

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.).

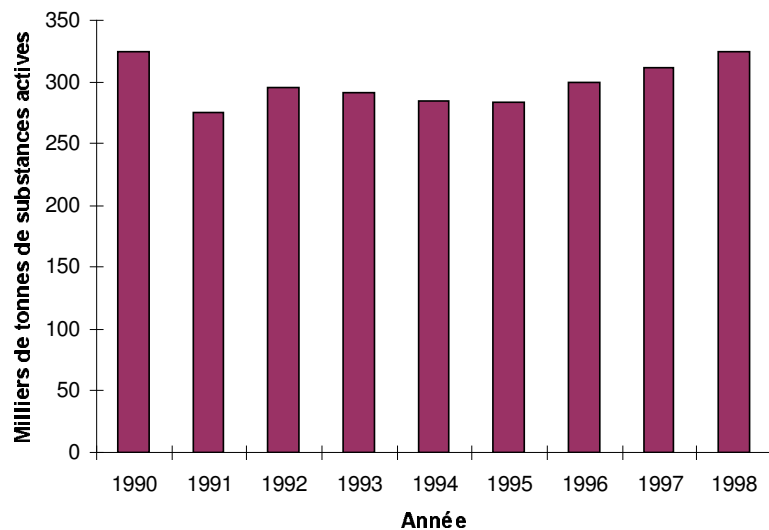


Figure 1.1. : Ventes totales de produits phytopharmaceutiques dans l'Europe des 15 (EUROSTAT).

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.

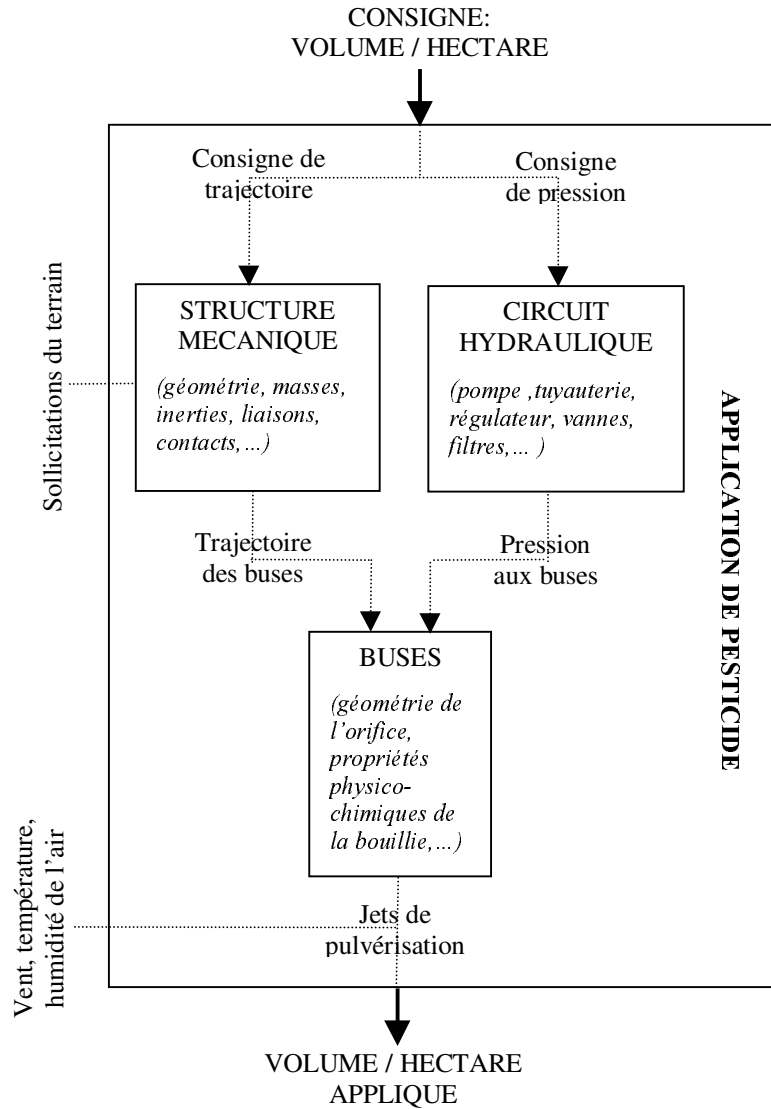


Figure 1.2. : Schéma descriptif du processus d'application.

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.