l'Union européenne. Les ventes de produits phytopharmaceutiques ont augmenté chaque année jusqu'en 1999 alors que les quantités utilisées ont évolué de manière variable. Après avoir atteint un maximum en 1990, les quantités utilisées ont baissé en 1991 et pendant la période 1993-1995, notamment en raison de l'apparition de nouvelles molécules et des modifications apportées à la Politique agricole commune en 1992. La tendance semble s'être inversée les années suivantes avec une nouvelle augmentation des quantités utilisées (Figure 1.1.).

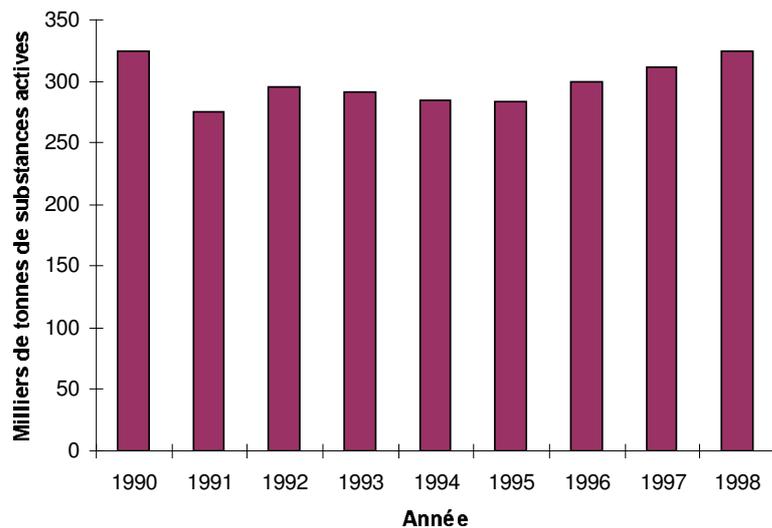


Figure 1.1. : Ventes totales de produits phytopharmaceutiques dans l'Europe des 15 (EUROSTAT).

Ces statistiques doivent toutefois être interprétées avec prudence dans la mesure où elles ne donnent aucune indication sur la nature des substances actives concernées et par conséquent sur les risques d'impacts négatifs liés à leur utilisation.

L'usage des produits phytopharmaceutiques, tant en nature qu'en quantité, varie en fonction du type de production agricole. Avec la viticulture et l'horticulture, les céréales et les pommes de terre constituent les cultures faisant le plus usage de produits phytopharmaceutiques. Divers facteurs influencent les produits et les quantités utilisés: type de maladie ou de ravageur, conditions météorologiques, facteurs saisonniers, prix des pesticides, réglementation,... Last but not least, 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.

D'un pays à l'autre apparaissent des disparités importantes des quantités utilisées par hectare et des types de produits appliqués en fonction des caractéristiques de l'agriculture pratiquée. Les pays d'Europe méridionale et occidentale sont les principaux consommateurs d'insecticides et de fongicides tandis que les pays d'Europe septentrionale et centrale recourent plus intensivement aux herbicides.

Le coût des produits phytopharmaceutiques varie considérablement d'une culture, d'une région ou d'une saison à l'autre. De manière générale, des cultures de plus haute valeur justifient des dépenses supérieures en produits phytopharmaceutiques dans la mesure où les risques financiers correspondants sont supérieurs. Selon les données d'EUROSTAT, le coût des produits phytopharmaceutiques dans l'Union européenne est de l'ordre de 6% de la valeur totale des productions végétales qui avoisine 100 milliards d'euros.

1.1.2 Avantages de l'utilisation des produits phytopharmaceutiques

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, d'améliorer ou de préserver la qualité des produits et de limiter la main-d'œuvre nécessaire. Ils jouent également un rôle essentiel en garantissant chaque année un approvisionnement fiable en produits agricoles en contribuant à limiter les fluctuations des rendements. Enfin, une utilisation adéquate permet un approvisionnement en fruits et légumes de bonne qualité à un prix accessible au plus grand nombre.

D'aucuns estiment que, par l'augmentation des rendements, l'application des produits phytopharmaceutiques réduit la surface nécessaire aux cultures alimentaires, ce qui libère des terrains pour d'autres utilisations comme les loisirs, les parcs industriels, les parcs naturels, la protection des zones marginales et des zones de biodiversité. Elle permet également de produire certains produits alimentaires au niveau régional, ce qui réduit les transports [Oppenheimer *et al.*, 1998].

Les pratiques culturales simplifiées qui, par ailleurs, peuvent présenter des avantages écologiques sont largement tributaires de l'utilisation d'herbicides.

1.1.3 Risques liés à l'utilisation des produits phytopharmaceutiques

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 dans lesquelles a lieu 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. Des 580 matières actives répertoriées par l'Organisation

Mondiale de la Santé, 29 sont classées comme extrêmement dangereuses (classe Ia), 61 sont classées comme hautement dangereuses (classe Ib), 123 modérément dangereuses (classe II), 122 légèrement dangereuses (classe III) et 245 peuvent être considérées comme inoffensives en utilisation normale [Anonyme 2002-2]. 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. Une étude de 1997 menée par la Fédération européenne des syndicats de travailleurs agricoles montre que les effets néfastes les plus communément relevés chez les opérateurs sont, dans 38% des cas, liés à une exposition lors de l'application, dans 28% des cas, ils se produisent lors de la préparation du mélange et dans 6% lors de la manutention des conteneurs. Le Health and Safety Executive (Royaume-Uni) signale qu'environ 170 incidents en rapport avec les pesticides surviennent annuellement, avec dans 70 % des cas des problèmes de santé. L'Agence de Protection de l'Environnement (EPA) des Etats-Unis estime qu'il y a, au niveau mondial, de 20 000 à 300 000 cas par an d'intoxication aiguë due aux pesticides parmi les travailleurs agricoles [Anon., 1996].

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 tant au niveau national, qu'europpéen et 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. De manière générale, les nouvelles réglementations sur l'agrément des matières actives tendent à éviter les composés présentant une toxicité, une persistance ou une accumulation trop importante. La réévaluation des matières actives, qui doit se terminer en 2008, permet quant à elle d'éliminer progressivement les composés nuisibles. A ce titre, les pays en voie de développement 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 riverains, des promeneurs 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. En Belgique, comme dans de nombreux pays, l'OCDE identifie les pesticides comme un élément majeur de la contamination des eaux souterraines. De plus en plus d'études épidémiologiques s'interrogent sur les effets des traitements sur la santé des riverains. Aux Etats-unis, l'EPA annonce plusieurs milliers de plaintes annuelles liées à la dérive de pesticides.

Dans la pratique, il est extrêmement difficile de quantifier les avantages et les effets indésirables réels liés à l'utilisation des pesticides.

1.1.4 Limitation des risques

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.

Les différents produits phytopharmaceutiques sont associés à des types et des niveaux de risque différents. Il convient de tenir compte des différentes phases de vie du produit, depuis la mise sur le marché jusqu'à l'élimination des déchets et résidus. Sur base d'une étude approfondie, il est possible de limiter les risques en adaptant la législation et en procédant à des contrôles et en respectant les bonnes pratiques en matière d'application.

De nombreux moyens existent pour limiter davantage l'impact des produits phytopharmaceutiques. Il serait difficile d'en faire une liste exhaustive mais il est utile de citer les principaux:

- *Contrôle de la mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques*: l'autorisation de mise sur le marché est contrôlée par les autorités nationales ou supranationales dans la majorité des pays. Cette autorisation fait suite à une évaluation des risques qui vise à garantir que les produits phytopharmaceutiques n'exercent pas d'effet néfaste sur la santé humaine et animale ni d'effet inacceptable sur l'environnement. Si on est en droit de rester inquiet de l'utilisation intensive des pesticides, on ne peut que se réjouir de l'évolution de la composition des produits phytopharmaceutiques conventionnels. Ceux-ci tendent vers des

produits plus sélectifs qui, du fait de leur faible rémanence, présentent moins de risques pour l'environnement que les premiers pesticides mis au point dans les années 1940 – 1950 [Matthews G.A., 1992].

- *Fixation de teneurs maximales en résidus dans les aliments:* des réglementations fixent les limites maximales en résidus compte tenu de la dose journalière admissible. En Europe, ces limites étaient dépassées dans 4% des échantillons analysés en 1999 pour les fruits, légumes et céréales [Anon., 1999].
- *Réglementation sur la qualité de l'eau:* les substances dangereuses pour la santé humaine dans les eaux superficielles et souterraines font l'objet d'un suivi par les autorités compétentes qui appliquent des mesures pour limiter les risques liés à la contamination des eaux.
- *Politique agricole:* que ce soit la politique agricole commune [Agenda 2000] ou des initiatives locales comme les mesures agro-environnementales, divers systèmes de primes peuvent limiter l'impact des produits phytosanitaires.
- *Règlements sur la sécurité et la santé des travailleurs sur leur lieu de travail:* les risques peuvent être limités en agissant sur le conditionnement, la formulation des produits phytopharmaceutiques ou en imposant des normes de sécurité pour le matériel d'application.
- *Recherche et développement de nouvelles technologies:* les recherches fournissent des solutions innovantes pour limiter les risques liés à l'utilisation des produits phytopharmaceutiques. Le développement de technologies anti-dérive permet de diminuer l'impact de facteurs climatiques. Des dispositifs de contrôle électronique du fonctionnement du pulvérisateur permettent d'améliorer la précision des traitements. L'agriculture de précision cherche à optimiser l'utilisation des intrants. Des solutions

alternatives à l'application des produits phytopharmaceutiques recourant aux OGM ont pour finalité de confiner le traitement à sa cible.

- *Programmes de formation et de vulgarisation*: l'élément humain reste décisif dans le respect de bonnes pratiques, de nombreux efforts de formation volontaire ou obligatoires sont entrepris dans de nombreux pays. L'opérateur doit être sensibilisé à l'impact de ses actes sur l'écosystème. Car, en pratique, il lui incombe de prendre la décision de traiter en fonction des agents climatiques. C'est également à lui qu'incombe de choisir, de régler et d'opérer son matériel. Il est également seul pour gérer ses stocks de produits phytosanitaires, se débarrasser des résidus d'emballage et des fonds de cuve. Même si un arsenal réglementaire de plus en plus complet se met en place, seule une prise de conscience de l'opérateur permettra vraiment d'assurer une pulvérisation en conditions optimales.
- *Plans de réduction de l'utilisation*: des pays comme le Danemark, la Suède, la Finlande et les Pays-Bas mettent en œuvre des plans nationaux de réduction de l'utilisation des produits phytopharmaceutiques. A titre d'exemple, le nouveau plan de protection des cultures du gouvernement néerlandais prévoit de réduire les risques environnementaux de 90% en diminuant de 95% l'utilisation de produits phytopharmaceutiques pour 2010 par rapport à 1998 [Van de Zande *et al.* 2002].
- *Collecte des emballages*: la majorité des pays européens ont mis en place un système volontaire ou obligatoire de collecte des emballages et produits non utilisés en vue de leur destruction en toute sécurité.
- *Interdiction de la pulvérisation aérienne*: la pulvérisation aérienne est de plus en plus fréquemment interdite ou limitée à des applications très strictement réglementées.

- *Développement de la lutte intégrée et de la lutte biologique*: des systèmes d'avertissement, le développement de labels et de codes de bonne pratique participent à l'emploi raisonné des produits phytopharmaceutiques.
- *Promotion de la qualité*: des cahiers des charges, comme par exemple en Belgique la "Charte Perfect" ou "Terra Nostra", qui visent la qualité des productions imposent une utilisation raisonnée des produits phytopharmaceutiques avec révision des itinéraires techniques.
- *Promotion de l'agriculture biologique*: l'agriculture biologique réduit fortement l'utilisation des pesticides, même si certains produits phytopharmaceutiques traditionnels, comme des sels de cuivre, restent autorisés.
- *Taxation*: en Europe, la Suède, le Danemark et la Belgique ont imposé des taxes pour tenter de contribuer à rationaliser l'utilisation des produits phytopharmaceutiques. Des pays comme le Royaume-Uni étudient cette possibilité.
- *Vérifications techniques, 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'épandage des produits phytopharmaceutiques. Les contrôles techniques existent dans tous les pays européens et sont obligatoires dans plusieurs d'entre eux. A ce titre, il faut rappeler le travail pionnier réalisé dans ce domaine par le Département Génie rural du Centre de Recherches agronomiques de Gembloux. Par ailleurs, un gros effort de normalisation est encore consenti pour standardiser les procédures de test de l'équipement [Herbst et Ganzelmeier, 2002]. C'est dans ce cadre que le présent travail tente d'apporter une

contribution à l'amélioration de la santé publique et de l'environnement.

1.2 Application des produits phytopharmaceutiques en grandes cultures

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

1.2.1 Définitions

Dans la suite du travail, le vocabulaire utilisé est celui qui est défini par la norme ISO 5681 [Anon., 1992]. Il faut toutefois remarquer que les termes de *répartition* et de *distribution d'une buse* ne font pas l'objet d'une distinction précise dans la norme. D'une manière générale, ces notions sont utilisées de manière ambiguë dans la littérature francophone, alors que la littérature anglo-saxonne est plus précise. Nous proposons de les définir de la manière suivante:

- *Répartition*: distribution spatiale du taux d'application¹ (en anglais: "spray deposits distribution"). Elle définit la manière dont la quantité de bouillie de pulvérisation appliquée sur la cible est répartie dans le plan. Ses unités ont les dimensions d'un volume par unité de surface, par exemple des ml/m² ou des l/ha. La répartition présente la distribution spatiale du résultat final du processus physique de pulvérisation. Lorsque la répartition est le fait d'une buse à l'arrêt, la répartition est qualifiée de statique tandis que lorsqu'elle est le fait d'une buse en mouvement, elle est qualifiée de dynamique.

¹ taux d'application : volume de bouillie appliquée par unité de longueur, de surface ou de volume traité (en anglais: "application rate").

- *Distribution d'une buse*: distribution spatiale du débit-volume² de la bouillie au sein du jet (en anglais: "nozzle spray distribution" ou "nozzle spray pattern"). Le plus souvent, la distribution est caractérisée selon un axe horizontal perpendiculaire à la direction d'avancement au moyen d'un banc de répartition. On parlera alors de *distribution unidimensionnelle* (selon un axe et à une hauteur déterminée) ou de distribution transversale. Lorsque la distribution est caractérisée selon un maillage dans un plan horizontal, on parlera de *distribution bidimensionnelle* (pour une hauteur fixée). Dans ce cas, la distribution s'exprime en volume par unité de temps et de surface, par exemple des ml/(s.m²).

Les notions de distribution et de répartition sont intimement liées. En conditions statiques, comme par exemple sur un banc de répartition, la distribution de la buse est égale à la répartition qu'elle génère divisée par le temps de pulvérisation. C'est pour cette raison que les deux notions sont souvent confondues.

1.2.2 Le processus d'application

Le processus d'application des pesticides en grandes cultures peut être représenté comme un système dont l'entrée est le volume par hectare à appliquer (*consigne*) et dont la sortie est le volume par hectare appliqué (Fig. 1.2). Sur la surface cible, le taux d'application diffère plus ou moins de la consigne selon les performances du processus et sa sensibilité aux différentes sources de perturbation. Le processus peut être divisé en trois sous-systèmes, qui possèdent des entrées et sorties propres, et qui sont éventuellement affectés par des perturbations extérieures.

- *la structure mécanique du pulvérisateur*: celle-ci comprend le châssis du pulvérisateur, la rampe de pulvérisation et son support. Le

² débit-volume : quotient du volume traversant une surface par le temps.

conducteur du véhicule tente d'imposer le respect de la consigne de trajectoire mais la structure est soumise à des perturbations extérieures, qui affectent la trajectoire des buses. Outre les imprécisions de la trajectoire du véhicule, le roulement du véhicule génère des vibrations qui sont transmises à la rampe via son support intermédiaire. En fonction des propriétés dynamiques (répartition des masses et inerties, nature des liaisons entre rampe et véhicule d'une part et entre tronçons de rampe d'autre part), la rampe subit des mouvements dont l'amplitude plus ou moins importante détermine la trajectoire des buses.

- *le circuit hydraulique*: la pression au niveau des buses dépend de la consigne de pression imposée directement ou indirectement par l'opérateur et du comportement des éléments du circuit hydraulique comme la pompe, le régulateur, la tuyauterie, les filtres,... Des variations du régime moteur ou l'obstruction de filtres peuvent perturber le processus. En règle générale, les différents types de régulateurs cherchent à maintenir l'homogénéité du traitement en compensant les variations de vitesse d'avancement du pulvérisateur par des modifications de la pression de la bouillie. Le débit des buses étant proportionnel à la racine carrée de la pression, la compensation de modifications de vitesse nécessite une variation quadratique de la pression.
- *les buses*: le passage au travers de cet orifice calibré 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.

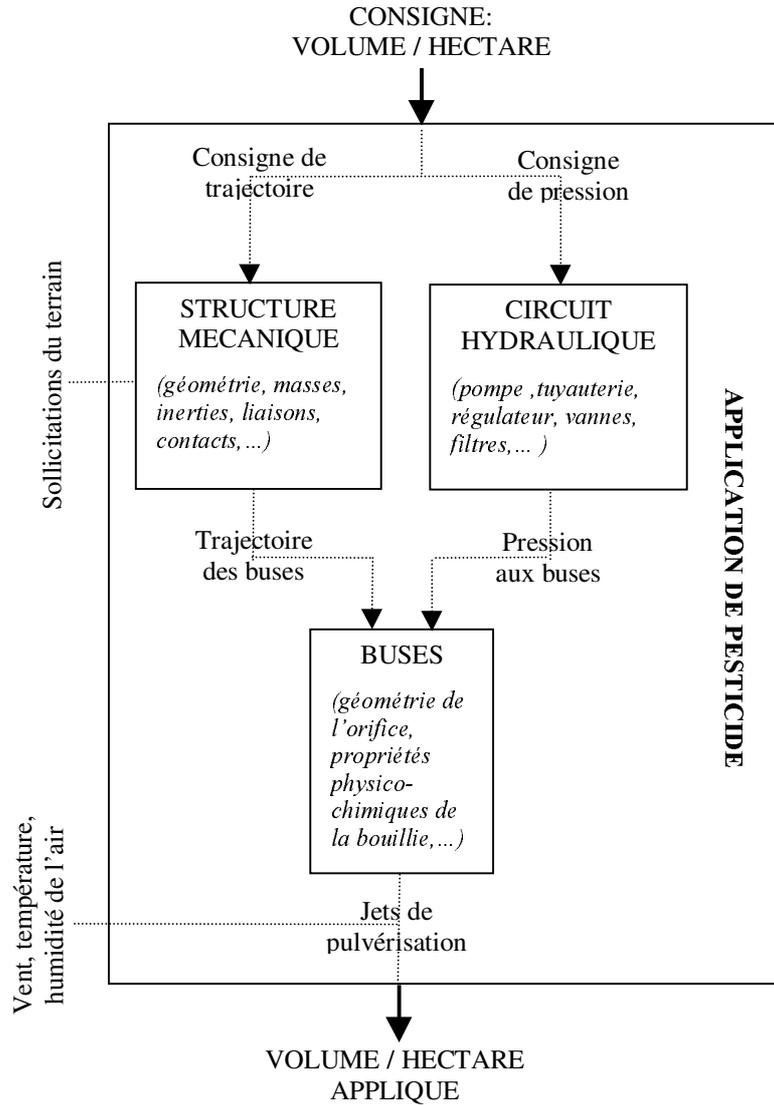


Figure 1.2. : Schéma descriptif du processus d'application.

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. Enfalt *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.

1.3 Objectifs et méthodologie

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. Il existe au niveau européen une volonté de développer des procédures standardisées de test des pulvérisateurs, tant pour l'homologation du nouveau matériel que pour le contrôle technique du matériel en usage. Plusieurs approches peuvent être envisagées pour rencontrer ces objectifs. Elles peuvent être classées comme suit:

- *Essais de terrain*: les études empiriques basées sur des essais de terrain s'avèrent indispensables pour quantifier le problème en conditions réelles. Elles ne permettent malheureusement pas de comparer précisément les différents matériels en raison de la

variabilité des conditions d'essai. De plus, elles sont longues et coûteuses.

- *Essais sur obstacles*: les pistes vibratoires munies d'obstacles divers permettent de solliciter le matériel en conditions contrôlées, même si la trajectoire du véhicule peut différer légèrement d'un essai à l'autre.
- *Essais sur simulateur de piste*: il est possible de recourir à des simulateurs de piste, comme ceux qui existent au CEMAGREF (France) ou à la BBA (Allemagne), qui sollicitent le matériel de manière totalement contrôlée. Le principal désavantage de la méthode réside dans son coût, ce qui la réserve à des tests d'homologation ou au développement de prototypes.
- *Essais de laboratoire*: il est finalement possible de mesurer par des essais de laboratoire le comportement des différents composants du pulvérisateur: la structure mécanique, le circuit hydraulique et les buses. Cette méthode présente l'avantage de mettre en évidence l'effet des différents sous-systèmes dans le processus global, ce qui est précieux lorsqu'on cherche à améliorer le matériel et obtenir un diagnostic précis des causes de dysfonctionnement.

Pour mettre en place des procédures d'homologation ou de certification, les méthodes utilisées doivent être représentatives des sollicitations effectivement rencontrées sur le terrain. De plus, pour être pratiques, elles doivent être rapides. Les mesures de répartition réalisées sur le terrain sont particulièrement fastidieuses et dépendantes des conditions climatiques et, à ce titre, représentent un gros handicap à la mise en place de procédures de test, même si des tentatives sont en cours pour développer des dispositifs automatisés. Pour dépasser cette limitation, il est possible de recourir à la modélisation de la répartition sous l'effet de la trajectoire de la buse et de la pression de pulvérisation. Le développement d'un tel modèle, qui doit permettre de décrire précisément les interactions entre les différentes composantes du processus

d'application, fait l'objet de cette thèse. Si l'approche s'avère concluante, les procédures de test peuvent s'en trouver considérablement facilitées, dans la mesure où des mesures de mouvements de rampe et de pression de pulvérisation pourraient être substituées aux mesures de répartition.

Faisant suite à cette introduction, le deuxième chapitre présente l'état de l'art et les travaux menés sur la répartition. Dans un premier temps, les facteurs affectant la répartition sont identifiés et leurs effets décrits. Par la suite, les méthodes de mesure de la répartition sous une buse, statique ou en mouvement, sont précisées. Enfin, les travaux menés sur la modélisation de la répartition sont présentés. Le chapitre 3 décrit le matériel utilisé. Il se compose d'une buse à fente dont les caractéristiques (distribution transversale, granulométrie) sont décrites. Cette buse est montée sur un banc d'essai permettant de simuler des mouvements de rampe. Les différentes méthodes mises en œuvre pour la mesure de la répartition sous la buse sont décrites. Le chapitre 4 présente la répartition mesurée pour différents mouvements imposés à la buse. Il permet de mettre en évidence la manière dont les différents facteurs affectent la répartition. Sur cette base, un modèle de simulation de la répartition sous une buse en mouvement est proposé au chapitre 5. Une première mise en application du modèle est réalisée au chapitre 6 à partir de la distribution statique de la buse. Partant du constat des limitations de cette première approche, une nouvelle méthode basée sur la distribution dynamique est proposée et évaluée. Au chapitre 8, le modèle est utilisé pour estimer la répartition en conditions réelles à partir de mesures de mouvements de rampe acquises sur le terrain au moyen d'une chaîne de mesure spécialement conçue à cet effet. Les conclusions du chapitre 9 clôturent le travail.

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.

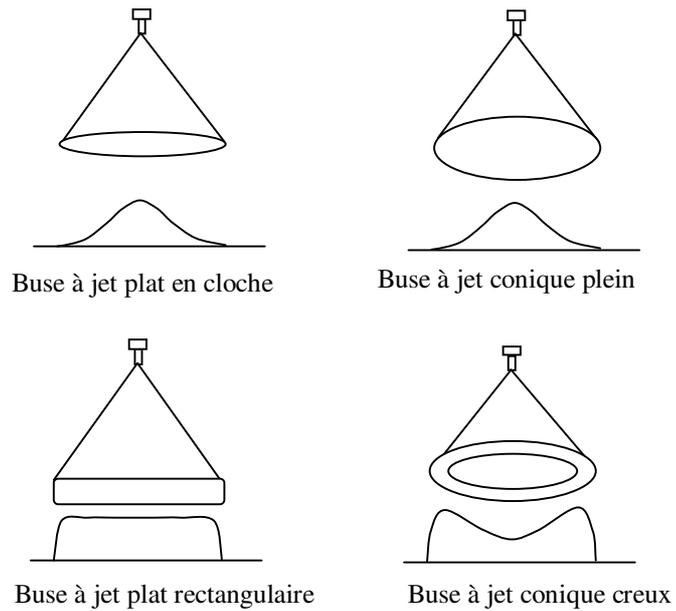


Figure 2.1. : Distribution du jet des buses les plus courantes (distribution spatiale et transversale).

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).

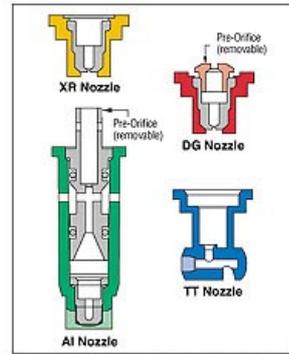


Figure 2.2. : Exemples de buses utilisées pour la pulvérisation en grandes cultures (document Teejet).

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.

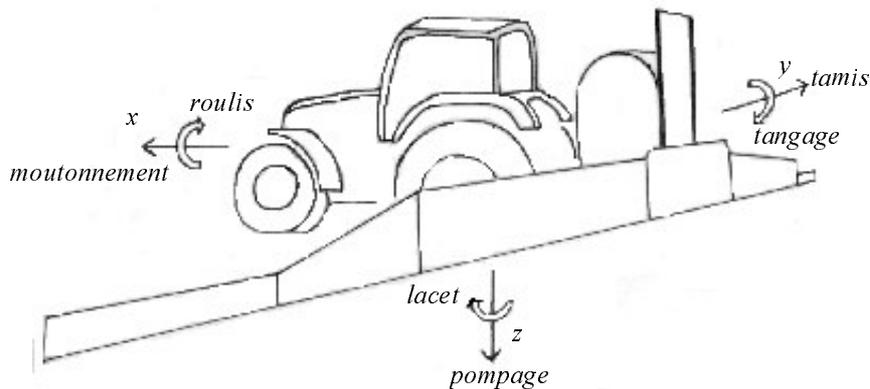


Figure 2.3. : Illustration des mouvements selon les six degrés de liberté.

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 surdosée (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.

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.

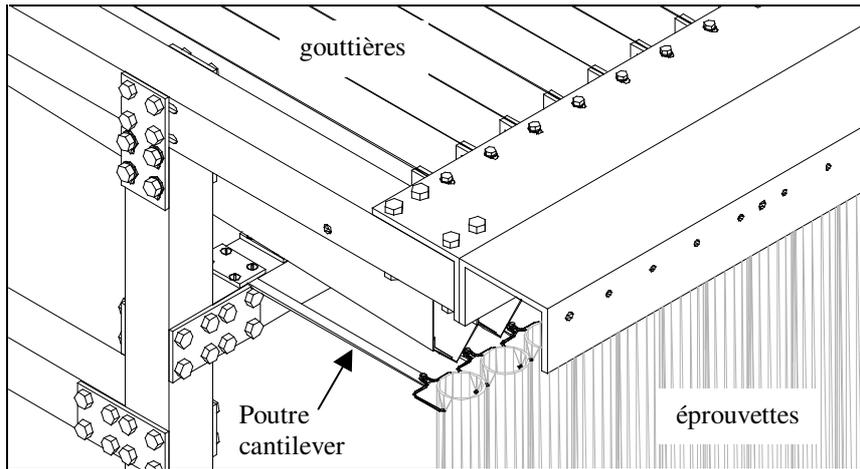


Figure 3.1. : Vue du dispositif de fixation des éprouvettes.

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.).

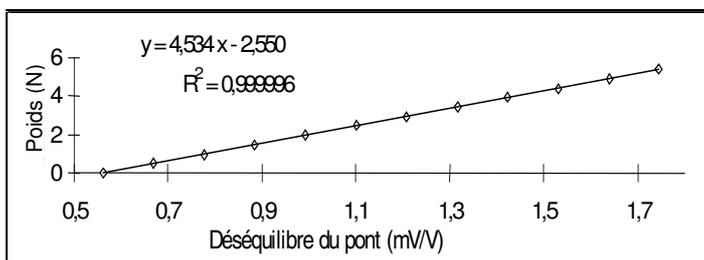


Figure 3.2. : Exemple de droite de calibrage (épreuve 1).

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.

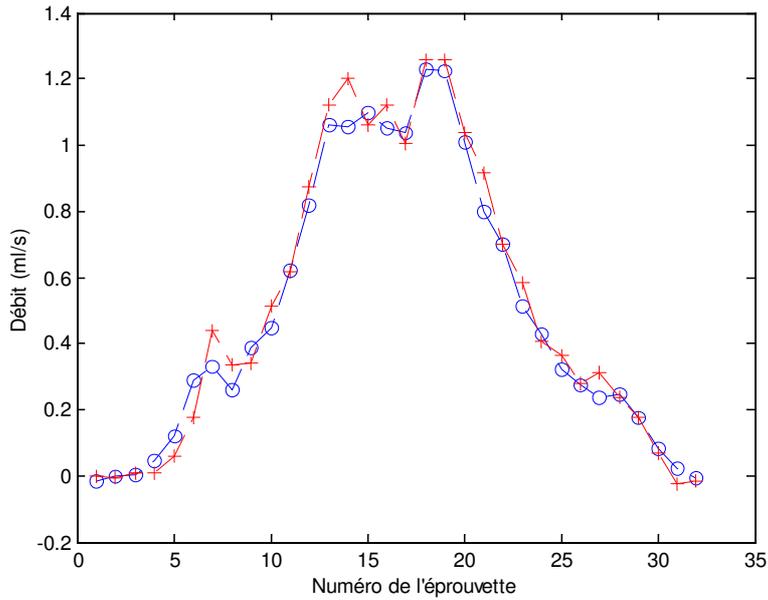


Figure 3.3. : Mesures de la distribution transversale de la buse Teejet XR11003VK à 2 bars, en début d'expérimentation (bleu) et fin d'expérimentation (8 mois plus tard, rouge), 50 cm de hauteur.

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.

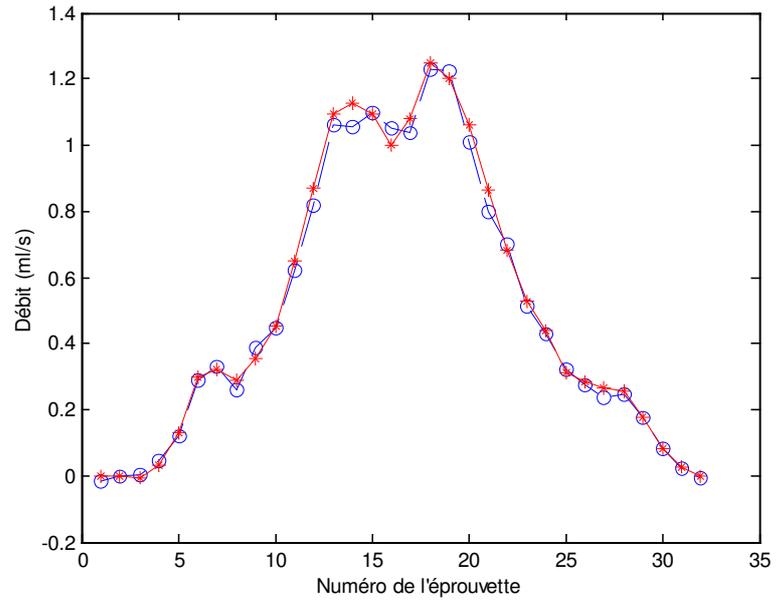


Figure 3.4. : Mesures de la distribution transversale de la buse Teejet XR11003VK à 2 bars, à quelques heures d'intervalle, 50 cm de hauteur.

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° .

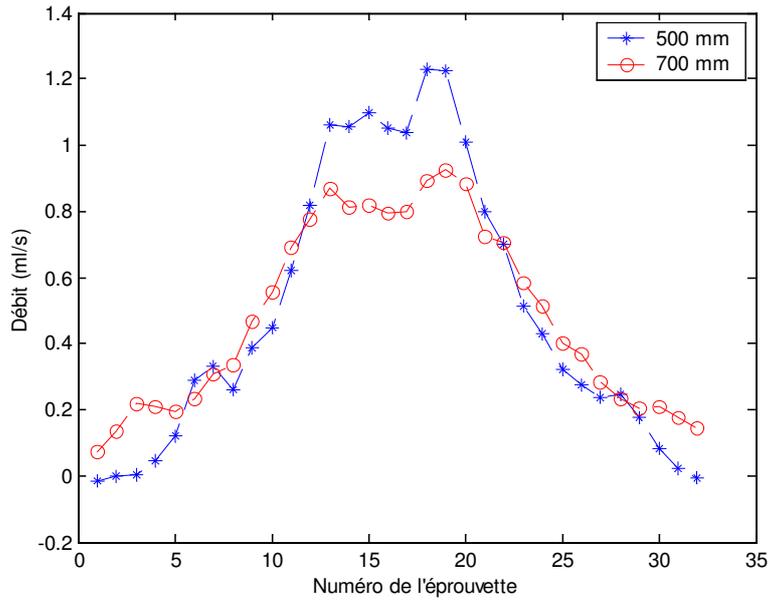


Figure 3.5. : Effet de la hauteur. Mesure de la distribution unidimensionnelle de la buse Teejet XR11003VK à 2 bars, 500 et 700 mm de hauteur.

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.

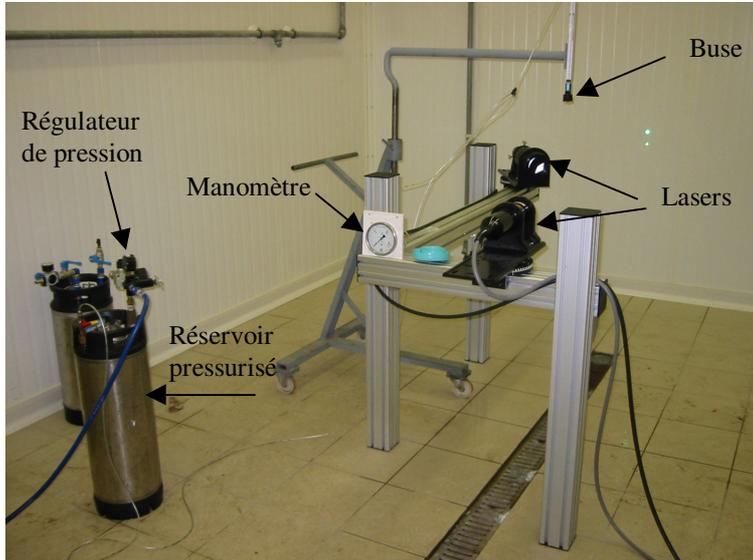


Figure 3.7. : Granulomètre laser du CLO.

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.

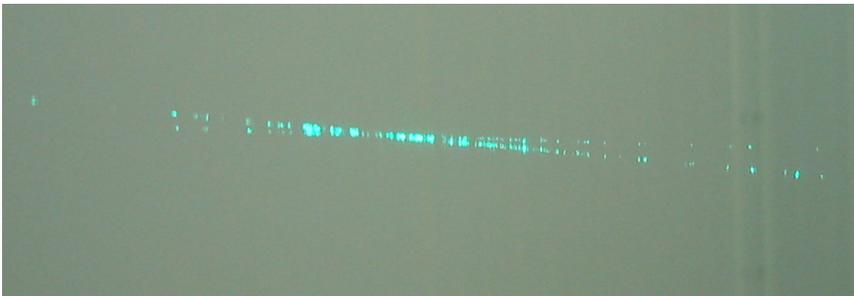


Figure 3.8. : Zone de mesure du granulomètre laser.

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.

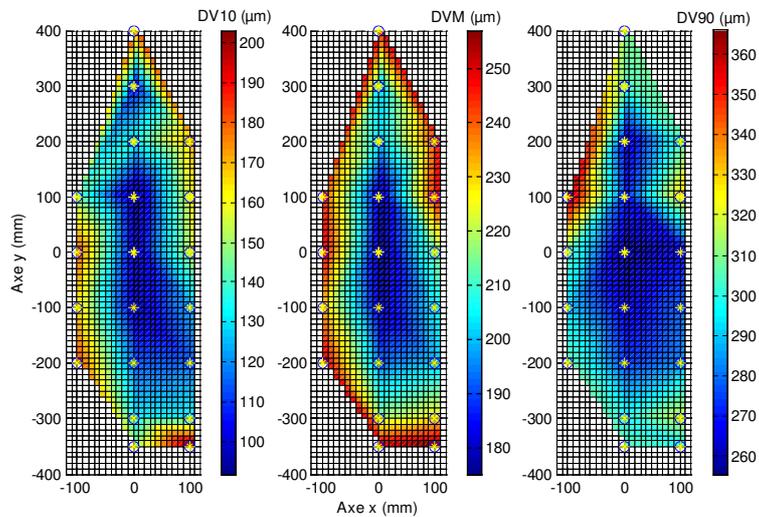


Figure 3.9. : DV10, DVM et DV90 de la buse XR11003VK à 2 bars et 55 cm de hauteur.

