

Caractérisation de la pulvérisation dans son milieu

Les conditions de fabrication du jet et de son transport vers la cible déterminent le devenir des gouttelettes qui le forment et donc l'efficacité du traitement et le niveau de contamination de l'environnement.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons de près au mouvement du nuage des gouttelettes et aux facteurs qui déterminent sa trajectoire, en particulier la taille des gouttelettes. Une attention particulière sera donnée au compromis devant exister entre l'efficacité recherchée du traitement et la préservation de l'environnement.

2.1 Caractérisation du spectre de pulvérisation

Afin de pouvoir maîtriser les limites du spectre des gouttelettes et l'adapter au type de traitement recherché, la connaissance des populations de gouttelettes pulvérisées est très importante. Dans ce paragraphe, sont définies les grandeurs permettant de caractériser un spectre de gouttelettes.

La répartition de la taille des gouttelettes dans un spectre ($f_a(D)$) est caractérisée à l'aide de différents outils statistiques. Cependant dans la pratique, elle est souvent décrite comme une fonction de deux paramètres : un diamètre représentatif et une fourchette de tailles. Classiquement, on choisit les trois diamètres représentatifs suivants :

- D_{10} : c'est le 10ème percentile de la fonction $f_a(D)$,
- D_{50} ou VMD (Volume Median Diameter) : c'est la médiane de $f_a(D)$,
- D_{90} : c'est le 90ème percentile de la fonction $f_a(D)$.

L'étendue des tailles de gouttelettes dans un spectre peut être appréciée par le rapport appelé SPAN relatif :

$$\Delta = \frac{D_{90} - D_{10}}{VMD} \quad (2.1)$$

La valeur de ce rapport, indépendante du calibre de la buse, est d'autant plus faible que le spectre est plus homogène.

Définitions des concepts clés abordés dans ce travail

Certains concepts utilisés dans ce document ont des définitions qui peuvent ne pas correspondre à celles utilisées dans d'autres sources. Il a été donc jugé important de commencer cette partie introductive par la présentation des définitions que nous avons retenues pour ces concepts clés.

1. **Dérive (D_d)** : Le mouvement des pesticides dans l'atmosphère **pendant ou juste après le traitement**. Elle inclut les **flux déportés** à une distance par rapport à la cible (*le déport*), les émissions vers l'air et l'évaporation.
2. **Déport (D_{sd})** : Les flux déportés latéralement par le vent et déposés au sol plus loin que la cible.
3. **Rétention (D_p), ou adhérence** : La fraction des gouttelettes retenue par les plantes ciblées par rapport à la quantité pulvérisée. Une gouttelette **interceptée** par la plante n'est pas forcément retenue.
4. **Évaporation, (D_e)** : La part des gouttelettes qui s'évapore complètement après avoir parcouru une certaine distance. Dans ce document, l'évaporation est implicitement comprise dans la volatilisation.
5. **Volatilisation, (D_v)** : La part des gouttelettes perdues dans l'air ou évaporées. Elle correspond à la somme des gouttelettes évaporées et de celles perdues dans l'air.

2.2 Facteurs affectant l'efficacité de la pulvérisation et favorisant les pertes de pesticides

2.2.1 Introduction

Pour qu'un traitement soit efficace, le produit appliqué doit atteindre la cible avec la dose requise et doit y adhérer. D'autre part, les pesticides doivent être appliqués sans affecter l'environnement.

Pendant le traitement d'un pesticide sur une culture, la trajectoire du nuage est régie par plusieurs mécanismes participant à sa dispersion avec une intensité qui varie selon son évolution spatiale et temporelle. Le comportement des gouttelettes pulvérisées est la résultante de nombreux facteurs tels que **les techniques et les conditions du traitement, les propriétés physico-chimiques de la bouillie et le couvert végétal**. Cette section est consacrée à la description de ces différents facteurs et de leurs multiples interactions. Nous commencerons par montrer le rôle capital que joue la taille des gouttelettes.

2.2.2 Importance de la finesse des gouttelettes pour l'efficacité et pour l'environnement

Le diamètre des gouttelettes formant le spectre du jet peut aller d'une dizaine de microns pour les plus petites, jusqu'à 800 microns ou plus pour les plus grosses. Les gouttelettes les plus fines sont très sensibles à la dérive même par temps calme. Elles restent plus longtemps en suspension dans l'air à cause de leur masse réduite et de leur faible vitesse. Elles sont plus freinées dans leur chute par les forces de frottement aérodynamiques et sont par conséquent affectées par le mouvement de l'air et les conditions climatiques. Pendant ce temps de suspension, le vent peut les déplacer horizontalement à travers le champ et les faire dériver à l'extérieur de la zone cible. Les gouttelettes les plus grosses sont par contre peu susceptibles de dériver mais elles sont très sensibles au ruissellement sur la surface des feuilles de la culture traitée.

Le choix de la technique de traitement doit tenir compte de toutes les interactions possibles des gouttelettes avec leur environnement.

Il y a également à considérer le type de traitement qui est principalement imposé par la cible pouvant être une plante ou un insecte. Par exemple, le traitement des mauvaises herbes est effectué à des stades de croissance précoces caractérisés par un faible couvert végétal impliquant une contamination du sol plus importante pendant le traitement. En plus, pour améliorer l'efficacité, ce type de traitement requiert un maximum de couverture de la cible par la bouillie, ce qui nécessite des fines gouttelettes dont le potentiel de dérive est important. Dans le cas des fongicides, les traitements sont souvent appliqués à un stade de développement de la culture plus avancé. Le couvert végétal est alors plus dense et le sol est moins exposé aux dépôts de pesticide. Là aussi, pour une meilleure efficacité, la finesse est demandée, mais les gouttelettes n'ont pas l'énergie suffisante pour pouvoir pénétrer dans la végétation. Les gouttelettes de taille moyenne sont alors les plus convenables pour répondre au mieux à ce double objectif.

La taille des gouttelettes est soumise à l'effet de plusieurs paramètres qui sont détaillés dans les sections 2.2.3 à 2.2.6.

2.2.3 Facteurs liés aux techniques de traitement

La technique de pulvérisation utilisée est un facteur déterminant dans la quantité de pesticide qui atteint les plantes. Des facteurs comme la **buse (type et calibre)** et la **pression** déterminent le diamètre des gouttelettes qui définira en grande partie leur comportement pendant le transport vers la cible (Hobson *et al.*, 1993 ; Jensen *et al.*, 2001). Ce diamètre sera déterminant aussi pour l'adhérence des gouttelettes à la surface des feuilles. Des facteurs tel que **la hauteur de la rampe et dans une certaine mesure la vitesse d'avancement du tracteur agissent, avec la pression, sur la vitesse des gouttelettes** qui intervient dans leur distribution finale. La hauteur de la rampe a une forte influence sur la qualité de la répartition et la pénétration du produit (Asman *et al.*, 2003). La vitesse d'avancement a un effet direct sur la dérive et donc sur l'efficacité du traitement, (Taylor *et al.*, 1989). Lorsque la vitesse augmente, l'effet du vent relatif augmente aussi et une force supplémentaire vient s'appliquer sur les gouttelettes. Sous l'effet de cette force et de la turbulence générée par la circulation de l'air, les dépôts dus aux vents soufflant dans l'axe de déplacement du tracteur peuvent être encore plus importants. Ces facteurs, ensemble, jouent pour accroître significativement le potentiel de dérive dans le sens longitudinal.

Tous ces facteurs agissent également sur l'énergie cinétique des gouttelettes émises. Dans le nuage obtenu à la sortie de la buse, les fines gouttelettes n'ont pas suffisamment d'énergie pour pouvoir atteindre la culture, alors que les plus grosses qui arrivent à impacter la cible ont une énergie élevée qui pourra être à l'origine de leur ruissellement à la surface des feuilles.

2.2.4 Conditions atmosphériques

Pendant l'application d'un traitement phytosanitaire, la fraction de substance qui n'atteint pas la cible est fortement liée aux facteurs météorologiques eux-mêmes très sensibles au micro-climat local. Plusieurs chercheurs ont mené des travaux de mesure sur terrain (Gilbert et Bell, 1988 ; Hobson *et al.*, 1993) ou de simulation, (Khelifi *et al.*, 1993 ; Sarker et Parkin, 1995 ; Gil *et al.*, 2007) pour étudier l'influence de ces facteurs sur la perte des pesticides. Ils s'accordent tous sur les facteurs météorologiques pouvant affecter l'efficacité du traitement : c'est principalement le vent, la température ambiante, l'humidité relative et la stabilité atmosphérique.

