

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.