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).

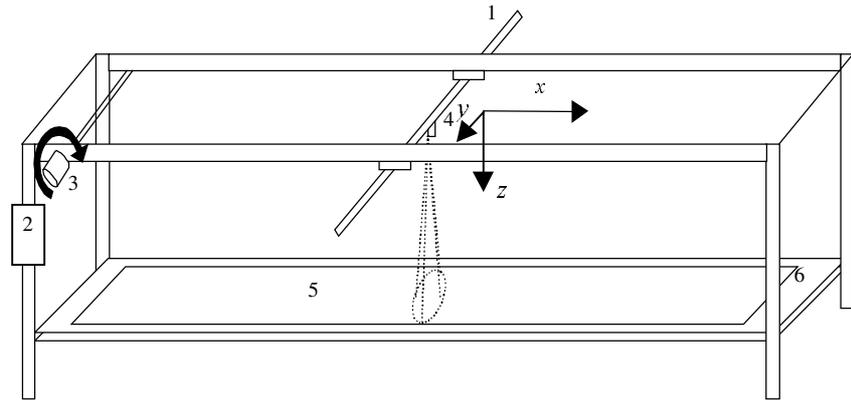


Figure 3.10. : Dispositif expérimental de validation du modèle de simulation de la répartition dynamique.

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.

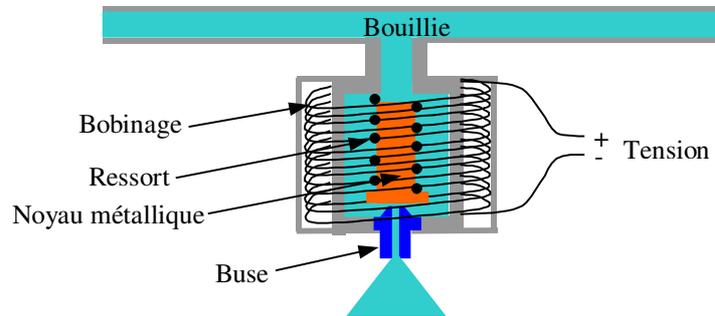


Figure 3.11. : Schéma de principe du porte buse PWM.

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 Enfält *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").

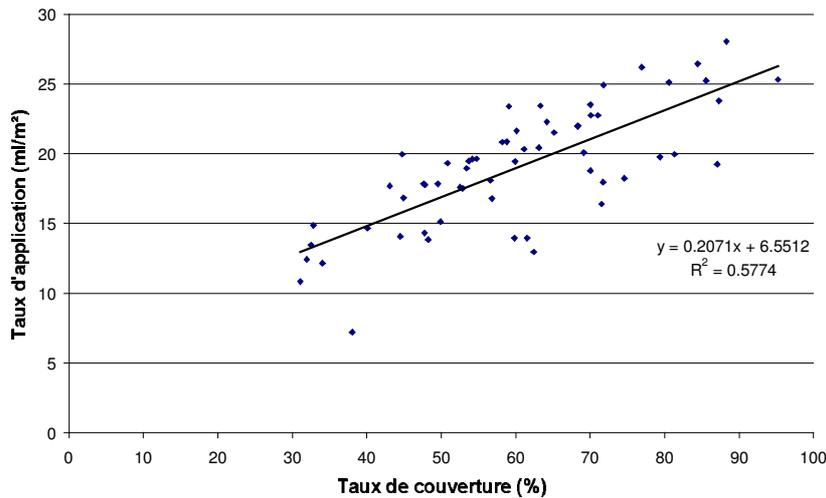


Figure 3.12. : Etalonnage de la mesure du taux d'application par analyse d'image des dépôts de nigrosine.

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

retenu 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.

CHAPITRE 4

EVALUATION EXPERIMENTALE DE LA REPARTITION DYNAMIQUE

A l'aide du banc dynamique décrit au chapitre 3, la répartition dynamique de la buse XR11003VK à 2 bars est mesurée dans diverses conditions expérimentales : à vitesse constante, à vitesse variable et sous différentes hauteurs. Dans un premier temps, une mesure continue de la répartition est effectuée par analyse d'images. Ensuite, compte tenu des limites de la méthode, la répartition est mesurée par dosage du KCl, puis par pesée de celui-ci.

4.1 Mesures de la répartition par analyse d'images

4.1.1 Vitesse constante

A vitesse constante, la répartition apparaît relativement uniforme, selon la direction d'avancement (Figures 4.1. et 4.2.).

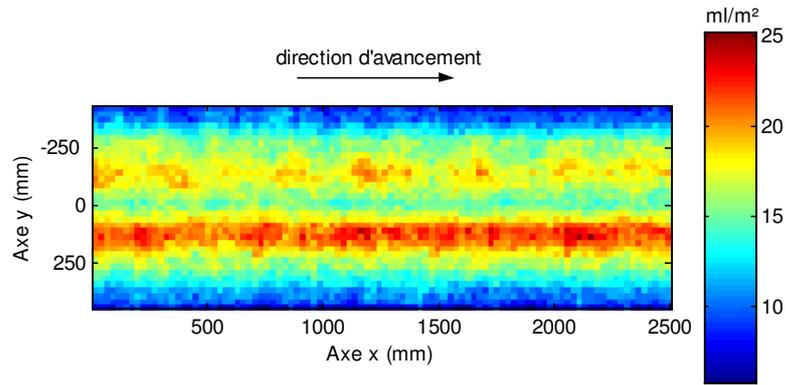


Figure 4.1. : Mesure de la répartition de la buse Teejet XR11003VK par analyse d'images (pression = 2 bars, vitesse = 1 m/s, hauteur = 55 cm).

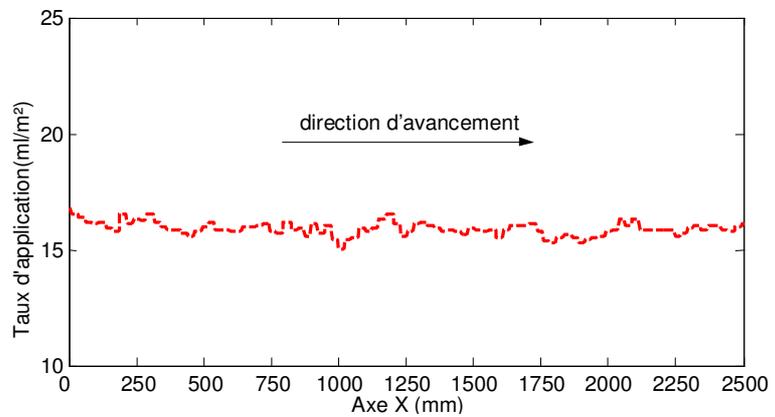


Figure 4.2. : Répartition longitudinale moyenne mesurée par analyse d'image (vitesse = 1 m/s, hauteur = 55 cm).

Transversalement, une répartition bimodale asymétrique se dessine avec un minimum local situé à proximité de l'axe de la buse (Figure 4.3.). Elle est liée à la distribution transversale de la buse qui est également dissymétrique. La modélisation de la répartition dynamique doit par conséquent se baser sur la distribution de la buse. Les chapitres 5, 6 et 7 préciseront les relations qui existent entre la distribution de la buse et la répartition. Pour le reste, la

variabilité longitudinale du taux d'application s'explique par les variabilités de la méthode de mesure et de la répartition.

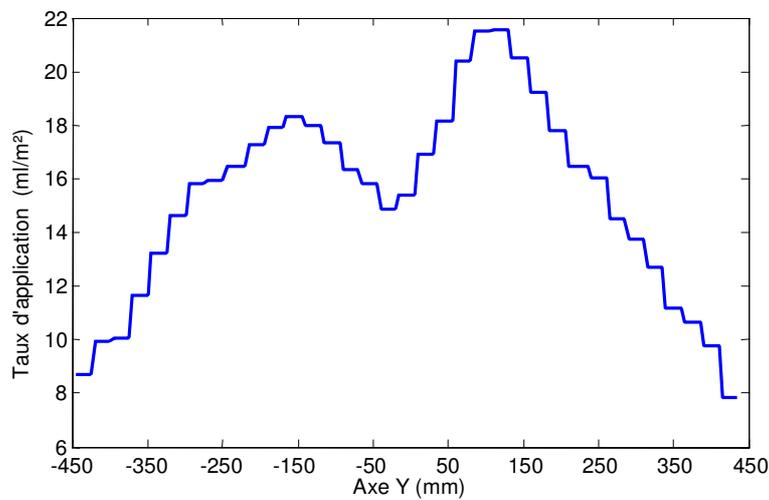


Figure 4.3. : Répartition transversale moyenne mesurée par analyse d'image (vitesse = 1 m/s, hauteur = 55 cm).

4.1.2 Vitesse variable

Pour mesurer l'effet du mouvement horizontal des buses, une vitesse moyenne de 1 m/s à laquelle se superpose une variation sinusoïdale de vitesse de 0,6283 m/s d'amplitude ($2\pi 0,1$ m/s) et 0,9 Hz de fréquence a été appliquée à la buse. Cette sollicitation correspond à une amplitude de déplacement de 10 cm. On a donc :

$$v = 1 - 2\pi 0,1 \cos(2\pi 0,9t) \quad (4.1)$$

avec v : la vitesse de la buse en m/s;
 t : le temps en secondes.

Ces valeurs d'amplitude et de fréquence correspondent à une sollicitation de forte intensité et de haute fréquence, qui peut être observée sur les rampes de pulvérisation. Ce genre de sollicitation permet de mettre en évidence les performances du modèle en conditions sévères.

La mesure de répartition obtenue par analyse d'images est présentée à la Figure 4.4. Il apparaît que l'inclinaison de 10° de l'axe principal de la buse par rapport à l'axe x , classiquement utilisée pour éviter les interférences entre jets voisins de buses à fente, se marque sur la répartition. Cela montre qu'il est nécessaire de tenir compte de la distribution bidimensionnelle de la buse pour modéliser la répartition dynamique.

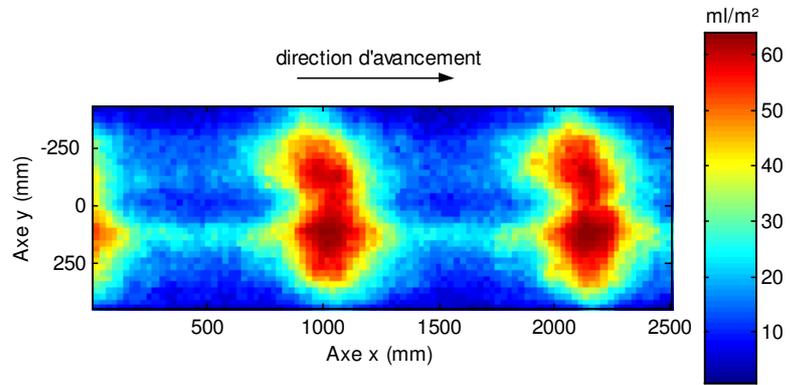


Figure 4.4. : Mesure de la répartition de la buse Teejet XR11003VK par analyse d'images (pression = 2 bars, $v=1+(0,6283\sin(5.655 t))$ m/s, hauteur = 55 cm).

La Figure 4.5. montre en outre que la variation de vitesse sinusoïdale provoque une variation cyclique non sinusoïdale de la répartition longitudinale.

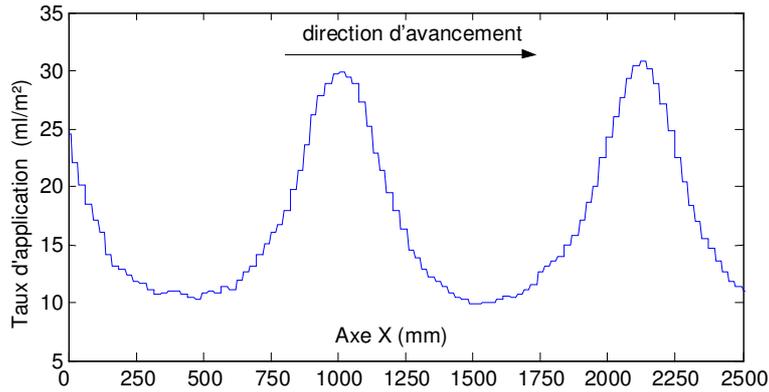


Figure 4.5. : Répartition moyenne longitudinale mesurée par analyse d'images pour ($v = 1 + (0,6283 \sin(5,655 t))$ m/s et $h = 55$ cm).

D'autre part, la distance x pour l'expression l'équation 4.2. en omettant la constante d'intégration correspondant à la position initiale:

$$x(t) = t - 0,1 \sin(2\pi 0,9t) \quad (4.2)$$

avec x : la distance parcourue en m ;
 t : le temps en secondes.

Moyennant le changement de variable suivant,

$$u = 2\pi 0,9t \quad (4.3)$$

l'Equation 4.2. devient

$$x(u) = \frac{u}{2\pi 0,9} - 0,1 \sin(u) \quad (4.4)$$

et sa dérivée, la vitesse, a pour expression

$$v(u) = \frac{1}{2\pi 0,9} - 0,1 \cos(u) \quad (4.5)$$

ce qui correspond à la forme canonique paramétrique d'une trochoïde (Equation 4.6).

$$(u) = at - b \sin(u) \text{ et } (v) = a - b \cos(u) \quad (4.6)$$

avec $a = \frac{1}{2\pi 0,9}$ et $b = 0,1$

Il en résulte que la vitesse de la buse en fonction de la distance parcourue varie selon une trochoïde (Figure 4.6.). Celle-ci est en opposition de phase par rapport à la répartition (Figure 4.5.).

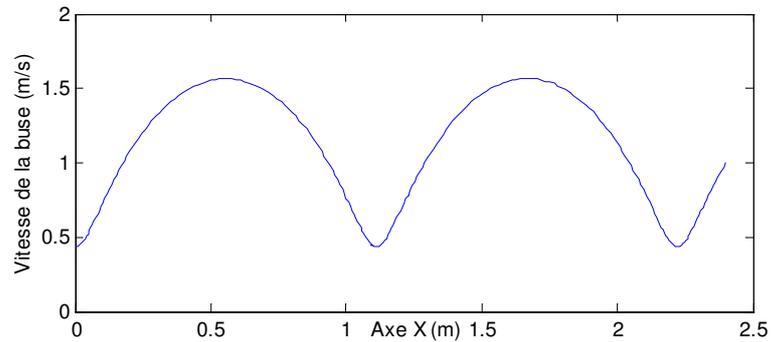


Figure 4.6. : Vitesse de la buse en fonction de la distance ($v = 1 + 0,2 \pi \sin(0,2 \pi t)$ m/s et $h=55\text{cm}$).

La répartition transversale moyenne (Figure 4.7.) apparaît très proche de celle mesurée pour l'essai à vitesse constante, elle présente les mêmes caractéristiques de minimum local au centre d'une distribution bimodale.

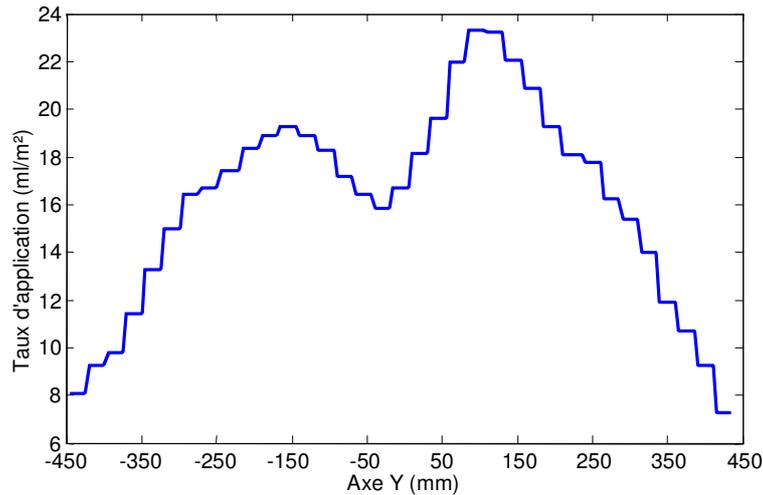


Figure 4.7. : Répartition transversale moyenne mesurée par analyse d'images ($v=1+0,2 \pi \sin(0,2 \pi t)$ et $h=55\text{cm}$).

4.1.3 Hauteur variable

Une hauteur variable de pulvérisation est obtenue en faisant varier linéairement la hauteur du collecteur de 700 à 300 mm de hauteur en 2,5 mètres. Le résultat de la mesure de répartition est présenté à la Figure 4.8. L'effet de la diminution de hauteur de pulvérisation se marque par un rétrécissement de la distribution transversale. La distribution transversale bimodale est présente à toutes les hauteurs.

Aux faibles hauteurs, la somme des taux d'application calculés à partir de la répartition dépasse le débit fourni par la buse. Une variation de la relation entre taux de couverture et dose appliquée en fonction de la hauteur est à mettre en cause.

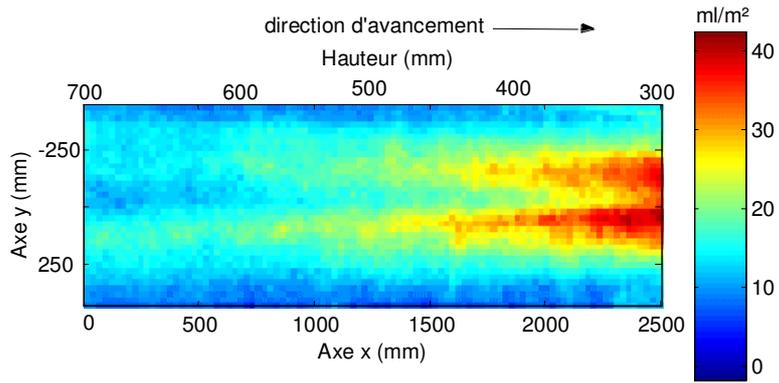


Figure 4.8. : Mesure de la répartition de la buse Teejet XR11003VK par analyse d'images, (pression = 2 bars, $v=1\text{m/s}$ et h variant linéairement de 700 à 300 mm).

4.2 Mesures de la répartition par dosage du KCl

Deux phénomènes mis en évidence au paragraphe précédent (fluctuations de la distribution longitudinale observées pour des essais à vitesse constante et impossibilité de calculer précisément le taux d'application à partir des mesures de taux de couverture, particulièrement lorsque la hauteur varie) incitent à utiliser une méthode de mesure plus précise de la répartition, à savoir la méthode basée sur le dosage du KCL, exposée au chapitre 3. Le plan d'échantillonnage comprend 10 boîtes disposées à 100 mm d'intervalle parallèlement à l'axe x ($y = -50$ mm) et 20 boîtes disposées à 100 mm d'intervalle selon l'axe y ($x = 0$ mm) (Figure 4.9.).

Les essais sont réalisés pour un passage de la buse au-dessus des collecteurs à vitesse constante (1 m/s) et hauteur constante (55 cm).

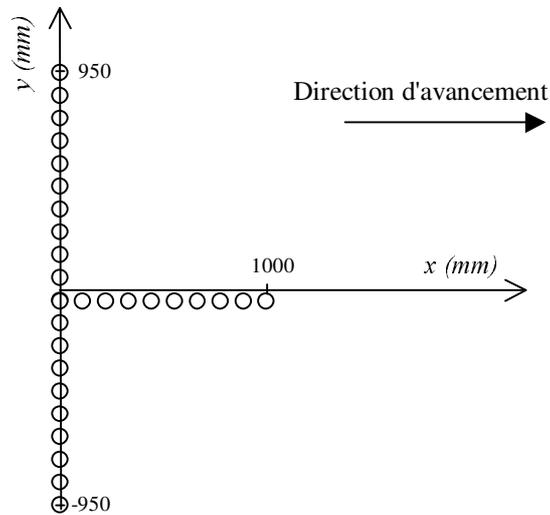


Figure 4.9. : Plan d'échantillonnage de mesure de la répartition par dosage du KCl.

4.2.1 Répartition longitudinale

La valeur moyenne de la dose selon l'axe d'avancement ($y = -50$ mm) s'établit à $14,8$ ml/m². L'écart-type est égal à $0,86$ ml/m², ce qui correspond à un coefficient de variation de $5,8$ %. Les valeurs extrêmes valent respectivement $13,6$ et $16,2$ ml/m². Elles se situent dans une fourchette relativement large, pour des conditions opératoires identiques. La variabilité tient probablement au fait que la pulvérisation de la veine fluide à la sortie de la buse est un régime transitoire (entre la canalisation et l'orifice, le nombre de Reynolds passe de 1800 à 17500) qui donne lieu à un spectre de gouttelettes dont la trajectoire présente un caractère aléatoire. La méthode de mesure pouvant être considérée comme une méthode de référence, le coefficient de variation de l'ordre de 5 % constitue une limite de précision.

4.2.2 Répartition transversale

La répartition transversale de la buse est représentée à la Fig. 4. 10. Les mesures longitudinales ($y = - 50$ mm) sont reprises en bleu pour rappeler la variabilité de la répartition observée au paragraphe précédent. Le bilan massique peut être obtenu en intégrant numériquement par la méthode des trapèzes la surface sous la courbe. La valeur obtenue, 16,9 ml/s, est très proche du débit de la buse (16,5 ml/s). L'hypothèse selon laquelle l'intégralité du jet se dépose sous la buse apparaît acceptable.

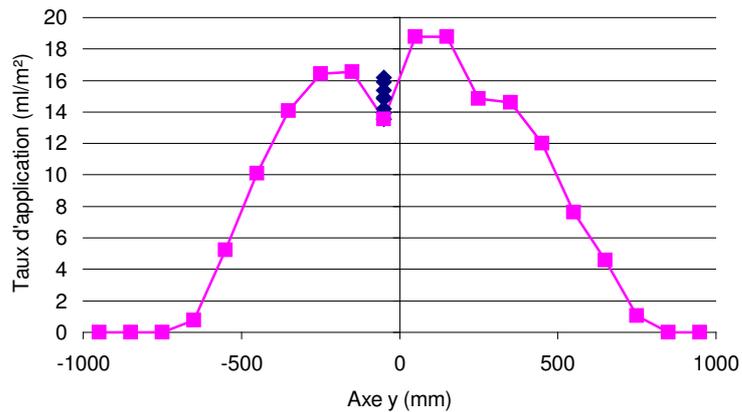


Figure 4.10. : Répartition transversale de la buse à 1m/s et 55 cm de hauteur par dosage du KCl.

4.3 Mesures de la répartition par pesée du KCl

4.3.1 Vitesse constante

Trois essais indépendants à 1 m/s et 50 cm de hauteur ont été réalisés à une quinzaine de jours d'intervalle. La répartition transversale est mesurée dans des boîtes de Pétri disposées perpendiculairement au sens d'avancement et espacées de 70 mm. Le résultat des mesures est présenté à la Figure 4.11. A

nouveau, une grande variabilité est observée. Elle est particulièrement importante pour les doses élevées situées au centre de la distribution. A titre d'exemple l'écart-type du point de mesure situé en $y = -70$ mm vaut $1,7$ ml/m². Un phénomène d'usure de la buse ne semble pas à l'origine du phénomène. Le débit mesuré tout au long des essais est resté constant. De plus, les trois essais ne montrent pas de tendance chronologique, les valeurs du premier essai sont situées entre les valeurs observées pour les deuxième et troisième essais.

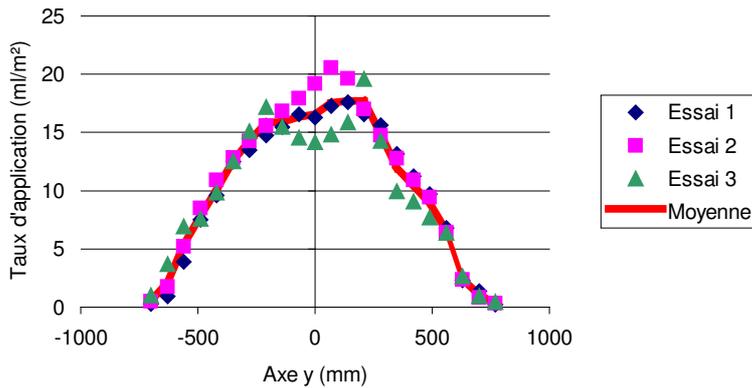


Figure 4.11. : Répartition transversale de la buse à 1 m/s et 50 cm de hauteur par pesée du KCl lors de trois essais distincts.

La variabilité observée est telle qu'il apparaît naturel de se poser la question de la validité de la méthode de mesure, d'autant que chaque essai correspond à la moyenne de 150 passages de la buse. En effet, malgré les précautions expérimentales, plusieurs sources de variabilité sont possibles : mauvaise efficacité des collecteurs, rebond des gouttelettes, variabilité des diamètres des boîtes, mauvais positionnement, nettoyage de l'extérieur insuffisant,... Cependant, la Figure 4.12. permet d'infirmer toutes ces hypothèses. Il présente trois mesures de la répartition transversale à 100 mm d'intervalle selon l'axe d'avancement lors d'un même essai. Pour la vitesse d'avancement constante de 1 m/s, ces trois mesures peuvent être considérées comme des répétitions car elle sont simplement décalées dans le temps d'un dixième de

seconde. Pour ces trois répétitions, l'écart-type moyen du point de mesure situé en $y = -70$ mm n'est que de $0,26$ ml/m². Il apparaît donc que la variabilité dans le temps de la distribution transversale qui a été observée à la Figure 3.3. doit être incriminée pour expliquer les différences observées entre essais indépendants et pas une défaillance de la méthode de mesure.

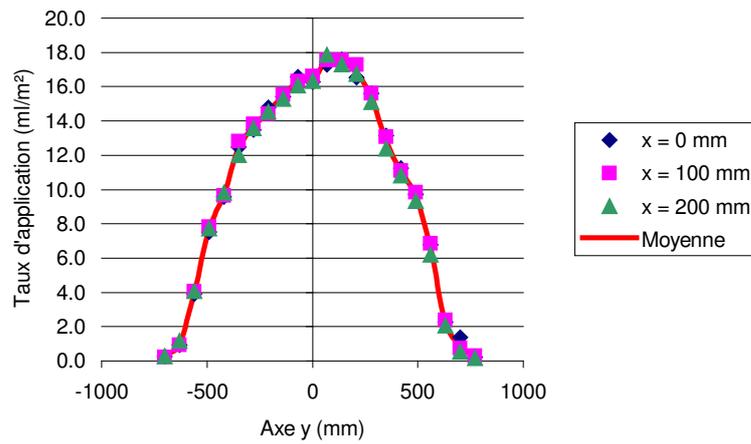


Figure 4.12. : Répartition transversale de la buse à 1m/s et 50 cm de hauteur par pesée du KCl: trois mesures à 100 mm d'intervalle selon l'axe x.

4.3.2 Vitesse variable

Trois essais indépendants réalisés à une vitesse de $1+0,2 \pi \sin(2 \pi t)$ m/s et 50 cm de hauteur ont été menés à quelques jours d'intervalle (avec t , le temps en secondes). La trochoïde décrivant la vitesse de la buse en fonction de la position selon l'axe d'avancement est présentée à la Figure 4.13. Comme précédemment, cette sollicitation fort énergétique (10 centimètres d'amplitude pour 1 Hz) a été choisie car elle permet ultérieurement de valider le modèle dans des conditions extrêmes.

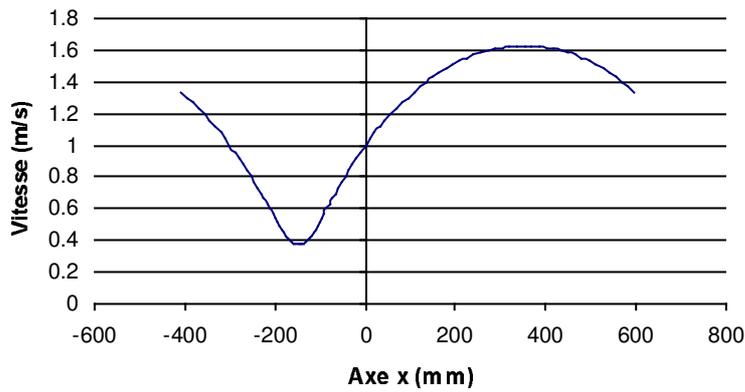


Figure 4.13. : Vitesse de la buse en fonction de la distance; vitesse de $1+0,2 \pi \sin(2 \pi t)$ m/s et 50 cm de hauteur.

La répartition est mesurée en effectuant 105 passages de la buse, les boîtes de Pétri étant disposées selon un maillage carré de 100 mm de côté (Figure 4.14.). Il est composé de 10 et 14 rangées disposées respectivement selon la direction d'avancement (de -400 à 500 mm) et perpendiculairement à cette dernière (de -650 à 650 mm).

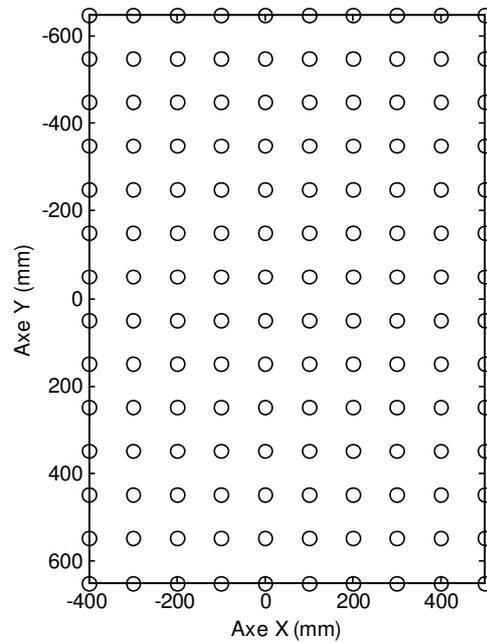


Figure 4.14. : Plan d'échantillonnage de mesure de la répartition pour l'essai à vitesse variable par pesée du KCl.

La zone d'échantillonnage d'un mètre de long et de 1,3 mètres de large permet de mesurer un cycle complet sur la largeur de la buse. Le résultat moyen des mesures interpolé pour des éléments de surface carrés de 50 mm de côté est présenté à la Figure 4.15. Comme pour l'essai similaire mesuré par analyse d'image au point 4.1.2, la répartition dans le plan (x,y) fait apparaître une forte variabilité transversale et longitudinale.

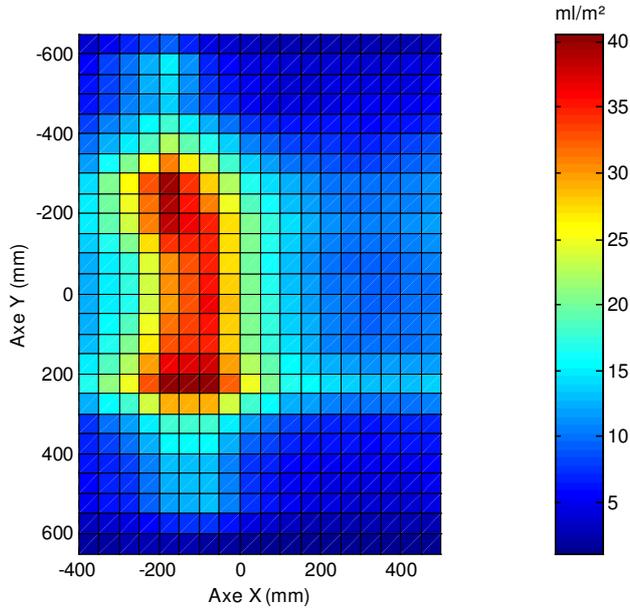


Figure 4.15. : Répartition de la buse Teejet XR11003VK par pesée du KCl (pression = 2 bars, vitesse de $1+0,2 \pi \sin(2 \pi t)$ m/s, 50 cm de hauteur).

La Figure 4.16. présente la répartition longitudinale à 50 mm de l'axe de la buse ($y = -50$ mm). Les mesures sont limitées à un cycle. La répartition longitudinale présente un profil proche de celui observé à la Figure 4.5. qui s'apparente à une trochoïde.

La Figure 4.17. présente la répartition transversale moyenne (pour les 10 positions de mesure de la répartition transversale selon l'axe X) sur un cycle. Elle présente un profil légèrement asymétrique marqué par plusieurs points d'inflexion.

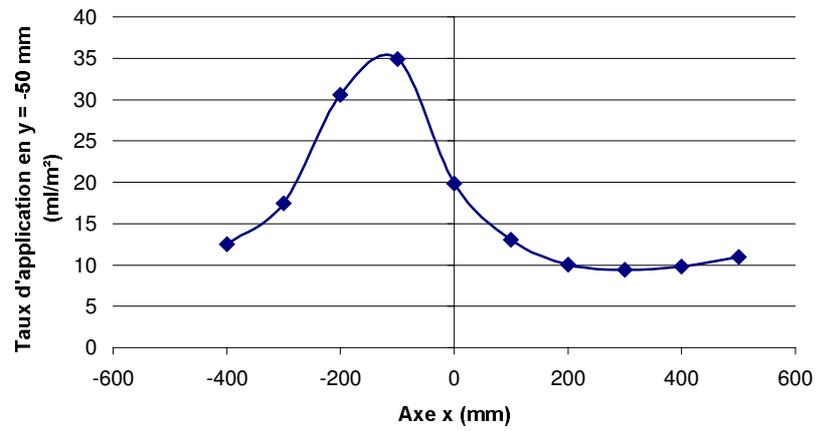


Figure 4.16. : Répartition longitudinale de la buse en $y = -50$ mm pour une vitesse de $1+0,2 \pi \sin(2 \pi t)$ m/s et 50 cm de hauteur par pesée du KCl.

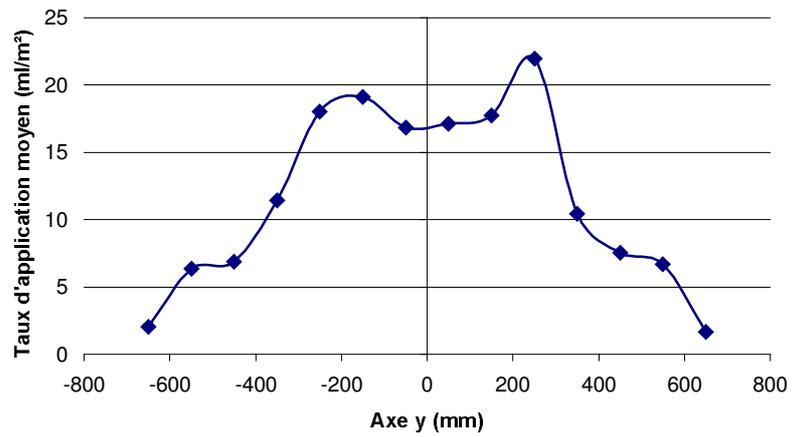


Figure 4.17. : Répartition transversale moyenne de la buse pour une vitesse de $1+0,2 \pi \sin(2 \pi t)$ m/s et 50 cm de hauteur par pesée du KCl.

Pour évaluer la variabilité temporelle en chaque point de mesure, l'écart-type du taux d'application mesuré y est calculé (Figure 4.18.). L'écart-type est préféré ici au coefficient de variation car ce dernier est trop affecté par les basses valeurs du taux d'application moyen. Des erreurs de plusieurs dizaines de pourcent sur un taux d'application quasiment nul ne sont en effet pas significatives. La variabilité est importante. Elle est logiquement supérieure aux points où la dose est la plus élevée. La valeur extrême approche $2,4 \text{ ml/m}^2$.