Un nuage de pesticides peut se disperser horizontalement et verticalement dans le sens et autour du courant de vent. Les plus grosses gouttelettes se déposent rapidement sur le sol pendant que les plus fines qui ont des vitesses de sédimentation plus lentes peuvent rester en suspension dans l'air pendant un certain temps et être transportées par le vent à de grandes distances par rapport à la zone traitée (Hobson *et al.*, 1993).

Au niveau de la couche de surface où a lieu le traitement, le profil vertical de la vitesse du vent est perturbé du fait du frottement de l'air sur le sol et sur la végétation. Ainsi, cette zone est à fort gradient de vitesse de vent et l'écoulement de l'air y est fortement turbulent (Turbelin, 2000).

La température et de l'humidité relative influencent surtout la taille des gouttelettes du fait de leur rôle sur l'évaporation des gouttelettes. La diminution du diamètre des gouttelettes va entraîner un accroissement de la distance de dérive comme montré par exemple par Ozkan (1991) et Zhu *et al.* (1994). Ces différents aspects seront détaillés dans la partie III.

2.2.5 Facteurs liés aux propriétés physico-chimiques de la formulation

La volatilité est liée à la pression de vapeur saturante. La tension superficielle et la viscosité sont d'autres propriétés importantes car elles conditionnent la taille des gouttelettes et la rétention sur les plantes.

2.2.6 Facteurs liés à la végétation

Après éjection du jet, une gouttelette approchant la cible a plusieurs possibilités. Elle peut être retenue par la plante, se fragmenter en plusieurs petites gouttelettes, rebondir et tomber sur les feuilles inférieures ou atteindre le sol en passant à travers la végétation (Richardson et Newton, 2000 ; Forster *et al.*, 2005). Cela dépendra en partie de la plante elle-même : son espèce, sa taille, sa structure et son stade de développement. Une première caractéristique différenciant une espèce de culture d'une autre est la **rugosité de surface des feuilles**. Celle-ci est déterminée par deux facteurs : tout d'abord la cire de la cuticule des feuilles dont la présence limite le potentiel de rétention des feuilles (Forster *et al.*, 2002 ; Richardson et Thistle, 2003 ; Bousquet, 2007). Puis la présence de poils à la surface des feuilles. **La taille, la structure et le stade de développement** sont des facteurs qui affectent la densité du couvert végétal exprimée généralement par l'indice de surface foliaire (LAI)¹. Ces aspects sont détaillés dans la partie IV.

2.3 Approches de modélisation de la trajectoire du nuage

La littérature relative à la mécanique des fluides montre que le mouvement du nuage provenant de la pulvérisation d'un liquide inclut en même temps la dynamique des gouttelettes, le transfert de masse et le transfert de chaleur. La modélisation de la trajectoire et de la dispersion du nuage peut se faire à travers le suivi de **l'ensemble des gouttelettes, (le nuage)** ou **d'une gouttelette isolée**. La difficulté majeure des approches qui considèrent tout le nuage est que le jet de liquide est un flux diphasique composé de multiples gouttelettes. Celles-ci ensemble, peuvent avoir des interactions entre elles pendant le transport et ainsi modifier la trajectoire du nuage et le mouvement de l'air environnant. Ce qui veut dire que **les principes de transfert de la masse et de la chaleur ne sont pas nécessairement applicables au mouvement du nuage**. Pour cette raison, la plupart des recherches concernant le mécanisme de transport des gouttelettes optent pour les approches particulières : elles se limitent à l'étude de la trajectoire de gouttelettes individuelles. Les résultats pour l'ensemble du nuage sont ensuite extrapolés par des lois de proportionnalité.

Un état de l'art des différents modèles décrits dans la littérature scientifique figure dans la partie 6. Ces modèles sont en général utilisés pour prédire les dépôts des quantités pulvérisées.

1. Leaf Area Index : c'est la surface de la végétation par unité de surface de sol (en m² de feuilles/m² de sol).

Chapitre 3

Objectifs de la thèse

3.1 Conclusions de la partie I et justification du choix du sujet

Les données présentées dans la section 1.2 de cette première partie justifient **l'étude des pertes des pesticides vers l'environnement dans le contexte tunisien** malgré le grand nombre de travaux menés jusque là sur cette problématique à travers l'Europe et les USA. La plupart de ces études considère **qu'outre l'aspect réglementaire, le matériel et ses ajustements, les conditions atmosphériques, les propriétés de la formulation et de la végétation sont les paramètres déterminants dans l'efficacité recherchée par l'agriculteur et le niveau des pertes de pesticides vers l'environnement pendant le traitement**. La trajectoire et la dispersion du nuage sont déterminées en grande partie par des interactions complexes entre la taille des gouttelettes, la vitesse d'avancement, le vent, la température, l'humidité relative et la stabilité atmosphérique. Les phénomènes liés à la dispersion des gouttelettes se produisent dans la couche limite atmosphérique où les structures de l'écoulement sont caractérisées par une vitesse de vent fluctuante, influencée par la présence de la végétation au sol. L'estimation des transferts de pesticides dans l'environnement doit prendre en compte ces fluctuations, au risque de surestimer la dérive.

Par ailleurs, les études précédemment publiées se concentrent en général sur un seul phénomène (le plus souvent le déport) et aucune approche intégrée d'évaluation des pertes dans leur ensemble n'a été menée à ce jour.

3.2 Objectifs

L'objectif principal de cette thèse est de **caractériser les différents processus physiques entrant en jeu dans les phénomènes de pertes des pesticides vers l'atmosphère et le sol pendant le traitement pour pouvoir réaliser un bilan de ces pertes**. Le travail vise à étudier l'effet des paramètres physiques liés au matériel et des conditions microclimatiques sur les dépôts et les pertes, notamment dans des conditions méditerranéennes. Il se propose d'estimer les dépôts, la volatilisation (évaporation + gouttelettes perdues dans l'air), les pertes au sol sous la culture et les fractions retenues par les plantes pendant la pulvérisation terrestre dans les cultures basses, notamment le désherbage.

3.3 Présentation de la démarche

Pour atteindre ces objectifs nous proposons une approche basée sur un couplage entre approche expérimentale et modélisation. La figure 3.1 schématise les étapes de cette démarche.

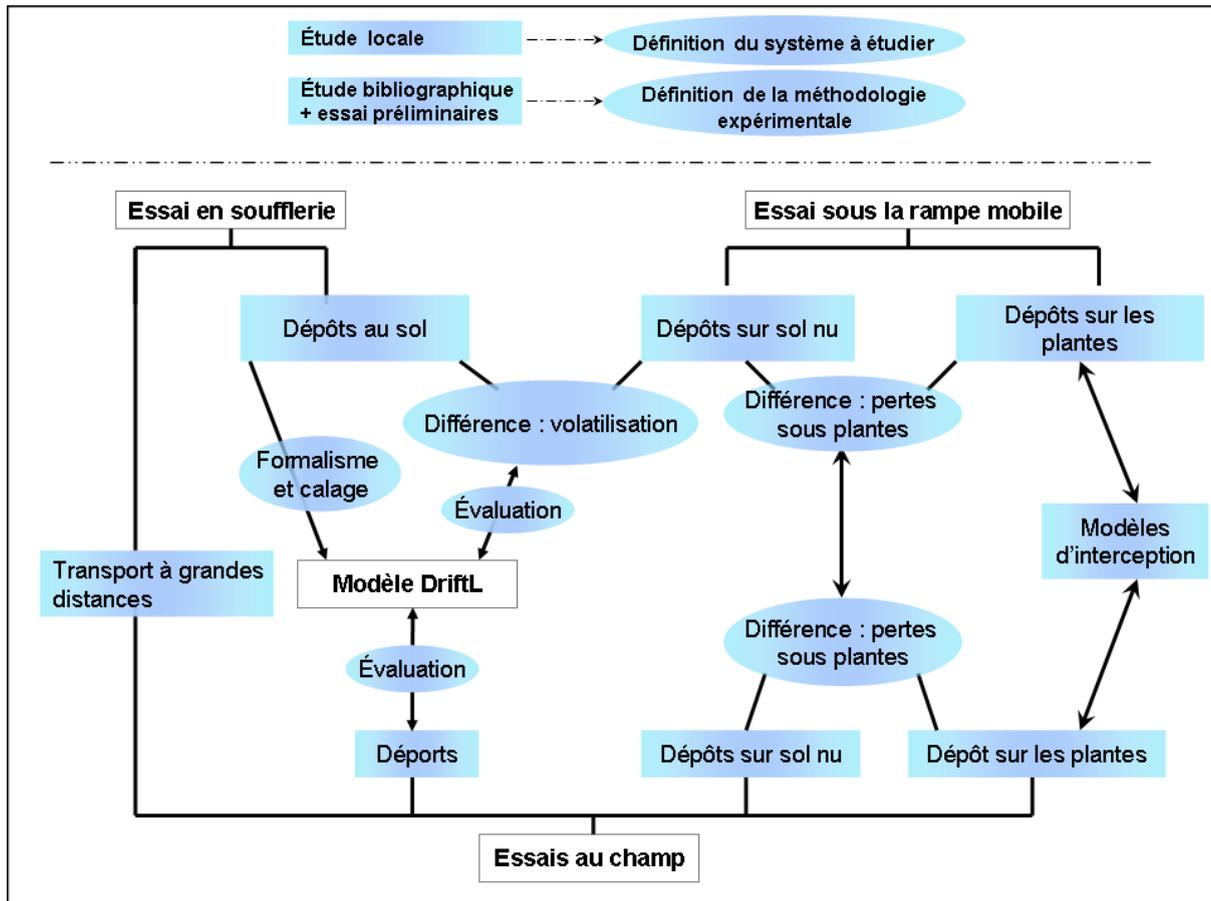


FIGURE 3.1 – Étapes de la démarche suivie pour l’estimation des pertes de pesticides et de la rétention sur les plantes dans les conditions tunisiennes.