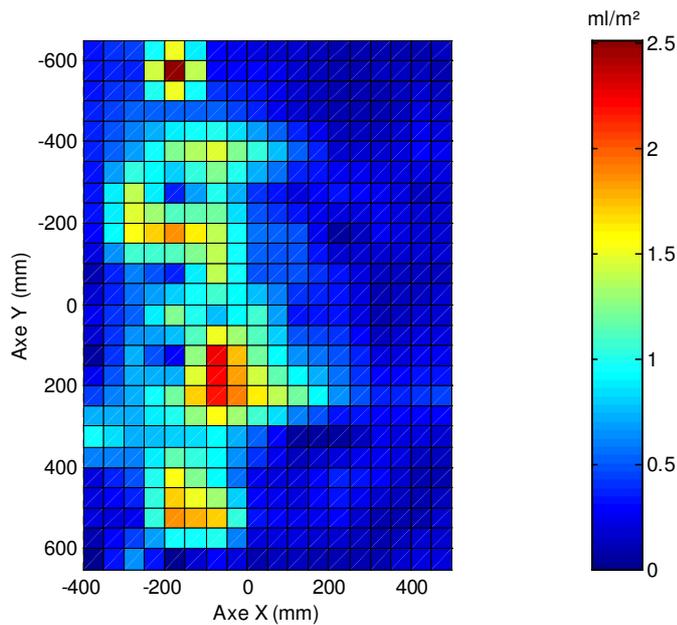


Figure 4.18. : *Ecart-types de la répartition de la buse par pesée du KCl (vitesse de $1+0,2 \pi \sin(2 \pi t)$ m/s et 50 cm de hauteur).*

4.3.3 Hauteur variable

Trois essais indépendants réalisés à une vitesse constante de 1 m/s pour une hauteur de pulvérisation variant linéairement de 700 à 300 mm sur une distance de 2,4 mètres ont été réalisés à quelques jours d'intervalle. Cette pente

importante (16,7%) a été choisie d'une part en raison de la course limitée du banc d'essai ainsi que pour solliciter de manière énergique le système en vue de la validation du modèle. La répartition dans le plan est mesurée pour 100 passages de la buse dans les boîtes de Pétri disposées selon un maillage irrégulier qui pourrait être qualifié de pyramidal (Figure 4.19.). Il est composé de 9 rangées selon la direction d'avancement (de $x = 0$ à $x = 2400$ mm) correspondant à des hauteurs décroissantes de 700 à 300 mm par pas de 50 mm. Transversalement, une quinzaine de boîtes sont disposées à un intervalle décroissant avec la hauteur, de 100 à 55 mm pour s'adapter au rétrécissement progressif de la répartition.

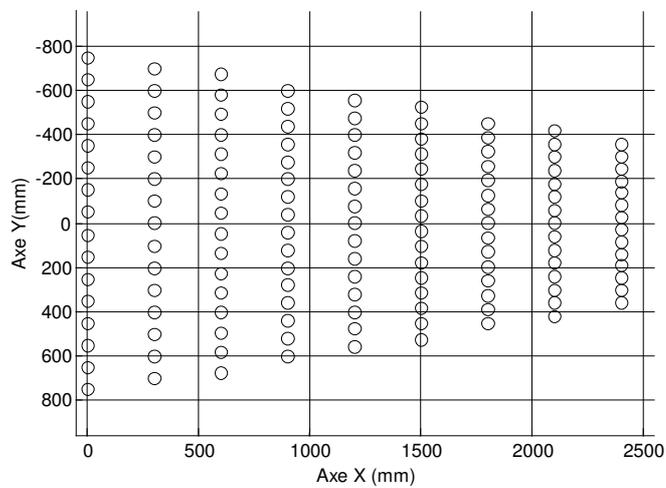


Figure 4.19. : Plan d'échantillonnage de mesure de la répartition pour l'essai à hauteur variable par pesée du KCl.

Le résultat moyen des mesures interpolé pour des éléments de surface carrés de 50 mm de côté est présenté à la Figure 4.20. Les zones bleu sombre sont en-dehors de la zone de mesure. Comme pour l'essai similaire mesuré par analyse d'image au point 4.1.3, la dose se concentre autour de l'axe d'avancement de la buse pendant que la répartition transversale se rétrécit sous l'effet de la diminution de hauteur dans le sens d'avancement.

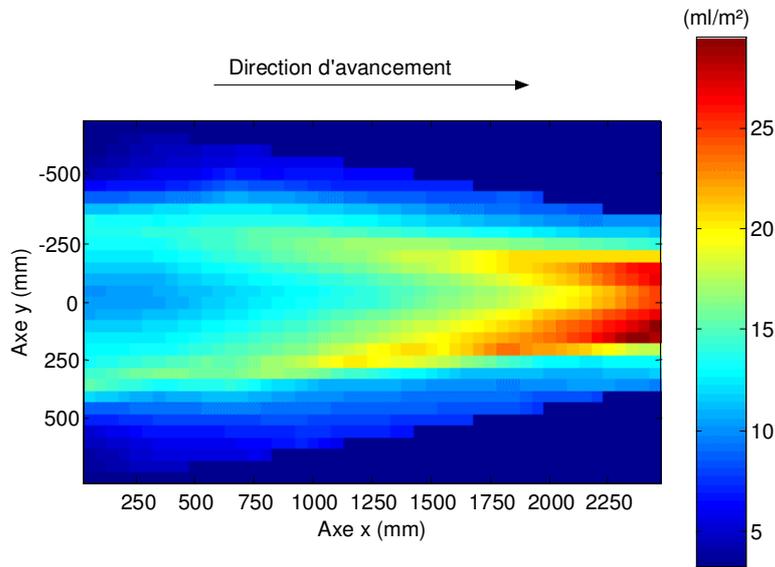


Figure 4.20. : Répartition de la buse Teejet XR11003VK par pesée du KCl (pression = 2 bars, vitesse de 1 m/s et hauteur variant de 700 à 300 mm).

La Figure 4.21. présente l'écart-type en chaque point. A nouveau, une grande variabilité est observée. Elle est supérieure aux points où la dose est la plus élevée, qui correspondent à la hauteur minimale de pulvérisation. La valeur extrême approche 3 ml/m².

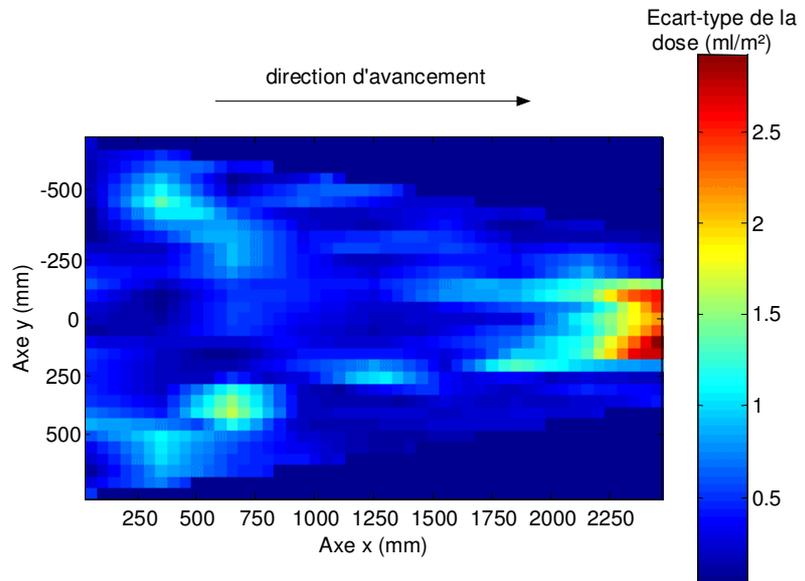


Figure 4.21. : *Ecart-types de la répartition de la buse par pesée du KCl (vitesse de 1 m/s et hauteur variant de 700 à 300 mm).*

4.4 Conclusion

La répartition dynamique a été mesurée par trois méthodes différentes, à savoir l'analyse d'images, le dosage du KCl par voie chimique et la pesée de collecteurs.

L'analyse d'images permet d'effectuer une mesure en continu de la répartition et s'avère intéressante pour illustrer l'effet des mouvements de buse sur la répartition. Cependant, sa précision est limitée et il est nécessaire de

recourir à des méthodes quantitatives plus laborieuses pour quantifier précisément l'effet des mouvements.

Grâce à la méthode recourant au dosage du KCl, qui peut être qualifiée de méthode de référence, la variabilité spatiale de la répartition a pu être chiffrée. Etant donné la lourdeur de la méthode, nous nous sommes surtout intéressés à la variabilité longitudinale mesurée le long d'un transect. Dans les conditions expérimentales que nous nous sommes fixées, elle est de l'ordre de 5 %.

La pesée du KCl recueilli dans des boîtes de Pétri, plus rapide à mettre en œuvre que la méthode précédente et plus précise que l'analyse d'images, a permis de mesurer la répartition selon un maillage dense. Elle fournit les répartitions spatiales, à la fois longitudinales et transversales. En outre, elle permet de mettre en évidence une variabilité temporelle de la répartition liée à la variabilité temporelle de la distribution de la buse.

CHAPITRE 5

MODELE DU PROCESSUS DE REPARTITION

La mesure de la répartition sous une buse en mouvement est lourde à mettre en œuvre et difficilement praticable à grande échelle. Un modèle de répartition, tenant compte à la fois des caractéristiques des buses et des mouvements qu'elles subissent présente donc un grand intérêt pour comparer des pulvérisateurs agricoles. Un tel modèle est proposé dans ce chapitre.

5.1 Structure du modèle

Le modèle est basé sur l'hypothèse selon laquelle la répartition est une fonction du temps passé par la buse à chaque position successive. Dans le référentiel adopté, les axes x , y et z correspondent respectivement aux directions longitudinale (avancement), transversale et verticale comme présenté à la Figure 5.1.

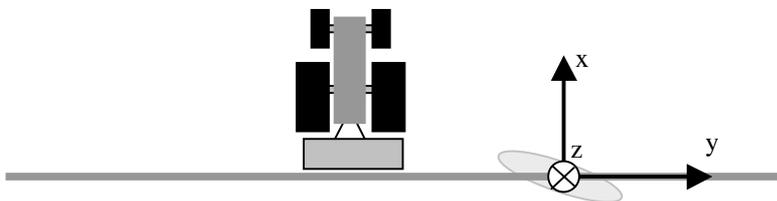


Figure 5.1. : Position des axes du modèle.

Dans l'approche classique, la répartition engendrée par une buse peut être calculée comme la somme des distributions de la buse au niveau de ses positions successives, à intervalles de temps constant. Une représentation

graphique illustrant la signification physique de cette hypothèse est présentée à la Figure 5.2. Les points représentés sur la trajectoire correspondent à des positions successives de la buse, les ellipses symbolisant les distributions des buses pour chacun de ces points. La taille des ellipses représentées dépend de la hauteur de pulvérisation et leur écartement est fonction de la vitesse de la buse entre deux positions successives. La répartition causée en chacune des positions successives correspond à la distribution de la buse à la hauteur à laquelle elle se trouve multipliée par l'intervalle de temps. Lorsque l'intervalle de temps est suffisamment réduit, cette hypothèse permet de considérer la répartition globale comme l'intégrale des contributions successives de la buse le long de sa trajectoire.

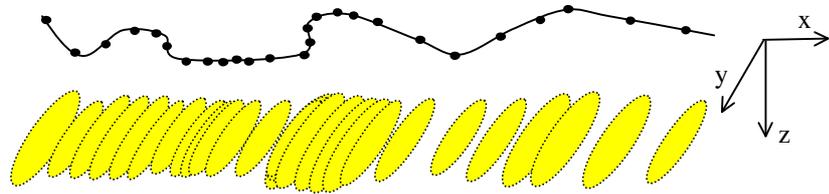


Figure 5.2. : Signification physique du modèle classique.

L'approche proposée ici ne se base pas, contrairement à l'approche classique de modélisation de la répartition, sur un intervalle de temps constant mais bien sur un intervalle de distance constant, comme l'illustrent les points situés sur la trajectoire de la Figure 5.3. Pour chaque intervalle de distance, la contribution à la répartition totale est calculée en multipliant la distribution à cette position par le temps passé dans cet intervalle, ce qui est symbolisé par les ellipses de teintes de couleur et de taille différentes.

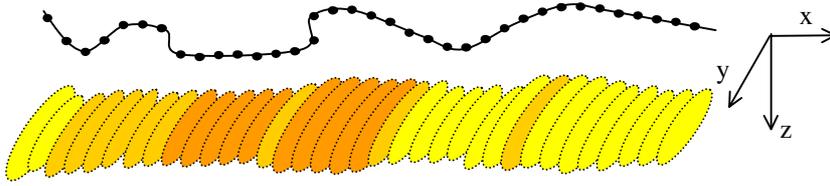


Figure 5.3. : Signification physique du modèle proposé.

Au passage aux limites, pour des intervalles de temps ou de distance infinitésimaux, selon le modèle, les deux approches sont équivalentes. La dernière présente toutefois un attrait particulier du point de vue du formalisme mathématique et de la mise en œuvre.

5.2 Modélisation du processus de répartition

5.2.1 La convolution

Comme décrit précédemment, la répartition engendrée par une buse à un instant est égale au produit du laps de temps passé à une position par la distribution de la buse. Ce problème s'apparente à un problème mathématique classique qui est la convolution de deux fonctions. Prenons l'exemple de deux fonctions quelconques à une dimension $h_1(t)$ et $h_2(t)$. Le produit de convolution $H(t)$ est défini comme suit (Equation 5.1)

$$H(t) = h_1 * h_2 = \int_{-\infty}^{\infty} h_1(t - \tau) * h_2(\tau) d\tau \quad (5.1)$$

avec t une variable;

avec τ une variable de balayage selon l'axe t .

Cette équation montre que la valeur du produit de convolution pour une valeur de t donnée est le résultat de l'intégrale des produits de la valeur des deux fonctions glissant l'une par rapport à l'autre au fur et à mesure de l'augmentation de la variable de balayage τ de $-\infty$ à $+\infty$ selon l'axe t . La Figure 5.4. présente un équivalent graphique de cette intégrale selon l'axe t . Elle met en évidence les différentes combinaisons de produits sommées pour calculer la valeur de la convolution en un point.

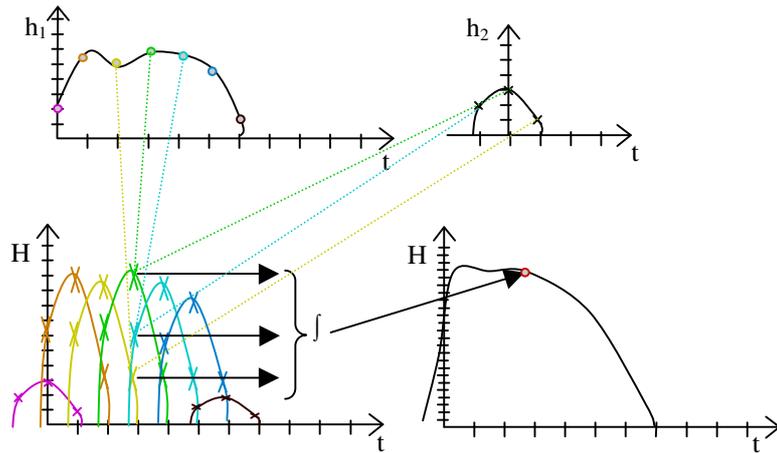


Figure 5.4. : Décomposition du processus de convolution de deux fonctions.

L'intégrale de convolution de l'Equation 5.1 décrit le comportement des systèmes linéaires invariants. Les systèmes linéaires permettent de modéliser le comportement de systèmes mécaniques ou hydrauliques, etc. Pour cette raison, ils sont couramment utilisés dans de nombreux domaines de l'ingénierie (automatique, analyse vibratoire,...) et les outils mathématiques associés sont très répandus.

Classiquement, la fonction $h_2(t)$ constitue la réponse impulsionnelle du système, $h_1(t)$ l'entrée et $H(t)$ la sortie tel que représenté par le schéma-bloc de la Figure 5.5.

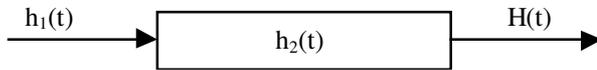


Figure 5.5. : Schéma-bloc des paramètres d'un système linéaire invariant.

5.2.2 Application de la convolution à la modélisation de la répartition

La Figure 5.4. peut également illustrer l'analogie entre l'opération de convolution et le processus de pulvérisation pour une hauteur constante. Si la fonction h_2 décrit la distribution d'une buse selon la direction d'avancement et la fonction h_1 le laps de temps passé aux positions successives, le produit de convolution H correspond à la somme des répartitions engendrées le long de la trajectoire. Le processus de répartition peut être schématisé par la Figure 5.6. sous la forme d'un schéma-bloc.

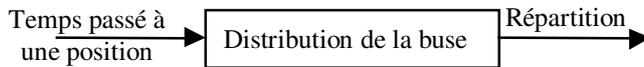


Figure 5.6. : Schéma-bloc du processus de répartition.

Selon nos hypothèses, la buse ne se déplace pas selon un axe mais dans un plan et la distribution de la buse a deux dimensions au lieu d'une. Le principe du schéma-bloc de la Figure 5.6 peut néanmoins être généralisé de la manière suivante :

Le laps de temps Δt durant lequel une buse est à la position (x,y) peut être exprimé par une fonction de (x,y) dont les unités sont un temps par unité de surface :

$$\Delta t = k(x, y) \quad (5.2)$$

La notion de laps de temps introduite ici pour une trajectoire bidimensionnelle est analogue à l'inverse de la vitesse pour une trajectoire unidimensionnelle.

Par ailleurs, sous l'hypothèse que la buse a une distribution constante de son débit-volume de bouillie dans l'espace, la distribution peut être caractérisée par une fonction de (x, y) dont les unités sont un volume par unité de temps et de surface :

$$D = D(x, y) \quad (5.3)$$

Sous cette forme, la fonction de distribution représente la réponse impulsionnelle du processus de répartition. La convolution à deux dimensions de l'entrée avec la réponse impulsionnelle selon l'axe x et l'axe y a pour résultat une fonction à deux dimensions $R(x, y)$ dont les unités sont un volume par unité de surface :

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} D(x, y) \cdot k(x - \xi, y - \psi) d\xi d\psi = R(x, y) \quad (5.4)$$

avec ξ : une variable de balayage spatial selon l'axe x ;
 ψ : une variable de balayage spatial selon l'axe y ;
 $D(x, y)$: une fonction décrivant la distribution du débit-volume de bouillie dans l'espace.

La fonction $R(x, y)$ ainsi calculée décrit la répartition générée par la buse dans le plan au cours de son mouvement.

On voit donc que la mise en œuvre du modèle implique de connaître la distribution dimensionnelle $D(x, y)$ qui décrit la réponse impulsionnelle du système d'une part et la fonction $k(x, y)$ d'autre part qui décrit l'entrée du modèle.

5.3 La distribution de la buse

La distribution de la buse correspond à la fonction de transfert (relation entre l'entrée et la sortie) du modèle de répartition. Celle-ci doit être estimée pour chaque type de buse, voire pour plusieurs buses d'un même type si elles présentent une variabilité importante. De plus, la distribution des buses est fonction de facteurs opératoires (pression, hauteur, angle de la buse pour les buses à fente, propriétés physico-chimiques de la bouillie,...), et de perturbations extérieures (vent, évaporation, ...). Pour modéliser correctement le processus, la distribution de la buse qui représente la réponse impulsionnelle du système doit être estimée pour les différentes valeurs que prennent les facteurs opératoires.

5.4 Evaluation du temps passé par la buse aux différentes positions

5.4.1 Aspects théoriques

Le temps (τ) auquel une buse est à la position (x,y) peut être exprimé par la fonction suivante :

$$\tau = g(x, y) \quad (5.5)$$

Cette fonction peut être estimée à partir de mesures de position, avec x le déplacement absolu de la buse selon la direction d'avancement et y le déplacement absolu de la buse selon la direction perpendiculaire à l'avancement. Il en résulte que la fonction dans le plan (x,y) décrivant le laps de temps δt passé dans un intervalle $\delta x \delta y$ peut être calculée par la dérivée partielle de l'équation 5.5. Cette fonction (Equation 5.6) constitue l'entrée du processus de répartition $k(x,y)$ de l'équation 5.4.

$$\frac{\partial^2 \tau}{\partial y \partial x} = \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial y \partial x} = k(x, y) \quad (5.6)$$

Il faut remarquer qu'au sens mathématique strict, la trajectoire qui est une courbe dans le plan (x,y) n'est pas une fonction dérivable car elle est discontinue mais ce n'est pas un obstacle en calcul numérique.

5.4.2 Aspects pratiques

La trajectoire qu'il est nécessaire de mesurer comme entrée du modèle de répartition correspond à la position absolue selon les axes x et y . Les différentes méthodes de mesure du mouvement de la rampe de pulvérisation sortent du cadre du présent document mais de manière générale, la mesure de la trajectoire de la buse résulte d'un échantillonnage des signaux des capteurs mesurant le mouvement de la buse. Le calcul de la dérivée partielle (Equation 5.6) à partir du signal échantillonné de la trajectoire (Equation 5.5) correspond au calcul d'un histogramme du nombre d'échantillons de la variable τ à la position (x,y) . Comme les incréments δx et δy sont fixés par la résolution spatiale de $D(x,y)$ (50 mm dans notre cas), la fréquence d'échantillonnage détermine le nombre d'échantillons présents dans chaque intervalle. Pour assurer une estimation acceptable de la dérivée partielle, une fréquence de 1000 Hz a été choisie. Cette fréquence est très largement supérieure aux fréquences des mouvements de rampe significatifs. Dans le cas où le système de mesure des mouvements de rampe est de plus basse fréquence, un rééchantillonnage du signal à plus haute fréquence est parfaitement adapté car seules les composantes basses fréquences du signal ont un effet sur la répartition, les hautes fréquences ne servent qu'à assurer la continuité de la dérivée partielle numérique. La distance par rapport à la cible selon l'axe z modifie quant à elle la distribution de la buse $D(x,y)$ au même titre que d'autres facteurs opératoires comme le type de buse ou la pression de pulvérisation.

5.5 Conclusion

Un modèle mathématique du processus de répartition est proposé. Considérant des intervalles de distance constants sur la trajectoire de la buse, la

répartition totale est calculée en multipliant la distribution aux différentes positions par le temps nécessaire pour passer d'une position à la suivante. Moyennant l'hypothèse que le processus de pulvérisation est un système linéaire invariant, ceci s'exprime par le formalisme mathématique suivant : la répartition est obtenue par convolution du laps de temps passé en chaque position avec la distribution de la buse, celle-ci étant assimilée à une réponse impulsionnelle.

Ce modèle s'apparente à ceux qui sont classiquement utilisés pour prédire la répartition sous une buse en mouvement par son concept mais s'en distingue par son formalisme mathématique original qui permet une résolution numérique aisée. Dans ce travail, les calculs numériques sont réalisés par le logiciel Matlab (Mathworks Inc.).

La mise en œuvre de ce modèle suppose que l'on établisse la distribution de la buse considérée en tenant compte des facteurs opératoires et que l'on dispose de la mesure de la trajectoire de la buse pour calculer le laps de temps passé en chaque position. Les deux prochains chapitres traitent de deux méthodes d'estimation de la distribution de la buse et de la validation du modèle pour des trajectoires contrôlées. Par la suite, le chapitre 8 présente des applications du modèle sur base de trajectoires de buses mesurées sur le terrain.

CHAPITRE 6

EVALUATION DU MODELE SUR LA BASE DE LA DISTRIBUTION STATIQUE

Le modèle proposé au chapitre précédent considère la répartition comme une convolution du laps de temps passé aux positions successives avec la distribution de la buse. Il suppose que l'on établisse la distribution bidimensionnelle de la buse considérée. Dans ce chapitre, celle-ci est estimée à l'aide du banc de répartition pourvu d'un dispositif conçu pour donner à la buse différentes positions angulaires par rapport aux gouttières. Les différentes distributions unidimensionnelles obtenues à l'aide de ce dispositif sont traitées par une *méthode de rétro-projection filtrée* pour obtenir une distribution bidimensionnelle.

Ensuite le modèle est mis en œuvre numériquement pour des trajectoires particulières et ses performances sont évaluées au moyen d'essais de répartition.

6.1 Distribution statique

Le modèle de répartition proposé implique de connaître la distribution bidimensionnelle de la buse dans les conditions opératoires des essais. A cette fin, une méthode de rétro-projection filtrée est appliquée à la buse Teejet XR11003VK utilisée dans les essais de répartition et alimentée à 2 bars. Cette technique de mesure de la distribution a été retenue car elle présente l'avantage d'utiliser un banc de répartition standardisé, matériel disponible dans la majorité des laboratoires spécialisés dans le domaine de la pulvérisation, sans nécessiter de modification majeure. De plus, elle permet un échantillonnage continu de la distribution.

6.1.1 La rétro-projection filtrée

En tomographie (procédé de radiographie qui permet de faire des clichés sur un seul plan du volume observé, avec effacement des autres plans), on est amené à reconstituer des coupes dans des objets tridimensionnels à partir de leurs projections sous plusieurs angles de vue. Pour ce faire, on réalise les opérations qui peuvent être décrites succinctement comme suit :

- Pour un objet tridimensionnel dont la propriété mesurée est caractérisée dans le plan de coupe par une fonction $G(x,y)$, on effectue l'acquisition d'une série de projections g_i sous plusieurs angles (Dans le cas d'une radiographie, ces projections se situent dans un plan perpendiculaire à la direction des rayons et correspondent à l'absorption du rayonnement par le corps). L'ensemble des g_i constitue *la transformée de Radon* de l'objet.
- Reconstruction de la coupe dans l'objet. Celle-ci est opérée en exploitant une relation mathématique qui montre que la transformée de Fourier des projections est égale à la transformée de Fourier bidimensionnelle de $G(x,y)$. Une fois cette dernière calculée, on trouve $G(x,y)$ par transformée de Fourier inverse.

Le théorème de la transformée de Fourier d'une projection (en anglais "Fourier Slice Theorem") est l'élément de base des méthodes de reconstruction tomographique qui utilisent la transformée de Fourier [Kak et Slaney, 1988]. Soit la coupe dans l'objet tridimensionnel caractérisée par la fonction $G(x,y)$. La projection $g(\phi,t)$ correspond à l'intégrale de $G(x,y)$ le long d'une droite l qui est l'intersection du plan de projection avec le plan de coupe (x,y) . Cette droite fait un angle ϕ avec l'axe y et est située à une distance t de l'origine (Figure 6.1.):

$$g(\phi, t) = \int_l G(x, y) dl \quad (6.1)$$

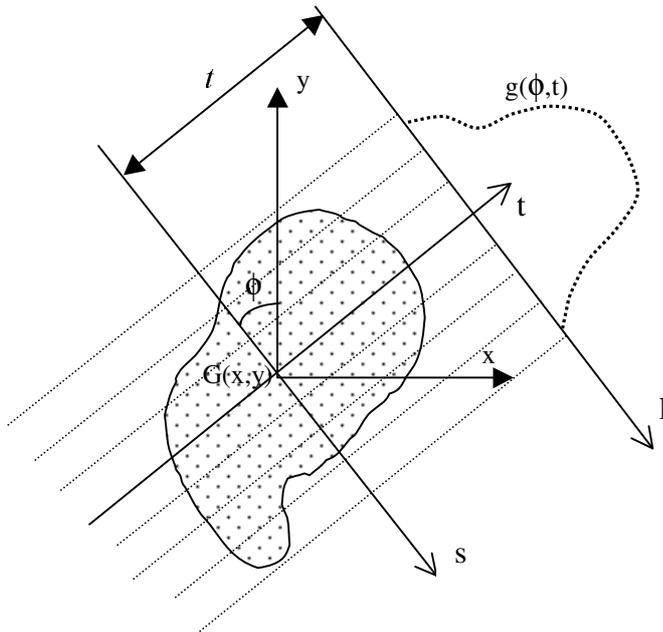


Figure 6.1. : Projection d'une fonction $G(x,y)$ le long d'une droite l .

Comme tous les points de la droite satisfont l'équation linéaire suivante,

$$y = ax + b \tag{6.2}$$

avec $a = -t / \operatorname{tg} \phi$
 $b = t / \sin \phi$

la droite l a pour équation

$$x \cos \phi + y \sin \phi - t = 0 \tag{6.3}$$

Dès lors, on peut démontrer que la transformée de Radon prend l'expression suivante :

$$g(\phi, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(x, y) \delta(x \cos \phi + y \sin \phi - t) dx dy \quad (6.4)$$

Dans cette expression, δ est une impulsion de Dirac à deux dimensions qui caractérise le système de mesure.

En définissant un nouveau système d'axe orthogonaux (t, s) de même origine que (x, y) avec s dans la direction de l , les équations suivantes permettent d'effectuer un changement de coordonnées :

$$\begin{bmatrix} t \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t \\ s \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

Dans ce système de coordonnées (t, s) , la transformée de Radon peut s'écrire sous la forme d'une intégrale simple :

$$g(\phi, t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(t \cos \phi - s \sin \phi, t \sin \phi + s \cos \phi) ds \quad (6.6)$$

La reconstruction de la fonction $G(x, y)$ à partir d'une série de transformées de Radon, appelée également *sinogramme*, peut se faire selon différentes méthodes. Ces méthodes sont dites *rétro-projection filtrée* ou *projection de radon inverse*. La technique la plus courante se base sur l'utilisation des transformées de Fourier. La transformée de Fourier d'une fonction $g_\phi(t)$ s'écrit :

$$S_\phi(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g_\phi(t) \exp(-j2\pi\omega t) dt \quad (6.7)$$

avec ω : la fréquence en radians par unité de longueur.

En remplaçant g_ϕ par son expression, on obtient la transformée de Fourier d'une projection:

$$S_\phi(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} G(t \cos \phi - s \sin \phi, t \sin \phi + s \cos \phi) ds \right] \exp(-j2\pi\omega t) dt \quad (6.8)$$

Et en repassant dans le système de coordonnées original (x,y)

$$S_\phi(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(x, y) \exp(-j2\pi\omega(x \cos \phi + y \sin \phi)) dx dy \quad (6.9)$$

Cette expression correspond à la transformée de Fourier bidimensionnelle de $G(x,y)$ exprimée dans un système de coordonnées du plan de Fourier (u,v) ($u = w \cos \phi$, $v = w \sin \phi$), évaluée le long d'une droite radiale w faisant un angle ϕ avec l'axe u .

Prendre la transformée de Fourier d'une projection selon l'angle ϕ revient donc à obtenir la transformée de Fourier bidimensionnelle de $G(x,y)$ selon un droite du plan de Fourier inclinée de ϕ .

En considérant un nombre infini de projections, il est possible d'obtenir la transformée de Fourier bidimensionnelle de $G(x,y)$:

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(x, y) \exp(-j2\pi\omega(ux + vy)) dx dy \quad (6.10)$$

Ceci permet de trouver $G(x,y)$ par la transformée de Fourier inverse :

$$G(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(u, v) \exp(j2\pi\omega(ux + vy)) du dv \quad (6.11)$$

6.1.2 Application de la transformée de Radon au calcul de la distribution bidimensionnelle

Sur un banc de répartition tel que celui qui a été présenté au chapitre 3, où l'on peut faire tourner une buse selon différents angles ϕ (voir point 6.1.4) et recueillir les volumes correspondants, les distributions unidimensionnelles sont assimilables à une transformée de Radon.

Pour une buse située à une hauteur z par rapport au banc de répartition, le volume recueilli par unité de temps dans les éprouvettes $d(\phi, t)$ correspond à l'intégrale de la fonction de distribution $D_z(x, y)$ dans le plan des gouttières (x, y) le long des gouttières faisant un angle ϕ avec l'axe y (Figure 6.2.):

$$d(\phi, t) = \int_l D_z(x, y) dl \quad (6.12)$$

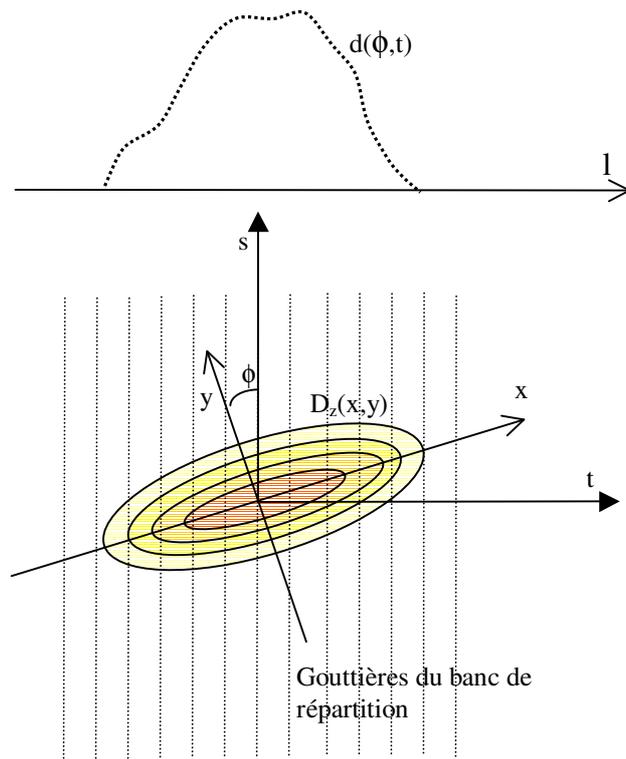


Figure 6.2. : Projection d'une fonction de distribution $D_z(x,y)$ le long des éprouvettes.

Et sous la forme traditionnelle transformée de Radon:

$$d(\phi, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} D_z(x, y) \delta(x \cos \phi + y \sin \phi - t) dx dy \quad (6.13)$$

Dans le cas de la pulvérisation, δ correspond à une fenêtre rectangulaire dont la longueur est adaptée à la vitesse de remplissage des gouttières.

La technique de rétro-projection filtré détaillée au point 6.1.1 nous permet par conséquent d'estimer $D_z(x,y)$, la distribution originale de la buse pour la hauteur z . Comme, en pratique, on ne dispose pas d'un nombre infini de projections, on ne peut connaître que partiellement la transformée de Fourier et par conséquent $D(x,y)$ sera approchée, la précision étant d'autant meilleure que le nombre de projections mesurées au moyen du banc de répartition est élevé. Il est également utile d'avoir à l'esprit que les intégrations présentes dans la technique de rétro-projection ont pour conséquence de favoriser l'apparition d'un bruit important sur l'estimation de la distribution originale dans les hautes fréquences à partir des erreurs présentes dans les données expérimentales. Certains algorithmes de rétro-projection présentent des options de filtration pour limiter ce bruit.

6.1.3 Effet de la hauteur

Le modèle de répartition dynamique nécessite la connaissance de la distribution statique $D(x,y)$ pour toutes les hauteurs comprises entre les hauteurs maximale et minimale de pulvérisation. Comme il a été dit au chapitre 2, beaucoup d'auteurs estiment que l'amplitude de la distribution varie linéairement avec la hauteur de pulvérisation. Cette hypothèse a naturellement un domaine d'application très restreint ou une validité limitée, dans la mesure où l'étalement de la distribution ne se poursuit pas indéfiniment en raison des frottements des gouttelettes dans l'air mais elle présente l'avantage de ne nécessiter qu'une seule mesure de la distribution. Un modèle plus précis doit respecter la concentration du jet en un point pour une hauteur nulle de pulvérisation, le facteur d'étalement de la distribution et l'existence d'une asymptote verticale en l'absence de vent comme présenté à la Figure 6.3.

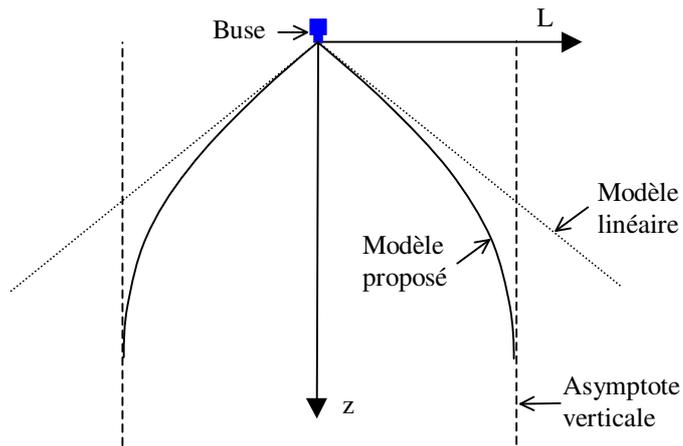


Figure 6.3. : Modèle de l'amplitude de la distribution en fonction de la hauteur.

Pour respecter ces critères, une relation exponentielle de l'amplitude de la distribution en fonction de la hauteur est proposée:

$$L(z) = L_{\max} (1 - e^{-bz}) \quad (6.14)$$

Avec $L(z)$: amplitude de la distribution à la hauteur z (m)
 L_{\max} : amplitude de la distribution pour $z = \infty$ (m)

Cette relation se base sur l'hypothèse d'un frottement visqueux des gouttes dans l'air. Les conditions aux limites de cette équation respectent bien les critères énoncés plus haut. A une hauteur nulle, la fonction s'annule. La valeur de sa dérivée ($-b L_{\max} e^{-bz}$) est fonction de l'angle de pulvérisation de la buse. Pour une hauteur tendant vers l'infini, la fonction tend vers une asymptote verticale de valeur L_{\max} . Cette équation comprend deux paramètres, L_{\max} et b , il est par conséquent nécessaire de connaître au minimum la distribution à deux hauteurs pour déterminer leurs valeurs. La valeur de L_{\max} correspond à l'amplitude de la distribution prise comme référence pour la recherche du facteur d'échelle. Ce modèle suppose évidemment que la forme de la distribution n'est pas altérée en fonction de la hauteur, ce qui est une simplification par rapport à la

réalité. Le facteur d'échelle calculé par l'équation 6.14 permet d'estimer la distribution pour toutes les hauteurs.