Elle s’appuie fortement sur l’expérimentation et nous avons donc défini, au préalable, une méthodologie expérimentale qui, comme cela sera justifié à la partie II, est basée sur le piégeage de dépôts sur des collecteurs. Le choix des collecteurs a donc fait l’objet de tests préliminaires menés en conditions contrôlées (en soufflerie) et au laboratoire.

Pour estimer les dépôts, nous proposons de développer une démarche de modélisation basée sur l’observation du phénomène en conditions contrôlées dans une soufflerie. Les résultats du modèle seront évalués par comparaison avec des mesures en conditions réelles, au champ. La volatilisation sera également incluse dans la démarche de modélisation à partir des connaissances déjà établies par la communauté scientifique. Pour évaluer les résultats, nous proposons de comparer les dépôts obtenus en soufflerie, dans une atmosphère saturée en humidité avec des dépôts obtenus dans les mêmes conditions mais avec une humidité plus faible. Nous supposons que la différence entre les deux protocoles représente un bon ordre de grandeur des quantités perdues par volatilisation.

Pour différencier les quantités perdues par évaporation de celles liées aux gouttelettes transportées à grande distance, nous proposons de piéger sur un plan vertical les gouttelettes qui ne seraient pas déposées sur la zone traitée ou dans la zone de dépôt. Les mesures seront réalisées dans la soufflerie et répétées lors des essais au champ pour confirmation.

Enfin, pour estimer les pertes au sol, sous les cultures, nous procéderons par voie expérimentale en comparant les dépôts sur sol nu avec les quantités interceptées par les plantes dans quelques conditions spécifiques.

Là encore, ces mesures seront répétées lors des essais au champ pour confirmer les résultats obtenus en conditions contrôlées, au laboratoire.

Il est attendu que cette démarche permette de réaliser un bilan du devenir des pesticides pulvérisés dans les trois compartiments : sol, plante et air. Nous obtiendrons alors un outil permettant de discuter de manière objective et quantifiée de l'efficacité des traitements et des sources de pollutions qui y sont liées.

Après cette première partie décrivant le contexte tunisien et justifiant le sujet de la thèse, le mémoire se compose ainsi de quatre parties.

La deuxième partie décrit la méthode expérimentale utilisée, en commençant par un état de l'art sur les techniques de mesure des pesticides.

La troisième partie est consacrée à la dérive. Après une revue bibliographique des méthodes d'estimation et de modélisation les plus courantes, elle décrit le modèle développé pour cette thèse.

La quatrième partie traite des dépôts au sol et de la rétention sur les plantes pendant le traitement. Elle décrit les processus physiques intervenant dans ce phénomène à partir de quelques uns des outils développés par la communauté scientifique pour prédire les dépôts au sol et les fractions retenues par les plantes. Elle finit par présenter et discuter les données expérimentales de nos essais de laboratoire à travers une comparaison aux résultats de terrain et de certains modèles de la littérature.

Ce mémoire s'achève avec un chapitre de conclusion, qui synthétise les principaux résultats obtenus et suggère des pistes pour les recherches futures.

Deuxième partie

Etude expérimentale des pertes de pesticides lors de la pulvérisation

Chapitre 4

Etat de l'art

La mise en place d'une démarche expérimentale est basée sur le choix d'une méthode d'échantillonnage et d'une méthode d'analyse. Pour répondre aux objectifs que nous nous sommes fixés, nous avons étudié les méthodes proposées par la communauté scientifique pour mesurer les dépôts de pesticides sur différents types de collecteurs. Nous avons également recensé des méthodes de suivi des nuages de pesticides. Enfin, compte-tenu du rôle de la végétation pour les dépôts sur les plantes et sur le sol nous avons considéré aussi les méthodes proposées pour mesurer les densités de végétation.

4.1 Mesure des dépôts de pesticides sur les plantes et dans l'environnement

Les essais de mesure des dépôts de pesticides sont généralement effectués avec de l'eau seulement ou avec une formulation (traceur + eau), ou encore avec une formulation réelle (pesticide + eau). La technique utilisée pour le piégeage et l'analyse des dépôts dépend en grande partie de cette formulation.

4.1.1 Détection de l'impact des gouttelettes contenant de l'eau

L'analyse d'images est une méthode très pratiquée pour mesurer les impacts de ce type de gouttelettes. C'est une technique simple qui a montré une précision et une rapidité de mesure acceptable mais elle est exigeante en matériels et en moyens d'analyse. Le liquide est pulvérisé sur des collecteurs sensibles à l'impact des gouttelettes comme par exemple le papier hydro-sensible. Un système d'analyse d'image automatisé permet d'analyser les différents impacts des gouttelettes recueillies par des collecteurs. Ce dernier regroupe un ou plusieurs capteurs d'images, un système de numérisation et des logiciels spécifiques. Carlton et Bouse (1981) l'ont utilisé par exemple pour déterminer le pourcentage de surface couverte sur des feuilles de Soja. Sa limite principale réside dans le problème d'étalement des gouttelettes, dans le cas de mesures directes sur les collecteurs. En d'autres termes l'impact mesuré par le capteur d'images ne correspond pas à la taille réelle de la gouttelette quand elle percute le collecteur car il y a eu un étalement lors de la percussion. Ainsi l'application de l'analyse d'image nécessite souvent une correction à l'aide d'un coefficient d'étalement (Stermer *et al.*, 1988). De plus, les plus petits impacts ne sont pas toujours détectables.

4.1.2 Mesure des dépôts d'une solution à base de traceur

L'utilisation des traceurs est une pratique courante pour l'étude des dépôts de pesticides aussi bien au sol, que dans l'air ou sur les plantes. Selon le type de traceur, la technique pratiquée peut être de la **spectrocolorimétrie** pour les **colorants**, de la **spectrofluorimétrie** pour les **traceurs fluorescents** et de la **spectrométrie de masse** pour les **métaux**.

1. **La spectrocolorimétrie** : Cette méthode est basée sur la mesure de la densité optique d'une solution colorée (avec par exemple du cuivre ou de la tartrazine) pulvérisée sur des collecteurs qu'on rince pour analyser la solution récupérée par un spectrocolorimètre.

Plusieurs types de collecteurs sont utilisés par les chercheurs. Ils peuvent être artificiels ou naturels et diffèrent selon le compartiment concerné par la mesure. Carlton et Bouse (1981) ont utilisé la spectrocolorimétrie pour mesurer les dépôts **au sol** avec un film d'acétate comme collecteur et de l'acide nitrique comme liquide de rinçage. Les auteurs ont confirmé la fiabilité de la méthode en précisant que l'utilisation du cuivre comme traceur, sous forme de bouillie Bordelaise, est stable et non photosensible.

Cross *et al.* (2001a,b, 2003) ont testé plusieurs traceurs sur des bandes en polyéthylène afin d'estimer les **émissions atmosphériques**. Salyani et Withney (1988) ont utilisé la spectrocolorimétrie pour l'analyse du cuivre appliqué sur des feuilles artificielles et ont confirmé la fiabilité de la technique pour mesurer la **rétenion sur les plantes**. Forster *et al.* (2005) et Gaskin *et al.* (2005) de leur côté ont utilisé de la tartrazine pour étudier la rétenion sur des plantes naturelles.

La spectrocolorimétrie est une technique simple à appliquer mais elle se caractérise par un très faible niveau de sensibilité de l'appareil utilisé qui ne dépasse pas dans le meilleur des cas 0,01 mg/l.

2. **La spectrofluorimétrie** : Cette technique consiste à pulvériser une solution contenant un traceur fluorescent sur un collecteur qui est rincé à l'eau claire et la solution obtenue est analysée à l'aide d'un spectrofluorimètre. Il s'agit de mesurer l'intensité de fluorescence émise par la solution excitée par la lumière.