6.1.4 Mesure de la distribution bidimensionnelle en fonction de la hauteur

L'estimation de la distribution bidimensionnelle d'une buse nécessite un banc de répartition qui permette la mesure de la distribution de la buse sous différents angles et à différentes hauteurs, un algorithme de rétro-projection filtrée et un algorithme de reconstruction de la distribution bidimensionnelle en fonction de la hauteur à partir de distributions bidimensionnelles.

a) Mesure de la distribution sur banc de répartition

La mesure de la répartition unidimensionnelle des buses à différents angles $d(\phi, t)$ est réalisée sur le banc de répartition automatisé présenté au chapitre 3. Afin d'effectuer les mesures aux différents angles ϕ nécessaires au calcul de la rétro-projection filtrée, la buse a été montée sur dispositif constitué d'un plateau gradué à intervalles réguliers de $3^{\circ}45'$ permettant de donner à la buse un maximum de 48 positions angulaires différentes sur un demi-tour (Figure 6.4.) .



Figure 6.4. : Photographie du dispositif de rotation de la buse au-dessus du banc de répartition.

b) Calcul de la distribution bidimensionnelle par rétro-projection filtrée

Le calcul de la répartition bidimensionnelle à partir d'un ensemble de projections à des angles discrets passe par l'estimation de $F(u,v)$ à partir des $S_{\phi}(w)$ mesurés. Le nombre de projections selon ϕ , leur résolution selon w et la précision des mesures conditionnent la qualité de la reconstitution. La précision de la mesure avoisine 1% pour un banc répondant à la norme ISO 5682, il est par conséquent illusoire de dépasser cette valeur pour la reconstitution de la distribution bidimensionnelle, d'autant que comme on l'a vu au chapitre 3 elle évolue dans le temps. Comme la résolution selon l'axe w qui correspond à l'écartement des gouttières est fixée par la norme à 50 mm, il reste à déterminer le nombre optimal de projections permettant d'obtenir une bonne estimation de la distribution bidimensionnelle tout en gardant un nombre d'essais raisonnable. Ceci a été testé à l'aide de la buse Teejet XR11003VK à 1,5 bars. La distribution unidimensionnelle à deux bars a été mesurée pour 48 positions à $3^{\circ}45'$ d'intervalle angulaire. Le résultat de ces mesures qui correspond à un échantillonnage de la transformée de Radon $d(\phi,t)$, appelé sinogramme, est présenté à la Figure 6.5.

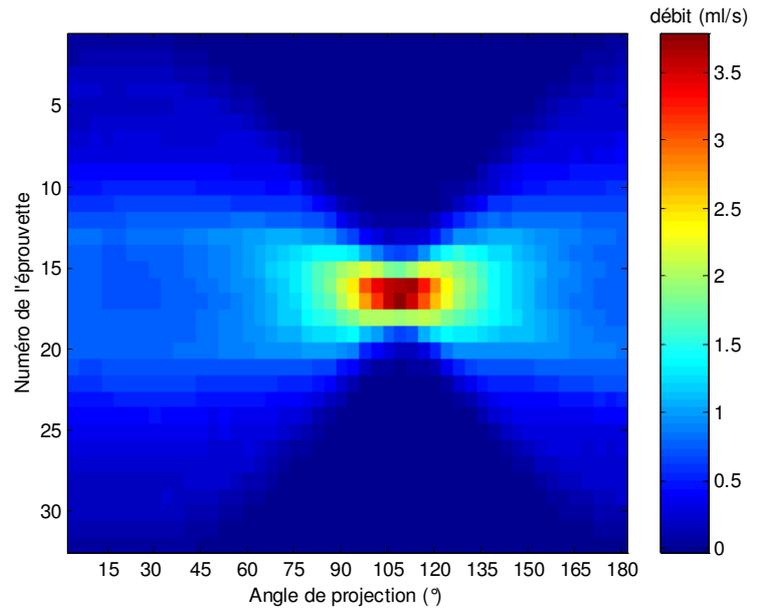


Figure 6.5. : Sinogramme de 48 projections à $3^{\circ}45$ d'intervalle d'une buse Teejet XR11003VK à 1,5 bar.

La distribution bidimensionnelle sur une surface carrée de $2,56 \text{ m}^2$ constituée de 32×32 carrés de 2500 mm^2 a été calculée par rétro-projection filtrée, tel que présenté au paragraphe 5.4.1, au moyen de l'algorithme "iradon.m" (Matlab image processing toolbox, Mathworks inc.) successivement pour 48, 24, 16 et 12 projections. Comme la reconstitution de la distribution originale à partir d'un échantillon de projection à différents angles a une résolution limitée par le nombre de projections, il est nécessaire d'interpoler les résultats pour estimer la distribution originale. A cette fin une interpolation de type *spline* a été appliquée. Comme les problèmes de bruit dans la mesure des distributions unidimensionnelles sont limités, aucun filtre particulier n'a été sélectionné (option "Ram-Lak"). Quatre paramètres statistiques ont été utilisés sur les matrices 32×32 de la distribution bidimensionnelle pour évaluer la sensibilité de l'algorithme de reconstruction au nombre de projections : le débit

total, le débit minimal et maximum et la somme des carrés des écarts. La matrice de référence est constituée par la reconstruction pour 48 projections (Figure 6.6.)

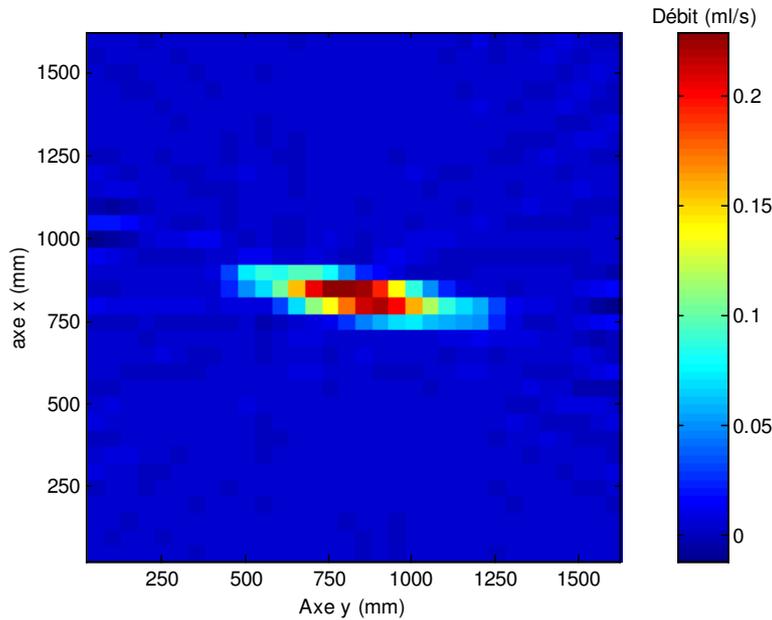


Figure 6.6. : Reconstruction de la distribution bidimensionnelle d'une buse Teejet XR11003VK à 1,5 bars à partir de 48 projections

Le Tableau 6.1 présente le résultat d'une analyse de sensibilité réalisée sur les débits calculés pour les 1024 surfaces élémentaires de la distribution bidimensionnelle calculée. Les sommes des carrés des écarts (SCE) entre les distributions reconstruites à partir de 24, 16 et 12 projections et la distribution reconstruite à partir de 48 projections sont utilisés pour quantifier l'évolution de la qualité de la reconstruction en fonction du nombre de projections. Il apparaît que la qualité de la reconstitution se dégrade avec la diminution du nombre de projections. L'algorithme est sensible au bruit dans les hautes fréquences car l'estimation de la transformée de Fourier bidimensionnelle y est moins bonne. Les valeurs de débit négatives permettent de quantifier le bruit dans la reconstruction. On observe que lorsque le nombre de projections diminue, le bruit augmente fortement. Ce même phénomène explique également

l'augmentation des valeurs maximales avec la diminution du nombre de projections.

Tableau 6.1. : Etude de sensibilité de l'algorithme de reconstruction au nombre de projections

Nombre de projections	Débit total (ml/s)	Débit min. (ml/s)	Débit max. (ml/s)	SCE (ml ² /s ²)
48	12,995	-0,012	0,244	-
24	12,992	-0,013	0,246	0,0056
16	12,983	-0,017	0,249	0,0324
12	12,910	-0,045	0,251	0,1142

Les 4 heures nécessaires à la mesure de 24 projections justifient de se limiter à ce nombre de projections en regard de l'information limitée qu'apporterait un doublement du nombre d'essais. En effet, le bruit (évolution des débits minimum et maximum) est peu important et la somme des carrés des écarts est faible en regard du nombre d'échantillons.

Une fois le nombre de projections déterminé, il est intéressant d'estimer la précision de la mesure de distribution bidimensionnelle obtenue. Tout d'abord, le débit total dans l'ensemble des carrés est comparé à une mesure par empotement du débit de la buse. Les débits totaux mesurés par rétro-projection présentent un écart important par rapport aux 14,2 ml/s mesurés par empotement. Pour résoudre ce problème, deux précautions ont été prises. Tout d'abord, une technique de 'zero padding' qui consiste à ajouter des faisceaux de projection fictifs de valeur nulle de part et d'autre du sinogramme a été adoptée. Elle permet, pour les objets de taille finie, d'améliorer significativement la précision de l'algorithme. Ensuite, le débit total mesuré varie quelque peu selon l'angle de projection en raison des dimensions limitées du banc de répartition et des petites variations de pression lors des différents essais. Pour compenser cet effet, le débit de chaque projection est normé sur le débit maximum observé. L'erreur sur le débit total est alors inférieure au pourcent. Il reste à vérifier que ces mesures n'altèrent pas de manière exagérée la forme de la distribution. Un moyen simple

est de projeter la distribution bidimensionnelle selon un axe et de comparer cette transformée de Radon à la mesure de distribution originale sur cet axe.

La Figure 6.7. présente la comparaison de forme réalisée pour la buse Teejet testée selon son axe principal à deux bars et 50 cm de hauteur. On observe que l'écart maximal ne dépasse pas le pourcent.

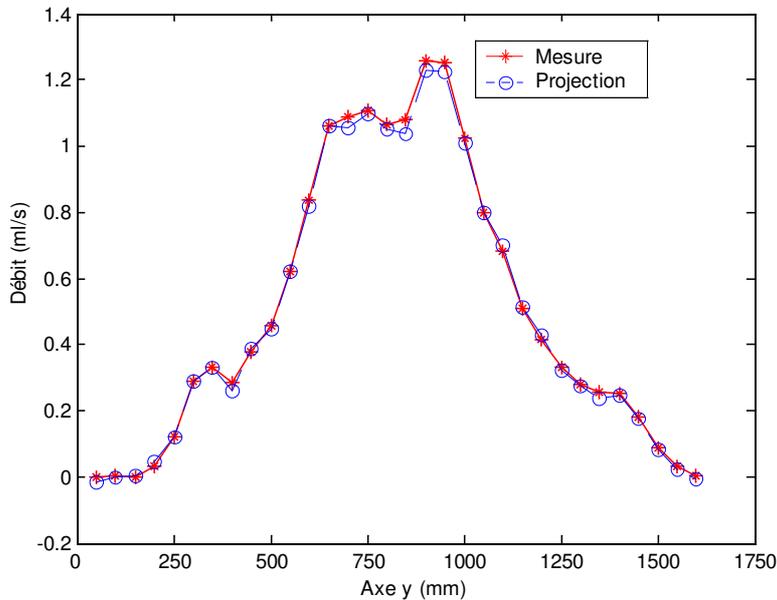


Figure 6.7. : Comparaison de distribution transversale mesurée avec la projection sur l'axe y de la distribution bidimensionnelle calculée par rétro-projection (buse Teejet XR11003VK, 2 bars).

c) Modélisation de la répartition en fonction de la hauteur sur base de distributions bidimensionnelles

Le calcul de la distribution en fonction de la hauteur à partir du modèle proposé (Equation 6.14) nécessite la mesure d'au moins deux distributions bidimensionnelles pour ajuster les paramètres L_{\max} et b . Une troisième hauteur de pulvérisation permet de juger de la qualité de l'ajustement. Les distributions bidimensionnelles mesurées pour trois hauteurs de pulvérisation (300, 500, et 700 mm) pour la buse Teejet XR11003VK sont présentées à la Figure 6.8.

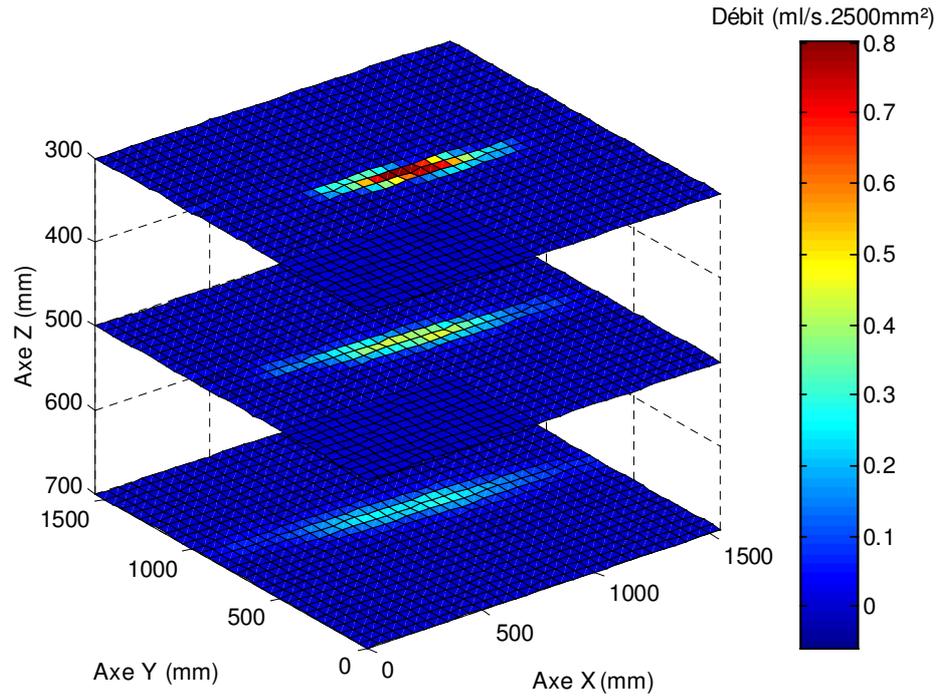


Figure 6.8. : Distribution bidimensionnelle à trois hauteurs: 30, 50 et 70 cm (buse Teejet XR11003VK, 2 bars).

Pour estimer les paramètres de l'Equation 6.14, l'amplitude de mesure à 700 mm est considérée comme référence : $L(700) = 1600$ mm. Un algorithme itératif est mis en œuvre pour déterminer la valeur de $L(300)$. Il recherche le minimum de la variance entre la distribution à 700 mm et la zone centrale correspondante de la distribution à 300 (cette variance correspond à la somme des carrés des écarts entre les distributions divisée par le nombre de surfaces élémentaires). Cette variance atteint un minimum lorsque le facteur d'échelle utilisé fournit la meilleure estimation de l'évolution de l'amplitude de la distribution. A titre d'exemple, pour la buse Teejet XR11003VK à 2 bars présentée ci-dessus, l'Equation 6.14 fournit le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} 1,6 = L \max(1 - e^{-0,7b}) \\ 0,904 = L \max(1 - e^{-0,3b}) \end{cases}$$

En levant les inconnues, on obtient l'équation suivante :

$$L(z) = 2,39(1 - e^{-1,58z})$$

Cette équation décrit l'évolution de l'amplitude de la distribution bidimensionnelle en fonction de la hauteur z (en mètres). Lorsqu'on compare la valeur prise par cette équation en $z = 0,5$ m avec le facteur d'amplitude calculé au moyen de l'algorithme précédent entre $z = 0,5$ m et $z = 0,7$ m, on obtient respectivement 1,31 et 1,33. Cela montre que la relation, si elle n'est pas dépourvue d'erreur, est une bonne approximation de la réalité.

Cette relation est utilisée pour calculer les distributions $D(x,y)$ aux différentes hauteurs. Comme ces distributions sont constantes pour une buse, elle sont calculées une fois et stockées en mémoire d'ordinateur sous forme d'une matrice à trois dimensions. La résolution de cette matrice doit être compatible avec l'algorithme de simulation de la répartition dynamique. Dans ce travail, une résolution de 50 mm selon les axes x, y et z a été choisie. Avec comme limite une dimension de 2,5 mètres selon X et Y et 2 mètres selon Z , cette matrice contient plus de 10^5 éléments. Pour éviter une trop grande erreur sur la forme de la distribution, la distribution est extrapolée à partir de la distribution à 0,7 m au-delà de cette hauteur, interpolée par une combinaison linéaire des distributions à 0,7 et 0,5 m entre ces deux hauteurs, de même à partir des distributions à 0,5 et 0,3 m entre ces deux hauteurs et extrapolée au dessous de 0,3 m.

La Figure 6.9. présente une projection dans le plan (y,z) selon l'axe x de la matrice tridimensionnelle obtenue. L'effet de la hauteur sur l'étalement du jet est clairement mis en évidence. Il faut remarquer qu'au delà de 0,7 m, les distributions sont extrapolées et par conséquent la validité de leur estimation devrait être vérifiée. Dans la suite du travail, seules les distributions comprises entre 0,3 et 0,7 m seront utilisées.

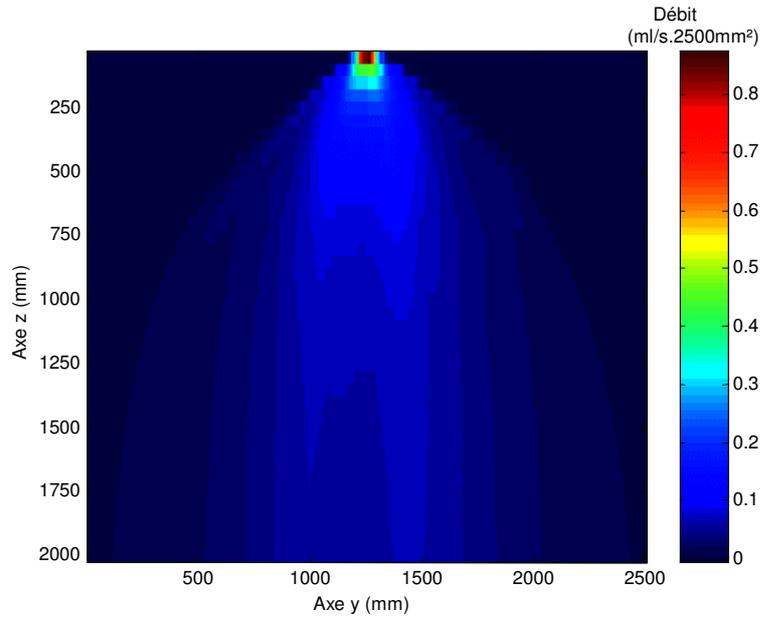
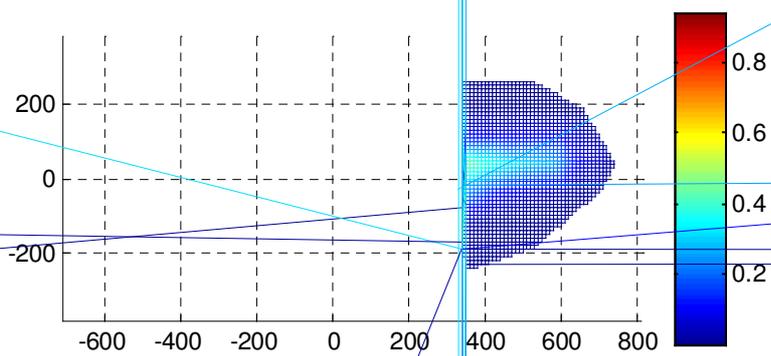


Figure 6.9. : Projection selon l'axe x de la modélisation de la distribution tridimensionnelle (buse Teejet XR11003VK, 2 bars).

d) Validation de la mesure de distribution

Une mesure de la distribution dans des boîtes de Pétri a été mise en œuvre afin de valider la méthode de mesure de la distribution au moyen du banc de répartition. Un échantillonnage quasi continu (90% de la surface) de la distribution statique dans des boîtes de Pétri a été réalisé pour la buse Teejet à 55 cm de hauteur. 108 boîtes de Pétri ont été disposées jointives selon un maillage hexagonal dont le contour a été limité à la zone de pulvérisation de la buse. Les boîtes de Pétri ont été pesées avant et après un essai de pulvérisation d'eau à 2 bars de 33,75 secondes. La différence entre les mesures a été convertie en débit par boîte de Pétri. Afin de comparer le débit ainsi mesuré aux résultats obtenus au moyen du banc de répartition, le débit correspondant à la surface de chaque boîte de Pétri a été calculé à partir de la matrice bidimensionnelle de la répartition à 55 centimètres extraite de la matrice de distribution calculée au paragraphe précédent. La Figure 6.10. présente la distribution mesurée dans les boîtes de Pétri et la distribution équivalente calculée à partir de $D(x,y,z)$.



simulée est plus étalée que la distribution mesurée mais possède une forme similaire.

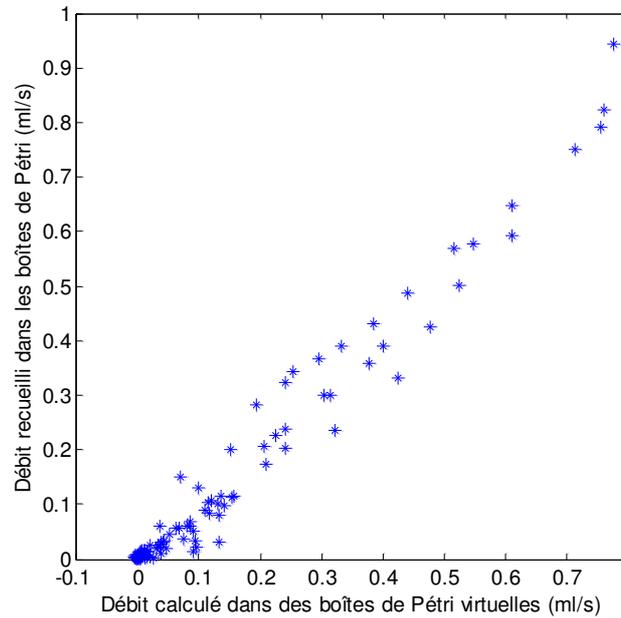


Figure 6.11. : Comparaison entre les distributions statiques mesurée par gravimétrie et calculée par la méthode de rétroprojection.

Pour juger de l'équivalence entre les mesures par les deux méthodes et apporter une appréciation qualitative, la différence d'étalement a été comparée à celle générée par des différences de hauteur. Pour ce faire, l'écart-type des valeurs de débit a été utilisé comme critère car ce dernier augmente avec l'étalement de la distribution. Le Tableau 6.2. présente les valeurs d'écart-type calculé pour 4 hauteurs à partir de $D(x,y,z)$.

Tableau 6.2. : *Effet de la hauteur sur l'écart-type des distributions simulées.*

Hauteur (cm)	Ecart-type (ml/s)
45	0.2332
50	0.2151
55	0.1953
60	0.1788

L'écart-type calculé pour la distribution statique mesurée à 55 centimètres dans les boîtes de Pétri vaut 0,2089, ce qui correspond à une hauteur de 51,6 centimètres pour $D(x,y,z)$. On peut en déduire que l'erreur sur l'étalement de la distribution est relativement faible. Les écarts entre résultats sont également à relativiser eu égard à la résolution des mesures. Enfin, une dernière source de différence possible provient de la variabilité de la distribution. Une répétition à plusieurs semaines d'écart de la mesure de la distribution de la buse à 50 cm et 2 bars l'illustre parfaitement (Figure 6.12.).

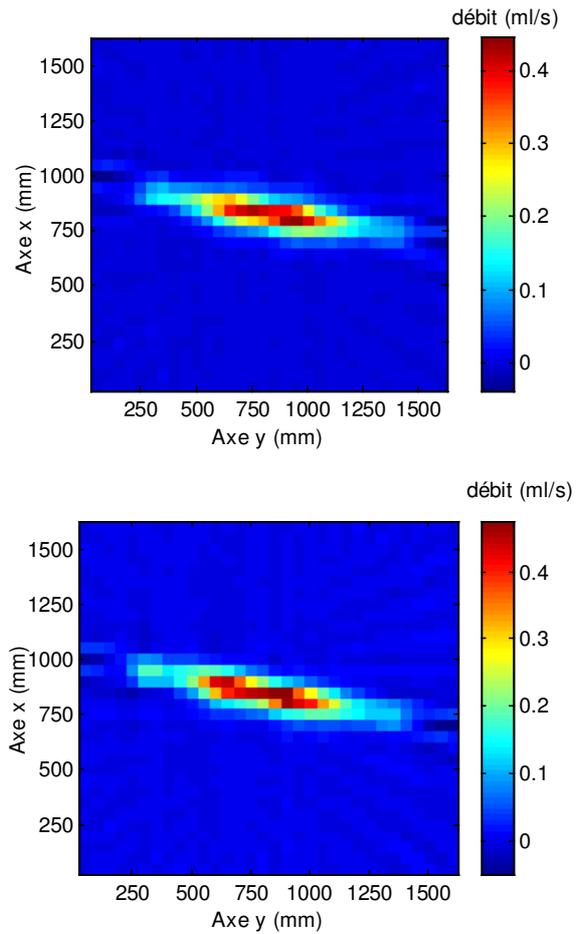


Figure 6.12. : Images de deux mesures indépendantes de la distribution à 50 cm et 2 bars d'une même buse.

La Figure 6.13. présente la comparaison des mesures point à point. Dans ce cas, la pente de la régression au sens des moindres carrés vaut 0,926 et une corrélation de 0,9688 est observée. Cela implique que la variabilité de la distribution est une source prépondérante des écarts observés. En effet, l'examen de toutes les sources de variation extérieures (pression de pulvérisation,

température, humidité relative,...) n'a pas permis de mettre en évidence de rôle explicatif de l'un de ces facteurs sur la variabilité de la distribution.

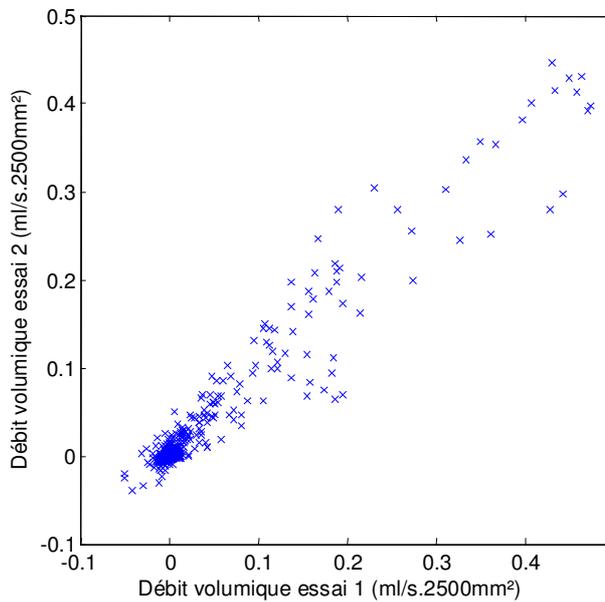


Figure 6.13. : Comparaison de mesures indépendantes de la distribution à 50 cm et 2 bars de la même buse.

Pour conclure, la méthode de mesure de la distribution proposée fournit une bonne estimation de la distribution réelle de la buse. Elle présente l'avantage de mettre en œuvre un banc de répartition qui a fait l'objet d'une normalisation internationale. Il faut néanmoins tenir à l'esprit que la résolution limitée de ce matériel et la variabilité de la distribution conditionnent le résultat de la mesure.

6.2 Evaluation du modèle

La répartition est calculée pour les trois sollicitations décrites au chapitre 4 (vitesse constante et hauteur constante, vitesse variable et hauteur

constante ainsi que vitesse constante et hauteur variable) à partir de la trajectoire et de la distribution de la buse et comparée aux mesures des essais de répartition.

Dans l'objectif de fournir une mesure de la qualité de la prédiction, une valeur E de l'écart de prédiction est calculée pour les points de mesure par la formule 6.15. Elle calcule une valeur moyenne de l'écart absolu entre le taux d'application mesuré en moyenne et le taux d'application modélisé.

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n |d_i - \hat{d}_i|}{n} \quad (6.15)$$

avec E : valeur moyenne de l'écart absolu ;
 d_i : le taux d'application modélisé en un point ;
 \hat{d}_i : le taux d'application moyen mesuré en un point.

E dépend naturellement du volume par hectare pulvérisé et de la position des points de mesure. Pour limiter cette dépendance, il est nécessaire d'échantillonner de manière régulière sur toute la largeur de la répartition. En divisant le paramètre E par la moyenne des taux d'application modélisés, on obtient un critère de comparaison peu sensible aux petites erreurs sur les faibles valeurs. Le paramètre V , qui correspond à un écart absolu type, est calculé selon l'Equation 6.16. Il facilitera les comparaisons entre les différents essais.

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n |d_i - \hat{d}_i|}{\sum_{i=1}^n \hat{d}_i} \quad (6.16)$$

avec V : écart absolu type ;
 d_i : le taux d'application modélisé en un point ;
 \hat{d}_i : le taux d'application moyen mesuré en un point.

Un dernier critère est de vérifier le biais éventuel de la prévision du volume total appliqué au moyen du rapport de la somme des taux d'application

modélisés par la somme des taux d'application mesurés, B , selon la formule de l'Equation 6.17.

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \hat{d}_i} \quad (6.17)$$

6.2.1 Vitesse constante

La Figure 6.14. présente le résultat de la simulation d'un mouvement rectiligne à vitesse constante. La couleur de chaque carré de 2500 mm² de coté représente le taux d'application simulé. La position des échantillons lors de la mesure de répartition de l'essai correspondant est indiquée par une croix jaune entourée d'un cercle bleu. Comme attendu pour une vitesse constante, le taux d'application est uniforme selon l'axe x.

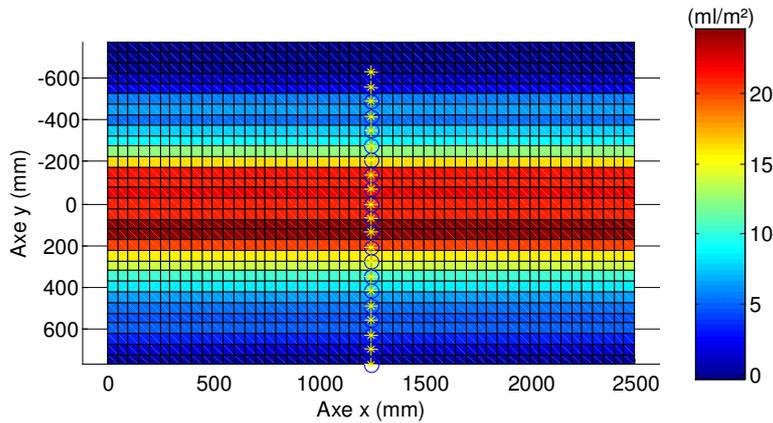


Figure 6.14. : Répartition calculée par le modèle pour $v=1m/s$ et $h=50cm$

La Figure 6.15. compare les taux d'application modélisé et mesuré en moyenne pour les trois répétitions. Des différences importantes apparaissent au niveau de la forme de la répartition transversale mais pas de son amplitude qui avoisine 1600 mm. Au centre de la distribution, le modèle surestime le taux d'application de près de 50 %. Le modèle présente un maximum proche de

25 ml/m², alors que le maximum des mesures avoisine 17 ml/m². Les différences tendent à s'estomper au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre de la distribution pour s'annuler aux environs de ± 250 mm. Au-delà de cette limite, le modèle sous-estime le taux d'application. La sous-estimation culmine aux environs de 30% vers ± 400 mm et s'annule définitivement au delà de ± 700 mm.

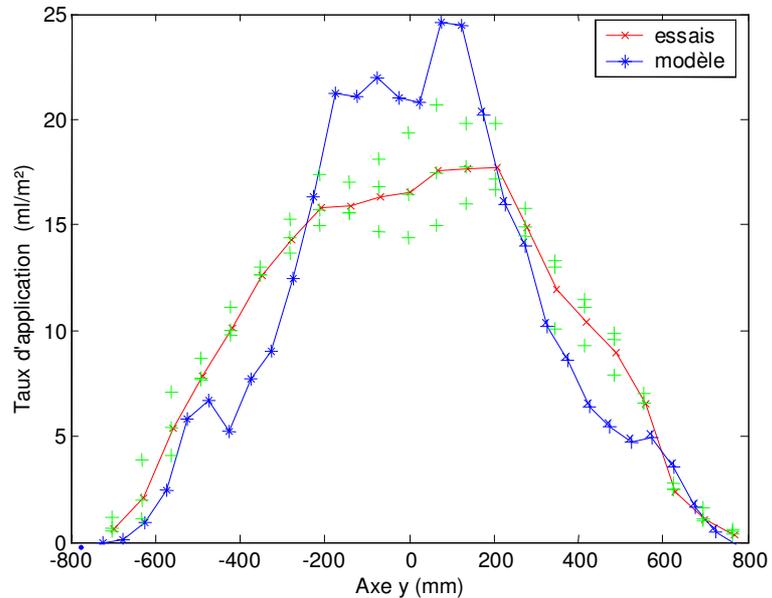


Figure 6.15. : Comparaison de la répartition transversale calculée par le modèle avec la répartition moyenne mesurée pour $v=1\text{m/s}$ et $h=50\text{cm}$.

Les écarts assez importants que présente le modèle par rapport à la répartition mesurée doivent être interprétés en tenant compte de la variabilité de cette dernière. Les signes + verts de la Figure 6.15 illustrent les valeurs mesurées lors des trois répétitions. Les différences entre le modèle et la répartition mesurée sont souvent supérieures à la variabilité qui a été observée au sein des essais, ce qui tend à montrer que le modèle souffre d'écarts systématiques par rapport à la réalité.

L'écart E prend pour l'essai présent la valeur de $3,36 \text{ ml/m}^2$. V prend la valeur de $32,6 \%$. Cette valeur montre que le modèle souffre d'un manque de précision important (33% d'erreur) du point de vue de la prévision de la forme de la répartition. B vaut $1,00$, ce qui montre l'absence de biais dans le modèle. Pour conclure, cet essai montre un effet important de la vitesse de la buse sur la distribution transversale de la buse.

6.2.2 Vitesse variable

La Figure 6.16. représente la position des 140 points d'échantillonnage de l'essai à vitesse variable illustrée par des étoiles jaunes entourées d'un cercle bleu sur fond d'une image des valeurs simulées du taux d'application.

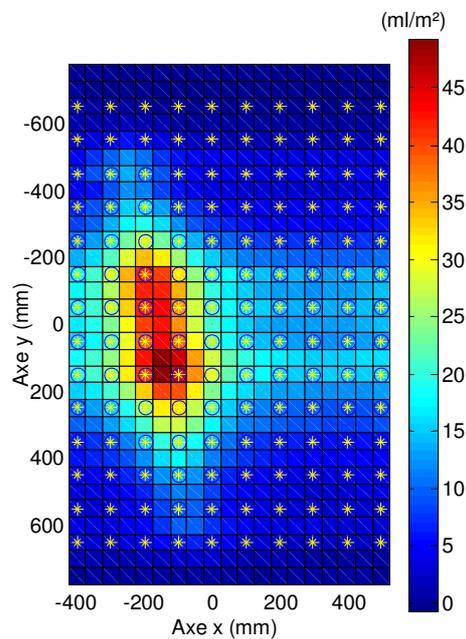


Figure 6.16. : Répartition calculée par le modèle pour $v=1+0,2 \pi \sin(2 \pi t) \text{ m/s}$ et $h=50\text{cm}$.

La Figure 6.17. présente une comparaison visuelle des taux d'application mesurés et modélisés.

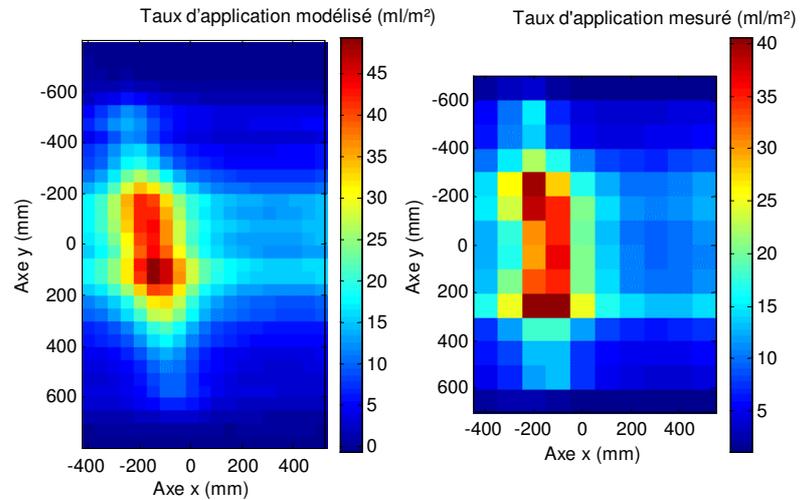


Figure 6.17. : Comparaison de la répartition calculée par le modèle avec la répartition mesurée pour $v=1+0,2 \pi \sin(2 \pi t)$ m/s et $h=50$ cm.

Comme pour l'essai à vitesse constante, la valeur maximale du taux d'application modélisé est supérieure à celle mesurée. De plus, comme le montre la Figure 6.18., la répartition transversale modélisée est plus concentrée au niveau de la buse que la répartition mesurée. Cette tendance est également celle qui a été observée pour l'essai à vitesse constante. De manière générale, les commentaires sur les différences de forme entre répartition transversale modélisée et mesurée du paragraphe 6.2.1. restent valables. Cela confirme donc l'effet important de la vitesse d'avancement sur la distribution de la buse observée lors de l'essai à vitesse constante.

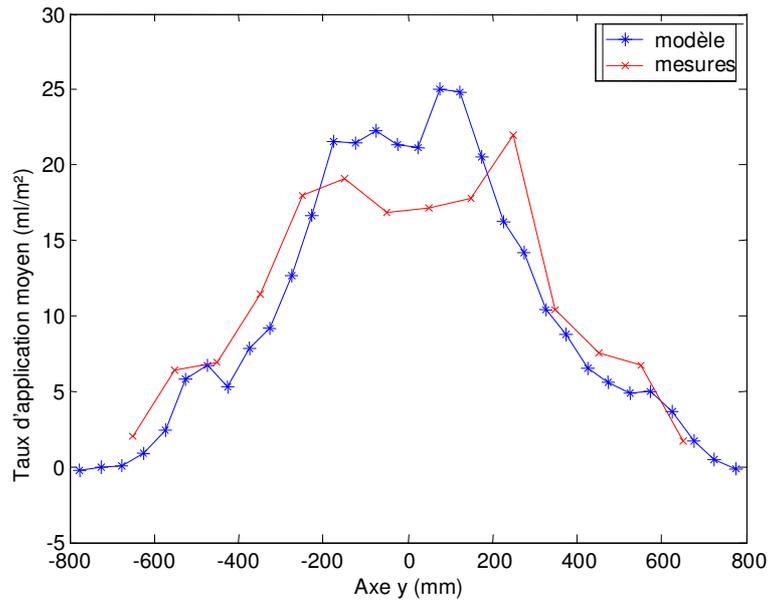


Figure 6.18. : Comparaison de la répartition transversale moyenne calculée par le modèle de répartition avec la répartition mesurée pour $v=1+0,2 \pi \sin(2 \pi t)$ m/s et $h=50$ cm.

L'effet de la variation de vitesse se marque sur la modélisation de la répartition longitudinale de même manière que sur les mesures. La Figure 6.19. présente les répartitions longitudinales modélisée et mesurée (la quantité de bouillie par mètre d'avancement). Outre la similitude évidente des deux courbes, il apparaît que le taux d'application mesuré est en léger retard de phase par rapport au taux d'application modélisé. L'effet de la vitesse d'avancement de la buse sur la trajectoire des gouttelettes peut expliquer cette observation : sous son effet, les gouttelettes ont un point d'impact qui est en moyenne situé plus loin que leur point d'éjection.

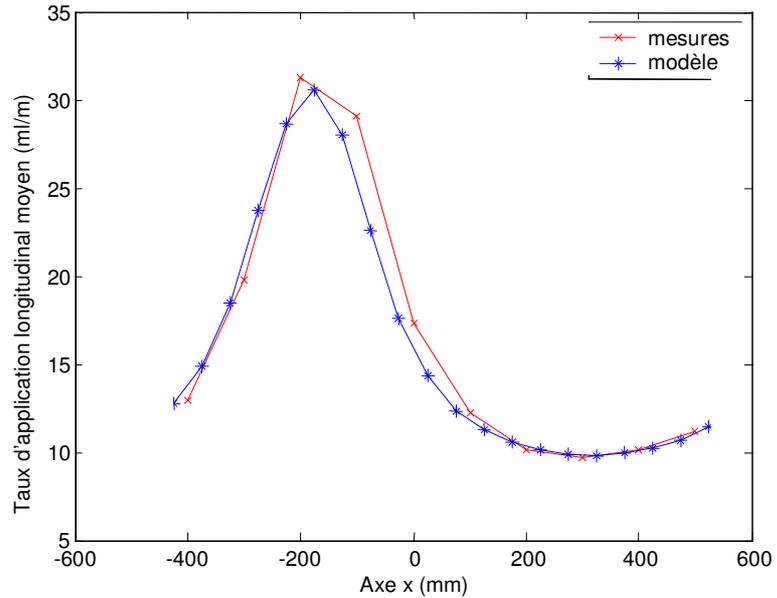


Figure 6.19. : Comparaison de la répartition longitudinale moyenne calculée par le modèle avec la répartition longitudinale mesurée pour $v=1+0,2 \pi \sin(2 \pi t)$ m/s et $h=50$ cm.

L'écart E entre modèle et mesures prend ici la valeur de $3,06 \text{ ml/m}^2$, ce qui est légèrement inférieur à l'écart observé à vitesse constante. La valeur de V atteint $26,2 \%$. Cela tend à montrer que l'effet des variations de vitesse est correctement modélisé car il ne tend pas à augmenter l'importance des erreurs de modélisation. La légère diminution de ces erreurs n'est pas très significative en regard de la variabilité de la répartition. Il est probable que le plus grand nombre d'échantillons que pour l'essai à vitesse constante soit légèrement favorable. Le paramètre B prend quant à lui la valeur de $0,97$. Ceci indique un faible biais qui n'est pas significatif.

6.2.3 Hauteur variable

La Figure 6.20. présente la position des 138 points d'échantillonnage de l'essai à hauteur variable illustrée par des étoiles jaunes entourées d'un cercle

bleu sur fond d'une image des valeurs simulées de la répartition. La première colonne de mesures située à gauche correspond à une hauteur de 700 mm. Les colonnes suivantes correspondent à des hauteurs dégressives par pas de 50 mm jusqu'à 300 mm en $x = 2400$ mm. L'intervalle d'échantillonnage est progressivement réduit avec le rétrécissement de la répartition transversale.

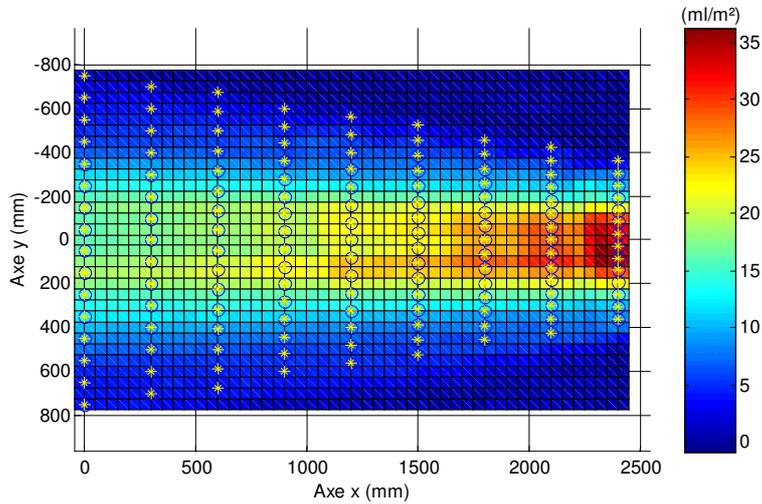


Figure 6.20. : Répartition calculée par le modèle pour $v=1\text{m/s}$ et h variant linéairement de 700 à 300 mm.

La Figure 6.21. présente une comparaison visuelle des répartitions mesuré et modélisé. Comme pour les essais à vitesse constante et à vitesse variable, la valeur maximale du taux d'application modélisé est supérieure à celle qui est mesurée, ceci pour chaque hauteur.

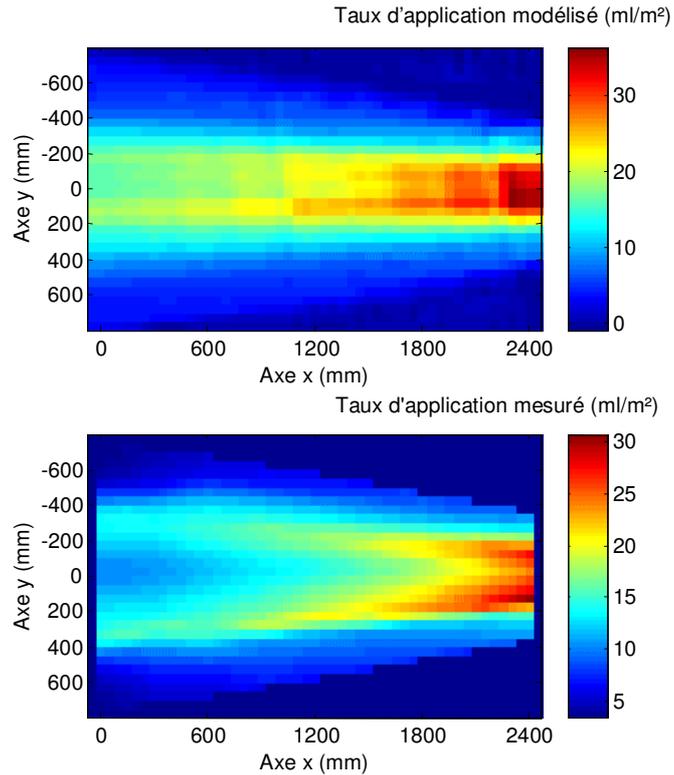


Figure 6.21. : Comparaison de la répartition calculée par le modèle avec la répartition mesurée pour $v=1\text{m/s}$ et h variant linéairement de 700 à 300 mm.

La Figure 6.22. présente une image illustrant les différences dans le plan (x,y) entre les taux d'application modélisés et mesurés. La zone bleu foncé uniforme est en-dehors de la zone de mesure. La répartition transversale modélisée est plus concentrée au niveau de la buse que la répartition mesurée. Cette tendance est également celle qui a été observée pour les deux autres essais. Encore une fois, les commentaires sur les différences de forme entre répartition transversale modélisée et mesurée du paragraphe 6.2.1. restent valables mais les distances par rapport à l'axe de la buse des points caractéristiques varient avec la hauteur. Cela confirme une fois de plus un effet important de la vitesse d'avancement sur la distribution de la buse, cette fois-ci à toutes les hauteurs.

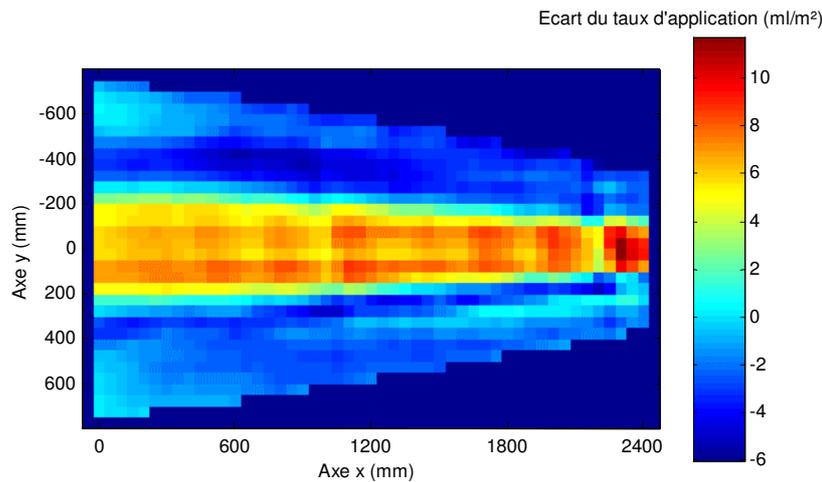


Figure 6.22. : Différence entre le taux d'application moyen calculé par le modèle et le taux d'application mesuré pour $v=1m/s$ et h variant linéairement de 700 à 300 mm.

L'écart E entre modèle et mesures prend ici la valeur de 3,41 ml/m², ce qui est légèrement supérieur à l'écart observé à vitesse constante. Le paramètre V atteint quant à lui 25,9%. Cela tend à montrer que l'effet des variations de hauteur est correctement modélisé car il ne tend pas à augmenter l'importance des erreurs de modélisation. La légère diminution de ces erreurs n'est pas très significative en regard de la variabilité de la répartition. Il est également probable que le plus grand nombre d'échantillons que pour l'essai à vitesse constante soit légèrement favorable. Le paramètre B prend quant à lui la valeur de 1,034. Ceci indique un faible biais.

6.3 Interprétation et conclusion

Ces essais montrent que la répartition modélisée sur base de la distribution statique des buses souffre d'imprécisions importantes qui avoisinent 30 %. Ce résultat médiocre est principalement dû à des erreurs de modélisation de la répartition transversale et, dans une moindre mesure, de la répartition longitudinale, que ce soit pour les essais à vitesse et hauteur constantes, à vitesse

variable et hauteur constante ou à vitesse constante et hauteur variable. Il semble néanmoins que le modèle prédit correctement l'effet des mouvements sur la répartition.

Une explication plausible de l'erreur sur l'évaluation de la répartition longitudinale est à rechercher dans des phénomènes balistiques : au moment de leur éjection, les gouttelettes ont, en plus de la vitesse créée par la transformation de la pression, une composante initiale horizontale due à la vitesse de la buse. Pour améliorer les résultats de la modélisation, il est nécessaire de prendre en compte cet effet balistique sur la distribution de la buse. La comparaison des répartitions modélisée et observée montrent que la forme de la répartition transversale est affectée par la vitesse d'avancement de la buse, sa largeur restant inchangée. Ce résultat peut paraître surprenant dans la mesure où il n'est pas largement documenté dans la littérature malgré le grand nombre de mesures et de modèles de répartition disponibles. Une étude bibliographique plus orientée montre néanmoins qu'un effet similaire a déjà été observé précédemment par Smith [1992]. Ce dernier juge que les différences importantes observées entre les mesures de répartition de laboratoire et de terrain justifient de ne pas considérer les mesures sur banc de répartition comme une mesure définitive de l'uniformité de la répartition. Il étudie l'effet d'un vent de face de 3,2 m/s pour simuler l'effet de la vitesse d'avancement sur la répartition d'une buse à fente statique (TX-4). La répartition observée diffère de celle qui est mesurée en l'absence de vent, en ce sens que le volume collecté est plus faible au centre de la répartition tandis qu'il augmente sur les côtés en amplifiant l'aspect bi-modal de la répartition. C'est exactement ce qui est observé ici pour les trois essais réalisés. Il est également intéressant de remarquer que les essais présentés par Smith montrent une forte variabilité de la répartition, tout comme celle que nous avons pu observer.

Il apparaît que la différence de répartition transversale mesurée au cours du mouvement de la buse par rapport à celle calculée par le modèle provient d'effets aérodynamiques liés à l'effet de la vitesse d'avancement de la buse. En

effet, la modification de répartition transversale, sans étalement significatif et avec déplétion au centre correspond à un phénomène dont l'effet se marque différemment depuis le centre jusqu'aux extrémités de la distribution. Comme les effets aérodynamiques sur les gouttelettes sont liés à leurs diamètres, le spectre des gouttelettes dans le jet peut fournir un début de compréhension du phénomène observé. Au centre de la distribution, 10 % du jet est constitué de gouttes de moins de 100 μm très sensibles aux phénomènes aérodynamiques pour 50 % de gouttes de moins de 180 μm moyennement sensibles et de 90% de gouttes de moins de 260 μm peu sensibles. Par contre, en périphérie, de l'ordre de 10 % du jet sont susceptibles d'être moyennement sensibles aux phénomènes aérodynamiques, pour un DV10 d'environ 200 μm . Cette hétérogénéité de la distribution du point de vue de sa granulométrie peut être à l'origine de différences de comportement aérodynamique au sein du jet qui résultent en une modification de la distribution. Les grosses gouttelettes de la périphérie voient leurs trajectoires peu affectées. Miller [1989] montre que c'est le cas pour des gouttelettes de plus de 200 μm . Par contre, les fines gouttelettes du centre de la distribution se dispersent sous l'effet de turbulences. La distribution des fines gouttelettes s'en trouve étalée, ce qui diminue le débit volumique au centre de la distribution et le renforce à sa périphérie. Lorsque la buse est à l'arrêt, les fines gouttelettes sont entraînées par le courant d'air généré par les grosses, ce qui les confine au centre de la distribution. Lorsque la buse est en mouvement, les fines gouttelettes se séparent du jet de grosses gouttelettes à cause de l'effet de traînée. Elles sont alors libérées de l'entraînement du courant d'air et se dispersent latéralement.

Il ne fait pas partie de nos objectifs de poursuivre plus avant la recherche d'explications des modifications de forme de la distribution par l'effet de la vitesse d'avancement. Une telle étude devrait se baser sur des outils de modélisation comme les logiciels CFD (Computational Fluid Dynamics) ou des techniques expérimentales étudiées spécifiquement. Un enseignement doit néanmoins être tiré des résultats : la granulométrie des gouttelettes influence non

seulement la sensibilité à la dérive des buse mais également la distribution en conditions dynamiques.

Le modèle de répartition doit donc inclure les caractéristiques de la distribution dynamique. Il importe par conséquent de mettre au point une méthode de mesure de la distribution dynamique de la buse pour améliorer la prédiction de la répartition.

CHAPITRE 7

EVALUATION DU MODELE SUR LA BASE D'UNE DISTRIBUTION DYNAMIQUE

Les résultats du chapitre précédent ont mis en évidence un effet important de la vitesse d'avancement de la buse sur la répartition. Il semble que cet effet provienne d'une combinaison d'effets aérodynamiques et balistiques sur la distribution des buses. Pour tenir compte de ces effets dans le modèle, il est donc nécessaire d'estimer la distribution de la buse par des mesures réalisées en cours de mouvement. Une telle distribution, qui caractérise la forme du jet lorsque la buse est en mouvement, sera qualifiée de *dynamique*.

Dans un premier temps, la distribution de la buse en conditions dynamiques est estimée à partir de mesures de répartition effectuées par dosage de KCl. Ensuite, le modèle est mis en œuvre numériquement sur la base de la distribution obtenue et ses performances sont évaluées.

7.1 Distribution dynamique

7.1.1 Répartition transversale en fonction de la vitesse

La vitesse affecte la répartition transversale, principalement sous l'effet de phénomènes aérodynamiques. Une série d'essais à vitesse constante sont donc réalisés en vue de préciser l'effet de la vitesse sur la répartition transversale de la buse pour différentes combinaisons de facteurs opératoires.

a) Dispositif expérimental

Le banc d'essai présenté au chapitre 3 est utilisé pour déplacer la buse à vitesse constante au-dessus de la surface de mesure. La méthode gravimétrique

de dosage du KCl recueilli dans des boîtes de Pétri est utilisée pour mesurer le taux d'application transversal. Les boîtes sont disposées à un écartement croissant avec la hauteur de pulvérisation : 55 mm à 300 mm de hauteur, 70 mm à 500 mm de hauteur et 100 mm à 700 mm de hauteur. De même que pour les essais du chapitre 4, un nombre de passages augmentant proportionnellement à la vitesse est réalisé de manière à collecter dans les boîtes un volume de bouillie suffisant pour assurer une bonne précision de la mesure.

b) Résultats

La Figure 7.1. présente la fréquence relative de la répartition transversale de la buse mesurée pour différentes vitesses d'avancement avec un intervalle de classe de 50 mm (la répartition est considérée comme la somme d'unités de volume collectées).

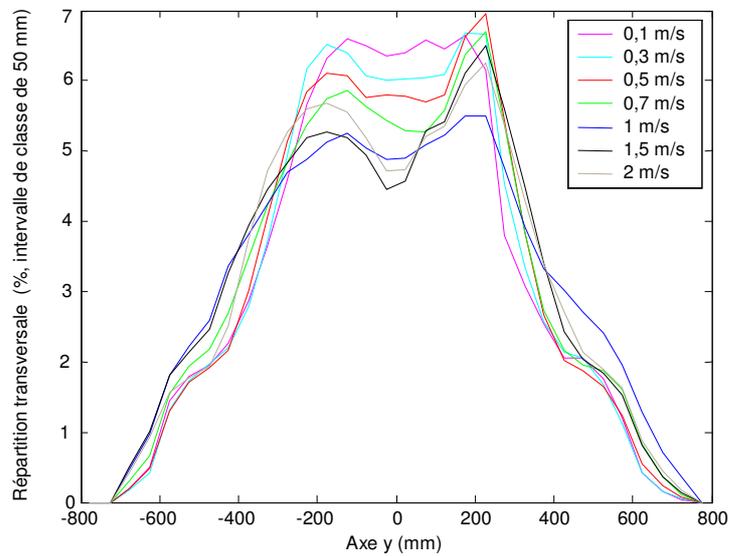


Figure 7.1. : Mesure de la fréquence relative de la répartition transversale de la buse à 50 centimètres de hauteur pour différentes vitesses, intervalle de classe de 50 mm.

Le pourcentage du volume collecté par intervalle de classe de 50 mm de large est calculé par interpolation linéaire entre les différents points de mesure de la répartition. Cette présentation permet de comparer aisément l'évolution de la forme de la répartition transversale de la buse en fonction de la vitesse mais l'interprétation doit être menée avec prudence, en raison de la variabilité de la répartition. L'amplitude de la distribution n'est pas affectée par la vitesse. De manière générale, le centre de la distribution tend à se creuser avec l'augmentation de la vitesse tandis que le volume se reporte sur les parties extrêmes de la distribution. C'est effectivement ce type d'erreur qui a été observé lorsque le modèle est basé sur une distribution statique. Avec les précautions qui s'imposent, il semble également que le phénomène soit non linéaire par rapport à la vitesse. En effet, il apparaît rapidement aux faibles vitesses pour évoluer ensuite plus lentement. La vitesse de 1 m/s semble celle où le jet se disperse le plus latéralement. Aux vitesses supérieures, le creusement de la distribution se marque toujours nettement mais ce volume ne semble pas continuer à se disperser latéralement indéfiniment.

La Figure 7.2. présente la mesure de la fréquence relative de la répartition transversale à 1 m/s pour différentes hauteurs de pulvérisation. C'est naturellement l'effet de la hauteur qui se marque sur la distribution transversale avec un étalement qui croît de moins en moins à mesure que la hauteur augmente.

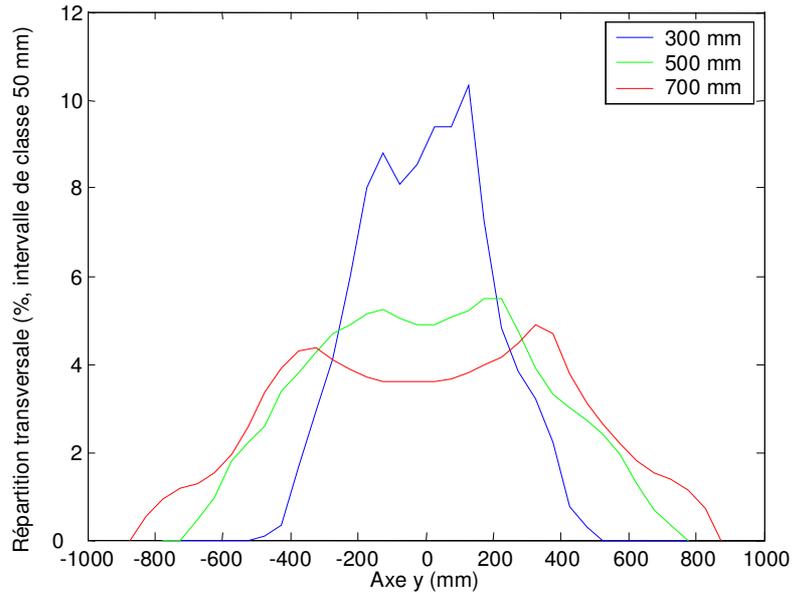


Figure 7.2. : Mesure de la fréquence relative de la répartition transversale de la buse à 1 m/s pour trois hauteurs, intervalle de classe de 50 mm.

7.1.2 Répartition longitudinale impulsionnelle en fonction de la vitesse

L'essai à vitesse variable a montré que la distribution longitudinale de la buse est affectée par les effets balistiques et aérodynamiques de la vitesse d'avancement sur la trajectoire des gouttelettes. Ces effets dépendent notamment des diamètres des gouttelettes, de leurs vitesses initiales, des caractéristiques du flux d'air associé et des interactions entre gouttelettes. Pour estimer ces effets, une nouvelle approche expérimentale a été mise en œuvre. Elle consiste à mesurer une répartition longitudinale impulsionnelle en ne pulvérisant que sur un intervalle de distance de 50 mm le long de la trajectoire de la buse, pour différentes vitesses d'avancement constantes. Cette ouverture de la buse pendant un laps de temps bref peut en effet être considérée comme une impulsion

appliquée au système de pulvérisation. Cet intervalle correspond également à la résolution du modèle.

a) Dispositif expérimental

La mise en œuvre de cet essai nécessite de pulvériser pendant un laps de temps très court qui peut descendre jusqu'à $1/40^{\text{ème}}$ de seconde pour une vitesse de buse de 2 m/s. Le porte-buse PWM offre la possibilité de réaliser une telle performance.

Un capteur de proximité est monté sur le tronçon de rampe mobile. Une cible métallique de 50 mm de long selon l'axe d'avancement est fixée sur le rail de guidage du banc d'essai. L'ouverture de la buse est commandée au moment du passage du capteur au niveau de la cible. Grâce à un circuit électronique dédié, l'ouverture de la buse n'est réalisée que lors d'un passage sur deux, ce qui permet de réaliser de nombreux passages en ne pulvérisant que lorsque la buse passe dans un sens déterminé.

La répartition est mesurée au moyen de boîtes de Pétri par dosage gravimétrique de la bouillie de KCl. Elles sont disposées selon un maillage d'intervalle adapté à la hauteur de pulvérisation. Des maillages carrés de 55 mm et de 70 mm de côté sont utilisés respectivement à une hauteur de 300 et 500 mm et un maillage rectangulaire de 70 mm selon l'axe x et 100 mm selon l'axe y pour 700 mm de hauteur.

b) Résultat

Le pourcentage du volume total collecté par intervalle de classe de 50 mm de côté est calculé par interpolation linéaire entre les différents points de mesure de la répartition. Les Figures 7.3. à 7.7 présentent le résultat des mesures de répartition, en terme de fréquence relative par élément de surface de 2500 mm², pour 500 mm de hauteur et des vitesses respectivement égales à 0,1, 0,5, 1, 1,5 et 2 m/s. La position des boîtes de Pétri est indiquée par des étoiles jaunes cerclées de bleu.

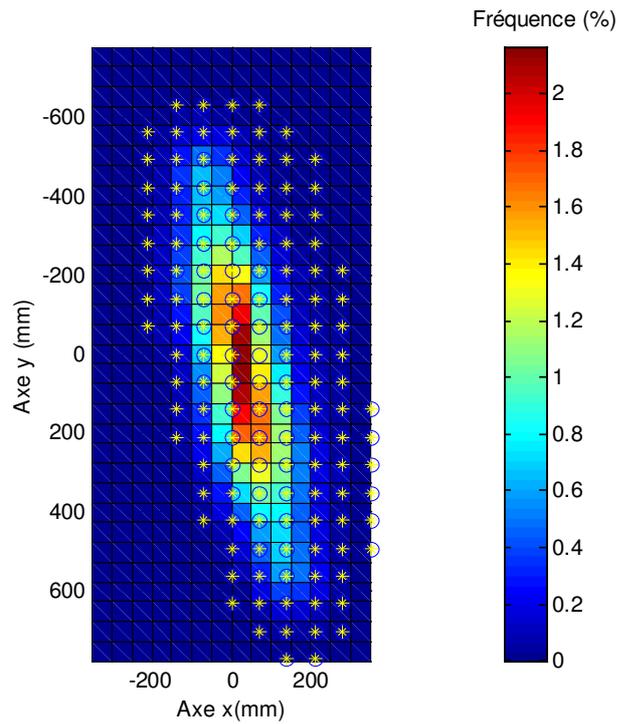


Figure 7.3. : Répartition impulsionnelle de la buse en fréquence relative (%), 0,1 m/s et 50 cm de hauteur, éléments de surface de 2500mm².

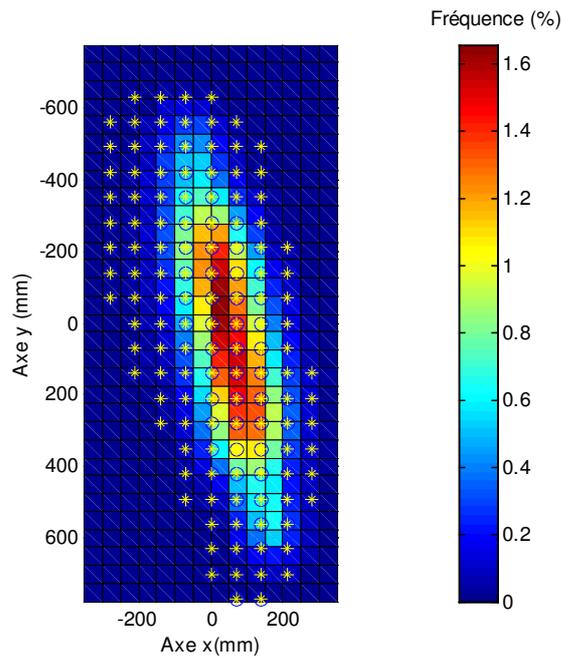


Figure 7.4. : Répartition impulsionnelle de la buse en fréquence relative (%), 0,5 m/s et 50 cm de hauteur, éléments de surface de 2500mm².

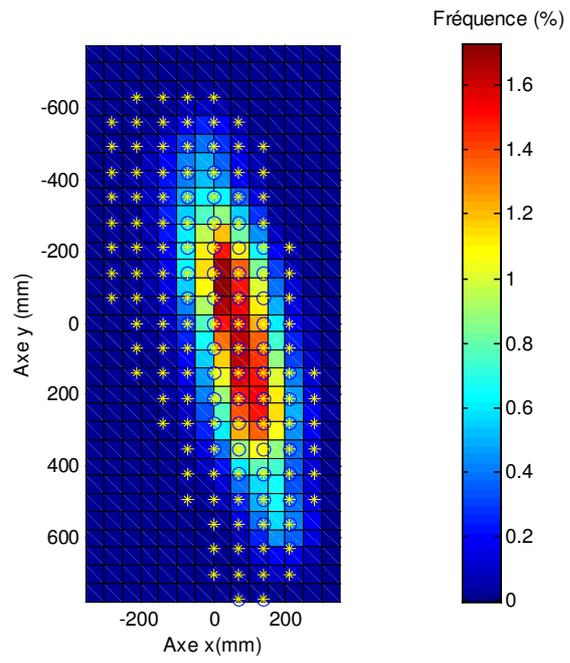


Figure 7.5. : Répartition impulsionnelle de la buse en fréquence relative (%), 1 m/s et 50 cm de hauteur, éléments de surface de 2500mm².

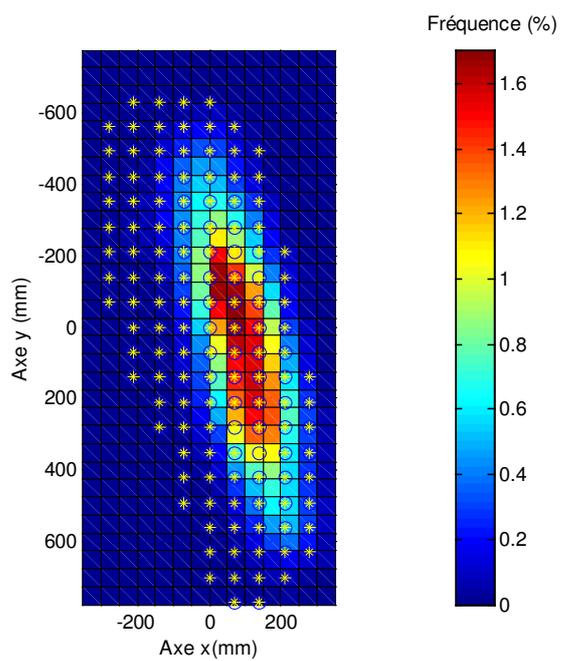


Figure 7.6. : Répartition impulsionnelle de la buse en fréquence relative (%), 1,5 m/s et 50 cm de hauteur, éléments de surface de 2500mm².

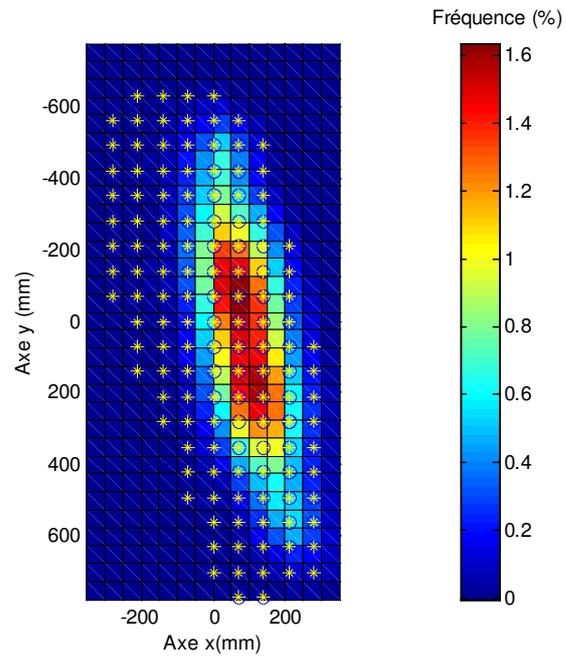


Figure 7.7. : Répartition impulsionnelle de la buse en fréquence relative (%), 2 m/s et 50 cm de hauteur, éléments de surface de 2500mm².

La Figure 7.8. synthétise le résultat des mesures pour les 5 vitesses d'avancement par ordre croissant de gauche à droite. Il apparaît que la répartition se déplace progressivement vers la droite à mesure que la vitesse augmente, c'est-à-dire qu'elle se décale selon le sens d'avancement par rapport à la position de la buse lors de l'impulsion. C'est l'effet balistique moyen attendu. La répartition longitudinale est également plus étalée que dans le cas de la distribution statique. Cela résulte du déplacement de la buse de 50 mm selon cet axe durant l'essai. Comme cette distance correspond à la résolution du modèle, cet artefact n'est théoriquement pas un handicap.

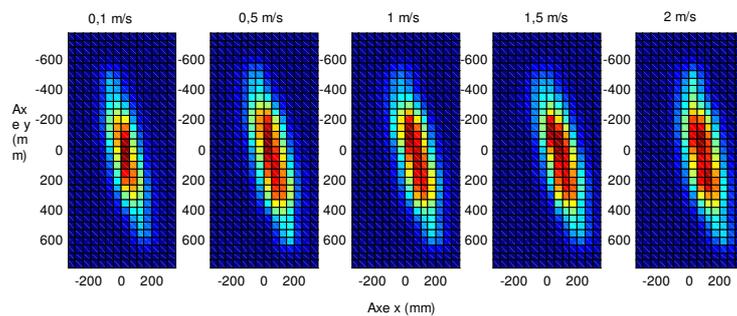


Figure 7.8. : Déplacement de la répartition impulsionnelle pour une vitesse variant de 0,1 à 2 m/s (hauteur 500 mm).

La Figure 7.9. présente la fréquence relative de la répartition longitudinale pour l'ordonnée nulle. Le déplacement de la distribution vers la droite augmente avec la vitesse. La moyenne conditionnelle en $y = 0$ de la distribution selon x permet de chiffrer le déplacement moyen. Il vaut respectivement 6, 26, 44, 68 et 63 mm pour 0,1, 0,5, 1, 1,5 et 2 m/s. La petite diminution par rapport au déplacement observé à 1,5 m/s peut être due à la variabilité ou une modification de la forme de la distribution de la buse pour cette ordonnée.