Cette méthode est largement utilisée par les scientifiques depuis bien longtemps pour la mesure des dépôts provenant de la pulvérisation agricole, (Speelman, 1971 ; Barry, 1978 ; Carlton et Bouse, 1981 ; Whitney et Roth, 1985). Comme pour la spectrocolorimétrie, le traceur et les collecteurs utilisés diffèrent selon que la mesure est faite au sol, sur la plante ou dans l'air. Speelman (1971) a utilisé la spectrofluorimétrie avec des collecteurs sous forme de longues bandes de papier afin de comparer la dynamique de différents pulvérisateurs. De même, Barry (1978) s'est servi de la *Rhodamine B* comme traceur fluorescent sur des feuillages de conifères comme collecteur afin de caractériser le dépôt des gouttelettes. Whitney et Roth (1985) ont également utilisé ce traceur pour comparer l'efficacité de deux types de collecteurs : des bandes de papier et des collecteurs cylindriques en coton. Ils ont alors conclu que les deux collecteurs sont valables pour effectuer des mesures au sol et dans l'air. Plus récemment, Holterman *et al.* (1997a) ont utilisé cette technique avec la Brillant Sulfo Flavine (BSF) comme traceur et des bandes synthétiques comme capteurs au sol pour mesurer la dérive sur champ à partir d'une rampe pour cultures basses. Herbst (2001) ; Herbst et Molnar (2002) ; Gil et Sinfort (2005) ont testé cette même méthode avec des fils PVC ($\phi=2$ mm) et ont montré que ces fils sont très bien adaptés à la mesure des émissions vers l'air. Ils ont ainsi estimé les pertes atmosphériques dans des conditions contrôlées et en plein champ. Caldwell (2006) a utilisé la *Rhodamine WT* pour mesurer la dérive dans les sens horizontal et vertical. Pour cela, il a utilisé deux types de collecteurs : des boîtes de Petri pour mesurer les dépôts au sol et des pailles en plastique ($\phi=0,6$ cm et long=12 cm) placées verticalement pour mesurer la dérive en suspension dans l'air.

Un des avantages de la spectrofluorimétrie est son niveau de sensibilité élevé par rapport à la spectrocolorimétrie. Elle a aussi ses limites, du fait notamment de la dégradation du traceur fluorescent, généralement sensible à la lumière et à la température.

Sundaram et Sundaram (1992) ont étudié la dégradation du traceur fluorescent, *Day-Glo* dans une solution de Chlorure de Méthylène. Ils ont alors observé la dégradation du produit à partir d'une durée de conservation de 24 heures. Cai et Stark (1997) ont comparé les performances de différents traceurs fluorescents dont la BSF. La conclusion de cette étude classe la BSF comme le meilleur traceur, avec un taux de dégradation de 11% après 8 h d'exposition à la lumière et à la chaleur du soleil.

- 3. La Spectrométrie de masse :** Cette technique permet l'identification d'un composé par la séparation dans un champ magnétique et/ou électrique des fragments de la molécule engendrés par une quantité d'énergie constante. Le résultat fournit un spectre de masse de la molécule caractérisant chaque composé analysé. Les valeurs des signaux produits sont déterminées par un étalonnage obtenu par introduction dans le spectromètre de masse d'une substance de référence.

Les traceurs utilisés avec cette méthode sont des métaux comme le zinc, le manganèse, le strontium et le cuivre, (Cross *et al.*, 2001a,b, 2003). En ce qui concerne les collecteurs, aucune particularité n'a été signalée par les scientifiques par rapport aux deux méthodes précédentes. Les trois techniques utilisent pratiquement les mêmes types de collecteurs.

4.1.3 Mesure des dépôts d'une formulation à base de pesticide

La technique utilisée pour la mesure des dépôts provenant de formulations réelles est essentiellement de la chromatographie. Cette technique de séparation des composants chimiques d'un mélange repose sur une différence de comportement de partage des constituants à analyser entre une phase mobile et une phase stationnaire. Son principe est de coupler le transport des molécules à analyser dans un milieu poreux possédant des propriétés de rétention à un procédé de détection et de dosage. Le transport des molécules est effectué par le déplacement d'un fluide porteur, liquide ou gaz. La séparation est obtenue par une phase stationnaire qui retient les molécules. Il est alors possible d'identifier et de doser les composés séparés en se référant à des substances de référence. En fonction des collecteurs mis en œuvre, l'analyse peut consister en un lavage de la surface de collecte afin de recueillir la solution à analyser, mais elle peut aussi consister à effectuer des mesures directes sur des surfaces artificielles ou naturelles. D'une manière générale, une mesure directe est préférable aux techniques de lavage qui ne permettent pas de recueillir la totalité du dépôt des produits.

Comparée aux autres techniques d'analyse chimique, la chromatographie est plus sensible mais elle est coûteuse et plus difficile à mettre en œuvre. Elle est souvent couplée avec la spectrométrie de masse pour étudier des mélanges complexes à l'état de traces (de l'ordre de nanogrammes).

4.2 Suivi du nuage de pesticides

Des technologies *Laser* ont été proposées pour caractériser le transport et la dispersion du nuage des gouttelettes pulvérisées. Cette technique a été utilisée depuis bien longtemps. Zalay *et al.* (1980) ont par exemple utilisé un Vélocimètre Laser Doppler depuis les années 1980 pour suivre un nuage des gouttelettes et évaluer sa dispersion dans l'atmosphère.

Le Laser ne permet pas la mesure de la quantité absolue du volume pulvérisé mais plutôt la mesure de la concentration relative des particules et leur vitesse de déplacement. Elle est rapide, précise et performante mais elle est difficile à mettre en œuvre et surtout très coûteuse.

Le *Lidar* (Light detection and ranging) est une autre technique de plus en plus utilisée pour le suivi du nuage de pesticides. Elle détermine en temps réel la concentration relative des particules en suspension dans l'air permettant d'établir une cartographie précise de la progression des nuages qu'elles forment. Il s'agit d'un appareil de télémétrie qui émet deux à trois impulsions laser par m². L'altitude des particules successives atteintes par le rayon laser est déduite du temps de retour du signal et l'intensité de ce signal donne des indications sur les propriétés du nuage telles que l'épaisseur, la composition et les particules polluantes. L'appareil peut ainsi établir des cartes de risque et fournir à l'opérateur une information en temps réel. L'INERIS a par exemple introduit cette technique depuis 1999 et l'a utilisé pour fournir des profils verticaux de concentration sur de longues distances en ozone (Ramel, 2003).

4.3 Mesure de la densité de végétation

La connaissance de la densité de la végétation est un facteur primordial car il détermine les dépôts sur les plantes et les pertes au sol sous la culture. Un état de l'art détaillé des interactions entre pulvérisation et végétation est fourni dans la partie IV, p.65. Pour décrire l'effet de la densité de la végétation, certains utilisent le **Leaf Area Density**, *LAD*¹. Da Silva *et al.* (2002) et Sinfort (2006) l'ont par exemple utilisé pour caractériser la végétation de la vigne. D'autres se basent sur le **Leaf Area Index**, *LAI* ou indice foliaire².

A titre indicatif, la bibliographie donne les valeurs typiques suivantes de LAI : $LAI_{sol} = 0$; $LAI_{prairie} = 1$ à 4 et $LAI_{foret} = 4$ à 10,

Différentes méthodes ont été rapportées pour mesurer l'indice foliaire :

- **Mesure directe au champ** : les feuilles sont coupées et leur surface est déterminée :
 - soit par pesée à partir du décalque sur papier et pesée des formes découpées (Alem *et al.*, 2002),
 - soit par prise d'image après avoir étalé les feuilles sur une surface plane puis utilisation de la méthode d'analyse d'image. C'est le principe utilisé par les planimètres optiques.

Les méthodes de mesure directe sont simples à mettre en œuvre, non coûteuses mais elles ne sont pas rapides. Il y a aussi des cas où elles ne sont pas réalisables (forêt).

- **Mesure indirecte** : cette méthode consiste à mesurer avec un radiomètre l'énergie lumineuse incidente sous les feuilles et idéalement sur les feuilles. On utilise ensuite le fait que théoriquement, moyennant quelques hypothèses, (Duchemin *et al.*, 2005) on a :

$$I = I_0 \exp^{-0,5 LAI} \quad (4.1)$$

où I et I_0 sont respectivement l'énergie incidente sous et sur les feuilles.

De telles méthodes de mesure sont simples et plus rapides que les méthodes de mesure directe, mais elles ne sont pas précises et leur utilisation exige un matériel spécifique.