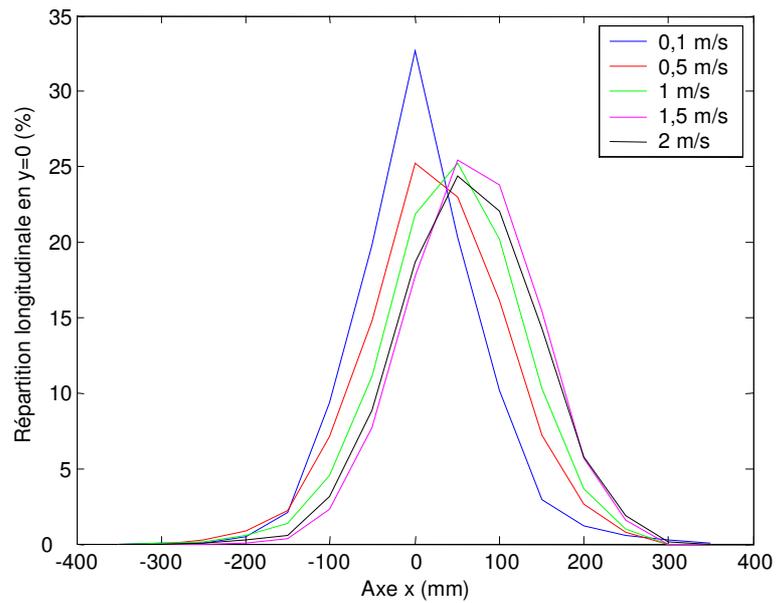


Figure 7.9. : Répartition longitudinale en $y=0$, fréquences relatives (%), 5 vitesses d'avancement, intervalle de classe de 50 mm.

La Figure 7.10. présente la fréquence relative de la répartition longitudinale sur toute la largeur. Le déplacement de la distribution vers la droite augmente avec la vitesse. La moyenne marginale de la distribution permet d'estimer le déplacement moyen de celle-ci selon la direction d'avancement. Il vaut respectivement 10, 27, 45, 67, 69 mm pour 0,1, 0,5, 1, 1,5 et 2 m/s. La dernière valeur semble montrer qu'un maximum est atteint aux environs de 70 mm. Le faible écart entre le déplacement au centre de la distribution avec le déplacement moyen montre que celui-ci est peu influencé par la position sur l'axe y . L'étalement de la distribution n'est que légèrement influencé par la vitesse car l'écart-type selon l'axe x varie seulement entre 89 et 95 mm entre 0,1 et 2 m/s et le coefficient de corrélation passe de 0,52 pour 0,1 m/s à 0,6 pour les vitesses supérieures.

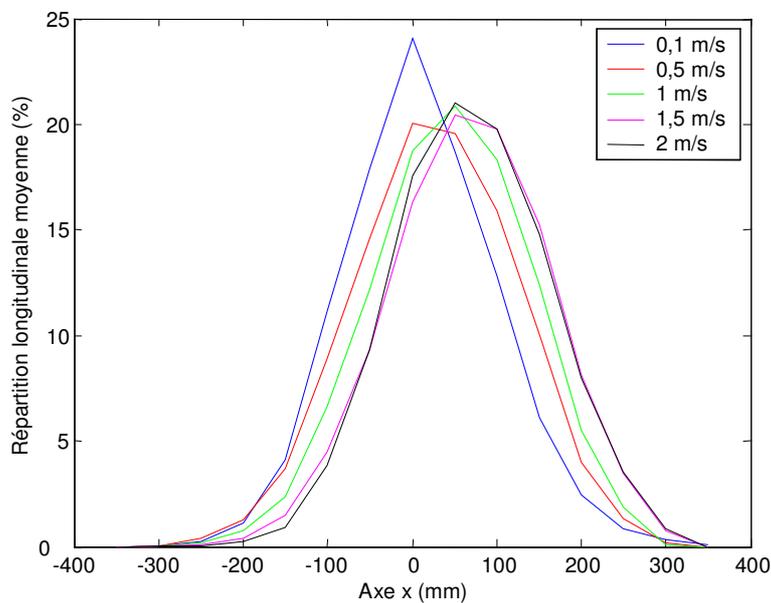


Figure 7.10. : Répartition longitudinale moyenne, fréquences relatives (%), cinq vitesses d'avancement, intervalle de classe de 50 mm

La Figure 7.11. illustre le résultat des mesures à 1 m/s pour 700 mm de hauteur. La répartition est naturellement plus étalée que pour l'essai à 500 mm de hauteur et 1m/s. Elle est en outre plus décentrée vers la droite.

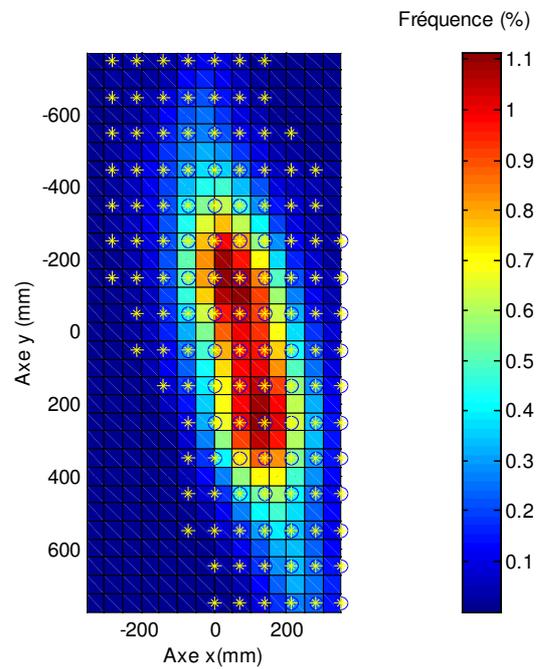


Figure 7.11. : Images de la fréquence relative de la répartition impulsionnelle de la buse pour 1 m/s et 700 mm de hauteur.

La Figure 7.12. illustre le résultat des mesures à 1 m/s pour 300 mm de hauteur. Dans ce cas, la répartition est moins étalée que pour 500 mm et également décalée vers la droite dans une moindre mesure.

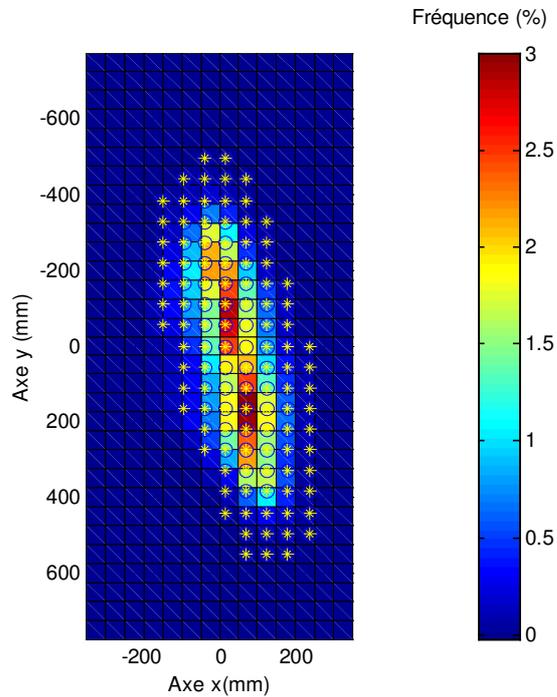


Figure 7.12. : Images de la fréquence relative de la répartition impulsionnelle de la buse pour 1 m/s et 300 mm de hauteur.

La Figure 7.13. présente la fréquence relative de la répartition impulsionnelle longitudinale moyennée sur toute la largeur de la distribution pour trois hauteurs (300, 500 et 700 mm) et 1 m/s de vitesse d'avancement. Le déplacement moyen de la distribution selon la direction d'avancement augmente avec la hauteur. Il vaut respectivement 16, 45 et 63 mm pour 300, 500 et 700 mm de hauteur. L'étalement est naturellement fortement influencé par la hauteur.

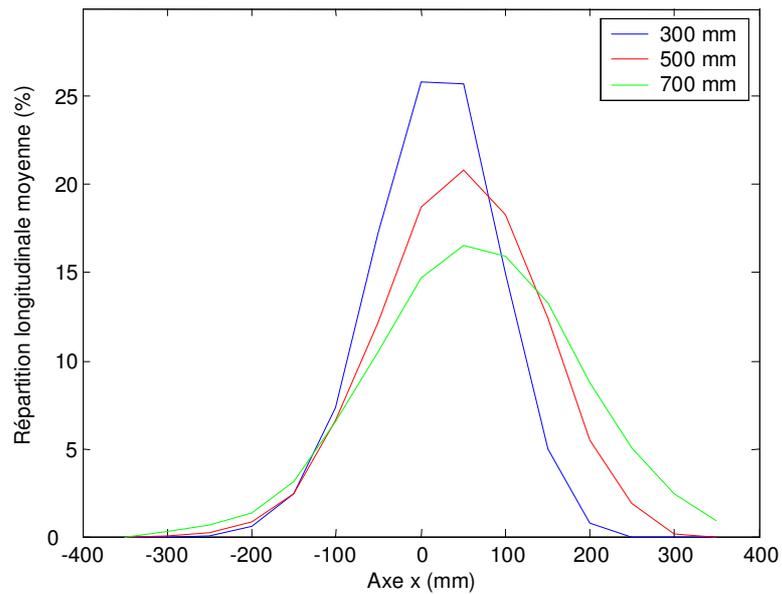


Figure 7.13. : Répartition impulsionnelle longitudinale, fréquence relative, 3 hauteurs, 1 m/s, intervalle de classe de 50 mm.

7.1.3 Calcul de la distribution bidimensionnelle dynamique

Théoriquement, si les effets aérodynamiques étaient identiques en pulvérisation continue et discontinue (il convient de rappeler ici que les travaux menés sur les buses PWM [Gilles et Comino, 1990] ont montré que leur utilisation n'affecte ni la distribution ni la granulométrie du jet), la répartition impulsionnelle mesurée par la méthode du point 7.1.2 permettrait de calculer directement une distribution bidimensionnelle qui tienne compte des effets de la vitesse. En effet, cet essai correspond strictement à un essai impulsionnel qui, pour un système linéaire, fournit directement la fonction de transfert du processus. Cette fonction de transfert qui tient compte de l'effet de la vitesse sur la distribution (elle sera appelée par la suite distribution bidimensionnelle dynamique) est nécessaire pour améliorer les résultats de la modélisation. Malheureusement, il apparaît que les effets aérodynamiques ne se développent

pas pleinement dans le cas d'une pulvérisation discontinue telle que celle générée par la buse PWM. La comparaison des répartitions transversales mesurées aux différentes vitesses pour la buse PWM de la Figure 7.14. avec celles mesurées en pulvérisation continue de la Figure 7.1. montre directement que l'effet de la vitesse y est beaucoup moins marqué.

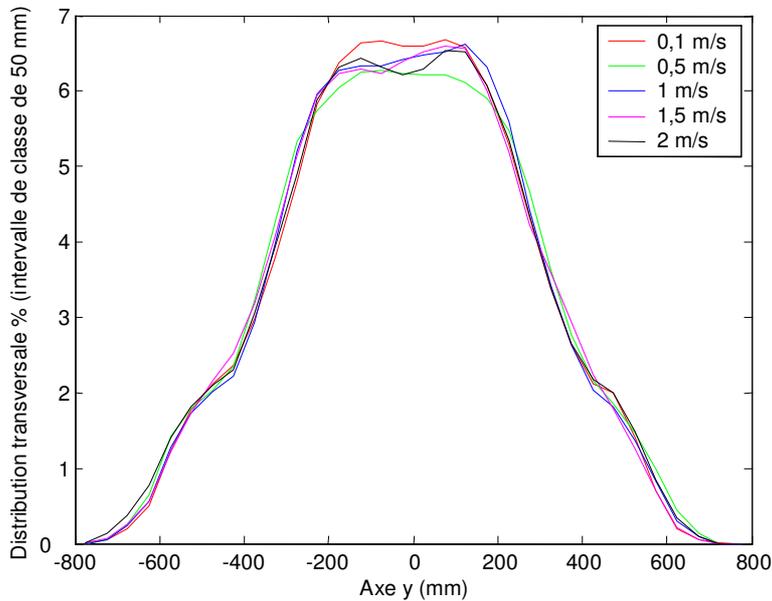


Figure 7.14. : Répartition impulsionnelle transversale, fréquence relative %, 5 vitesses, 500 mm de hauteur, intervalle de classe de 50 mm.

Pour calculer une distribution dynamique qui tienne compte à la fois des effets aérodynamiques et balistiques à une hauteur et une vitesse déterminée $D_{vz}(x,y)$, il est possible de combiner le résultat de mesures de répartition longitudinale et impulsionnelle réalisées aux paragraphes précédents. En effet, les effets aérodynamiques se marquent principalement sur les essais de répartition transversale tandis que les effets balistiques se marquent principalement sur les essais impulsionnels.

Pour combiner les résultats de ces deux types d'essais en vue d'obtenir une distribution bidimensionnelle à une vitesse déterminée, trois étapes sont nécessaires:

- Dans un premier temps le débit de la buse est multiplié par la fréquence relative de la répartition transversale mesurée lors d'un essai à vitesse constante, ce qui permet d'obtenir une distribution transversale dynamique. Soit la fréquence relative $Dt_{vz}(y)$ de la distribution transversale obtenue à partir d'une mesure de la répartition transversale à vitesse et hauteur constantes $Rt_{vz}(y)$,

$$Dt_{vz}(y) = \frac{Rt_{vz}(y)}{\sum Rt_{vz}(y)} \quad (7.1)$$

Avec $Rt_{vz}(y)$: répartition transversale mesurée (ml/m²)

Le débit de la buse multiplié par la fréquence relative permet de calculer une distribution dynamique transversale $dt_{vz}(y)$.

$$dt_{vz}(y) = q * d_{vz}(y) \quad (7.2)$$

avec q : débit de la buse (ml/s).

- Dans un deuxième temps, la mesure correspondant à la même vitesse de la répartition longitudinale de la buse $Rl_{vz}(x,y)$ mesurée au point 7.1.2 au moyen de la buse PWM permet de calculer la fréquence relative longitudinale $dl_{vz}(x,y)$ pour chaque valeur de y .

$$dl_{vz}(x, y) = \frac{Rl_{vz}(x, y)}{\int_{-\infty}^{+\infty} Rl_{vz}(x, y) dx} \quad (7.3)$$

avec $Rl_{vz}(x,y)$: distribution longitudinale de la buse (ml/m²).

- Pour terminer, chacun des points de la distribution transversale est multiplié par la fréquence relative longitudinale à l'ordonnée correspondante pour obtenir la distribution dynamique

bidimensionnelle à une hauteur et une vitesse déterminée $D_{vz}(x,y)$, ce qui s'exprime par la convolution suivante:

$$D_{vz}(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} dt_{vz}(y) \cdot dl_{vz}(x - \xi, y) d\xi \quad (7.4)$$

avec ξ , une variable de balayage spatial selon l'axe x

Cette méthode hybride implique que l'on néglige certains effets aérodynamiques sur la distribution longitudinale. Des essais du type fonction de réponse en fréquence auraient pu éviter de recourir à cette simplification mais leur mise en œuvre est très lourde en l'absence de méthode rapide de mesure de la répartition.

Si en pratique la vitesse varie de manière continue, les impératifs du calcul numérique nécessitent de discrétiser la vitesse en classes pour lesquelles la distribution est considérée constante. La variabilité de la répartition observée lors des différents essais implique que le nombre de classes peut être limité. Sur base des mesures de répartition, les classes de vitesse suivantes sont retenues (m/s) : [0-0,2[, [0,2-0,4[, [0,4-0,6[, [0,6-0,75[, [0,75-1,25[, [1,25-1,75[, [1,75-2,25[. Les répartitions transversales mesurées aux vitesses centrales de classe sont combinées aux distributions longitudinales correspondantes qui sont soit mesurées pour 0,1, 0,5, 1, 1,5 et 2 m/s, soit interpolées pour 0,3 et 0,7 m/s.

L'équation 6.14 est utilisée pour l'interpolation entre les différentes hauteurs avec une résolution de 50 mm.

7.2 Evaluation du modèle

De même manière qu'au chapitre précédent, les différentes mesures de la répartition sont comparées aux résultats de la modélisation, cette fois sur la base de distributions dynamiques.

7.2.1 Vitesse constante

La Figure 7.15. présente le résultat de la simulation d'un mouvement rectiligne à vitesse constante de 1 m/s. La couleur de chaque carré de 2500 mm² de côté représente le taux d'application simulé. La position des échantillons lors de la mesure de répartition de l'essai correspondant est indiquée par une croix jaune entourée d'un cercle bleu. Le taux d'application est uniforme selon l'axe x en raison de la vitesse d'avancement constante. La répartition transversale est liée à la distribution transversale de la buse.

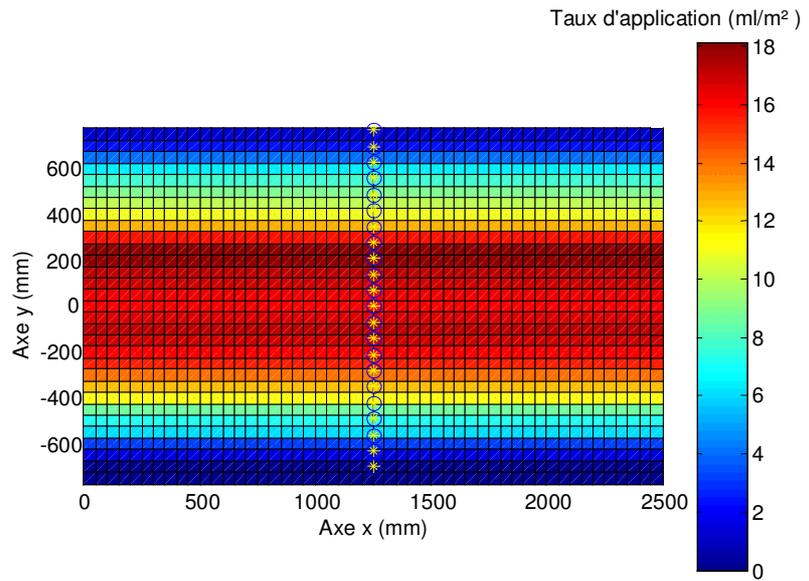


Figure 7.15. : Répartition calculée par le modèle de répartition pour $v=1\text{m/s}$ et $h=50\text{cm}$.

La Figure 7.16. présente les taux d'application modélisé et le taux d'application moyen mesuré pour les trois répétitions. De faibles différences apparaissent au niveau de la forme de la répartition mais elle sont peu importantes en regard de celles qui existent entre répétitions de différentes mesures de répartition. Ceci a été confirmé par une analyse de la variance à deux dimensions qui montre que les différences entre les mesures ne sont significatives qu'en fonction de la position selon l'axe y.

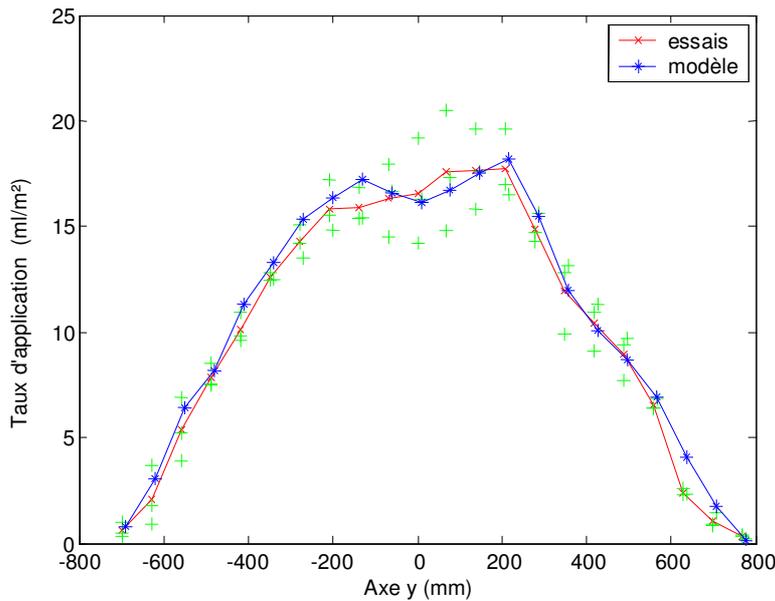


Figure 7.16. : Comparaison de la répartition transversale calculée par le modèle avec la répartition transversale moyenne mesurée pour $v=1\text{m/s}$ et $h=50\text{cm}$.

Il est logique que l'écart soit faible, dans la mesure où la distribution dynamique est calculée à partir d'une mesure de répartition à vitesse constante mesurée de la même manière que les essais de validation. La principale source de variation provient donc de la variabilité de la distribution. Les différents traitements mathématiques appliqués lors du calcul de la distribution dynamique ne semblent pas affecter la qualité du résultat de la modélisation. En effet, la

Figure 7.17. montre clairement que la répartition modélisée est très proche de la répartition utilisée lors du calcul de la distribution.

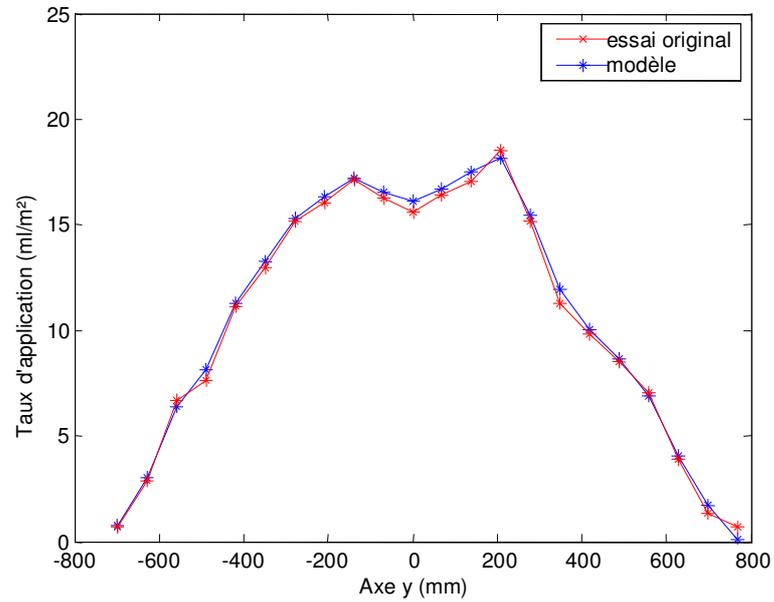


Figure 7.17. : Comparaison de la répartition transversale calculé par le modèle avec la répartition transversale de l'essai original pour $v=1m/s$ et $h=50cm$

L'écart E prend pour l'essai présent la valeur de $0,61 ml/m^2$. V est égal à $5,9 \%$, ce qui indique que l'erreur a été réduite de manière drastique du point de vue de la prévision de la forme de la répartition. En effet, ceci correspond à une diminution de l'erreur de plus de 80% par rapport au modèle basé sur la distribution statique. B vaut $1,04$, ce qui montre un léger biais dans le modèle qui correspond à une sous-estimation du débit de la buse. Ceci explique une partie des erreurs observées.

7.2.2 Vitesse variable

La Figure 7.18. présente la position des 140 points d'échantillonnage de l'essai à vitesse variable illustrée par des étoiles jaunes entourées d'un cercle bleu sur fond d'une image des valeurs simulées du taux d'application.

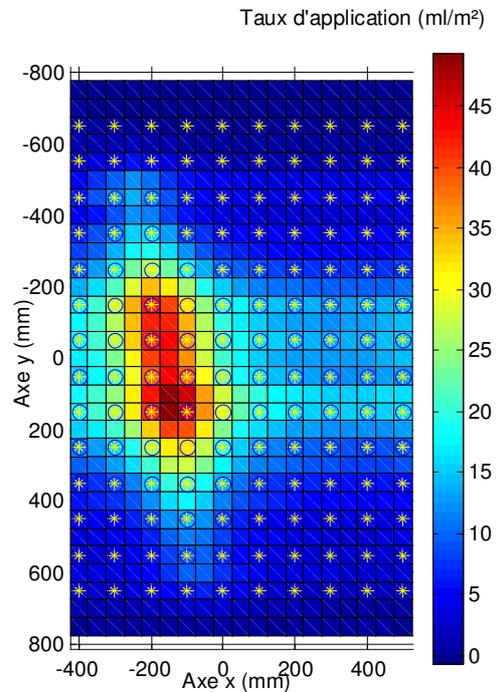


Figure 7.18. : Répartition calculée par le modèle pour $v=1+0,2 \pi \sin(2 \pi t)$ m/s et $h=50\text{cm}$.

La Figure 7.19. présente une comparaison visuelle de la répartition mesurée et modélisée. Elles présentent une allure fort similaire. L'ordre de grandeur des taux d'application est mieux respecté que par l'utilisation d'une distribution statique comme en témoigne l'échelle des deux images.

Il apparaît à la Figure 7.20. que la répartition modélisée présente un étalement similaire à celui mesuré, ce qui montre que la prise en compte de

l'effet de la vitesse dans le calcul de la répartition résout en grande partie le problème rencontré lors de l'utilisation de la distribution statique.

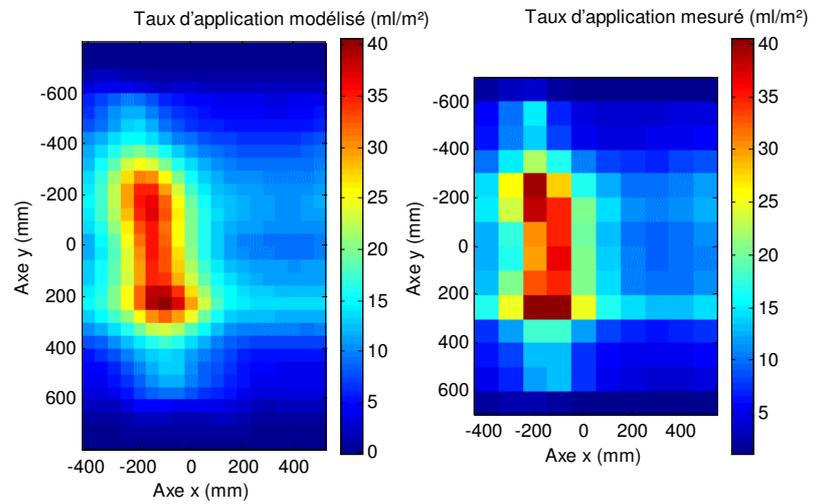


Figure 7.19. : Comparaison de la répartition calculée par le modèle avec la répartition mesurée pour $v=1+0,2 \pi \sin(2 \pi t)$ m/s et $h=50\text{cm}$.

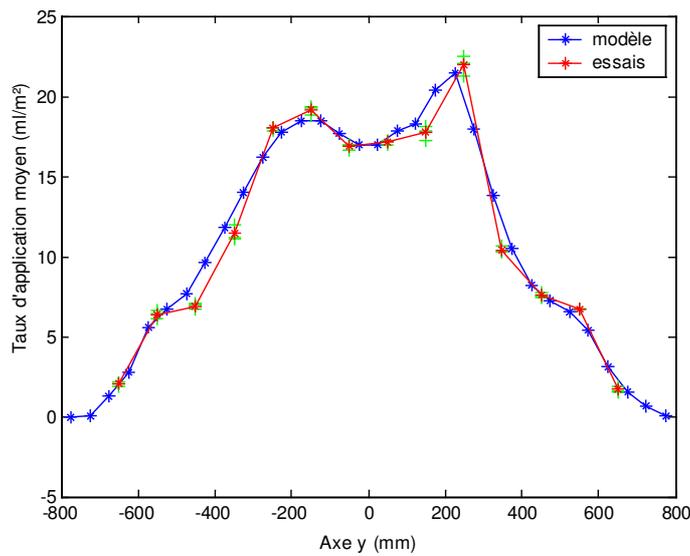


Figure 7.20. : Comparaison de la répartition transversale moyenne calculée par le modèle de répartition avec la répartition mesurée pour $v=1+0,2 \pi \sin(2 \pi t)$ m/s et $h=50$ cm.

L'effet de la variation de vitesse se marque bien sur la modélisation de la répartition longitudinale de la même manière que ce qui est observé pour les mesures. La Figure 7.21. présente la répartition longitudinale modélisée et mesurée (la quantité de bouillie par mètre d'avancement). Le problème de retard de phase observé lors de l'utilisation d'une distribution statique est résolu, voir même légèrement surcompensé. De plus, il apparaît que la répartition modélisée présente une amplitude légèrement moindre que celle mesurée. Cela s'explique par l'étalement des distributions dynamiques qui est supérieur à celui de la distribution statique. Il est possible qu'une partie de l'étalement observé en pulvérisation discontinue n'apparaisse pas en pulvérisation continue par la différence des effets aérodynamiques.

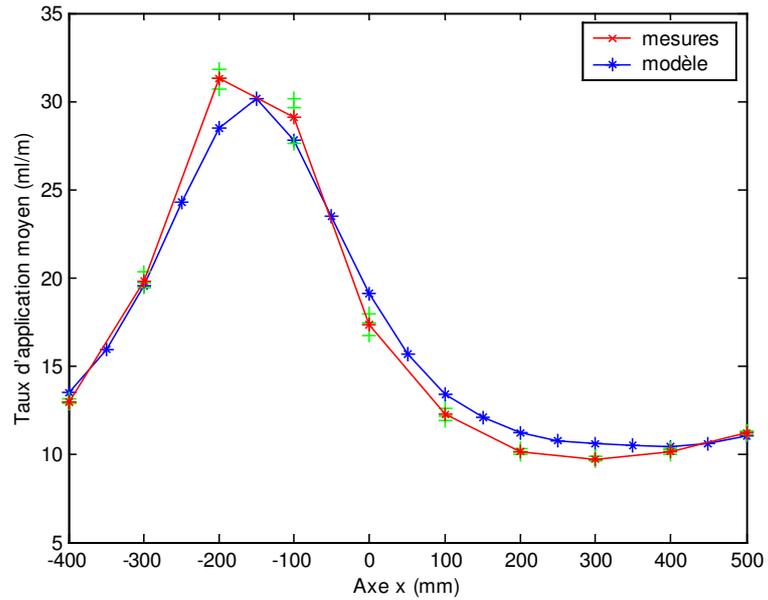


Figure 7.21. : Comparaison de la répartition longitudinale moyenne calculée par le modèle de répartition avec la répartition longitudinale moyenne mesurée pour $v=1+0,2 \pi \sin(2 \pi t)$ m/s et $h=50$ cm.

L'écart E entre modèle et mesures prend ici la valeur de $1,31 \text{ ml/m}^2$, ce qui est supérieur à l'écart observé à vitesse constante mais bien inférieur à ce qui est observé sur base d'une distribution statique. La valeur de V atteint $11,1 \%$. Le paramètre B prend quant à lui la valeur de $1,00$ qui montre une absence de biais du modèle.

Lorsqu'on observe la répartition spatiale des erreurs du modèle, il apparaît clairement que les plus fortes erreurs sont concentrées au niveau des plus hauts taux d'applications.

7.2.3 Hauteur variable

La Figure 7.22. présente la position des 138 points d'échantillonnage de l'essai à hauteur variable illustrée par des étoiles jaunes entourées d'un cercle bleu sur fond d'une image des valeurs simulées du taux d'application. La première colonne de mesures située à gauche, correspond à une hauteur de 700 mm. Les colonnes suivantes correspondent à des hauteurs dégressives par pas de 50 mm jusqu'à 300 mm en $x = 2400$ mm. L'intervalle d'échantillonnage est progressivement réduit pour suivre le rétrécissement de la répartition transversale avec la hauteur.

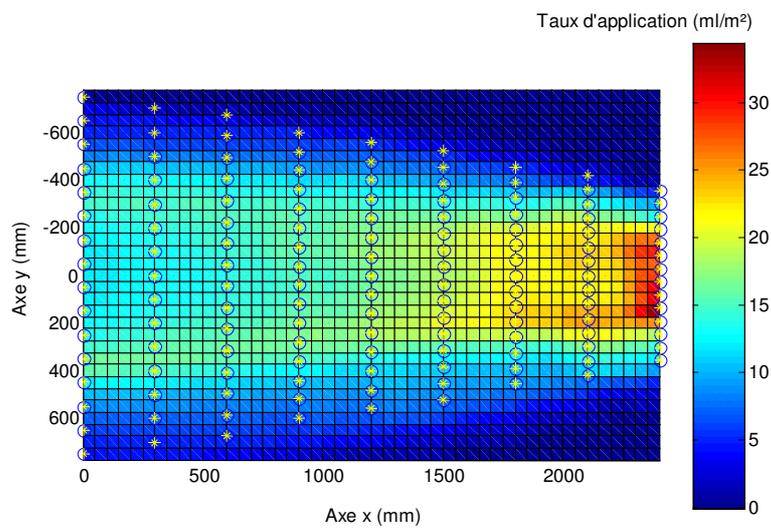


Figure 7.22. : Répartition calculée par le modèle pour $v=1\text{m/s}$ et h variant linéairement de 700 à 300 mm.

La Figure 7.23. présente une comparaison visuelle des répartitions mesurées et modélisées. Le taux d'application modélisé est en moyenne légèrement supérieur au taux d'application mesuré. Les répartitions mesurées et modélisées présentent pour le reste une allure similaire.

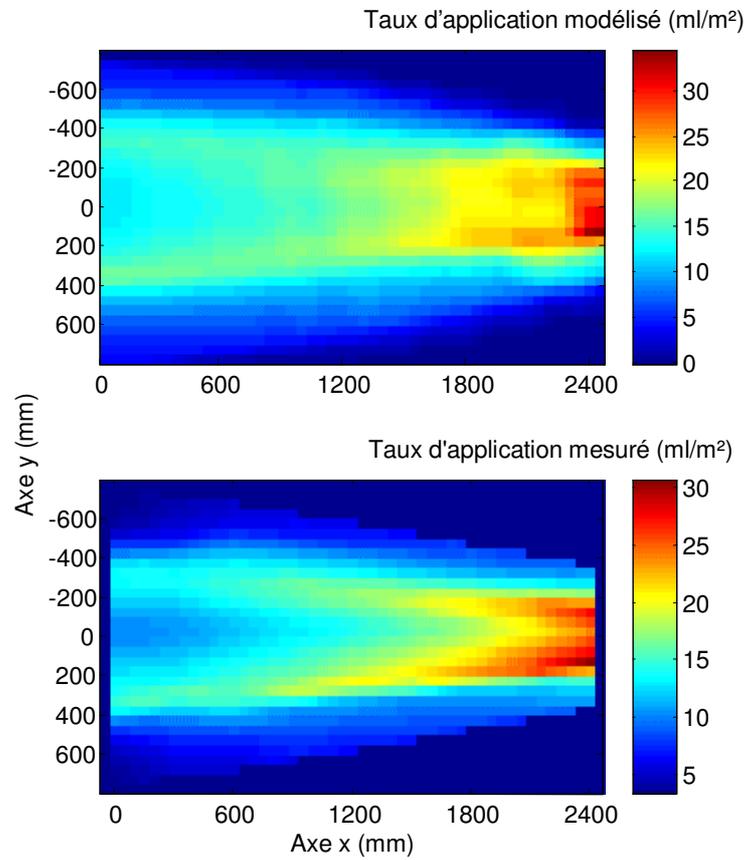


Figure 7.23. : Comparaison de la répartition calculée par le modèle avec la répartition mesurée pour $v=1\text{m/s}$ et h variant linéairement de 700 à 300 mm.

La Figure 7.24. présente une image des différences dans le plan entre les taux d'application modélisés et les taux d'application mesurés. La zone de couleur bleu foncé uniforme est en-dehors de la zone de mesure. Les écarts sont principalement positifs, ce qui confirme une légère surestimation du taux d'application par le modèle. Les zones de sous-estimation sont concentrées, ce qui peut s'expliquer par de légères différences entre la distribution de la buse utilisée pour la modélisation et la distribution effective de la buse lors des essais. L'intervalle de 50 mm choisi pour discrétiser le modèle ne semble pas affecter de manière importante la qualité du résultat de la simulation.

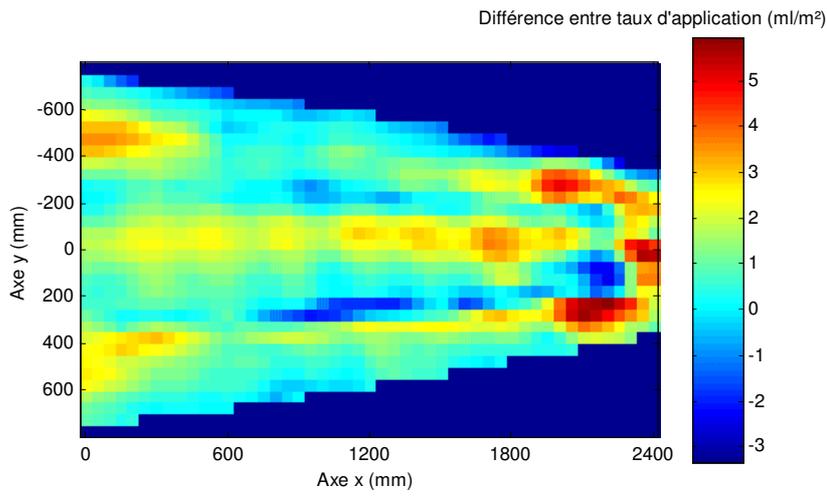


Figure 7.24. : Différence entre la répartition calculée par le modèle et la répartition mesurée pour $v=1\text{m/s}$ et h variant linéairement de 700 à 300 mm.