1. Rapport de la surface de feuilles au volume de végétation considéré [m^{-1}].
 2. Rapport de la surface de feuilles à la surface du sol [m^2/m^2].

Chapitre 5

Description des protocoles d'essais

La démarche décrite dans la partie 3.3 s'appuie sur trois types d'essais : en soufflerie, au laboratoire et au champ. Les matériels et les méthodes utilisés étant en partie les mêmes, cette section présente dans un premier temps les éléments communs aux différents essais, ensuite sont décrits les détails spécifiques à chacun d'eux.

5.1 Généralités

Les essais en laboratoire ont été conduits dans la soufflerie du Cemagref de Montpellier (cf. section 5.4.2) ainsi que sous une rampe mobile, construite à l'INRGREF, pour des conditions d'humidité plus faibles (cf. section 5.4.3). Les essais de terrain ont été effectués en Tunisie, dans une zone céréalière au Nord du pays (cf. section 5.4.1).

Les buses choisies sont de marque *Albuz* standard (classe API) qui sont très utilisées par l'agriculteur tunisien. Elles sont de type à fente 110° qui est le type le plus recommandé pour le désherbage.

Compte-tenu des particularités des traitements phytosanitaires en Tunisie (cf. section 1.2), p. 4, il a été choisi de conduire les essais de terrain sous des conditions « extrêmes » par rapport au contexte du désherbage des cultures basses par pulvérisation terrestre en Tunisie. Deux configurations ont ainsi été sélectionnées :

- La première, dite **de dérive** et notée **D+**, est caractérisée par des paramètres qui favorisent les dépôts et les émissions vers l'air. Le choix des valeurs de ces paramètres a été fait de façon à couvrir les conditions de dérive les plus difficiles pouvant être rencontrées en désherbant : une buse de petit calibre (02) et une pression élevée (4 bar) pour produire de fines gouttelettes sensibles à la dérive.
- La seconde, dite **de non dérive** et notée **D-**, représente des conditions de moindre sensibilité à la dérive mais qui favorisent les dépôts au sol sous la culture : une combinaison de buse de gros calibre (06) et d'une faible pression (2 bar) pour obtenir de grosses gouttelettes.

Les valeurs des VMD (Volume Median Diameter) obtenues pour ces deux configurations sont de $127 \mu\text{m}$ (VMD correspondant à D+) et $322 \mu\text{m}$ (VMD correspondant à D-).

5.2 Choix du traceur

Globalement, le choix de la méthode de travail adoptée pour mesurer les dépôts des pesticides dans la plupart de nos essais a été fait en se basant sur les résultats des différents travaux présentés dans le chapitre précédent.

Toutefois, certains essais ont nécessité le développement de méthodes et matériels spécifiques.

Pour le cas particulier du traceur, le choix a été fait en se basant essentiellement sur l'expérience déjà acquise en matière d'utilisation des traceurs fluorescents par l'équipe travaillant sur les problèmes de pulvérisation à l'UMR ITAP à Montpellier.

La méthode expérimentale utilisée pour la mesure des dépôts est basée sur le piégeage sur des collecteurs d'une solution aqueuse de BSF ($C_{19}H_{13}N_2O_5SN_a$) diluée à 0,1% et d'un surfactant (Nonylphenoxy polyéthoxyéthanol, « Agral »), dilué aussi à 0,1%. Chaque collecteur est ensuite rincé dans un volume donné d'eau tomponnée et la solution obtenue est analysée par spectrofluométrie. Les longueurs d'onde utilisées pour la détermination de la fluorescence du BSF sont de 500 nm à l'émission et de 455 nm à l'excitation.

5.3 Choix des collecteurs

Pour choisir les collecteurs appropriés, des essais préliminaires ont été mis en œuvre dans la soufflerie du Cemagref de Montpellier.

5.3.1 Collecteur des émissions vers l'air

En se basant sur le travail de Gil (2007), **le collecteur choisi pour piéger les émissions vers l'air s'est porté sur des fils PVC de 2 mm de diamètre** (fig. 5.1-b). L'auteur a montré que l'efficacité de ce fil comme collecteur dans l'air est de l'ordre de 80%.

5.3.2 Collecteur des dépôts au sol

Gil (2007) n'a étudié l'efficacité du fil PVC que pour les émissions atmosphériques. Afin de l'évaluer pour les dépôts au sol, un essai en soufflerie a été mis en place.

La capacité de rétention de ces fils a été testée au niveau du sol sur une distance de 10 m sous le vent par rapport à la dernière buse. Ces essais ont été réalisés pour les deux configurations **D+** et **D-** décrites plus haut (section 5.1) avec une rampe de 3 buses parallèles au flux d'air. Un dispositif a été mis en place pour contrôler précisément la durée de pulvérisation. Celle-ci a été fixée à **5 secondes**. Les résultats ont montré que les fils ne sont pas des collecteurs utilisables pour évaluer les dépôts dans la soufflerie avec cette durée de pulvérisation : au voisinage de la rampe (jusqu'à une distance de 3 mètres), le liquide commence à ruisseler avant la fin des 5 secondes de pulvérisation : le débit des buses est très important et les fils saturent rapidement.

Ceci nous a amené à tester un autre capteur utilisé pour des essais de terrain préliminaires réalisés en Tunisie. Il s'agit d'un tapis rectangulaire en caoutchouc souple (0,2 m × 0,3 m) (fig. 5.1-a).

L'efficacité de ces tapis a été testée par deux méthodes basées sur l'utilisation de la solution aqueuse présentée ci-dessus (cf. section 5.2).

- La première méthode, consiste à pulvériser manuellement un volume connu de la solution sur le tapis. Connaissant la concentration de la solution mère, le volume pulvérisé et le volume d'eau de rinçage, on peut déduire la masse de traceur récupérée et donc l'efficacité du tapis.
- La deuxième est basée sur la comparaison avec des résultats obtenus sur le banc de répartition équipant la soufflerie du Cemagref (cf. figure 5.2).

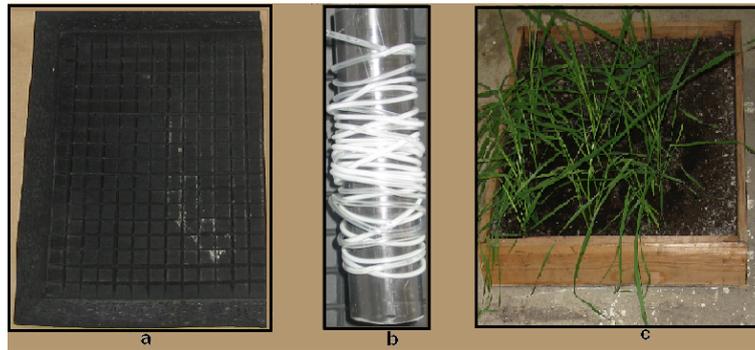


FIGURE 5.1 – Collecteurs sélectionnés pour le piégeage des dépôts au sol, des émissions vers l'air et de la rétention des plantes. (a) Tapis (b) Fil PVC et (c) Bac à blé.

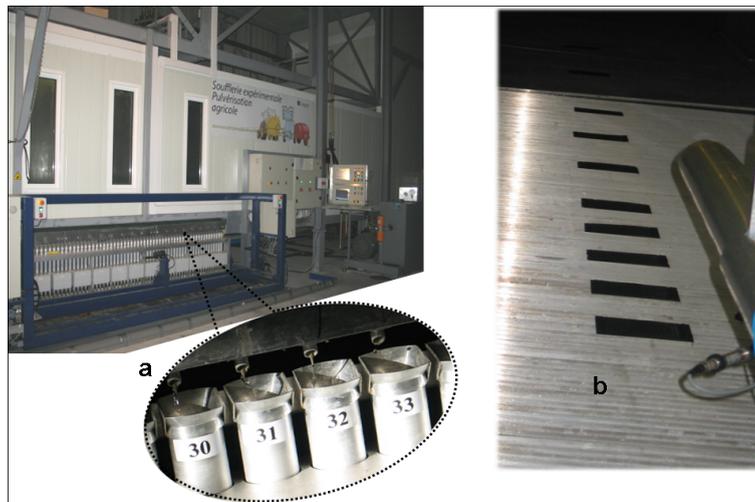


FIGURE 5.2 – Dispositif d'évaluation de l'efficacité des tapis par rapport au banc de répartition de la soufflerie. (a) Banc à gouttières accueillant de l'eau (b) Tapis accueillant la solution de traceur.

Le banc de répartition de la soufflerie est constitué de 60 gouttières d'une section de $2,95 \text{ m} \times 0,05 \text{ m}$ chacune. Les répartitions sur le banc à gouttières et sur les tapis ont été mesurées pour les configurations D+ et D- avec une rampe de 3 buses orientées dans le sens de la veine. La première mesure est située à 1m de l'axe de la dernière buse sous le vent alors que la dernière est à 8 m. Les mesures des dépôts ont été effectuées tout d'abord sur le banc puis sur les tapis. Dans un premier temps, de **l'eau claire** est pulvérisée sur le banc pendant un temps suffisamment long de façon à avoir des flux déportés mesurables dans toutes les éprouvettes du banc à différentes distances de la rampe. Le volume obtenu par éprouvette correspondant à un temps connu et une surface de $2,95 \times 0,05 \text{ m}^2$, on peut déduire les dépôts par unité de temps et par unité de surface. Dans un deuxième temps, **la solution de traceur** est pulvérisée en présence de dix tapis posés à différentes distances de la rampe sur le banc pendant **5 s**. Connaissant la concentration de la solution mère, le volume pulvérisé et le volume d'eau de rinçage, on peut déduire la masse de traceur récupérée et remonter aux volumes de la solution collectés par les tapis par unité de temps et par unité de surface. Tous les essais ont fait l'objet de trois répétitions.

Le graphique 5.3 représente le rapport des flux collectés sur les tapis à ceux recueillis sur le banc à gouttières à 10 mètres pour les deux configurations testées : D+ (VMD127) et D- (VMD322) (pour la méthode de calcul des flux, voir paragraphe 5.3.4). Ce rapport renseigne sur l'efficacité des tapis.

Le graphique montre que l'efficacité des tapis se situe autour d'une moyenne de 80% mais avec une allure décroissante en fonction de la distance des collecteurs. Elle varie de 0,87 à 0,79 pour D+ et de 0,86 à 0,72 pour D-.

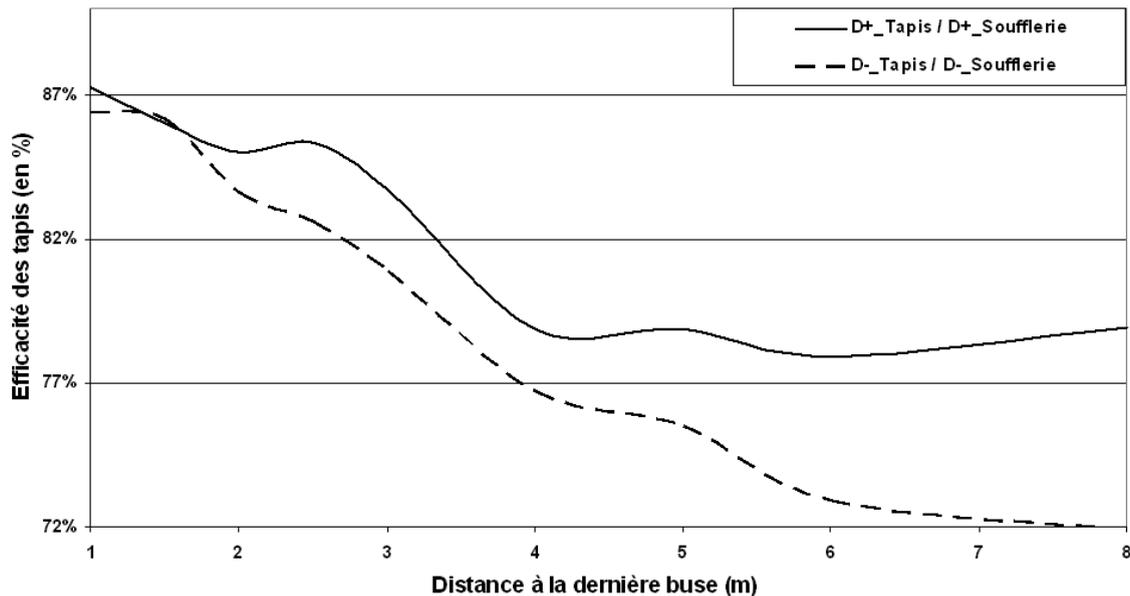


FIGURE 5.3 – Efficacité des tapis sélectionnés par rapport au banc à gouttière de la soufflerie du Cemagref pour les deux configurations D+ et D-.

Ainsi elle dépasse de loin l'efficacité d'autres collecteurs comme par exemple celle des écrans en nylon testées en soufflerie par Fox *et al.* (2004) qui variait entre 50 et 70%. Il faut noter également que ce résultat est comparable à celui obtenu par Gil (2007) dans le cas du fil PVC que nous avons utilisé pour le piégeage des émissions vers l'air. Ceci a l'avantage d'avoir des mesures comparables quand les deux collecteurs sont utilisés en même temps.

L'écart observé entre les deux configurations D+ et D- pourrait s'expliquer par une perte au sol d'une portion des gouttelettes après rebond sur les tapis. En effet, les gouttelettes qui tombent sur le tapis sont majoritairement les plus grosses et donc celles qui ont le plus d'énergie. Cette énergie implique une vitesse élevée qui serait à l'origine du rebond des gouttelettes à leur premier contact avec la surface du tapis. La configuration D- est caractérisée par de grosses gouttelettes, elle est alors la plus touchée par ce phénomène de rebond.

5.3.3 Collecteur des dépôts sur les plantes

Le collecteur à utiliser sur les plantes remplacera les adventices dont les plus traitées en grandes cultures en Tunisie sont des graminées. Pour le choix de ce collecteur, nous avons commencé par tester les papiers hydro-sensibles, qui sont couramment référencés dans la littérature. Au terme de ces tests, il a été conclu que ce collecteur ne convient pas à des configurations correspondant à des VMD élevés : pour les grosses gouttelettes, le problème d'étalement est difficile à corriger même en appliquant les facteurs d'étalement recommandés par certains chercheurs comme Stermer *et al.* (1988). Quand les gouttelettes commencent à ruisseler à la surface du papier hydro-sensible comme dans le cas de D- qui est associé à un VMD de $322 \mu\text{m}$, l'application de ce facteur correcteur n'a aucun sens. L'utilisation de ce collecteur sous la rampe pourrait convenir à des configurations produisant de fines gouttelettes comme notre configuration D+.

Ces observations nous ont conduit à tester des plantes de blé au stade 4 à 5 feuilles, en mesurant directement le traceur sur les feuilles. Pour cela, des plants de blé ont été cultivés hors sol¹ dans des bacs en bois d'une section de 0,50 m×0,25 m (fig. 5.1-c). Selon le laboratoire de Biotechnologie et Physiologie Végétale de l'Institut National des Recherches Agronomiques de Tunis (INRAT), cette variété de blé² a beaucoup de ressemblances avec les adventices graminées. Elle se caractérise par la présence d'une grande quantité de poils à la surface des feuilles et donc par une bonne rugosité. Le risque de ruissellement sous une rampe mobile est à priori faible. En l'absence de ce paramètre rugosité qui est important pour la rétention des gouttelettes, nous avons essayé de faire une appréciation qualitative à travers des photos microscopiques d'une feuille de cette culture, pour caractériser son état de surface (fig. 5.4).

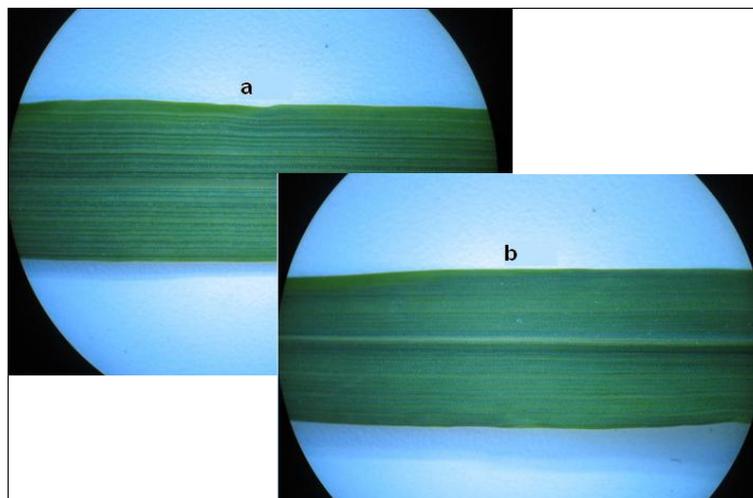


FIGURE 5.4 – Photos microscopiques de l'état de surface d'une feuille de blé "Karim". (a) Face supérieure (b) Face inférieure.

Pour évaluer le potentiel d'extraction du traceur de ces plantes, il a été procédé à un test simple. Les feuilles de six plantes provenant de six bacs différents sont coupées et posées à plat sur du papier blanc. Un petit volume de la solution aqueuse est injecté goutte à goutte par une seringue sur ces feuilles. Après pulvérisation, toutes les plantes d'un bac sont coupées, rincées dans 0,5 l d'eau et la concentration de la solution est obtenue par spectrofluométrie. Le taux d'extraction du traceur fluctuait alors entre 80 et 90% des quantités déposées.