Du point de vue quantitatif, l'écart E entre modèle et mesures prend ici la valeur de $1,51\text{ ml/m}^2$, ce qui correspond à une diminution de plus de 55 % par rapport à la modélisation sur base de la distribution statique. De même, le critère V descend à 11,5 %. Ce résultat est proche de celui obtenu pour l'essai à vitesse variable. Le paramètre B prend quant à lui la valeur de 1,086. Ceci indique une surestimation moyenne de l'ordre de 8 % du taux d'application par le modèle. C'est cette surestimation qui explique en grande partie les écarts observés.

7.3 Interprétation et conclusion

La distribution dynamique, qui est mesurée au cours du mouvement de la buse, se différencie de la distribution statique mesurée au banc de répartition en raison d'effets balistiques et aérodynamiques. Elle est calculée à partir de mesures de répartition transversale et longitudinale. La répartition transversale est mesurée pour des vitesses constantes comprises entre 0,1 et 2 m/s. Elle est affectée par la vitesse qui induit une modification progressive de forme. Elle présente une répartition bimodale proche de la répartition transversale statique pour les plus basses vitesses et tend vers une répartition bimodale de plus en plus marquée par une déplétion progressive dans la zone centrale à mesure que la vitesse augmente. La répartition longitudinale, mesurée à partir d'essais impulsionsnels pour des vitesses constantes comprises entre 0,1 et 2 m/s, montre un décalage progressif selon le sens d'avancement avec l'augmentation de la vitesse.

L'utilisation d'une distribution dynamique en lieu et place d'une distribution statique pour modéliser le processus de répartition permet d'améliorer de manière importante la qualité de la prédiction pour les trois essais.

Pour l'essai à vitesse et hauteur constantes, la réduction de l'erreur atteint 80% tandis que pour l'essai à vitesse variable et hauteur constante ainsi que l'essai à vitesse constante et hauteur variable, elle dépasse 55%. Les écarts résiduels ont notamment pour origines les interpolations réalisées, la résolution du modèle et la variabilité de la distribution. Cette dernière est la cause principale de l'erreur résiduelle, ce qui laisse peu de marge pour améliorer davantage la précision du modèle. Ceci n'est par ailleurs pas pertinent en regard de la variabilité importante observée lors des trois répétitions de chaque essai. En effet la variabilité de la distribution de la buse observée au chapitre 3 est du même ordre de grandeur. Il apparaît que la méthode proposée permet d'estimer la répartition d'une buse en conditions dynamiques à une dizaine de pourcents près.

CHAPITRE 8

EVALUATION DE LA REPARTITION EN CONDITIONS REELLES

Le chapitre précédent propose un modèle permettant de prédire la répartition dynamique sous une buse, compte tenu des mouvements de cette dernière. L'objectif de ce chapitre est de mettre ce modèle en œuvre, de manière à estimer la répartition du taux d'application au cours de traitements réalisés par un pulvérisateur à vitesse constante.

Pour obtenir une certaine diversité des sollicitations appliquées au pulvérisateur, trois conditions de terrain différentes sont testées : champ de froment (stade maturation), prairie permanente courte (10 cm) et champ de chicorée (stade 6 à 9 feuilles). Les essais ont été réalisés au début du mois de juillet sur des terrains présentant de faibles pentes. Pour les deux premiers le sol était sec et dur et pour le dernier il était légèrement meuble. Pour les deux essais sur champ, la trajectoire suivie était celle du semoir et des précédents traitements phytosanitaires. Les mouvements des buses sont estimés à partir de mesures des mouvements de rampe, réalisées à l'aide d'un ensemble de capteurs. Une estimation de la répartition est calculée en sommant la contribution de 36 buses à fente XR11003VK Teejet à deux bars.

8.1 Estimation de la trajectoire des buses

8.1.1 Introduction

La mesure des mouvements de rampes de pulvérisation est un domaine qui reste sujet à controverses après des années de recherches. Malgré une demande très forte pour une standardisation, chaque laboratoire actif dans le domaine de la pulvérisation dispose actuellement d'une méthode qui lui est

propre. Les méthodes peuvent être scindées en mesures de mouvements relatifs et en mesures de mouvements absolus.

Les méthodes relatives mesurent les mouvements de la rampe par rapport à un référentiel qui peut être soit lié à la terre, soit au véhicule. Un exemple de méthode à référentiel terrestre est décrit par Vanucci *et al.* [1992] qui proposent une méthode utilisant un distance-mètre laser posé au sol, dont le faisceau tournant permet de mesurer à une fréquence de 20 Hz et sur une distance de 5 mètres la position d'une cible rétro-réfléchissante fixée sur la rampe de pulvérisation. Une méthode similaire est utilisée par de Jong *et al.* [2000]. Citons encore une méthode développée par le CEMAGREF qui utilise l'enregistrement de la trajectoire de l'extrémité de la rampe par une caméra à poste fixe pour mesurer les mouvements par analyse d'images [Lardoux *et al.*, 1998]. Ces méthodes ont l'avantage d'être précises mais la longueur d'essai est limitée. Les méthodes où le référentiel est lié au véhicule permettent de dépasser cette limitation. Il s'agit de mesurer la trajectoire du véhicule tout en mesurant les mouvements de la rampe par rapport au véhicule. Pochi [2002] propose une méthode basée sur ce principe faisant appel à des potentiomètres à filin. Une méthode de mesure des mouvements horizontaux de rampe par télémétrie laser a été développée au laboratoire de Mécanique agricole de la FUSAGx [Lebeau & Destain, 1998]. Des distance-mètres, tant laser qu'à infrarouges ou ultrasons, sont également couramment utilisés pour mesurer la hauteur de la rampe par rapport au terrain.

La méthode mesurant le mouvement des rampes de manière absolue se base sur l'intégration de signaux accélérométriques. Utilisée très tôt [Ganzelmeier & Moser 1977; Nation, 1978], cette méthode présente l'avantage de permettre des mesures en continu sur de longues distances. Elle s'avère toutefois délicate à mettre en œuvre pour la mesure des déplacements verticaux qui nécessitent une double intégration des signaux. En effet, les phénomènes de dérive à basse fréquence inhérents aux capteurs accélérométriques sont amplifiés de manière importante par la double intégration. Dans le plan horizontal, par

contre, leur utilisation s'avère plus intéressante dans la mesure où les mouvements de rampe sont de plus hautes fréquences que dans le plan vertical et la variable à mesurer est la vitesse de rampe plutôt que son déplacement. La sensibilité des capteurs aux modifications de pente longitudinale est un autre problème qui peut être minimisé en fusionnant le signal de plusieurs capteurs [Lebeau & Destain, 2000].

8.1.2 Chaîne de mesure

Sur base des différentes techniques, une chaîne de mesure des mouvements de rampe a été développée au sein du laboratoire. Son objectif est de permettre des mesures en continu des mouvements de la rampe sur le terrain. A cette fin, les signaux de plusieurs capteurs ont été fusionnés dans l'objectif de reconstituer le mouvement absolu de la rampe par rapport au terrain.

La chaîne de mesure montée sur un pulvérisateur porté est schématisée à la Figure 8.1. Un tachymètre radar (RGSS-201, Philips Automotive Electronics Co.) est fixé au tracteur pour mesurer sa vitesse d'avancement. Il génère une impulsion par 7,8125 mm parcouru. Un capteur (DMU-VG, Crossbow Technology) monté sur le châssis du pulvérisateur mesure les vitesses de rotation absolues de -100 à $+100$ °/s autour de trois axes orthonormés (x,y,z) ainsi que les accélérations linéaires selon ces trois axes (de -20 à $+20$ m/s²). Deux capteurs ultrasons sont montés sur la rampe (US) horizontalement pour mesurer le mouvement de la rampe par rapport au châssis du pulvérisateur. La gamme de mesure des capteurs ultrasons (Turck Banner T30UUPAQ) est comprise entre 150 et 1000 mm. Des cibles adaptées sont attachées au châssis du pulvérisateur. Cinq accéléromètres triaxiaux (AC) sont montés sur la rampe pour mesurer ses mouvements en différents points. Un premier, dont la sensibilité est de 500 mV/(10m/s²) et dont la gamme va de -40 à $+40$ m/s² (CXL04M3, Crossbow Technology), est monté au centre du tronçon central, deux autres du même type sont fixés à l'extrémité des premiers tronçons. A l'extrémité des seconds tronçons, avant le dispositif d'évitement, deux accéléromètres de

1000 mV/(10m/s²) de sensibilité et de -20 à + 20 m/s² de gamme (CXL02M3, Crossbow Technology) sont installés. Deux distance-mètre infrarouges (IR) sont disposés à l'extrémité des seconds tronçons pour mesurer la hauteur de rampe par rapport au terrain. Ces capteurs (Wenglor HT77MVG80) qui ont une gamme de mesure allant jusqu'à 1300 mm sont peu sensibles à l'état de surface de la cible.

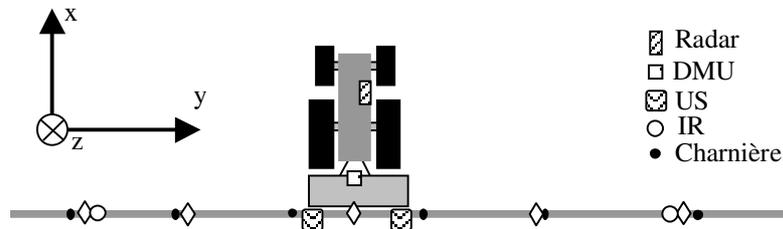


Figure 8.1. : Disposition des capteurs pour la mesure des mouvements de rampe.

Les capteurs ont été calibrés pour valider les relations entre le signal délivré et la grandeur physique mesurée. De plus, les performances dynamiques des capteurs ont été validées dans leur gamme utile.

Le dispositif d'acquisition du signal est schématisé à la figure 8.2.

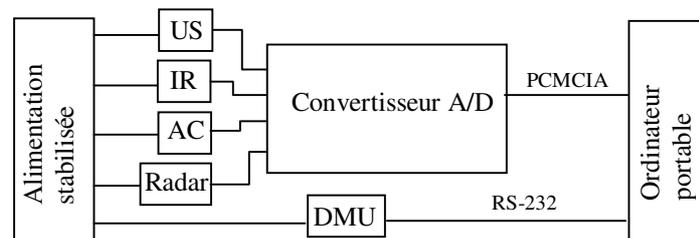


Figure 8.2. : Dispositif d'acquisition du signal.

Les différents capteurs sont alimentés en tension stabilisée à partir d'une batterie. Les signaux fournis par les capteurs analogiques sont dirigés vers un convertisseur analogique / digital (DAQCard-AI-16E-4, National Instruments). La carte PCMCIA est logée dans un ordinateur portable (Toughbook CF-71, Panasonic). Les données transmises par le DMU sont acquises via le port série

du même ordinateur. L'acquisition des signaux est gérée au moyen d'une application développée sous Labview (National Instruments). Les signaux analogiques sont acquis à une fréquence de 1000 Hz.

8.1.3 Traitement du signal

Le traitement du signal a pour objet de générer les entrées du modèle à partir des mesures de terrain. Le traitement du signal est réalisé en plusieurs étapes. Il peut être scindé en mouvements horizontaux et mouvements verticaux.

a) *Mouvements horizontaux*

La mesure des mouvements horizontaux recourt à une technique de fusion de capteurs. En effet, si en théorie la double intégration du signal accélérométrique fournit le déplacement absolu de la rampe, en pratique le signal est bruité dans les basses fréquences. La méthode proposée décompose le mouvement horizontal en trois composantes qui sont mesurées individuellement puis fusionnées par simple addition pour obtenir le mouvement absolu de la rampe. La procédure complète est détaillée et validée par Ooms *et al.* [2002]

- Mouvements de rampe de fréquences supérieures à 0,2 Hz

Dans un premier temps, la composante linéaire est soustraite du signal accélérométrique. La mesure est ensuite filtrée en enlevant les composantes de fréquences inférieure à 0,2 Hz de la transformée de Fourier du signal. Pour terminer, une double intégration permet de calculer le déplacement aux fréquences supérieures à 0,2 Hz.

- Mouvements relatifs rampe/châssis de fréquences inférieures à 0,2 Hz

Dans un premier temps, la composante linéaire est soustraite du signal des ultrasons. La mesure est ensuite filtrée en enlevant les composantes de fréquences supérieures à 0,2 Hz de la transformée de Fourier du signal. Pour terminer, le déplacement en un point de la rampe est calculé

par interpolation linéaire en fonction de la distance par rapport au centre de la rampe.

- Mouvements du châssis de fréquences inférieures à 0,2 Hz

Ce mouvement est calculé sur base des mesures du capteur DMU et du tachymètre radar. Il combine l'information issue de ces deux capteurs.

Dans un premier temps, la composante linéaire est soustraite de la mesure de la vitesse de rotation autour de l'axe z par le DMU. Cette mesure est ensuite filtrée en enlevant les composantes de fréquences supérieures à 0,2 Hz de la transformée de Fourier du signal. L'angle de lacet du châssis est calculé par intégration du signal et finalement le déplacement en un point de la rampe est calculé par interpolation linéaire en fonction de la distance par rapport au centre de la rampe.

Le signal du Radar est utilisé pour calculer le déplacement du châssis selon l'axe x . Le signal est filtré en enlevant les composantes de fréquences supérieures à 0,2 Hz de la transformée de Fourier du signal.

Comme il a été dit au point 8.1.2, les mesures sont réalisées en 5 points sur la rampe. La trajectoire individuelle des buses est estimée par interpolation linéaire. Le temps passé par les différentes buses dans des intervalles successifs de 50 mm est calculé pour servir d'entrée au modèle.

b) Mouvements verticaux

Les mouvements verticaux sont calculés sur base des signaux fournis par les deux capteurs infrarouges. L'état de surface de la culture conditionne fortement la qualité des mesures infrarouges. La culture la plus représentative des difficultés de mesure de hauteur sur le terrain a été rencontrée sur le blé mature. Le capteur mesure une distance comprise entre le sol et le sommet de la frondaison en fonction de la densité de la culture sous celui-ci. Le signal qui en résulte est fortement bruité. Dans notre application, la hauteur par rapport au sommet de la frondaison sert de référence. Pour calculer cette hauteur, un

premier traitement calcule la valeur moyenne des trois distances minimales par mètre de distance. Cela permet de limiter les composantes supérieures à un cycle par mètre qui ne peuvent provenir de variations de hauteur de la rampe. Un second traitement constitué d'un filtre passe-bas permet ensuite d'éliminer les composantes supérieures à 1 Hz. En effet, l'amplitude importante des variations de distance à des fréquences supérieures à 1 Hz ne peuvent être mises sur le compte de mouvements de la rampe. L'information fournie par un accéléromètre orienté selon l'axe z permet de le confirmer. La Figure 8.3. montre qu'à proximité de l'emplacement du capteur infrarouge les déplacements de plus de 1 Hz sont limités à une dizaine de millimètres d'amplitude.

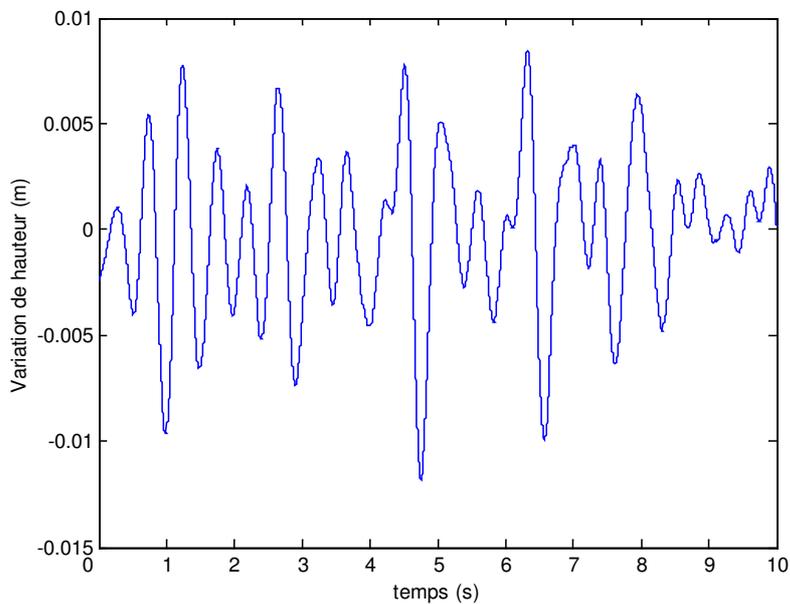


Figure 8.3. : Mouvements verticaux de la rampe de fréquences supérieures à 1 Hz à proximité de l'emplacement du capteur infrarouge sur froment.

La Figure 8.4 présente un exemple de l'effet des traitements sur le signal brut. La courbe bleue présente le signal brut, le traitement intermédiaire est en rouge et le signal final en vert. Comme le sommet de la frondaison sert de référence, le signal final est en moyenne inférieur au signal brut.

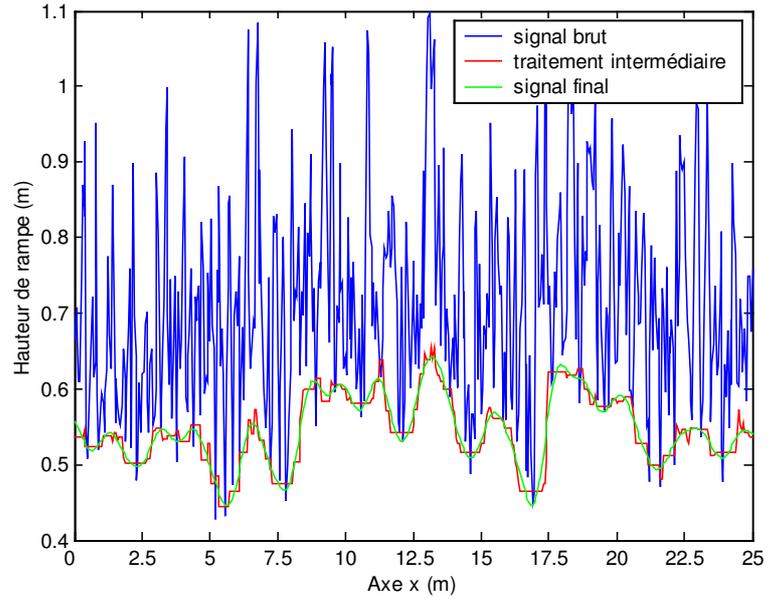


Figure 8.4. : Exemple de traitement du signal infrarouge pour mesurer la hauteur de rampe par rapport à la frondaison .

La filtration choisie permet bien d'obtenir en moyenne la hauteur de consigne réglée lors de l'essai, à savoir 550 mm et limite très fortement l'amplitude des mouvements au-dessus de 1 Hz.

Les hauteurs des différentes buses de la rampe dans les intervalles successifs de 50 mm sont calculées par interpolation sur base de l'équation de la droite passant par les deux points de mesure. Cette interpolation par deux points qui considère la rampe suspendue comme un corps rigide dans le plan vertical justifie également de limiter les déplacements mesurés au dessus de 1 Hz. En effet, les mouvements verticaux en corps rigide de la rampe sont nécessairement d'amplitudes limitées pour les fréquences fortement supérieures à la fréquence propre. Pour les pulvérisateurs actuels, cette fréquence est comprise entre 0,1 et 0,2 Hz.

8.2 Modélisation de la répartition

8.2.1 Introduction

La répartition est modélisée pour trois essais de terrain réalisés avec un pulvérisateur porté Delvano 1000 litres équipé d'une rampe HDL de 18 mètres de large, munie d'une suspension trapèze. Des mesures sur quelques centaines de mètres de longueur, lorsque la vitesse est stabilisée aux environs de 1,5 m/s, sont utilisées pour les trois terrains : champ de froment, de chicorée et prairie. La trajectoire des 36 buses est calculée indépendamment. Les taux d'application générés par chaque buse sont calculés par le modèle avec une résolution spatiale de 25 cm². Les différentes répartitions sont sommées afin de calculer la répartition globale. Les valeurs moyennes et le coefficient de variation de la répartition sont calculés sur la zone de pulvérisation complètement couverte par les jets, conformément aux recommandations de la norme ISO 5682/2 [Anon., 1997].

8.2.2 Répartition sur froment

Les fluctuations de vitesse des buses dans le champ sont présentées à la Figure 8.5. Si dans la partie centrale ($y = 0$) de la rampe, les buses ont une vitesse très proche de la vitesse moyenne de 1,5 m/s, un écart important apparaît et s'affirme à mesure que l'on s'écarte du centre. L'écart maximum est plus important pour les hautes vitesses que les faibles. Cela s'explique par une légère asymétrie de la distribution des vitesses de buse qui traduit un comportement asymétrique de la structure de la rampe. En effet, cette rampe présente au niveau de ses articulations une butée vers l'arrière tandis qu'elle est seulement munie d'un ressort de blocage vers l'avant.

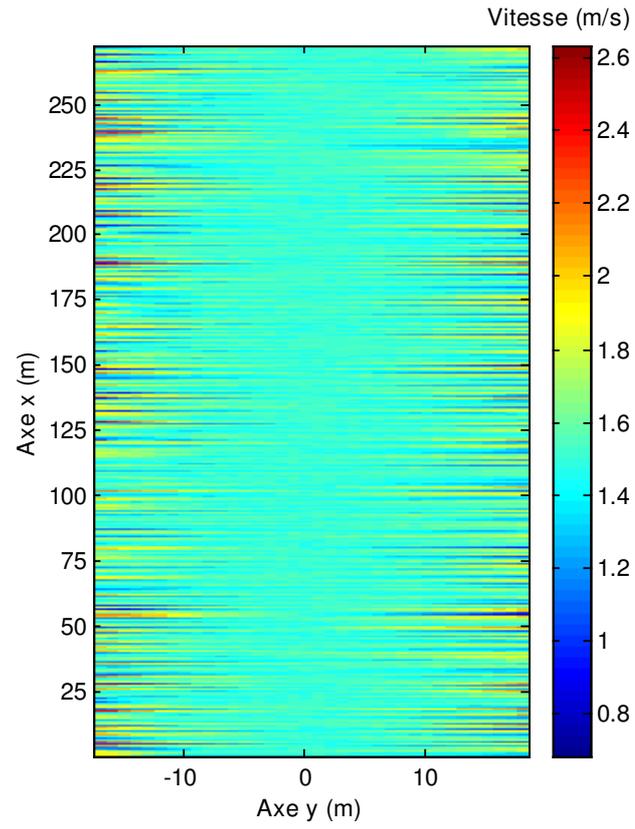


Figure 8.5. : Fluctuations des vitesses des buses dans le champ de froment.

La Figure 8.6 présente les fluctuations de hauteur de rampe par rapport au sommet de la frondaison. La hauteur moyenne lors de cet essai était de 610 mm. A la différence de ce que l'on observe pour les vitesses, les variations de hauteur sont présentes jusque dans les très basses fréquences. La rampe était en moyenne plus basse à gauche qu'à droite, ce qui correspond à un mauvais réglage de la position d'équilibre de la suspension de la rampe.

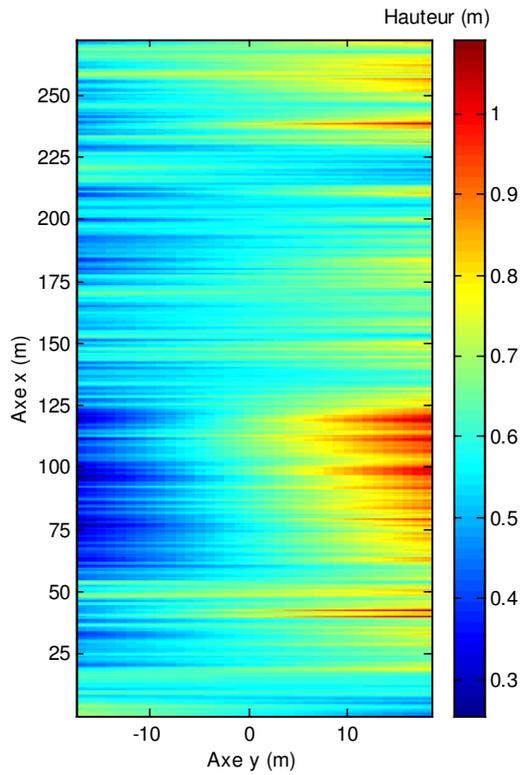


Figure 8.6. : Fluctuations des hauteurs des buses dans le champ de froment.

La répartition calculée sur base des vitesses et hauteurs des buses est présentée à la Figure 8.7. Le taux d'application moyen vaut 21,78 ml/m² et le coefficient de variation de la répartition vaut 9,22%.

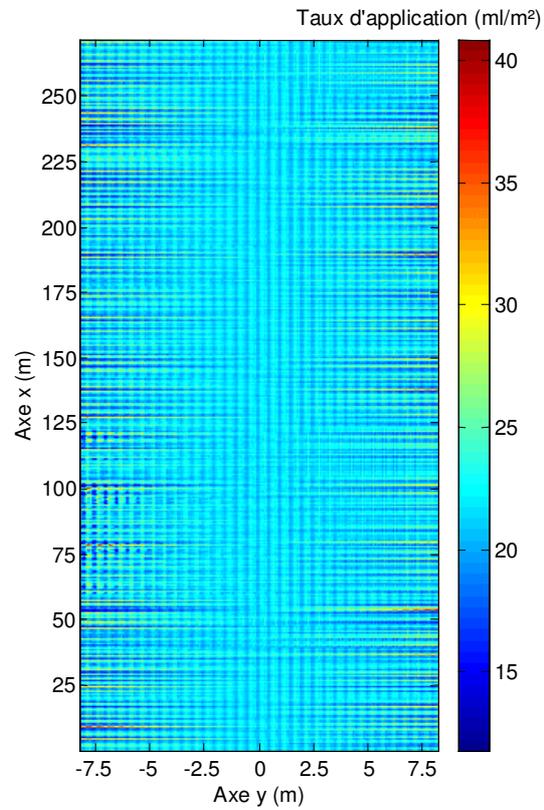


Figure 8.7. : Répartition modélisée pour le champ de froment.

La Figure 8.8. présente une image orthonormée (axes orthogonaux et de même échelle) de la répartition modélisée pour les 25 premiers mètres de l'essai (selon l'axe x). Cette zone correspond à une partie de l'essai où la rampe est relativement horizontale. L'effet des mouvements horizontaux de la rampe se marque très clairement. Particulièrement, le lacet se traduit par des variations de répartition longitudinale en déphasage entre la gauche et la droite du pulvérisateur. A cette hauteur, le recouvrement imparfait des jets des buses voisines se marque également sur la répartition.

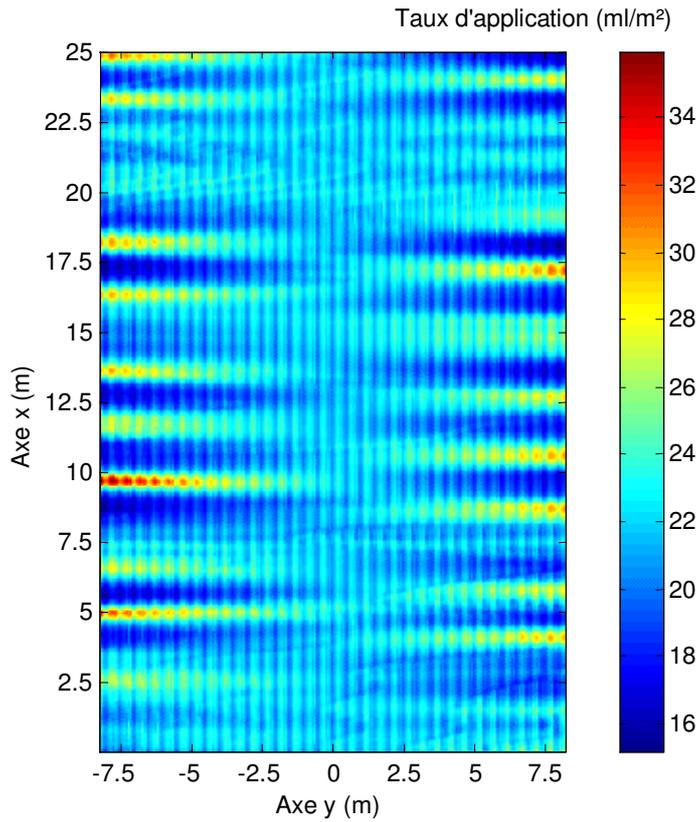


Figure 8.8. : Répartition modélisée pour le champ de froment (orthonormé).

La Figure 8.9 présente l'histogramme du taux d'application dans le champ de froment. Il présente une distribution unimodale en cloche.

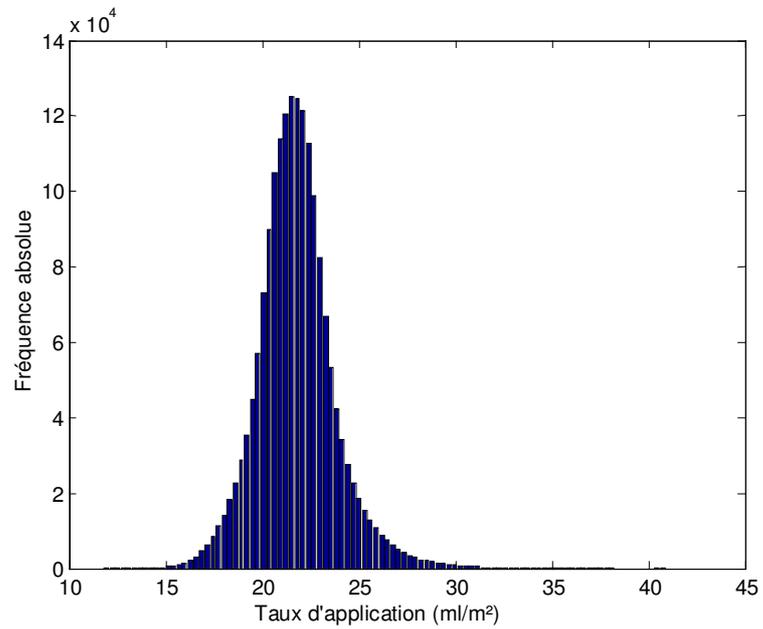


Figure 8.9. : *Histogramme des taux d'application pour le champ de froment.*

8.2.3 Répartition sur prairie

Les fluctuations de vitesse des buses sont présentées à la Figure 8.10. Le comportement est similaire à celui que l'on a observé sur froment, c'est-à-dire que les buses situées au centre de la rampe ont une vitesse très proche de la vitesse moyenne (1,35 m/s), la variabilité autour de cette vitesse augmente à mesure que l'on s'écarte du centre et l'écart maximum est plus important pour les hautes vitesses que les faibles.

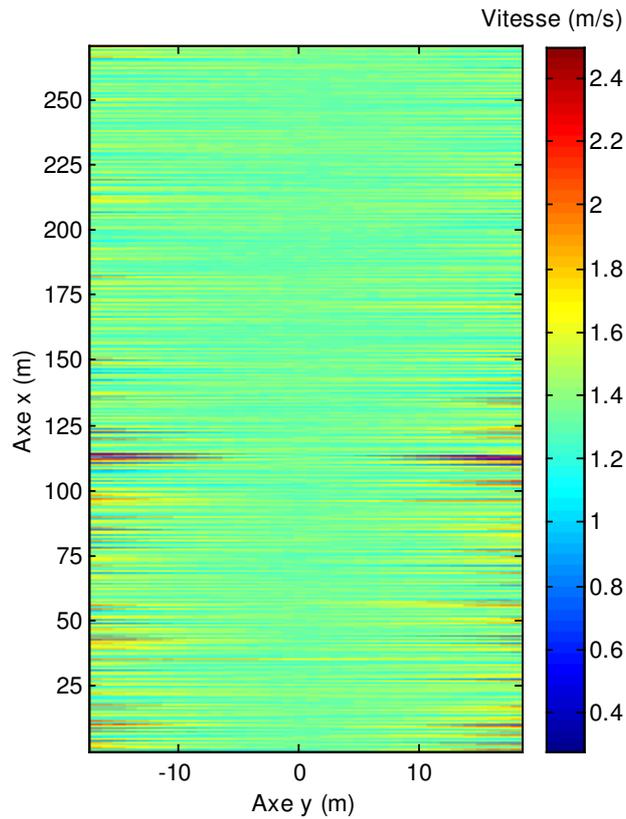


Figure 8.10. : Fluctuations des vitesses des buses dans la prairie.

La Figure 8.11. présente les variations de hauteur de rampe par rapport au sommet de la frondaison. La hauteur moyenne lors de cet essai était de 670 mm. Les variations de hauteur sont à nouveau présentes jusque dans les très basses fréquences. La rampe était en moyenne plus haute à gauche qu'à droite, ce qui confirme le mauvais suivi de pente par la suspension de la rampe.

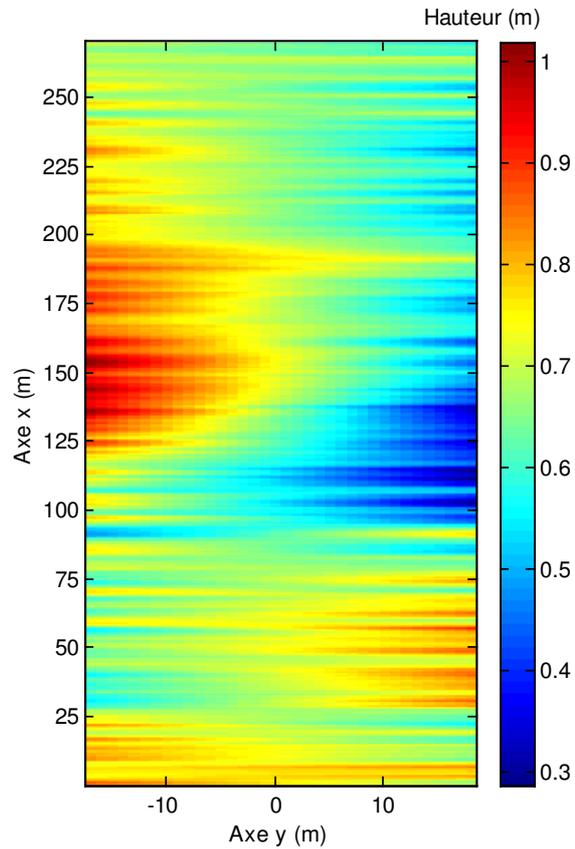


Figure 8.11. : Fluctuations des hauteurs des buses dans la prairie.

La répartition calculée sur base des vitesses et hauteurs des buses est présentée à la Figure 8.12. Le taux d'application moyen vaut 24,39 ml/m² et le coefficient de variation de la répartition vaut 9,85 %. Ces valeurs sont toutes deux supérieures à celles simulées sur le champ de froment. De plus, des maxima de plus grande amplitude sont observés (jusqu'à 65 ml/m²). Ils atteignent près de trois fois le taux d'application moyen, à des endroits où les effets de faibles hauteur et vitesse de rampe se combinent.

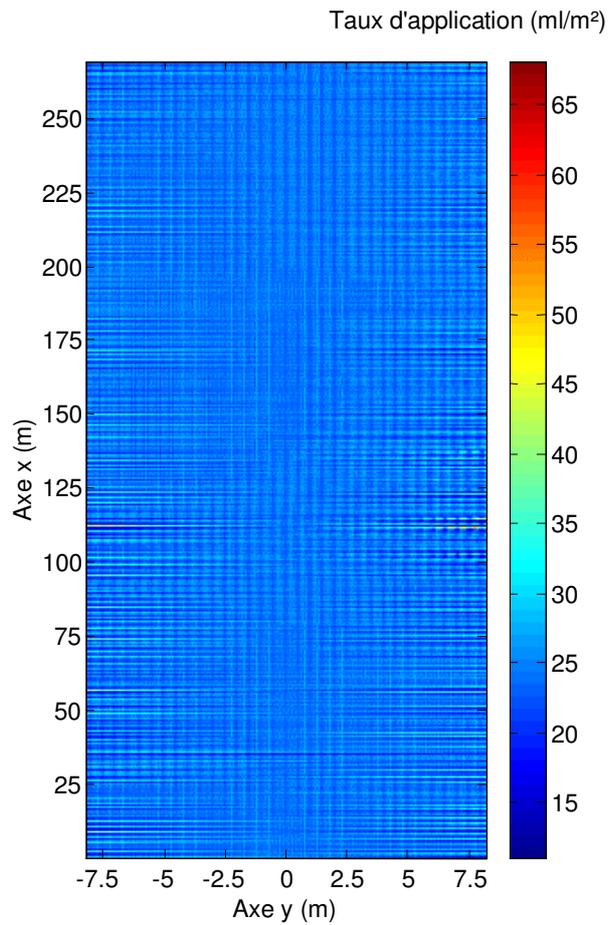


Figure 8.12. : Répartition modélisée pour la prairie.