Les essais réalisés nous ont permis de faire le choix de trois collecteurs. Le tableau 5.1 résume les résultats de ces essais.

Pour corriger les résultats obtenus, des facteurs ont été par la suite utilisés dans le calcul des dépôts : 80% pour les fils et les tapis et 85% pour les plantes.

5.3.4 Interprétation des quantités mesurées sur les collecteurs

Le calcul des pertes se fait en considérant que chaque collecteur échantillonne une zone caractérisée par sa distance dans l'axe du vent. Ainsi, si un collecteur de largeur l_e échantillonne une zone de largeur Z_e , alors la masse collectée est extrapolée avec une proportionnalité de l_e/Z_e pour estimer la masse perdue sur la zone échantillonnée. Cette quantité est alors normalisée par la masse de traceur pulvérisée par la rampe pendant le temps de l'essai (t). Cette méthode permettra de calculer le pourcentage de pertes totales, au sol et dans l'air.

1. La culture a été installée dans des bacs, sous des conditions contrôlées dans une chambre de cultures.
2. C'est une variété locale connue sous le nom "Karim".

Objet de l'essai	Collecteurs testés	Collecteur retenu	
		Type	Efficacité
Choix du collecteur des émissions vers l'air	Fil PVC	Fil PVC ϕ 2 mm (Gil, 2007)	80%
Choix du collecteur des dépôts au sol	-Fil PVC -Tapis en caoutchouc	Tapis (20cmx30cm)	80%
Choix du collecteur des dépôts sur les plantes	-Papier hydro-sensible -Plantes de blé	Plantes de blé 4 à 5 feuilles	85%

TABLE 5.1 – Résultats des essais de choix des collecteurs de mesure des pertes de pesticides et de la rétention.

Cependant, près de la rampe, les pertes seront surestimées puisqu'elles ne sont mesurées que là où elles sont maximales.

- **Cas des tapis :**

Si d est la largeur échantillonnée par un tapis :

-**Le pourcentage de traceur déposé au sol** sur la zone échantillonnée est :

$$\%Tr = \frac{d}{b_t} \times \frac{M_t}{n_b \cdot q_b \cdot t \cdot c} \quad (5.1)$$

-**Le flux collecté sur un tapis** est :

$$F_t = \frac{M_t}{a_t \cdot b_t \cdot t} \quad (5.2)$$

a_t : longueur du tapis (dans le sens d'avancement) [m]

b_t : largeur du tapis (dans le sens perpendiculaire à l'avancement) [m]

c : concentration du traceur [g^{-1}]

M_t : masse mesurée sur le tapis [g]

$\%Tr$: pourcentage de traceur collecté

q_b : débit d'une buse [$l \cdot s^{-1}$]

n_b : nombre de buses de la rampe

t : temps de pulvérisation [s]

- **Cas des fils PVC :**

En supposant que chaque fil échantillonne une hauteur H_i , la quantité de traceur perdue sur la hauteur totale échantillonnée est calculée par l'expression :

$$\%Tr = \frac{H_i}{D_f} \times \frac{M_{fi}}{n_b \cdot q_b \cdot t \cdot c} \quad (5.3)$$

D_f : diamètre du fil [m]

M_{fi} : masse de traceur mesurée sur le fil posé à la position " i " [g]

5.3.5 Mesure de la surface foliaire des bacs à blé

En se basant sur les travaux présentés à la section 4.3, le choix de la méthode de mesure de l'indice foliaire de nos bacs à blé s'est porté sur la mesure par planimètre optique.

Le matériel nécessaire est disponible à l'INRGREF, son utilisation ne pose pas de problème et ses résultats sont précis.

Les mesures sont effectuées sur l'ensemble des feuilles de 36 plants au stade 4-5 feuilles provenant de six bacs différents (à raison de six plants par bac) pris au hasard parmi les 34 bacs disponibles. Nous déterminons tout d'abord la surface foliaire moyenne par plant. Puis, compte-tenu du nombre de plants par bac, la surface foliaire totale de chaque bac (S_f) est calculée. Connaissant la surface totale d'un bac (S_b), l'indice foliaire LAI est déterminé par :

$$LAI = S_f/S_b$$

L'indice foliaire moyen par bac de blé est de $0,37 m^2, m^{-2}$. Ce résultat est tout à fait conforme au taux du couvert végétal proposé par Olofsdotter et Streibig (1997) qui est de 20 à 40% pour le blé d'hiver au stade 4 feuilles (cf. annexe I).

5.4 Mesure des dépôts dans les différentes conditions

5.4.1 Essais au champ

La bouillie pulvérisée est constituée de la solution sélectionnée (BSF+Agral) et le dispositif installé permet de faire toutes les mesures pendant un même passage du pulvérisateur (fig. 5.5).

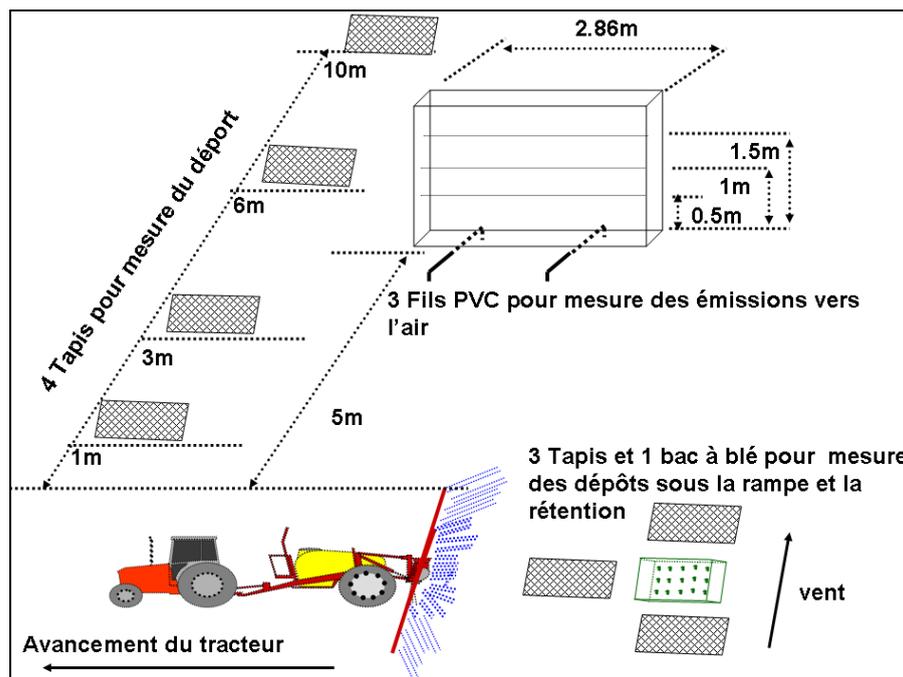


FIGURE 5.5 – Dispositifs de mesure des pertes de pesticides et de la rétention sur les plantes au champ.

Tous les essais de terrain ont été effectués à une vitesse d'avancement de $7 km.h^{-1}$, à l'aide d'un pulvérisateur à jet projeté pour cultures basses équipé de 24 buses réglées à une hauteur par rapport à la cible de 0,5 m par rapport à la cible.

La vitesse du vent, la température et l'humidité relative sont mesurées à chaque passage avec un anémomètre ultrasonique et une sonde hygrométrique placés à proximité de la rampe du pulvérisateur à la hauteur des buses (0,5 m).

Les essais de mesure réalisés sur le terrain se sont déroulés sous des conditions climatiques changeantes. Afin de limiter l'effet de ces variations, ces essais ont fait l'objet de **10 répétitions** d'une durée de 2 minutes par répétition (soit 20 mn pour chaque essai). Les conditions climatiques moyennes associées à **D+** et **D-** sont résumées dans le tableau 5.2.

Configuration	2006		2007	
	D+	D-	D+	D-
Buse	API02	API06	API02	API06
P (bar)	4	2	4	2
VMD (μ m)	127	322	127	322
V vent ($m.s^{-1}$)	4,1	2,1	1,8	4,6
Température ($^{\circ}C$)	32	30	29	24,5
HR (%)	54	55	46	50,5

TABLE 5.2 – VMD et conditions microclimatiques associés aux essais de mesure des dépôts au champ pour 2 campagnes (2006 et 2007).

Pour mesurer les quantités déportées, quatre tapis sont posés sous le vent (suivant le grand axe de la rampe), à des distances de 1, 3, 6 et 10 m de la dernière buse. Concernant les émissions vers l'air, trois fils PVC de 2,85 m de long sont placés horizontalement dans un plan vertical perpendiculaire à la direction du vent à une distance de 5 m de la dernière buse et à des hauteurs respectives de 0,5, 1 et 1,5 m. Les dépôts directs au sol sont mesurés à l'aide de trois tapis placés sous la rampe suivant le sens d'avancement. Un bac à blé au stade 4 à 5 feuilles positionné dans l'axe longitudinal entre les tapis permet d'estimer les fractions retenues par les plantes.

5.4.2 Essais en soufflerie

Trois types de mesures sont réalisés en soufflerie : **les répartitions sur banc** pour caler le modèle DriftL, **les dépôts au sol (sur les tapis)** pour évaluer l'évaporation par comparaison aux dépôts sous la rampe mobile (cf. section 5.4.3) et **les émissions vers l'air**.

– *Essais de mesure des répartitions :*

Les mesures de la répartition sur le banc à gouttières de la soufflerie (fig. 5.2-a) ont été faites avec une rampe de 3 buses perpendiculaire au vent pour 32 configurations. Pour élargir le champ de nos essais, il a été décidé de tester 8 VMD (tableau 5.3) pour deux hauteurs (0,5 et 0,8 m) et deux vitesses de vent (1,1 et 1,9 $m.s^{-1}$). Afin de pouvoir faire des comparaisons avec les résultats de terrain, deux des VMD sélectionnés correspondent respectivement à **D+** et **D-**, quatre sont associés à des **configurations intermédiaires** et deux autres correspondent à un **système antidérive** (buse à injection d'air, classe AVI) qui a été choisi pour comparer le comportement d'une buse classique à celui d'une buse conçue pour limiter la dérive.

Les mesures ont été faites pour une température moyenne de 14 $^{\circ}C$ et des conditions hygrométriques proches de 100%.

Le choix des hauteurs des buses a été fait de manière à pouvoir comparer les résultats d'une configuration de dérive à celle recommandée pour les buses à fente. 0,8m est une hauteur favorisant la dérive tandis que 0,5 m est la hauteur conseillée qui permet une répartition homogène du produit (triple recoupement des jets) et moins de risque de dérive.

– *Mesure des dépôts au sol sur tapis et des émissions vers l'air :*

Ces deux mesures sont effectuées pour **D+** et **D-** avec des vitesses de vent respectives de 6 et 3 $m.s^{-1}$, des températures de 30 et 25 $^{\circ}C$ et une humidité d'environ 100%. Ces trois facteurs sont mesurés à l'aide de sondes placées à l'entrée d'air (tout au début de la veine).

VMD (μm)	Représentation	Buse	Calibre	Pression (bar)
127	D+	API	02	4
144	Intermédiaires	API	02	2
162			03	4
210			03	2
234			06	4
322	D-	API	06	2
438	Système antidérive	AVI	03	4
641			03	2

TABLE 5.3 – VMD testés dans les conditions de laboratoire.

La méthode appliquée (fig. 5.6) est la même que celle utilisée sur le terrain. Les essais ont été effectués pour trois buses parallèles au flux d'air. En effet, même si la norme de mesure de la dérive ne considère que les dépôts latéraux, (AFNOR, 2005), l'observation des traitements sur le terrain montre que les dépôts dus à des vents soufflant dans l'axe de déplacement du tracteur peuvent être encore plus importants car ils se cumulent à l'effet du vent relatif.



FIGURE 5.6 – Dispositif de mesure des émissions vers l'air en soufflerie.

5.4.3 Essais sous la rampe mobile

Ces essais ont pour objectif de mesurer les dépôts au sol sous la rampe et les quantités retenues par les cultures. Pour permettre la comparaison des résultats, les conditions testées sont en grande partie les mêmes que celles de la soufflerie pour la mesure de la répartition : les 8 VMD du tableau 5.3 pour deux hauteurs (0,5 et 0,8 m) et deux vitesses d'avancement (1,1 et 1,9 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Le vent étant supposé nul, les conditions de température (T) et d'humidité (HR) sont mesurées pour chaque configuration testée à l'aide des mêmes sondes utilisées au champ. Les valeurs de T et de HR montrées dans le tableau 5.4 correspondent à la moyenne de 3 répétitions. Les pertes au sol sont mesurées à l'aide d'un seul tapis placé sous la rampe suivant le sens d'avancement. Un bac à blé au stade 4 à 5 feuilles positionné sur le même axe que le tapis permet d'estimer les fractions retenues par les plantes (fig. 5.7).



FIGURE 5.7 – Dispositif de mesure des dépôts au sol et de la rétention des plantes sous la rampe en conditions de laboratoire. (a) Mesure de la rétention (b) Mesure des dépôts au sol.

VMD(μm)	127	144	162	210	234	322	438	641
T. moyenne ($^{\circ}C$)	16	15	12	12	15	13	12	11
HR moyenne (%)	61	67	70	70	55	58	64	67

TABLE 5.4 – Conditions climatiques associées aux essais de mesure sous la rampe mobile.

Pour la réalisation de ces essais, une rampe mobile de pulvérisation a été fabriquée et installée dans le laboratoire de mécanisation agricole de l'INRGREF en Tunisie (fig. 5.8). Le dispositif est constitué d'une rampe montée sur des rails, commandée par un moteur électrique, un variateur de vitesse et deux inverseurs de sens automatiques. Les rails ont une longueur de 6m et sont placés à une hauteur de 1,20 m. Le distributeur de la rampe est alimenté par un appareil doté de toutes les fonctions d'un pulvérisateur à pression de liquide classique. Elle peut accueillir jusqu'à cinq buses avec un écartement réglable et la pression de service est contrôlable à deux endroits différents du circuit : au niveau du distributeur et au niveau de chaque buse. Elle permet de faire varier la pression (de 0,5 à 10 bar), la vitesse d'avancement (de 3 à 10 km.h⁻¹) et la hauteur de la rampe (de 0,1 à 1 m). Les mesures de la vitesse d'avancement peuvent être transférées instantanément à un PC.

Les quantités mesurées sont les dépôts sur le tapis, (D_{st}) et ceux sur les plantes, (D_p). Il a été supposé qu'au cours des essais sous rampe mobile (dans un local fermé), le déport latéral, (D_{sd}) et les émissions vers l'air, D_v sont négligeables. Ainsi, les fractions perdues sont estimées comme suit :

- Pertes au sol :

$$\frac{D_s}{D} = \frac{D_{st} - D_p}{D} \quad (5.4)$$

avec D la dose totale appliquée.

- Volatilisation (évaporation + gouttelettes perdues vers l'air) :

$$\frac{D_v}{D} = 1 - \frac{D_{st}}{D} \quad (5.5)$$



FIGURE 5.8 – Rampe mobile de pulvérisation pour mesurer les dépôts au sol et la rétention sur les plantes en conditions de laboratoire - INRGREF - Tunisie.

5.4.4 Conclusion pour le choix d'une méthodologie

La communauté scientifique utilise différentes méthodes pour quantifier les fractions des pesticides transférés dans l'environnement et celles retenues par les plantes pendant les traitements. La mesure des pertes de pesticides dans l'environnement se fait soit d'une manière directe, soit par des traceurs collectés sur des supports spécifiques et analysés par des méthodes appropriées. Notre choix s'est porté sur l'utilisation d'un traceur fluorescent pour ses performances et sa grande sensibilité.

Pour mesurer la rétention sur les plantes, l'indice foliaire est un facteur principal à considérer. La méthode retenue pour l'estimer est la technique utilisant un planimètre optique : elle est simple d'utilisation, rapide et précise.

La solution aqueuse utilisée est composée d'un traceur (BSF) et d'un surfactant (Agral) dilués à 0,1%. Le protocole a été défini à partir d'essais préliminaires, notamment pour le choix des collecteurs. Trois types de collecteurs ont été sélectionnés : des fils PVC de 2 mm de diamètre pour les émissions dans l'atmosphère, des tapis d'une section de 0,2 m×0,3 m pour les dépôts au sol et des plantes de blé au stade 4 à 5 feuilles installées dans des bacs en bois d'une section de 0,25 m×0,5 m pour les quantités retenues par la végétation. L'efficacité moyenne des tapis et des fils est de 80% alors qu'elle est de 85% pour les feuilles des plantes.

Trois types d'essais ont été réalisés : i. des essais de mesure des dépôts en soufflerie pour le choix du principe et le calage du modèle d'un côté et l'évaluation de l'évaporation de l'autre, ii. des essais sous la rampe mobile pour évaluer les pertes sous la rampe et la rétention sur les plantes et iii. des essais au champ pour la validation des calculs du modèle et des mesures de la rampe mobile. Les protocoles de mesure ont été adaptés pour chacun de ces essais.