La Figure 8.13. présente une image orthonormée de la répartition modélisée pour les 25 premiers mètres de l'essai (selon l'axe x). L'effet des mouvements horizontaux de la rampe se marque à nouveau très clairement, particulièrement le lacet. En raison de la hauteur de rampe et des importantes variations de vitesse de la rampe, la répartition est plus affectée par ces dernières que par le recouvrement incomplet des jets de buses voisines.

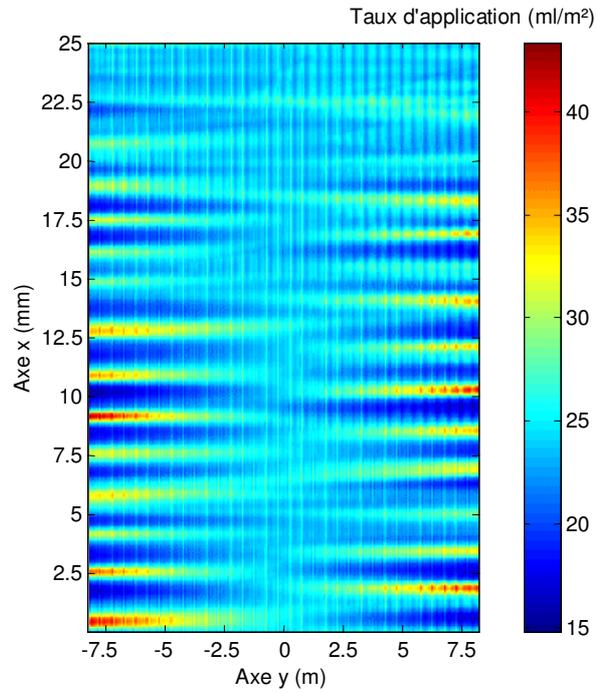


Figure 8.13. : Répartition modélisée pour la prairie (orthonormée).

La Figure 8.14 présente un histogramme du taux d'application dans la prairie. Il présente une grande similitude avec l'historgramme du froment mais présente quelques valeurs extrêmes supérieures.

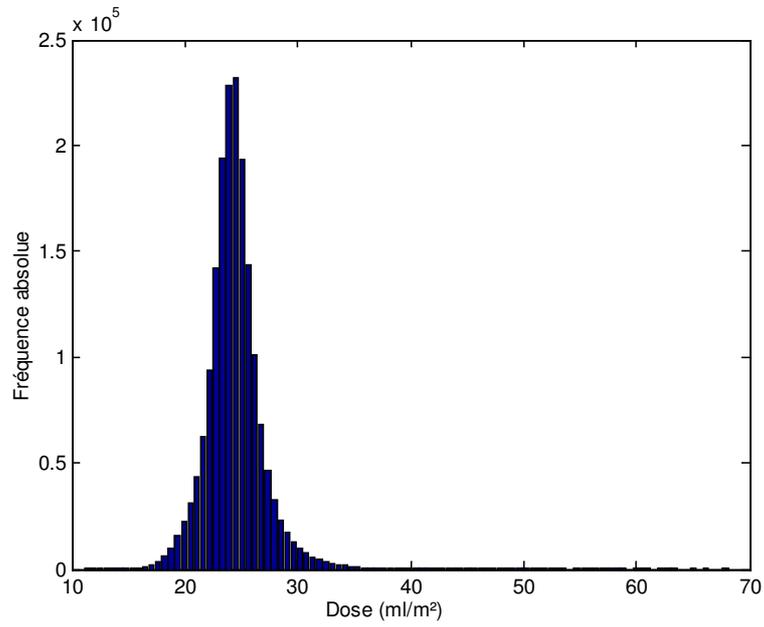


Figure 8.14. : *Histogramme des taux d'application pour la prairie.*

8.2.4 Répartition sur chicorée

Les variations de vitesse des buses sont présentées à la Figure 8.15. Le comportement est semblable à celui qui a été observé sur froment et sur prairie.

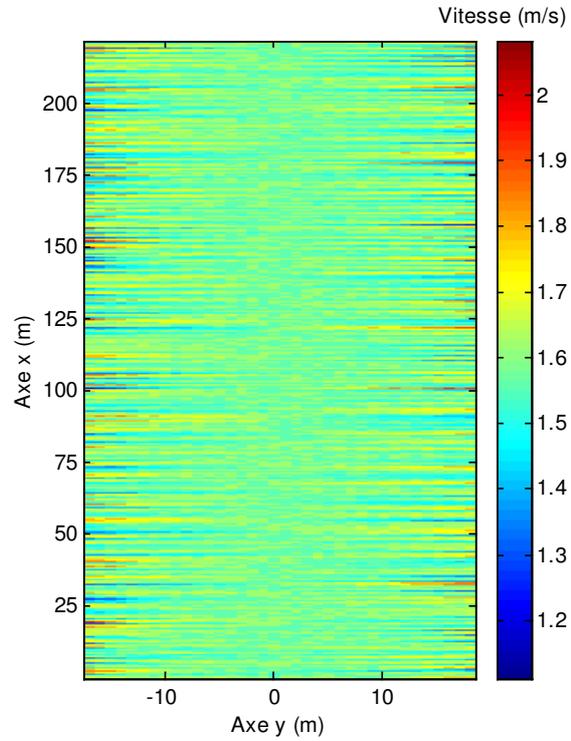


Figure 8.15. : Fluctuation des vitesses des buses dans le champ de chicorée.

La Figure 8.16 présente les variations de hauteur de rampe par rapport au sommet de la frondaison. La hauteur moyenne lors de cet essai était de 774 mm. Les variations de hauteur sont présentes jusque dans les très basses fréquences où le mauvais suivi de pente par la suspension de la rampe est à nouveau flagrant.

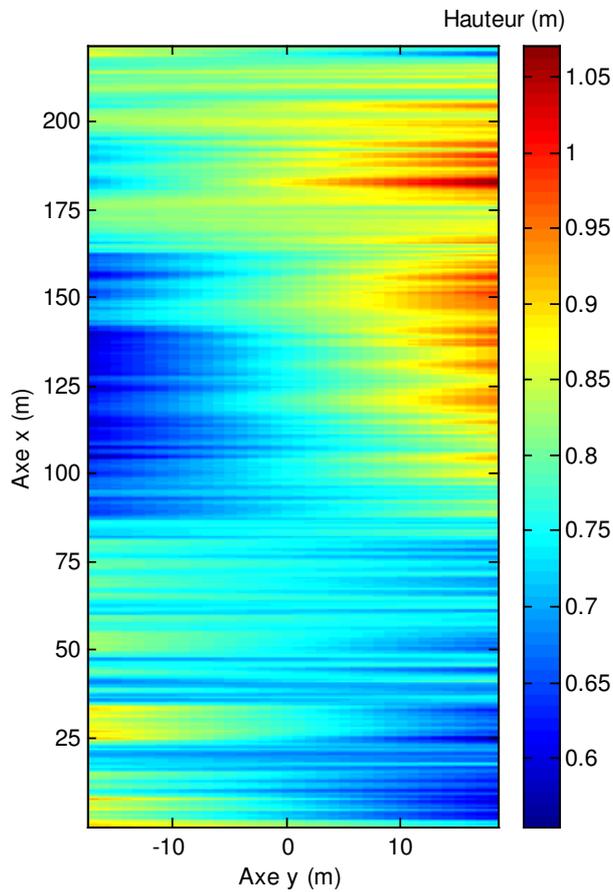


Figure 8.16. : Fluctuations des hauteurs des buses dans le champ de chicorée.

La répartition calculée sur base des vitesses et hauteurs des buses est présentée à la Figure 8.7. Le taux d'application moyen vaut 20,81 ml/m² et le coefficient de variation de la répartition vaut 4,43%. Ces valeurs sont toutes deux inférieures à celles observées sur froment et prairie. Le champ de chicorée présentait en effet un profil beaucoup plus doux que celui des deux cas précédents, ce qui s'est traduit par des mouvements de moindre amplitude, spécialement dans le plan horizontal et, dans une moindre mesure, dans le plan vertical.

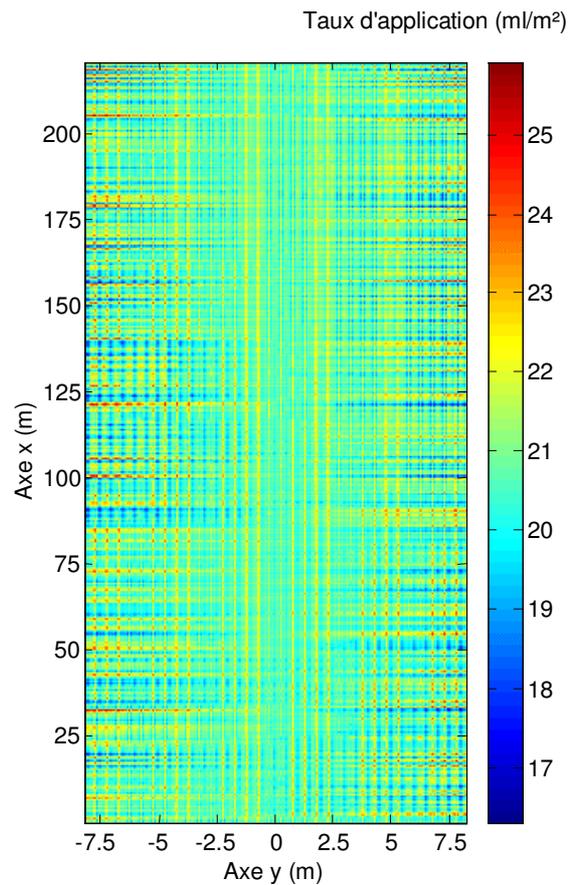


Figure 8.17. : Répartition modélisée pour le champ de chicorée.

La Figure 8.18. présente une image orthonormée de la répartition modélisée pour les 25 premiers mètres de l'essai (selon l'axe x). L'effet du lacet se marque toujours clairement par des variations de répartition longitudinale en déphasage entre la gauche et la droite du pulvérisateur. L'effet du recouvrement incomplet des jets de buses voisines sur la répartition est relativement plus marqué en raison de la moindre amplitude des variations de la vitesse de la rampe.

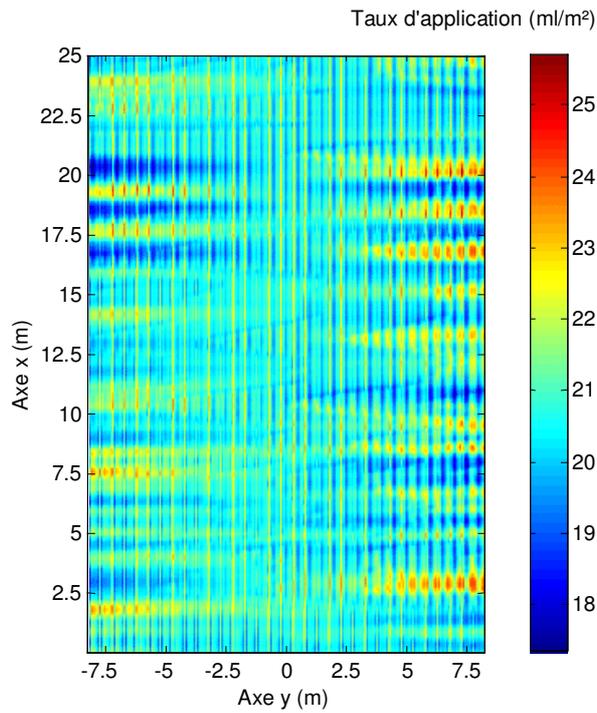


Figure 8.18. : Répartition modélisée pour le champ de chicorée (orthonormé).

La Figure 8.19 présente un histogramme de la répartition du taux d'application dans le champ de chicorée. De la même manière que le coefficient de variation est plus faible, l'étalement est moindre que pour les deux essais précédents.

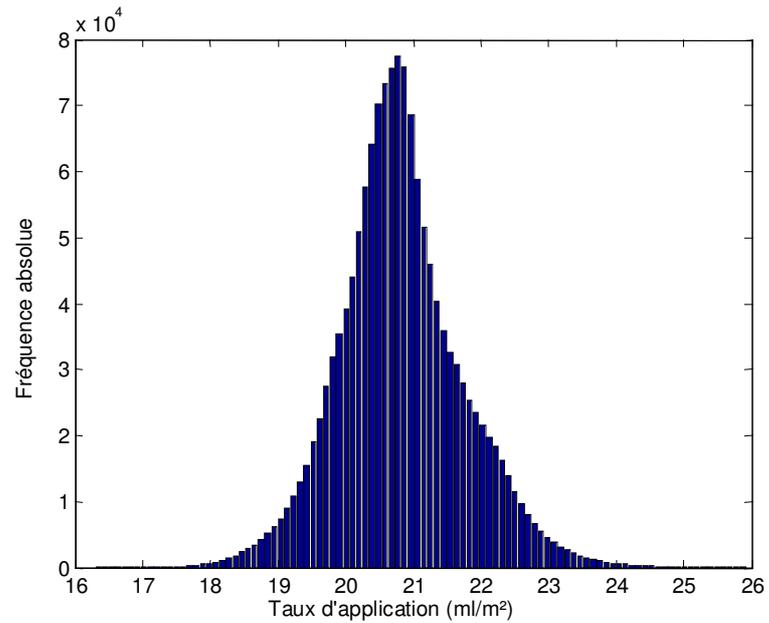


Figure 8.19. : Histogramme des taux d'application pour le champ de chicorée.

8.2.5 Interprétation des résultats

Pour une rampe donnée et une vitesse de traitement similaire, il apparaît que la qualité de la répartition varie de manière importante en fonction des sollicitations du terrain. En effet, le coefficient de variation de la répartition sur chicorée est beaucoup plus faible que sur prairie et froment. Ceci est vraisemblablement lié au fait que la rugosité du sol dans le champs de chicorée était plus faible que celle de la prairie et du champ de froment.

Le coefficient de variation est souvent utilisé comme critère de qualité de la répartition. L'analyse des histogrammes montre que le coefficient de variation du taux d'application est insuffisant pour décrire la forme. La Figure 8.20. présente une comparaison de chacun des histogrammes (classes 0,6 ml/m²) observés au cours des trois essais avec une distribution gaussienne de même moyenne et de même écart-type. Il apparaît dans les trois cas que les

histogrammes observés sont dissymétriques et présentent un aplatissement différent de la distribution normale, ce qui montre que les moyenne et écart-type sont insuffisants pour décrire correctement la distribution des taux d'application.

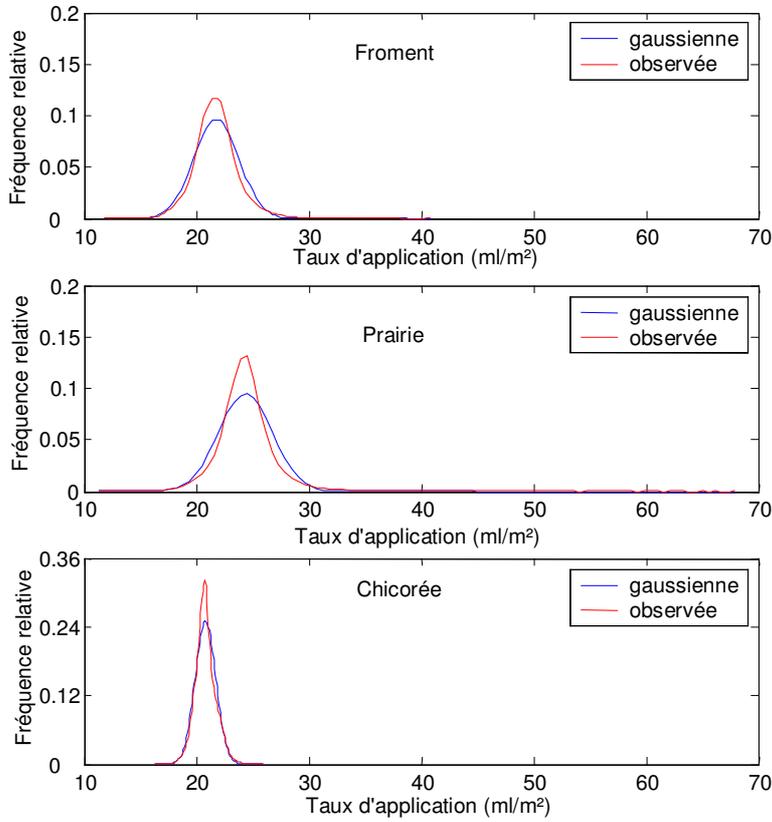


Figure 8.20. : Histogrammes des taux d'application modélisés.

Pour y palier, certains auteurs jugeant ces paramètres insuffisants y adjoignent d'autres critères comme le pourcentage de surdosage supérieur à 15% du taux d'application moyen et le pourcentage de sous-dosage inférieur à 15% du taux d'application moyen [Lardoux *et al.*, 1998]. Pour définir plus complètement la forme des histogrammes observés, il est possible d'adjoindre des paramètres

de curtosis (paramètres de forme) à la moyenne et à l'écart-type. Les coefficients de Fisher ($g1$ et $g2$) permettent de caractériser l'un le degré de symétrie, l'autre le degré d'aplatissement de l'histogramme [Dagnelie, 1973]. Le Tableau 8.1. reprend les valeurs des quatre paramètres de forme ainsi que le coefficient de variation.

Tableau 8.1. : Paramètres statistiques des histogrammes observés.

Paramètres	Champ de froment	Prairie	Champ de chicorée
Moyenne (ml/m ²)	21,78	24,39	20,81
Variance (ml ² /m ⁴)	4,03	5,77	0,85
Coefficient de variation	9,22	9,85	4,43
$g1$	0,607	0,941	0,302
$g2$	2,31	5,78	0,87

Les trois histogrammes présentent des distributions de fréquence leptocurtiques (elles sont plus pointues que la distribution normale de même variance), ce qui est quantifié par des valeurs de $g2$ positives. Elles présentent toutes des dissymétries gauches qui sont chiffrées par les valeurs positives de $g1$.

Les valeurs des paramètres statistiques permettent de quantifier les différences observées entre les traitements. A titre de référence, les coefficients de variation calculés pour cette même buse pour des hauteurs constantes de 50 et 75 cm avec une vitesse constante de 1,5 m/s valent respectivement 3,75 % et 2,67 %. Le coefficient de variation calculé pour le champ de chicorée s'approche fortement de ces valeurs, ce qui signifie que la principale source d'hétérogénéité est le mauvais recouvrement entre jets voisins plutôt que le comportement dynamique de la rampe. Les répartitions sur le champ de froment et sur la prairie présentent des coefficients de variation similaires nettement supérieurs à celui de la chicorée. Par ailleurs, ils se distinguent entre eux du point de vue de leurs aplatissement et dissymétrie. L'augmentation des paramètres $g1$ et $g2$ est liée à la présence plus marquée de valeurs de taux d'application extrêmes qui traduisent

l'existence de très basses hauteurs de pulvérisation pour lesquelles un surdosage localisé apparaît sous la buse et un sous-dosage entre buses voisines. Les paramètres g_1 et g_2 sont donc également un reflet de la qualité d'application du traitement qui complète l'information fournie par le coefficient de variation.

Il est possible de développer nombre d'autres paramètres comme des quantiles qui permettent de comparer les répartitions obtenues, par exemple les pourcentages de la surface traitée sous- et sur-dosés vus précédemment (Tableau 8.2). Les quantiles présentent l'avantage de pouvoir être facilement mis en relation avec les notions de sur- et sous-dosage en adaptant le choix des limites de classe à l'efficacité du produit utilisé en fonction du taux d'application. Tout comme pour le coefficient de variation, les valeurs des quantiles calculés pour le champ de froment et la prairie sont très proches, tandis que le champ de chicorée se distingue nettement. De manière générale, ces paramètres descriptifs doivent être adaptés aux objectifs particuliers poursuivis en aval de la modélisation. Selon que les événements que l'on cherche à mettre en évidence sont les valeurs extrêmes ou les variations les plus courantes, on privilégiera par exemple un écart-type ou l'écart moyen absolu.

Tableau 8.2. : *quantiles des histogrammes observés.*

Paramètres	Champ de froment	Prairie	Champ de chicorée
Pourcentage de surface sous-dosée (<85% du taux d'application moyen)	4,23 %	5,05 %	0,06 %
Pourcentage de surface sous-dosée (>85% et <115% du taux d'application moyen)	90,20 %	89,07 %	99,67 %
Pourcentage de surface sur-dosée (>115% du taux d'application moyen)	5,58 %	5,88 %	0,26 %

Dans le cadre de la normalisation des tests de pulvérisateurs, il est nécessaire de déterminer plus précisément quels paramètres peuvent être mis en

relation avec la qualité du traitement afin de déterminer des paramètres consensuels qui décrivent la qualité globale du traitement à partir de la répartition.

8.2.6 Conclusion

Partant de la mesure des mouvements verticaux et horizontaux des buses, le modèle permet d'évaluer la répartition et de la représenter sous une forme graphique aisément accessible. La quantification de la qualité du traitement effectué est aisée, puisqu'une information précise est fournie sur les proportions de surface sous- et sur-dosées. Pour les différents essais auxquels le modèle a été appliqué, on observe que les extrémités de rampe s'avèrent être les positions les plus critiques en terme d'écart par rapport au taux d'application moyen. L'effet de la rugosité du terrain qui conditionne les sollicitations dynamiques transmises à la rampe est également mis en évidence.

En outre, le modèle autorise le calcul de la distribution de fréquence du taux d'application. Sur cette base, il apparaît que la quantification de la qualité de la répartition doit dépasser les indicateurs classiques que sont la moyenne et le coefficient de variation. Des paramètres statistiques descriptifs de l'asymétrie et de l'aplatissement de l'histogramme des taux d'application permettent de mettre en évidence des différences plus fines entre traitements. Il reste toutefois nécessaire de les corrélérer à l'efficacité du traitement et à valider le modèle in situ.

CHAPITRE 9

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. Dorénavant, 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. C'est particulièrement vrai en grandes cultures du fait de la complexité des interactions existant entre les nombreuses géométries de pulvérisateurs, les différents types de régulateurs de débit et les innombrables modèles de buse.

L'amélioration des pulvérisateurs passe par le développement de critères de qualité qui permettent de procéder à leur évaluation lors de procédures de certification et d'homologation. En grandes cultures, un des critères de qualité des pulvérisateurs est l'uniformité de la répartition qu'il est possible d'obtenir en

conditions normales d'utilisation. La répartition dynamique est essentiellement conditionnée par la trajectoire des buses sous l'effet des mouvements de la rampe de pulvérisation et par la distribution des jets à la pression de travail. La mise en relation de ces interactions au sein d'un modèle de répartition peut faciliter la mise en place de procédures de test simplifiées basées sur une évaluation indépendante de chacun des composants. Le développement et la validation d'un tel modèle est l'objet de ce travail.

Cette étude concerne une buse à fente classique, de même type que celles couramment utilisées en grandes cultures. La distribution transversale 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 dépend de la hauteur et de la pression de pulvérisation. Le spectre des gouttes à deux bars mesuré au moyen d'un granulomètre laser 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 mouvements de buse similaires à ceux rencontrés sur le 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 trois méthodes différentes, à savoir l'analyse d'images, le dosage du KCl par voie chimique et la pesée de collecteurs. L'analyse d'images permet d'effectuer une mesure continue de la répartition et s'avère intéressante pour illustrer l'effet des mouvements de buse sur la répartition. Cependant, sa précision est limitée et il est nécessaire de recourir à des méthodes quantitatives plus laborieuses pour quantifier précisément l'effet des mouvements. Grâce à la méthode recourant au dosage du KCl, qui peut être qualifiée de méthode de référence, la variabilité

spatiale de la répartition peut être chiffrée. La variabilité longitudinale mesurée le long d'un transect est de l'ordre de 5 %, dans les conditions expérimentales que nous nous sommes fixées. En mesurant la répartition transversale, on peut confirmer, grâce à un bilan massique précis, que dans nos conditions expérimentales contrôlées, l'intégralité du jet se dépose sous la buse, ce qui montre l'absence d'évaporation et de dérive. La pesée du KCl recueilli dans des boîtes de Pétri, plus rapide à mettre en œuvre que la méthode de dosage par spectrophotométrie et plus précise que l'analyse d'images, permet de mesurer la répartition selon un maillage dense. Elle fournit les répartitions spatiales, à la fois longitudinale et transversale. En outre, elle montre une variabilité temporelle de la répartition. Les essais à vitesse et hauteur constantes présentent une variabilité importante de la répartition générée par la buse au cours du temps. Tous les paramètres opératoires étant fixés et contrôlés, il apparaît que la plus grande partie de la variabilité observée est intrinsèque au processus et s'apparente à un bruit dont il n'a pas été possible de s'affranchir malgré les précautions expérimentales. Les essais à vitesse variable et hauteur constante présentent également du bruit mais ils laissent apparaître clairement un effet des variations de vitesse de la buse sur la répartition. De même, les essais à hauteur variable et vitesse constante montrent un effet de la variation de hauteur, toujours en présence de bruit.

Un modèle mathématique expérimental du processus de répartition est proposé. Considérant des intervalles de distance constants sur la trajectoire de la buse, la répartition totale est calculée en multipliant la distribution aux différentes positions par le temps nécessaire pour passer d'une position à la suivante. Moyennant l'hypothèse que le processus de pulvérisation est un système linéaire invariant, ceci s'exprime par le formalisme mathématique suivant : la répartition est obtenue par convolution de la trajectoire avec la distribution de la buse, celle-ci étant assimilée à une réponse impulsionnelle. Ce formalisme mathématique permet de résoudre le problème en se basant sur des outils disponibles dans des logiciels de calcul numérique.

La mise en œuvre de ce modèle suppose que l'on établisse la distribution bidimensionnelle de la buse considérée en tenant compte des facteurs opératoires et que l'on dispose de la mesure de la trajectoire de la buse.

Le modèle est dans un premier temps mis en œuvre sur la base de mesures de répartition statique. La distribution bidimensionnelle de la buse est calculée pour trois hauteurs (300, 500 et 700 mm) au moyen d'une technique de rétro-projection filtrée, à partir d'un ensemble de mesures unidimensionnelles réalisées au banc de répartition, sous différents angles par rotation de la buse. Les distributions à des hauteurs intermédiaires sont estimées en utilisant une loi empirique de variation de l'étalement en fonction de la hauteur.

La comparaison entre la répartition mesurée et modélisée fait apparaître des écarts importants. En particulier, dans l'essai à vitesse constante, on note une erreur de 32 % due à une mauvaise estimation de la répartition transversale. Pour l'essai à vitesse variable, l'erreur est de l'ordre de 26 %, elle résulte principalement d'imprécisions dans l'estimation de la répartition transversale et dans une moindre mesure dans celle de la répartition longitudinale. L'essai à hauteur variable présente une erreur du même ordre de grandeur également présente essentiellement sur la répartition transversale à toutes les hauteurs. Il apparaît que les erreurs ont pour origine les effets aérodynamiques et balistiques dus à la vitesse d'avancement sur la distribution de la buse. En effet, ceux-ci ne sont pas pris en compte lors d'une mesure de la distribution statique de la buse. 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.

Pour augmenter la précision du modèle de répartition, il s'avère nécessaire de prendre en compte les effets balistiques et aérodynamiques de la vitesse sur la distribution de la buse. A cette fin, une méthode originale de mesure de la distribution de la buse en conditions dynamiques est proposée. Elle se base sur des mesures de répartition dynamique transversale à vitesse et hauteur constantes couplées à des mesures de répartition dynamique

longitudinale d'une pulvérisation discontinue réalisée grâce au porte-buse PWM sur un intervalle de 50 millimètres selon la direction d'avancement, également pour des hauteurs et vitesses constantes. Pour calculer la distribution dynamique, on procède en deux étapes. Le débit de la buse est dans un premier temps multiplié par la fréquence relative calculée à partir de la répartition dynamique transversale pour obtenir une distribution transversale dynamique. Chacun des points de cette distribution transversale dynamique est ensuite multiplié par les fréquences relatives longitudinales correspondantes calculées à partir des mesures de répartition dynamique longitudinale. Le résultat de la modélisation sur la base de la distribution dynamique ainsi estimée présente une erreur inférieure à 6 % pour l'essai à vitesse et hauteur constante et une erreur de l'ordre de 11 % pour les essais à vitesse et hauteur variables. Ces résultats montrent une très forte réduction des erreurs de modélisation (de l'ordre de 60 %) par rapport au modèle basé sur la distribution statique. Les écarts résiduels ne présentent pas de tendance. Ils résultent de la discrétisation du modèle, des erreurs de mesures et surtout de la variabilité intrinsèque de la distribution.

Le modèle est finalement appliqué pour évaluer la répartition en conditions réelles, les mesures de mouvement de la rampe étant menées à l'aide d'une chaîne de mesure spécialement conçue à cet effet. La répartition est simulée pour un pulvérisateur porté, dont la longueur de rampe est de 18 m, roulant à vitesse constante sur des terrains de pentes négligeables, à savoir un champ de froment, une prairie et un champ de chicorée.. Les résultats montrent que, pour des vitesses d'avancement similaires, la qualité de la répartition est fortement affectée par l'état de surface du terrain. La distribution du taux d'application indique que la seule prise en compte du coefficient de variation comme descripteur de la qualité de la répartition est trop limitative et doit être complétée par des paramètres de forme ou d'autres critères.

D'un point de vue pratique, le modèle de répartition constitue un outil utile pour les constructeurs de pulvérisateurs soucieux d'améliorer la qualité de leur matériel par des systèmes performants de filtration des vibrations. En effet,

des mesures de mouvements sur prototype peuvent être réalisées sur le terrain, sur piste standardisée, sur pistes avec obstacles ou encore sur un banc de simulation de pistes. L'introduction des mouvements dans un modèle tel que celui qui est proposé permet d'évaluer la répartition et de comparer les performances de différents équipements. De plus, le développement constant du prototypage virtuel généralise l'emploi de logiciels de simulation de type multi-corps qui prédisent le comportement dynamique dès le stade de la conception. Le couplage d'un tel modèle multi-corps à un modèle de répartition rend possible l'évaluation directe de l'efficacité de modifications de la structure mécanique sur la qualité de l'application des produits phytopharmaceutiques.

Par ailleurs, grâce au formalisme mathématique adopté dans la conception du modèle, il est possible de simuler la répartition en présence de différentes bouillies. Il suffit pour cela de mesurer la distribution bidimensionnelle dynamique correspondante, tout en gardant la même méthodologie que celle qui est proposée. Cet aspect ouvre des perspectives intéressantes pour étudier l'effet des propriétés physico-chimiques des bouillies sur la répartition, voir sur la dérive des produits phytopharmaceutiques.

Enfin, le modèle de répartition peut également contribuer au développement de normes, tant pour les procédures d'homologation que de certification des pulvérisateurs. Il facilite l'uniformisation des procédures de test pour l'ensemble des centres d'essai, ce qui est rendu indispensable par la dimension multinationale qu'acquière ces procédures au niveau de la construction européenne. Ces arguments en faveur de l'adoption du modèle sont renforcés par l'avantage qu'il évite de devoir d'effectuer de fastidieuses mesures de répartition à grande échelle.

Liste des références bibliographiques

- Anon., 1981, "Matériel de protection des cultures – Equipement de pulvérisation – Partie 1 : Méthodes d’essai des buses de pulvérisation" *International Organization for Standardization ISO 5682/1 : 1981 (F)*, pp. 14.
- Anon., 1992, "Matériel de traitement phytopharmaceutique – Vocabulaire " *International Organization for Standardization ISO 5681 : 1992 (E/F)*, pp. 16.
- Anon., 1993, "Agricultural Spray Products" *Catalogue 42M Spraying System Co, Wheaton, USA*, pp. 70.
- Anon., 1996, "Salariés agricoles: les plus pauvres d'entre les pauvres". *Organisation internationale du travail, Communiqué de presse BIT/96/26*, pp. 4.
- Anon., 1996-2, "Matériel de protection des cultures – Equipement de pulvérisation – Partie 1 : Méthodes d’essai des buses de pulvérisation" *International Organization for Standardization ISO 5682/1 : 1996 (F)*, pp. 18.
- Anon., 1997, "Matériel de protection des cultures – Equipement de pulvérisation – Partie 2 : Méthodes d’essai des pulvérisateurs à jet projeté" *International Organization for Standardization ISO 5682/2 : 1997 (F)*, pp. 9.
- Anon., 1999, "Surveillance des résidus de pesticides dans les produits d'origine végétale dans l'Union Européenne, la Norvège et l'Islande, rapport 1999". *Commission des communautés européennes, SANCO/397/01-final*.
- Anon., 2002, "Vers une stratégie thématique concernant l'utilisation durable des pesticides". *Commission des communautés européennes, COM(2002) 349 final*, pp. 45.
- Anon., 2002-2, "The WHO recommended Classification of Pesticides by Hazard". *World health Organization, International Programme on Chemical Safety WHO/PCS/01.5*, pp. 60.

- Azimi A. H., Carpenter T. G., Reichard D. L., 1981 "Nozzle Spray Distribution for Pesticide Application. ", *Transactions of the ASAE*. **28(5)**, 1410-1414.
- 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.
- Carlton J. B., Bouse L. F., 1981, "Characterising Spray Deposit on film by light transmission. " *Transactions of 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.
- Dagnelie P., 1973, "Théorie et méthodes statistiques (vol.1)". *Les presses agronomiques de Gembloux*, pp. 378.
- Davis P. F., 1973, "The method of analysis of spray boom motions", *NIAE Departemental Note DN/CM/382/1905*, pp. 19.
- 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", *AgEng 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", *AgEng 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", *AgEng 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.

- Ganzelmeier H., Moser E., 1977, "Einfluss des Auslegerbewegungen von Feldspritzgeräten auf die Verteilgenauigkeit der Spritzflüssigkeit" *Grundlagen der Landtechnik* **27**(3), 65 -72
- Giles D. K., Comino J. A., 1990, "Droplet Size and Spray Pattern Characteristics of an Electronic Flow Controller for Spray Nozzle", *J. Agric. Engng. Res.* **47**, 249-267.
- Gölich H., 1985, "Deposition and Penetration of Sprays", *Symposium on Application and Biology, BCPC monogram*, **28**, 172-182.
- Herbst A., Ganzelmeier H., 2002, "International Standards and their Impact on Pesticide Application" *Aspects of Applied Biology*, **66**, 1-8.
- 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., de Jong A., "Computing static two-dimensional patterns using patternator observations", *AgEng 2000 Poster 00-PM-067 – Warwick, Royaume-Uni*, 234-235.
- 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.
- Langenakens 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". *AgEng 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 Agricultures*, **9(6)**, 505-509.
- 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", *AgEng 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. Engng Res*, **22**, 93-96.
- Matthews G.A., 1992, "Pesticide Application Methods", *Singapore Longman*, pp. 405.
- Miller P. C. H., Hadfield D. J., 1989 , " A Simulation Model of the Spray Drift from Hydraulic Nozzles", *J. agric. Engng Res.*, **42**, 135-147.
- Nation H. J., 1976, "Spray Nozzle Performance and Effects of Boom Height on Distribution". *NIAE Departemental Note DN/S/77/1925*, pp. 27.

- Nation H. J., 1978, " The Dynamic Behavior of Field Sprayer Booms: A technique for Field Measurement". *NIAE Departemental Note DN/S/814/09005*, pp. 69.
- Nation H. J., 1982, "The Dynamic Behavior of Field Sprayer Booms", *J. agric. Engng Res.*, **27**, 61-70.
- 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/ phase 2*.
- Ozkan H. E., Reichard D. L., Ackerman K. D., 1992, "Effect of Orifice Wear on Spray Patterns from Fan Nozzles", *Transactions of ASAE*. **35(4)**, 1091-1096.
- 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", *AgEng 98, Paper 98-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. Engng. 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., 1997b, "Spray Boom Motion and Spray Distribution : part 2, Experimental Validation of the Mathematical Relation and Simulation Results", *J. Agric. Engng. Res.*, **66**, 31-39.
- 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
- 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
- Smith B. D., 1992 "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 ASAE*. **35(1)**, 33-37.
- Smith D. B., Oakley D., Williams E., Kirkpatrick A., 2000. "Broadcast Spray Deposits from Fan Nozzles", *Applied Engineering in Agriculture*, **16 (2)**, 109-113.
- 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. Engng. 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. Engng Res.* **19**, 117-129.
- Tian L., Zheng J., 2000, "Dynamic Deposition Pattern Simulation of Modulated Spraying", *Transactions of 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.
- Vanucci D., Pari L., Fedrizzi M., Menesatti P., 1992, " Study of an automatic system to determine the spraying boom lateral fluctuation", *AgEng 1992 Paper 9205113– Uppsala, Suède*, pp 5.

- 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.
- Whitney R. W., Roth L. O., 1985, "String Collector for Spray Pattern Analysis", *Transactions of ASAE*. **28(6)**, 1749-1753.
- Zhang N., Wang L., Thierstein G. E., 1994, "Measuring Nozzle Spray Uniformity Using Image Analysis", *Transactions of 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. Engng Res.*, **67**, 35-45.